

УДК 681.586

**С. А. Филимонов**, к.т.н., доцент,  
**К. В. Базило**, к.т.н., доцент,  
**Ю. Ю. Бондаренко**, к.т.н., доцент,  
**А. В. Батраченко**, к.т.н., доцент,  
**Н. В. Филимонова**, ассистент

Черкасский государственный технологический университет  
ул. Шевченко, 460, Черкассы, 18006, Украина

## СОЗДАНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ, МЕДИЦИНЕ И РОБОТОТЕХНИКЕ

*Статья посвящена проектированию и разработке комплекса для диагностики и исследования пьезоэлектрических изделий, которые нашли широкое применение в области приборостроения, медицины, робототехники. Проблема измерения характеристик и диагностики пьезоэлектрических компонентов заключается в специфике этих компонентов, а именно, в присущих им как электрических, так и механических свойств. В рамках работы используется комплексный подход к измерению электрических и механических параметров пьезоэлектрических элементов и изделий на их основе. Особое внимание в проекте уделяется разработке интеллектуального программного обеспечения, которое позволит быстро и удобно получать, анализировать и корректировать характеристики и параметры исследуемых пьезоэлектрических объектов. По результатам исследований проводится разработка высокоэффективного интеллектуального комплекса, автоматизируется метод оптимизации основных параметров пьезоэлектрических изделий, а также на основе анализа результатов исследований основных компонентов пьезотехники устанавливаются основные критерии проектирования высокоэффективных пьезоэлектрических систем.*

**Ключевые слова:** пьезоэлемент, пьезомотор, исследования пьезоэлементов, программное обеспечение для обработки данных.

### Введение

На сегодняшний день все чаще в промышленности и бытовых устройствах используются пьезокерамические материалы. Пьезоэлемент является важным компонентом в электронных, механических, медицинских устройствах, мехатронике, микро- и нанотехнике и других областях. Например, пьезоэлементы являются основной частью электроакустических преобразователей, которые используются в приборостроении, вычислительной и измерительной технике, охранных системах и устройствах, а также частью гидроакустических преобразователей и антенн для подводных лодок и надводных судов. В медицине на основе пьезоэлементов изготавливают преобразователи для измерителей артериального давления и ультразвуковой диагностики. Пьезоэлементы используют в качестве чувствительных элементов в датчиках давления для испытания оружия и взрывчатых веществ, а также измерения давления в двигателях внутреннего сгорания или пере-

грузок и ускорений в движущихся объектах, например, в ракетах, самолетах, автомобилях и т. д. В сканирующих зондовых микроскопах пьезоэлементы выполняют роль точных позиционирующих устройств, а в робототехнике – безредукторных высокоточных исполнительных механизмов и датчиков [1–7].

Одной из важных задач при разработке указанных выше устройств является измерение электрических и механических характеристик пьезокерамических изделий. Правильно полученные характеристики пьезоэлемента ускорят их производство, а новые преобразователи, разработанные с помощью предложенного комплекса, будут иметь лучшие технические характеристики.

**Целью** настоящей статьи является создание высокоэффективного интеллектуального комплекса, с помощью которого будут разработаны и исследованы высокоэффективные многокомпонентные пьезоэлектрические элементы для приборостроения, медицины, робототехники и др.

**Постановка задачи**

Тематика работы направлена на решение следующих задач:

1. Разработать модули для измерения электрических параметров: амплитудно-частотной, фазочастотной, импульсной и переходной характеристик, а также заряда, мощности, времени отклика, динамической емкости пьезоэлементов, которые являются составными частями высокоэффективного многомодульного комплекса.

2. Разработать модули для измерения механических параметров, которые позволяют определить форму и амплитуду колебаний, массу, пьезомодуль, мощность излучаемого звукового давления, влияние температуры и скорость звука в пьезоэлементе.

3. Разработать программное обеспечение для сбора, обработки, анализа полученных данных с пьезокерамических элементов и управления периферийными устройствами.

4. Разработать новую технологию проектирования изделий пьезоэлектроники с помощью предложенного комплекса.

5. Разработать интерактивный модуль звукового сопровождения, который позволит облегчить взаимодействие пользователя с предложенной системой.

6. Разработать и изготовить конструкцию предложенной системы и исследовать с ее помощью экспериментальные образцы пьезоэлектрических преобразователей.

**Обзор литературы.** Измерение и контроль параметров пьезоэлектрических колебательных систем невозможно без количественной и качественной информации об их параметрах [8]. Получение такой информации возможно только с помощью измерений. В таблице 1 приведена классификация измеряемых параметров пьезоэлемента.

Таблица 1

**Классификация измеряемых параметров пьезоэлементов**

Электрические параметры	Физические параметры (механические)
Электрическая емкость	Температура Кюри
Индуктивность	Скорость звука
Активное электрическое сопротивление	Механическая добротность
Относительная диэлектрическая проницаемость	Амплитуда колебаний
Резонансная и антирезонансная частота	Форма колебаний
Электрическая прочность	Механическая деполяризация
Электрическая деполяризация	Термальная деполяризация
Коэффициент электромеханической связи	Плотность
Тангенс угла диэлектрических потерь	Модуль Юнга

Как видно из таблицы измеряемые параметры можно разделить на электрические и условно физические (механические).

В процессе анализа измеряемых параметров были определены методы измерения параметров пьезоизделий, которые представлены в таблице 2.

Таблица 2

**Классификация методов измерения параметров пьезоэлементов**

Электрические параметры	Физические параметры
Фазовый и амплитудный метод измерения резонансной и антирезонансной частоты колебаний	Определение формы колебаний с помощью Хладни фигур
Квазистатический метод измерения сопротивления	Дифракционный метод измерения микроперемещений
Метод схем замещения измерения сопротивления	Метод оптической регистрации акустических колебаний пьезоэлементов
Метод последовательного резонанса для измерения ёмкости и индуктивности	Определение виброакустических характеристик методом лазерно-компьютерной интерферометрии
Метод затухания свободных колебаний для измерения ёмкости, индуктивности и сопротивления	Использование специализированных датчиков для определения микроперемещений

Специфичность и малая распространенность технологических аппаратов обусловили отсутствие специализированного измерительного оборудования, поэтому возникла необходимость в разработке новых методов измерения и группирование старых в единый комплекс для анализа электрических и механических параметров пьезокерамического изделия. Для разработки нового комплекса по определению параметров пьезокерамических изделий проведен поиск аналогов, который представлен ниже.

*Дифракционный метод для измерения микроперемещений.* При применении дифракционного метода для измерения микроперемещений обычно используют метод теневой проекции, который заключается в регистрации координаты перепада свет-тень с помощью многоэлементного фотоприемника. В этом случае изменение положения перепада свет-тень линейно связано с изменением длины образца. Недостатком данного метода является низкая чувствительность к перемещению и необходимость калибрования регистратора изображения [9].

*Измерительный преобразователь.* К преимуществам созданных измерительных преобразователей следует отнести возможность прямого превращения амплитуды в электрический сигнал и малую площадь контакта с излучающей поверхностью, что позволяет исследовать распределение колебаний на ней.

*Стробоскопический бесконтактный метод контроля.* Способ стробоскопического бесконтактного контроля колебаний излучающей поверхности колебательной системы основан на использовании двухцветного источника излучения, который позволяет повысить точность и автоматизировать процесс измерений. Метод основан на регистрации изображения, которое перекрывается колеблющейся поверхностью. Недостатком данного метода является невозможность перенастройки под другие образцы пьезокерамики.

*Программно-аппаратный комплекс FREGRAF для исследования и контроля параметров пьезопреобразователей и пьезоэлементов.* Комплекс состоит из компьютера и автономного блока, функционирование которых обусловлено специально разработанным пакетом программ [10].

Программное обеспечение комплекса создано с использованием объектно-

ориентированного подхода. Основная работа ведется в отдельном потоке, что позволяет избежать замедления работы интерфейса. Есть возможность подключения плагинов.

Недостатком данного комплекса является его относительно малая функциональность, заключающаяся в том, что с его помощью возможно определение только электрических характеристик.

*Автомат для измерения параметров и паспортизации пьезоэлементов, преобразователей, и устройств пьезотехники «Пьезо-1».* Автомат предназначен для использования в качестве универсального рабочего измерительного средства при измерении параметров и паспортизации пьезокерамики, пьезоэлементов, преобразователей и других устройств пьезотехники.

Измерения параметров проводятся податчей на исследуемый образец переменного электрического напряжения в области резонанса. Основное преимущество автомата – высокая производительность определения широкого спектра параметров контролируемых изделий при обеспечении всех метрологических требований стандартов, которые действуют, и автоматической паспортизации измеряемых устройств.

*Тестеры пьезомодуля.* Приборы предназначены для определения пьезомодуля пьезоэлемента [11].

В своих трудах Земляков В. Л., Ключников С. Н. [12] значительное внимание уделяют определению электрических характеристик пьезокерамических элементов, таких как модуль проводимости, добротность и пьезомодуль. Однако, полученные данные не полностью характеризует пьезокерамическое устройство. Эти методики могут быть применены для упрощенной проверки бракованных элементов в промышленных условиях. В частности, примером этого является методика контроля электрических параметров, описанная в работе Бодриковой Т. А. [13]. Определение некоторых механических параметров, например, исследование колебаний и микроструктуры пьезоэлемента описаны в работах Pavel Psota, Yibo Li, Seonghoon Kim и Галияровой Н. М. [14–17]. Однако, для разработки, например, ультразвукового дальномера или пьезоэлектрических моторов этих параметров недостаточно. Кроме этого, в приведённых работах не рассматривается взаимосвязь пьезо-

зокерамического изделия с электронными компонентами.

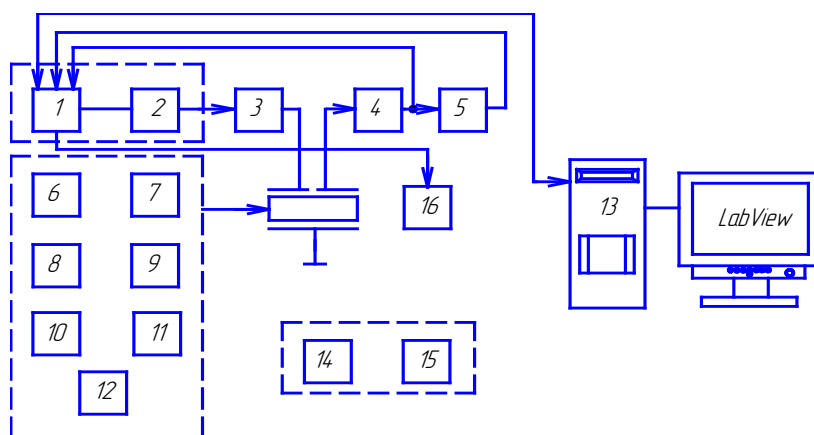
Таким образом, представленные в данном обзоре устройства для исследования пьезоэлементов определяют либо только электрические, либо только механические характеристики, что в большинстве случаев бывает недостаточно.

### Материалы и методы

В рамках работы предлагается новая методика исследования пьезоэлектрических элементов (изделий) для приборостроения, медицины, робототехники и др. На сегодня основные методы исследования пьезоэлементов узкоспециализированные. То есть при изготовлении изделий определенного класса

используются системы узкого назначения. В свою очередь изменение типа изделия требует использования другого типа оборудования. Свидетельством этого, например, является производство электроакустических преобразователей, в которых при изготовлении необходимо контролировать резонансную частоту, ток и диаграмму направленности, что требует применения нескольких измерительных приборов. Поэтому, отличие предложенной методики исследования заключается в комплексном подходе к контролю электрических и механических параметров пьезоэлектрических элементов.

Функциональная схема разработанного устройства состоит из модулей (рис. 1).



**Рис. 1. Функциональная схема устройства для исследования ПЭ:**

- 1 – микроконтроллерный блок; 2 – генератор; 3 – усилитель мощности; 4 – пиковый детектор; 5 – фазовый детектор; 6 – модуль для воздействия внешней силой на ПЭ; 7 – модуль для определения формы колебания ПЭ; 8 – модуль для определения амплитуды колебаний ПЭ; 9 – модуль для определения массы ПЭ; 10 – модуль для определения звукового давления излучающим ПЭ; 11 – модуль для определения вибрации; 12 – модуль для определения влияния температуры на свойства ПЭ; 13 – компьютер; 14 – звуковое сопровождение; 15 – сенсорная панель; 16 – модуль памяти

Основным узлом для сбора, обработки и управления всеми процессами в разработанном комплексе является микроконтроллерный блок. В данном блоке использован микроконтроллер фирмы Microchip (PIC18F4550). Основным преимуществом микроконтроллера PIC18F4550 является многофункциональность, большое количество встроенных каналов АЦП, большой объем памяти, аппаратная реализация протокола USB, а также низкое энергопотребление, основанное на разных программных опциях и фирменной технологии nanoWatt.

В модуле для измерения электрических характеристик пьезоэлемента основным элементом является микросхема-синтезатор (AD9833), которая используется в качестве широкополосного генератора сигналов. Она позволяет формировать нужную форму (синусоидальную, прямоугольную и треугольную) и частоту (0–5 МГц) сигнала с шагом 0,1 Гц. На рис. 2 показана принципиальная схема и формы выходного сигнала генератора на частоте 70 кГц, которая соответствует рабочей частоте пьезоэлектрического мотора РМ-20R.

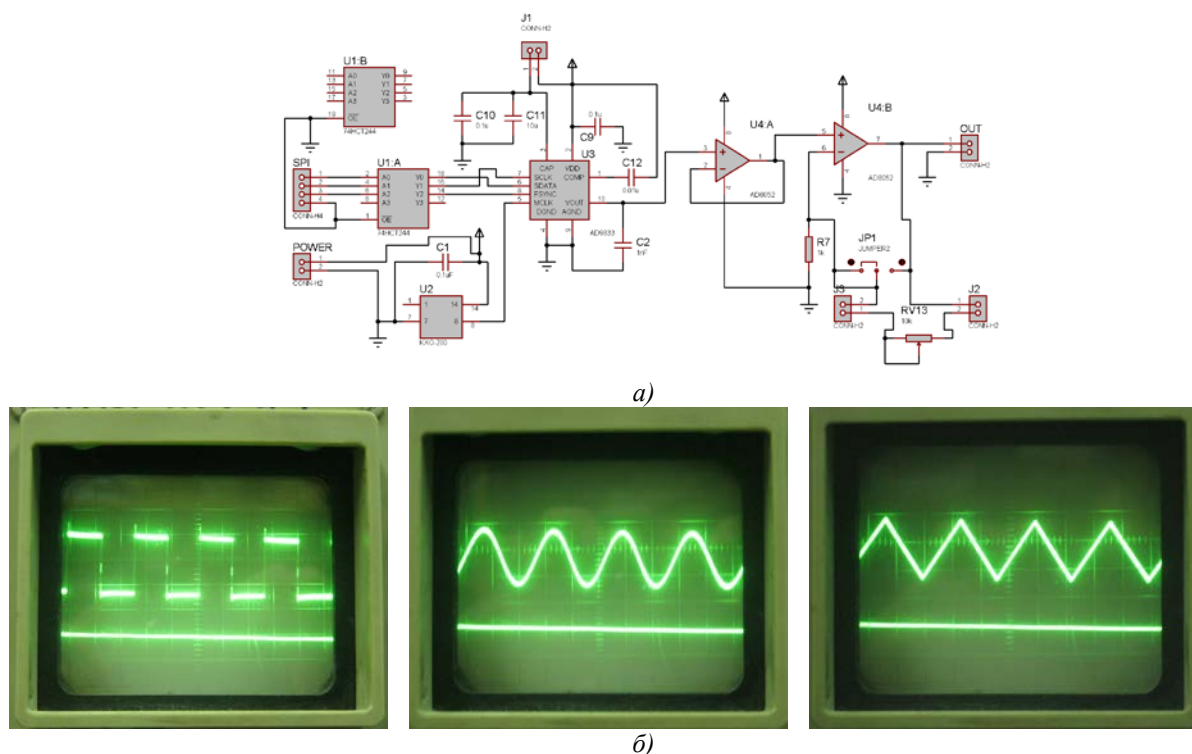


Рис. 2. Модуль генератора сигналов: а) принципиальная схема;  
б) форма выходных сигналов на частоте 70 кГц

Для увеличения мощности выходного сигнала генератора было исследовано два варианта выходных каскадов. Первый выходной каскад основан на полумостовой схеме MOSFET транзисторов, которые управляются специализированным драйвером IR2101 (рис. 3а). Второй вариант основан на выход-

ном повышающем высокочастотном трансформаторе (рис. 3б). В практическом исполнении было реализовано по два каскада каждого из вариантов на одной печатной плате (рис. 3в). Это необходимо для настройки и исследования пьезоэлектрических моторов на основе бегущей волны.

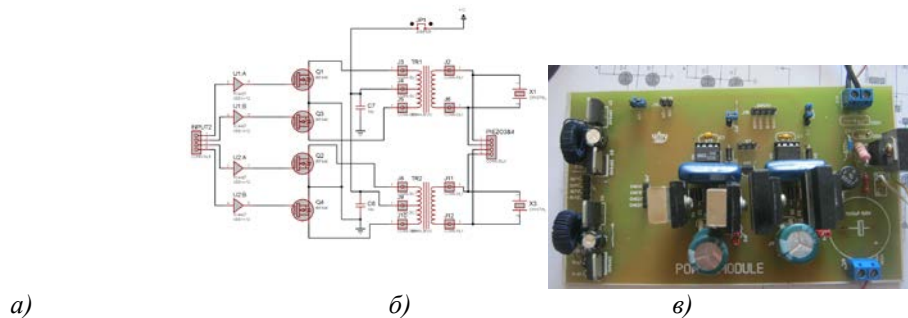


Рис. 3. Модуль усилителя мощности: а) принципиальная схема полумостового выходного каскада;  
б) принципиальная схема выходного каскада на основе повышающего высокочастотного трансформатора

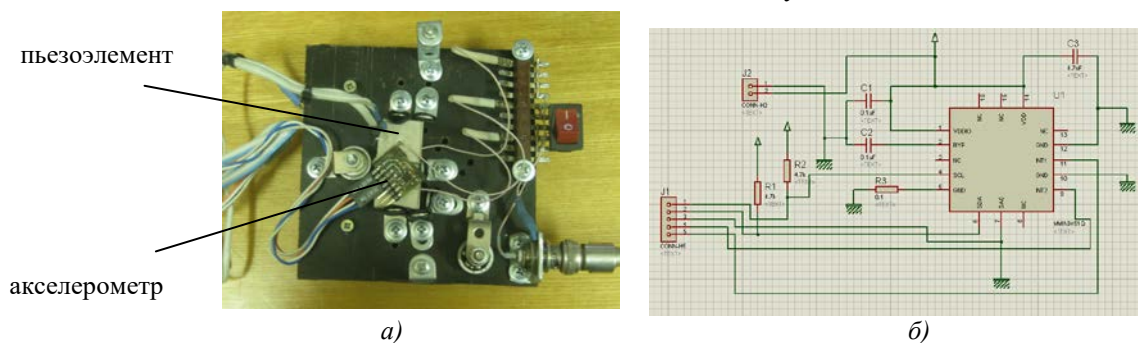
Таким образом, используя генератор с усилителем мощности и встроенный АЦП микроконтроллера можно измерять амплитудно-частотную, фазочастотную, импульсную, переходную характеристики, а также активное сопротивление ПЭ, динамическую емкость и индуктивность.

Для измерения механических характеристик ПЭ используются дополнительные модули, которые расположены в устройстве. Эти модули позволяют определить форму и амплитуду колебания, массу, пьезомодуль, мощность излучаемого звукового давления, влияние температуры и скорость звука, а также нагрев в пьезоэлементе.

Модуль для определения силы включает ударный механизм, который влияет на ПЭ с заданной силой. В основе модуля измерения амплитуды колебаний лежит емкостной датчик. Измерительным устройством модуля для определения звукового давления ПЭ является электретный микрофон. Кроме того, разработанное устройство позволяет передавать из-

меренные данные на компьютер для последующей обработки.

Модуль для определения вибрации (ускорения) основан на акселерометре MMA8451Q. Этот модуль может быть использован и для определения формы колебаний пьезоэлемента (рис. 4). Модуль закрепляется или на ПЭ, или на основании, где располагается исследуемый объект.

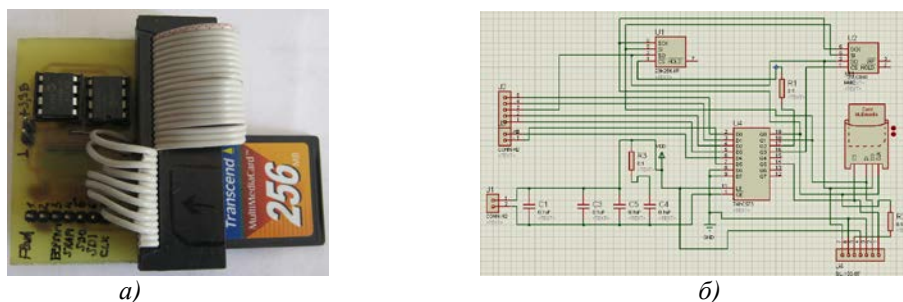


**Рис. 4. Модуль для определения вибрации (ускорения):**

а) экспериментальный образец; б) принципиальная схема

На рис. 5 представлен модуль памяти, который состоит из микросхем ОЗУ, EEPROM и MMC карты. Этот модуль предна-

значен для буферизации измеренной информации, а также для хранения констант и эталонных значений.

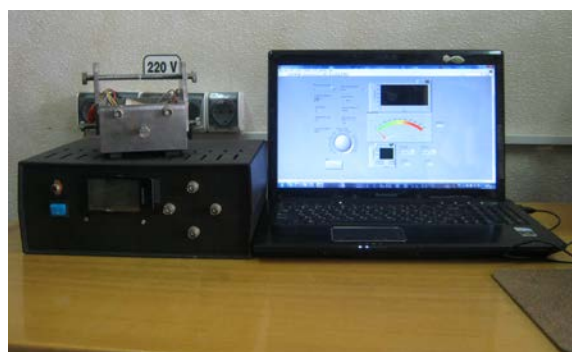


**Рис. 5. Модуль памяти:** а) экспериментальный образец; б) принципиальная схема

Разработанный комплекс может работать в ручном режиме или под управлением компьютера. Связь между компьютером и разработанным комплексом осуществляется согласно протоколу USB. Программное обеспечение комплекса основано на пакете программ Labview.

Программирование в Labview осуществляется на уровне функциональных блок-диаграмм. Объединение графического языка программирования и современного компилятора позволяет значительно сократить время разработки сложных систем при сохранении высокой скорости выполнения программ. Labview, как графическая система программирования на уровне функциональных блок-диаграмм, позволяет графически объединять

программные модули в виртуальные инструменты (Virtual Instruments – VI).



**Рис. 6. Высокоэффективный интеллектуальный комплекс для разработки и исследования пьезоэлектрических компонентов в приборостроении, медицине и робототехнике**

Разработанное программное обеспечение расширяет функциональные возможности предложенного комплекса. Оно позволяет использовать комплекс в качестве генератора качающейся частоты (путем изменения начальной и конечной частоты, а также формы сигнала), а также контролировать перемещение пьезоактуатора, выводить в графиках сигналы, измеренные акселерометром, термодатчиком и т.д.



а)

Общий вид разработанного интеллектуального технологического комплекса для исследования пьезокерамических изделий представлен на рис. 6.

### Эксперименты

При помощи разработанного комплекса были проведены исследования пьезодвигателей. На рис. 7 показаны экспериментальные образцы пьезодвигателей, один из заводской, а второй – разработанный коллективом авторов пьезоактуатор.



б)

**Рис. 7. Исследуемые образцы:**

а) пьезомотор PM-20R; б) разработанный пьезоэлектрический актуатор

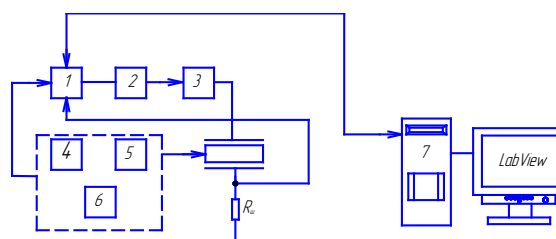
Разрабатываемый комплекс позволяет использовать множество схем измерения пьезокерамических изделий. Приведем одну из них.

Для определения подходящей формы колебаний в разрабатываемом пьезоэлектрическом актуаторе можно воспользоваться двумя методами: на основе фигур Хладни и при помощи акселерометра.

Схема измерения представлена на рис. 8. Обязательным элементом в схеме измерения является контроль тока, поскольку этим параметром определяется резонансная частота пьезомотора, вторым элементом измерения является контроль температуры.

Данная схема также используется для настройки пьезоэлектрического мотора на рабочую резонансную частоту, с учетом его тепловых характеристик. Принцип работы заключается в следующем. Управляющая программа с компьютера по протоколу USB передает данные в микроконтроллер. Данные содержат значения частоты, форму сигнала, сдвиг фазы, выбор канала, а также запуск измерения температуры и тока. В свою очередь микроконтроллер по протоколу SPI передает значения частоты синтезатору (генератору), который формирует нужный сигнал (рис. 2б). Определение нужной формы сигнала осуществляется при помощи метода фигур Хлад-

ни, а также экспериментального метода, основанного на акселерометре. Контроль тока осуществляется при помощи шунта  $R_{ш}$ . Датчик температуры располагается в непосредственной близости от исследуемого образца.



**Рис. 8. Общая измерительная схема экспериментов для определения подходящей формы колебания пьезокерамического актуатора, а также его нагрева и потребления тока:**

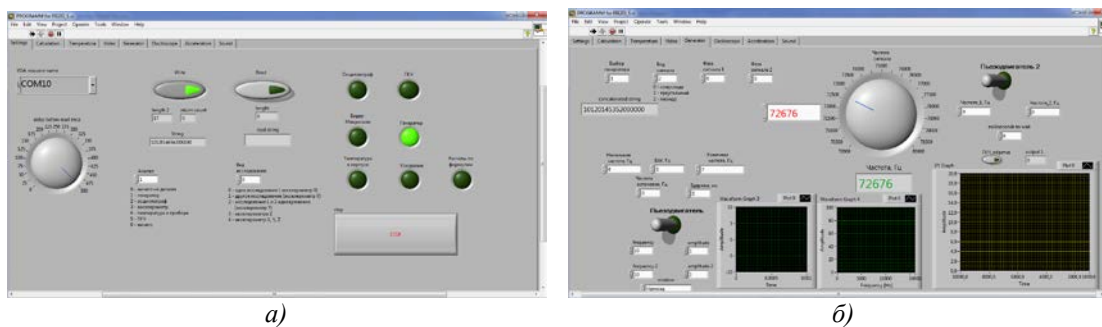
1 – микроконтроллер; 2 – генератор;  
3 – усилитель мощности; 4 – датчик температуры;  
5 – акселерометр; 6 – видеокамера; 7 – компьютер

Кроме представленных выше образцов были проведены исследования и с другими изделиями из пьезокерамики.

### Результаты

Далее приведены результаты, полученные на основе представленного выше метода.

На рис. 9 представлено рабочее окно управляющей программы.



а) б)  
**Рис. 9. Рабочее окно управляющей программы:**

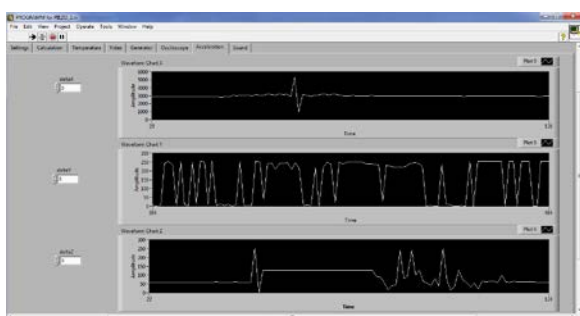
а) окно настроек и выбора режима; б) окно настроек генератора

Распределение колебаний по поверхности одного из актуаторов оценивалось методом фигур Хладни. В случае стоячих волн на резонансных частотах контрастный по цвету порошок распределялся со стороны металлической пластины в узлах колебаний и, таким образом, выявлял их. На рис. 10 представлены экспериментально полученные фигуры Хладни разрабатываемого пьезоэлектрического актуатора.



**Рис. 10. Определение формы колебания пьезоэлемента при помощи фигур Хладни**

На рис. 11 представлены графики зависимости измерения вибрации при помощи разработанного комплекса.

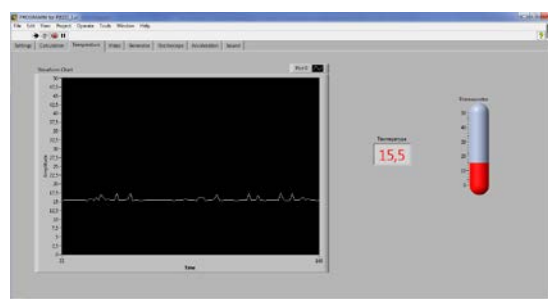


**Рис. 11. Графики зависимости измерения вибрации**

Изменение температуры исследуемого образца фиксировалось при помощи цифрового датчика DS18B20. Полученные данные представлены на рис. 12.

Таким образом, предложенный высокоэффективный интеллектуальный комплекс для разработки и исследования пьезоэлектри-

ческих компонентов в приборостроении, медицине и робототехнике, используя комплексный подход к определению характеристик пьезоэлектрических изделий, дает общую оценку исследуемых образцов.



**Рис. 12. Измерение температуры при помощи разработанного комплекса**

**Обсуждение**

По мнению авторов, подход к проблеме создания пьезоэлектрических компонентов должен быть комплексным, поскольку спецификой этих компонентов является дуализм физической природы пьезоэлектрических материалов и компонентов на их основе. То есть пьезоэлектрическим компонентам свойственны как электрические, так и механические свойства. Новизной работы является комплексный подход к измерению электрических и механических параметров пьезоэлектрических элементов (изделий), в частности, формы и амплитуды колебаний, массы, пьезомодулей, мощности излучаемого звукового давления, влияния температуры и скорости звука, амплитудно-частотной, фазочастотной, импульсной и переходной характеристик, а также заряда, времени отклика, динамической емкости пьезоэлементов. Особое внимание уделяется разработке интеллектуального программного обеспечения, позволяющего быстро и удобно получать, анализировать и кор-



ректировать характеристики и параметры исследуемых пьезоэлектрических объектов.

#### Выводы

Снижение рабочей частоты колебаний, повышение уровня звукового давления и расширение полосы пропускания, которые являются основными параметрами пьезоэлектрических компонентов и характеризуют их эффективность, чувствительность, дальность обнаружения объектов, можно обеспечить за счет разработанных авторами методов дополнительных электрических, электромеханических и акустических систем. Автоматизация данного процесса позволит ускорить и наладить технологию проектирования высокоэффективных пьезоэлектрических систем.

С практической точки зрения результаты будут полезными, поскольку расширят возможности проектирования пьезоэлектрических компонентов и систем, предназначенных для приборостроения, медицины и робототехники.

Таким образом, разработан высокоэффективный интеллектуальный комплекс для разработки и исследования пьезоэлектрических компонентов в приборостроении, медицине и робототехнике. В перспективе возможно дальнейшее усовершенствование модулей и методик измерения, используемых в данном комплексе, а также разработка новых модулей и методик для последующего расширения возможностей разрабатываемого комплекса.

#### Благодарности

Авторы выражают признательность за научную консультацию и техническую помощь д.т.н., профессору Петренко Сергею Федоровичу, директору ТОВ «Лилея» (<http://piezomotor.com.ua/>).

#### Список літератури

1. Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Шаропова Е. В. Пьезокерамические преобразователи физических величин: монография. М.: Техносфера, 2006. 632 с.
2. Смирнов А. Б. Мехатроника и робототехника. Системы микроперемещений с пьезоэлектрическими приводами: учеб. пособ. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003.
3. Бобцов А. А., Бойков В. И., Быстров С. В., Григорьев В. В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. СПб.: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2011. 131 с.
4. Панич А. Е., Жуков С. Н. Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. 4: Пьезоэлектрические актуаторы. Ростов-на-Дону: Издательство ЦВВР, 2008. 159 с.
5. Physik Instrumente (PI) URL: <http://www.physikinstrumente.com/>
6. Петренко С. Ф. Пьезоэлектрический двигатель в приборостроении. К.: Корнійчук, 2002. 96 с.
7. Tichy Jan, Erhart Jiry, Kittinger Erwin, Privratska Jana. Fundamentals of Piezoelectric Sensorics. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer, 2010.
8. Sharapov V. Piezoceramic sensors. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer, 2011. 498 p.
9. Журавлёв О. А., Шапошников Ю. Н., Щеглов Ю. Д. Электронный корреляционный спекл-интерферометр. Тезисы докладов VI учебно-методической конференции стран Содружества. М., 2000.
10. Программно-аппаратный комплекс Fregraf для исследования и контроля параметров пьезопреобразователей и пьезоэлементов. URL: <http://fvt.sfedu.ru/ksoftware/KFreGraf2/Article1.html/>
11. Пьезоэлектрическая керамика: принципы и применение / пер. с англ. С. Н. Жукова Мн. ООО «ФУА информ», 2003. 112 с.
12. Земляков В. Л., Ключников С. Н. Упрощенное определение параметров пьезоматериалов на образцах элементов в форме диска. *Инженерный вестник Дона*. 2012. № 3. С. 483–490.
13. Бодрикова Т. А., Ключников С. Н. Исследование быстродействия методов определения параметров пьезокерамических элементов. *Инженерный вестник Дона*. 2013. Т. 24. № 1.
14. Pavel Psota, Vaclav Kopecky, Vit Ledl, Roman Doleček. Digital Holographic Method for Piezoelectric Transformers Vibration Analysis. *EPJ Web of Conferences*. 2013/48, 00021. P. 1–6.

15. Yibo Li, Zhaohui Liu, Yanmei Liu. Hysteresis Modeling of Piezoelectric Actuators and Feed – Forward Compensation Algorithm Research. *International Journal of Control and Automation*. 2015. Vol. 8. No. 12. P. 331–340.
16. Seonghoon Kim, Junan Shen Piezoelectric-Based Energy Harvesting Technology for Roadway Sustainability. *International Journal of Applied Science and Technology*. 2015. Vol. 5. No. 1. P. 20–25.
17. Галиярова Н. М., Стреляева А. Б. Микро-структура пьезокерамики на основе титаната-цирконата. *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. 2012. № 2 (18). С. 114–119.
9. Zhuravlyov, O. A., Shaposhnikov, Yu. N., Shheglov, Yu. D. (2000) E'lektronny'j korrelyacionny'j spekl-interferometr. *Tezisy' dokladov VI uchebno-metodicheskoy konferencii stran Sodruzhestva*.
10. Programmno-aparatnij kompleks Fregraf dlya issledovaniya i kontrolya parametrov p'ezo-preobrazovatelej i p'ezozoelementov. URL: <http://fvt.sfedu.ru/ksoftware/KFreGraf2Article1.html/>
11. P'ezoe'lektricheskaya keramika: principy i primeneniye (2003) / per. s angl. S. N. Zhukova. Mn. ООО “FUA inform”, 112 p.
12. Zemlyakov, V. L., Klyuchnikov, S. N. (2012) Uproshhennoe opredeleniye parametrov p'ezomaterialov na obrazczax e'lementov v forme diska. *Inzhenerny'j vestnik Dona*, № 3, pp. 483–490.

### References

1. Sharapov, V. M., Musienko, M. P., Sharapova, E. V. (2006) P'ezokeramicheskie preobrazovateli fizicheskix velichin: monografiya. M.: Texnosfera, 632 p.
2. Smirnov, A. B. (2003) Mexatronika i robototexnika. Sistemy' mikroperemeshhenij s p'ezoe'lektricheskimi privodami: ucheb. posob. SPb.: Izd-vo SPbGPU.
3. Bobczov, A. A., Bojkov, V. I., By'strov, S. V., Grigor'ev, V. V. (2011) Iсполnitel'ny'e ustrojstva i sistemy' dlya mikroperemeshhenij. SPb.: Izd-vo SPbGU ITMO, 131 p.
4. Panich, A. E., Zhukov, S. N. (2008) P'ezoe'lektricheskoe priborostroenie. T. 4: P'ezoe'lektricheskije aktuatory'. Rostov-na-Donu: Izdatel'stvo CzVVR, 159 p.
5. Physik Instrumente (PI). URL: <http://www.physikinstrumente.com/>.
6. Petrenko, S. F. (2002) P'ezoe'lektricheskij dvigatel' v priborostroenii. K.: Korniiichuk, 96 p.
7. Tichy, Jan, Erhart, Jiry, Kittinger, Erwin, Privratska, Jana (2010) Fundamentals of Piezoelectric Sensorics. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer.
8. Sharapov, V. (2011) Piezoceramic sensors. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer, 498 p.
13. Bodrikova, T. A., Klyuchnikov, S. N. (2013) Issledovanie by'strodejstviya metodov opredeleniya parametrov p'ezokeramicheskix e'lementov. *Inzhenerny'j vestnik Dona*, vol. 24, № 1.
14. Psota, Pavel, Kopecky, Vaclav, Vit, Ledl, Doleček, Roman (2013) Digital Holographic Method for Piezoelectric Transformers Vibration Analysis. *EPJ Web of Conferences*. 2013/ 48, 00021, pp. 1–6.
15. Yibo, Li, Zhaohui, Liu, Yanmei, Liu (2015) Hysteresis Modeling of Piezoelectric Actuators and Feed – Forward Compensation Algorithm Research. *International Journal of Control and Automation*, vol. 8, No. 12, pp. 331–340.
16. Seonghoon, Kim, Shen, Junan (2015) Piezoelectric-Based Energy Harvesting Technology for Roadway Sustainability. *International Journal of Applied Science and Technology*, vol. 5, No. 1, pp. 20–25.
17. Galiyarova, N. M., Strelyaeva, A. B. (2012) Mikrostruktura p'ezokeramiki na osnove titanata-cirkonata svincza. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vy'sokie texnologii*, № 2 (18), pp. 114–119.

**S. A. Filimonov**, *Ph. D. (Eng.), Assoc. Prof.*,  
**C. V. Bazilo**, *Ph. D. (Eng.), Assoc. Prof.*,  
**Yu. Yu. Bondarenko**, *Ph. D. (Eng.), Assoc. Prof.*,  
**A. V. Batrachenko**, *Ph. D. (Eng.), Assoc. Prof.*,  
**N. V. Filimonova**, *assistant*  
Cherkasy State Technological University  
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

**CREATING HIGH-EFFICIENT INTELLECTUAL COMPLEX FOR DEVELOPING  
AND RESEARCHING PIEZOELECTRIC COMPONENTS IN INSTRUMENT MAKING,  
MEDICINE AND ROBOTICS**

*The designing and development of a complex for diagnostics and research of piezoelectric products, which have found wide application in the field of instrument making, medicine, robotics, are conducted in the work. The problem of characteristics measurement and diagnostics of piezoelectric components is the specificity of these components, namely in their inherent electrical and mechanical properties. Within the framework of the work, an integrated approach to measuring electrical and mechanical parameters of piezoelectric elements and products based on them is used. The project pays special attention to the development of intelligent software that will quickly and conveniently receive, analyze and correct the characteristics and parameters of the piezoelectric objects under study. Based on the research results, a highly effective intelligent complex is being developed, the method for the basic parameters of piezoelectric products optimization is automated, and the main criteria for high-efficiency piezoelectric systems designing on the basis of analysis of the results of research of the main components of piezoelectric equipment are established.*

**Keywords:** *Piezoelectric element, piezomotor, piezoelement research, data processing software.*

*Рецензенти: В. М. Рудницький, д.т.н., професор,  
В. І. Гордієнко, д.т.н.*