

УДК 004.942:621.314

А.М. Салагор, к.т.н., м.н.с., Е.Г. Трофименко, к.т.н., доцент, Л.Н. Буката, доцент

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ПОЛИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОНОМОРФНЫХ ДАТЧИКОВ

В работе исследованы зависимости основных характеристик пьезокерамики от соотношений геометрических параметров пьезоэлементов в форме бруска. Исследована схематическая модель мономорфного пьезокерамического преобразователя для измерения двух физических величин, проведены экспериментальные исследования. В результате анализа было установлено оптимальное соотношение геометрических параметров пьезоэлемента в виде бруска.

Ключевые слова: пьезоэлектрический преобразователь, пьезоэлемент, коэффициент электромеханической связи, относительная диэлектрическая проницаемость, пьезомодуль.

Вступление. Широко распространенным на практике является использование пьезокерамических датчиков для измерения различных физических величин. В качестве примеров можно привести различные датчики: давления, ускорения (акселерометры), детонации, разрушения и т. п. Кроме того, присущий пьезоэлектрическим преобразователям пьезоэффект позволяет использовать их для согласования механических систем с электронными системами контроля и управления, что сложно переоценить в условиях массового распространения компьютерной техники. Для измерения одной физической величины (силы, давления, ускорения, угловой скорости, деформации, влажности, температуры и т.д.) на практике подразумевается использование одного пьезоэлектрического преобразователя, выполненного с использованием одного мономорфного пьезоэлемента (ПЭ).

Форма мономорфных ПЭ играет важное значение и может быть различной: в виде прямоугольных параллелепипедов (пластин, стержней, брусков), тел вращения (диски, кольца, шайбы, сферы, сплошные и полые цилиндры), специальных форм (трапецидальных, треугольных и др.) [1].

Как показывают исследования [2], наилучшими характеристиками обладает ПЭ в виде бруска, поскольку такая форма дает возможность выделить две различные формы сигнала, в результате чего появляется возможность измерения двух физических величин одним чувствительным мономорфным ПЭ [3]. Во-первых, конструкция пьезокерамических преобразователей с одним чувствительным элементом, измеряющих сразу несколько физических величин, позволяет использовать их в местах с ограниченным пространством, например: при исследовании целостности строительных конструкций в реперных точках, в медицине при эндопротезировании суставов, в авиации при испытаниях беспилотников, в сканирующих зондовых наномикроскопах и во многих других случаях [4]. Поскольку использование для этих целей объединенных в один корпус нескольких чувствительных элементов приводит к увеличению массогабаритных показателей и делает конструктивно сложными такие измерители. Во-вторых, достоинствами таких систем, по сравнению с системами с несколькими датчиками, является точность измерений, стабильное энергопотребление, наличие одного канала связи, простая диагностика и ремонтпригодность.

Но и для ПЭ в виде бруска существует несколько вариантов соотношений геометрических параметров чувствительного элемента. Очевидно, что эти параметры будут оказывать различное влияние на технические характеристики ПЭ. Поэтому актуальным является разработка пьезокерамических преобразователей с оптимальными геометрическими параметрами.

Целью работы является моделирование пьезокерамических элементов в виде бруска и исследование их характеристик с целью выбора оптимальных геометрических параметров ПЭ для мономорфных пьезокерамических преобразователей.

Основная часть. Существует четыре основных случая соотношений геометрических параметров чувствительного элемента в виде бруска для мономорфного пьезокерамического преобразователя (МПП), представленных на рис. 1.

Качество пьезокерамики характеризуется многими параметрами: коэффициентом электро-механической связи, относительной диэлектрической проницаемостью, пьезоэлектрическими модулями, температурой точки Кюри, модулями Юнга, частотными постоянными, плотностью, механической добротностью и другими.

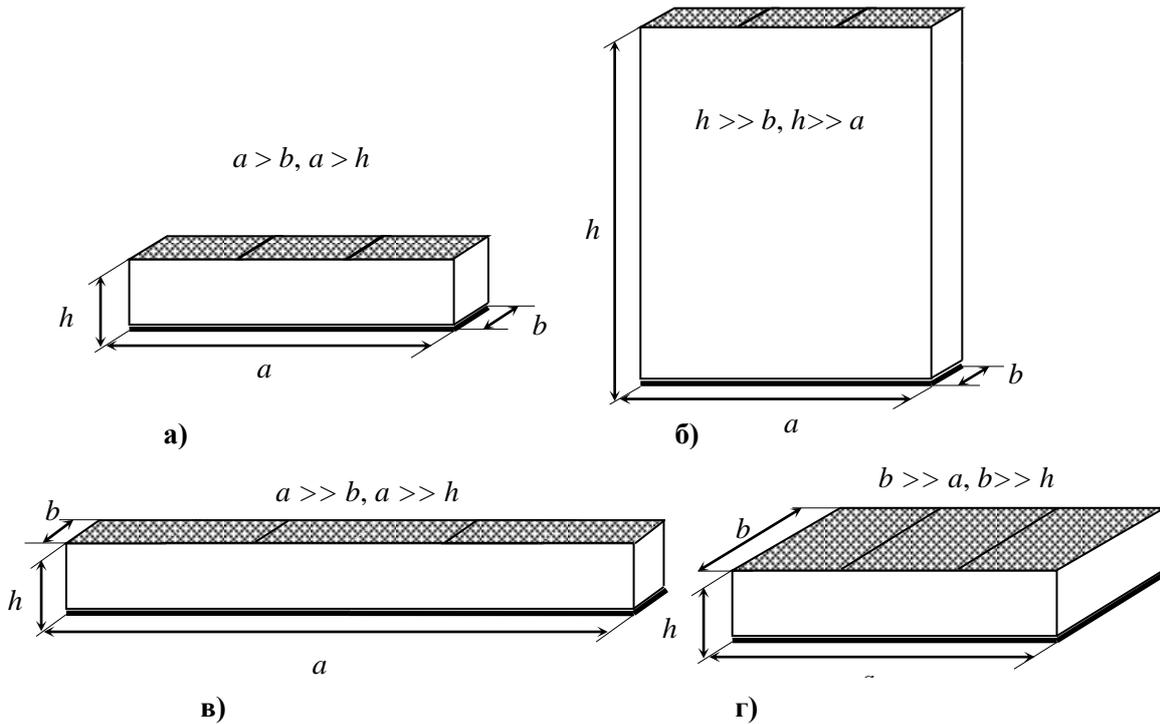


Рис. 1 – Соотношение геометрических параметров чувствительного элемента МПП:

- а) при условии $a > b, a > h$; б) при условии $h \gg b, h \gg a$;
в) при условии $a \gg b, a \gg h$; г) при условии $b \gg a, b \gg h$.

В данной работе проведено исследование двух основных характеристик в зависимости от выбранного соотношения геометрических параметров ПЭ: коэффициента электромеханической связи (K_p) и пьезомодуля (d_{31}), которые, по мнению авторов, являются определяющими при выборе оптимальной формы ПЭ.

Коэффициент электромеханической связи K_p определяется выражением [1]:

$$K_p = \frac{\frac{\pi \cdot f_a}{2 \cdot f_p}}{\sqrt{\frac{\pi \cdot f_a}{2 \cdot f_p} - \operatorname{tg}\left(\frac{\pi \cdot f_a}{2 \cdot f_p}\right)}} \cdot \sqrt{\frac{2}{1 - \sigma}}, \quad (1)$$

где f_a – антирезонансная частота ПЭ; f_p – резонансная частота; σ – коэффициент Пуассона.

С учетом значений резонансной и антирезонансной частот, а также в зависимости от значения емкости (C) для ПЭ в виде бруска выражение (1) примет вид:

$$K_p = \frac{\frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{11,3hC + \frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} ab}}{\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} ab}}{\sqrt{\frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{11,3hC + \frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} ab}}{\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} ab} - \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{11,3hC + \frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} ab}}{\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} ab}\right)}} \cdot \sqrt{\frac{2}{1 - \sigma}}, \quad (2)$$

где $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$ – относительная диэлектрическая проницаемость; a – длина ПЭ; b – ширина ПЭ; h – толщина ПЭ; C – динамическая емкость ПЭ.

Зависимости коэффициента электромеханической связи K_p от геометрических параметров ПЭ для четырех основных соотношений геометрических параметров показаны на рис. 2 – 4.

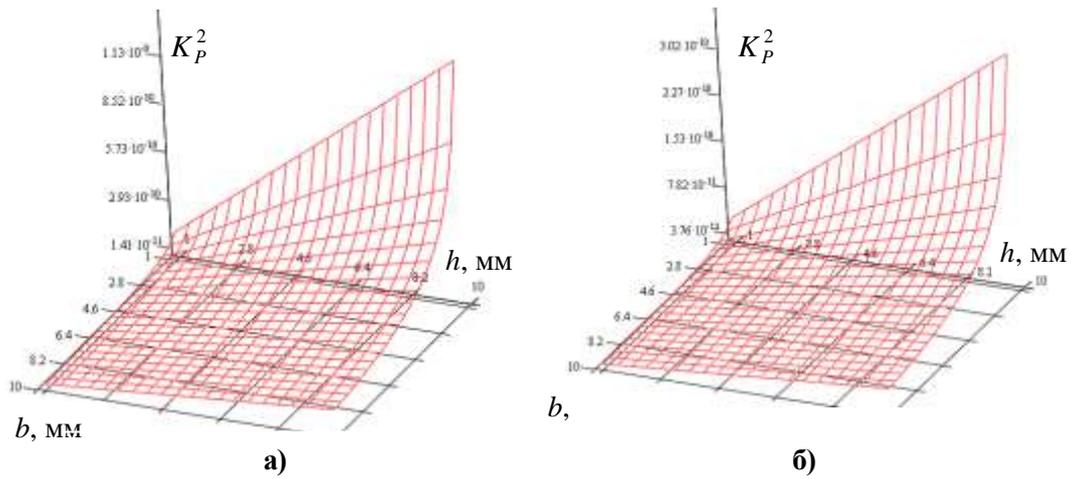


Рис. 2 – Зависимости коэффициента электромеханической связи K_p от ширины b и толщины h ПЭ:
а) при условии $a > b, a > h$; б) при условии $a \gg b, a \gg h$

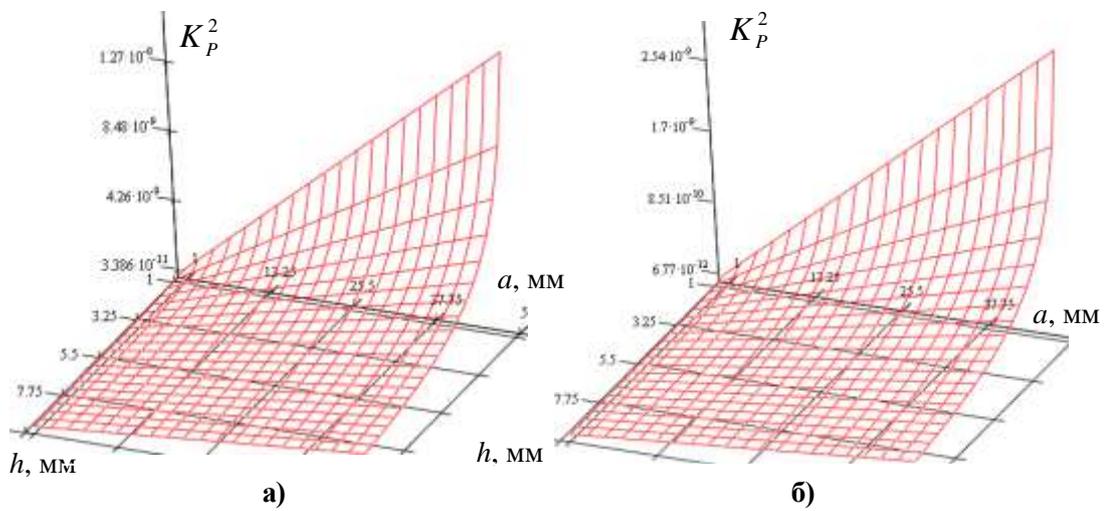


Рис. 3 – Зависимости коэффициента электромеханической связи K_p от длины a и толщины h ПЭ:
а) при условии $a > b, a > h$; б) при условии $b \gg a, b \gg h$

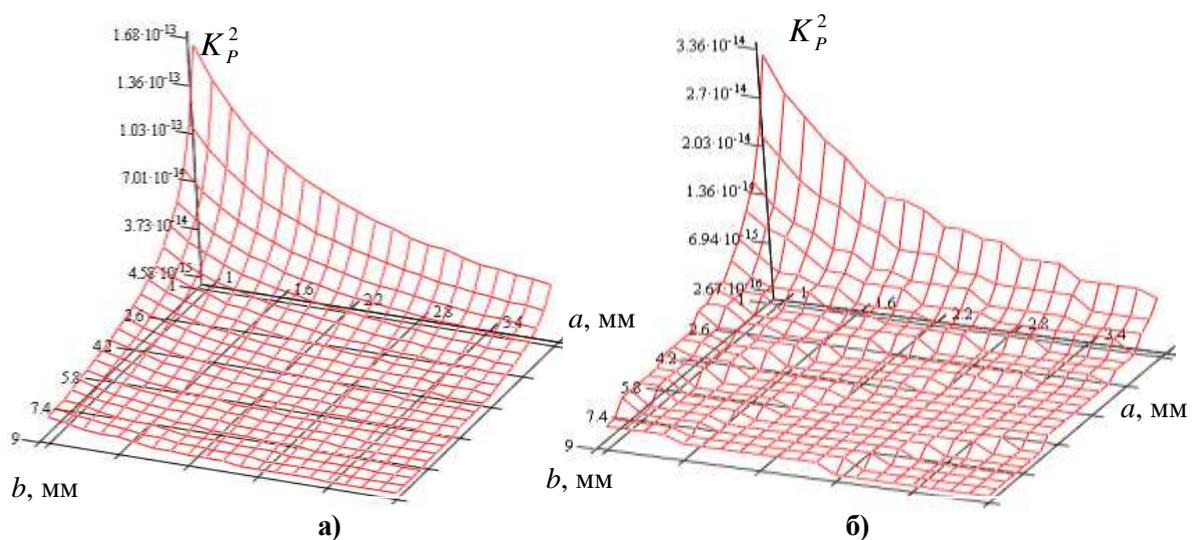


Рис. 4 – Зависимости коэффициента электромеханической связи K_p от длины a и ширины b ПЭ:
а) при условии $a > b, a > h$; б) при условии $h \gg b, h \gg a$

Преобразованное значение пьезоэлектрического модуля d_{31} имеет вид [1]:

$$d_{31} = \frac{\chi}{a} \cdot \frac{2\pi \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} \cdot \frac{ab}{11,3h}} \cdot LC}{\sqrt{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} \cdot \frac{ab}{11,3h}} - \sqrt{C + \frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} \cdot \frac{ab}{11,3h}} \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\sqrt{C + \frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} \cdot \frac{ab}{11,3h}}}{\sqrt{\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} \cdot \frac{ab}{11,3h}}} \right)} \cdot \frac{8,85 \cdot 10^{-12}}{(1 - \sigma^2)\rho} \cdot \frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0}, \quad (3)$$

где σ – коэффициент Пуассона; χ – постоянная величина, равная 2,069; ρ – плотность ПЭ; C – динамическая емкость; L – динамические индуктивности ПЭ.

Расчитанные зависимости пьезоэлектрического модуля от геометрических параметров ПЭ показаны на рис. 5 – 7.

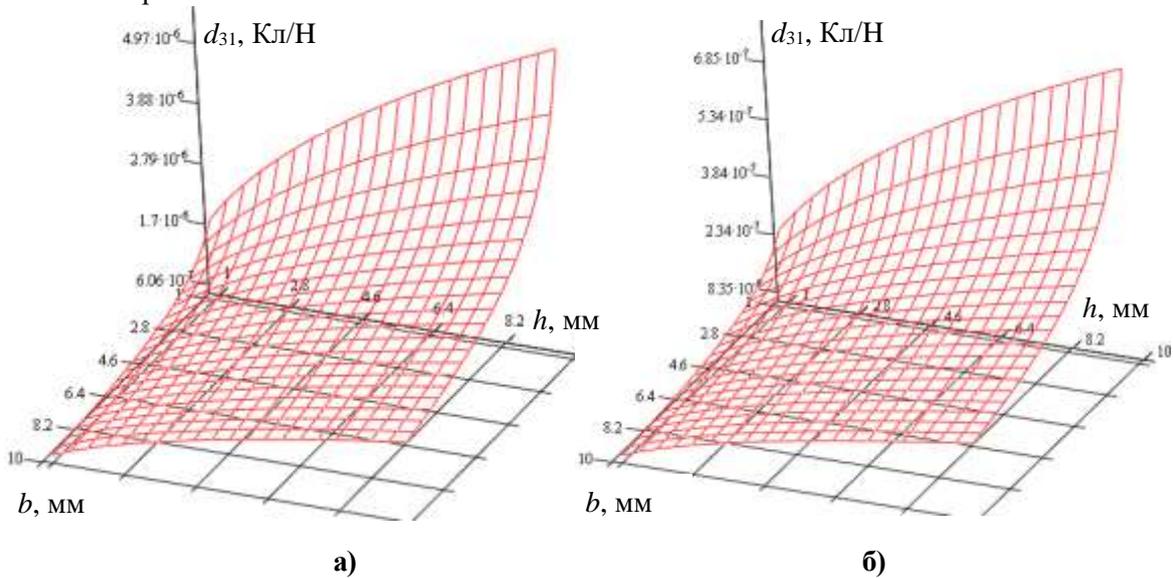


Рис. 5 – Зависимости пьезомодуля d_{31} от ширины b и толщины h ПЭ:
а) при условии $a > b, a > h$; б) при условии $a \gg b, a \gg h$

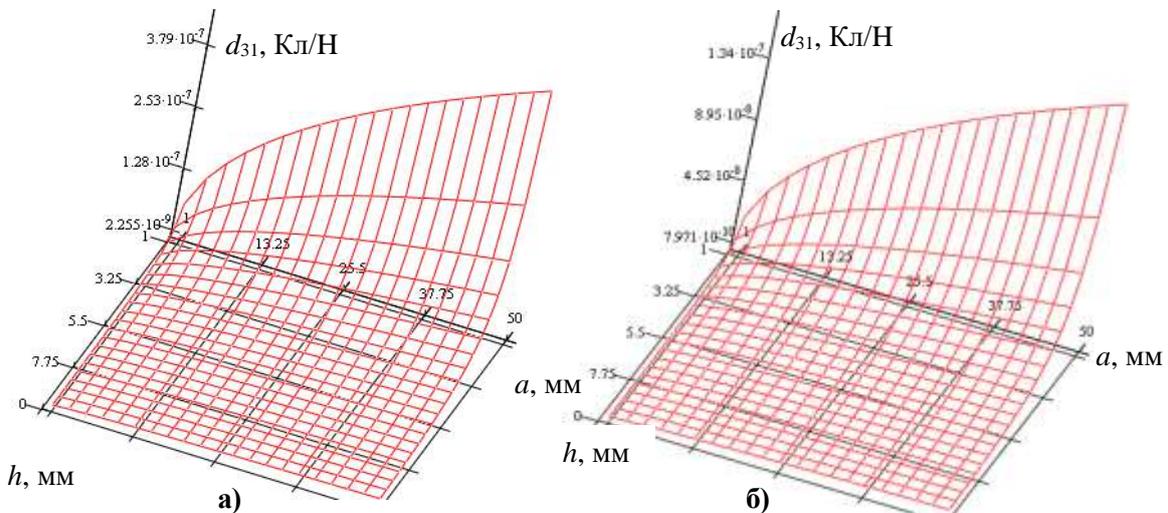


Рис. 6 – Зависимости пьезомодуля d_{31} от длины a и толщины h ПЭ:
а) при условии $a > b, a > h$; б) при условии $b \gg a, b \gg h$

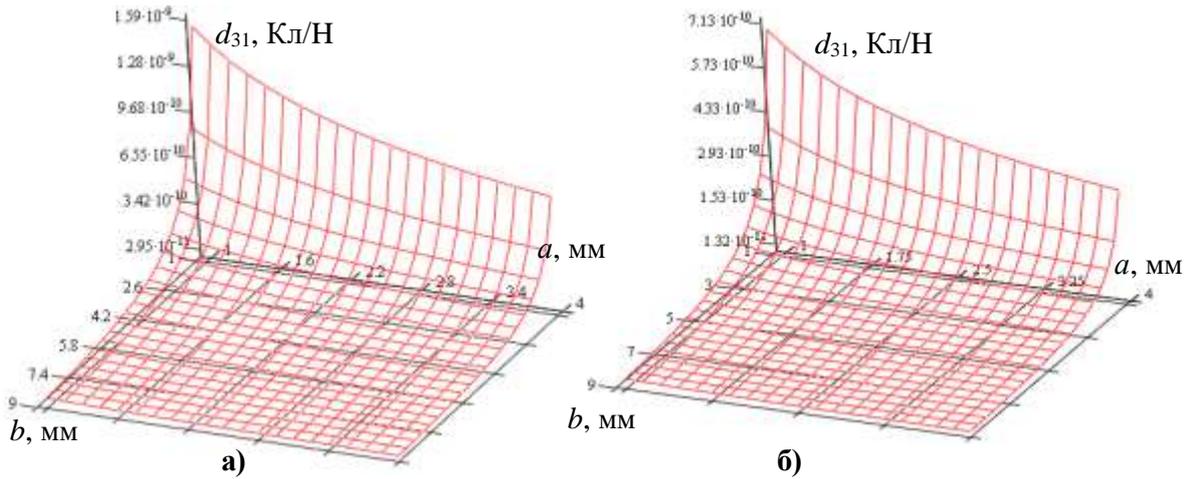


Рис. 7 – Зависимости пьезомодуля d_{31} от длины a и ширины b ПЭ:
а) при условии $a > b, a > h$; б) при условии $h \gg b, h \gg a$

Проанализировав рис. 2 – 7, можно сделать вывод, что ПЭ в виде бруска с соотношением геометрических параметров $a > b$ и $a > h$ имеет лучшие характеристики по сравнению с ПЭ в виде бруска с соотношением геометрических параметров: $h \gg b, h \gg a; b \gg a, b \gg h; a \gg b, a \gg h$.

Значения диэлектрических проницаемостей $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$ для пьезоэлементов с разными соотношениями геометрических параметров определялись по формуле [1]:

$$\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} = \frac{11,3C_0h}{ab}, \quad (4)$$

где C_0 – статическая емкость ПЭ.

Расчеты зависимостей пьезоэлектрического модуля от геометрических параметров ПЭ также подтвердили предпочтительность формы в виде бруска с параметрами $a > b$ и $a > h$ по сравнению с другими геометрическими параметрами, поскольку при таком соотношении были получены максимальные значения выходного напряжения.

Детальный анализ всех соотношений геометрических параметров ПЭ был произведен по схемотехнической модели, представленной на рис. 8.

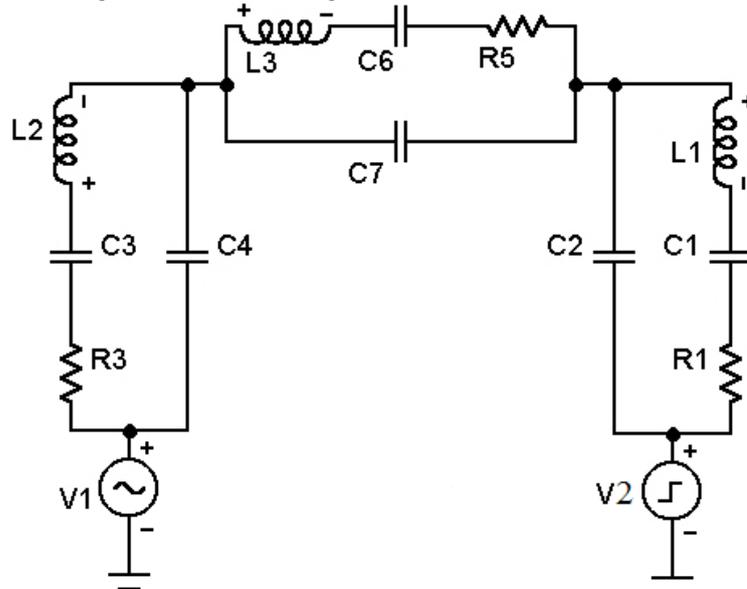
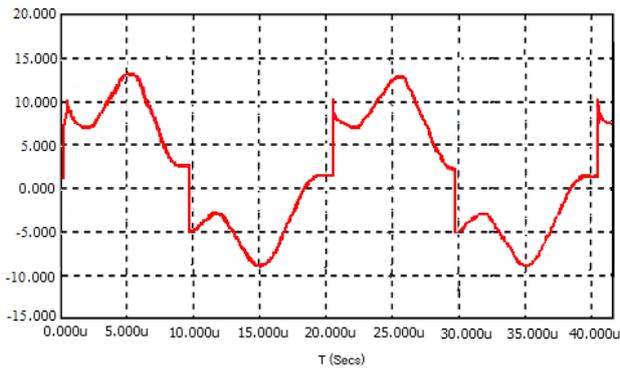


Рис. 8 – Схемотехническая модель МПП для измерения двух физических величин

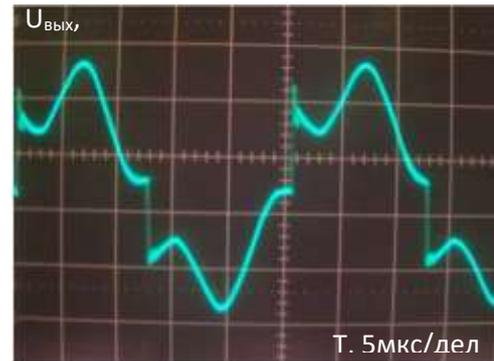
Временные характеристики для МПП с чувствительным элементом в виде бруска при условиях: $a > b$, $a > h$; $h \gg b$, $h \gg a$; $b \gg a$, $b \gg h$; $a \gg b$, $a \gg h$, смоделированы в пакете схемотехнического моделирования MicroCap 9.0 и представлены на рис. 9(а), 10(а), 11(а) и 12(а).

Для проведения экспериментальных исследований использовались пьезоэлементы из пьезокерамики ЦТС-19 с различными геометрическими параметрами: 1) бруска размером $24 \times 10 \times 6$ мм; 2) бруска размером $90 \times 10 \times 10$ мм; 4) бруска размером $17 \times 7 \times 29$ мм; 4) бруска размером $17 \times 29 \times 7$ мм. Для измерения временных характеристик использовался генератор импульсов Г5-67, осциллограф С1-55 и милливольтметр В7-38.

Экспериментально полученные временные характеристики МПП с чувствительным элементом в виде бруска при условиях: $a > b$, $a > h$; $h \gg b$, $h \gg a$; $b \gg a$, $b \gg h$; $a \gg b$, $a \gg h$ представлены на рис. 9(б), 10(б), 11(б) и 12(б).



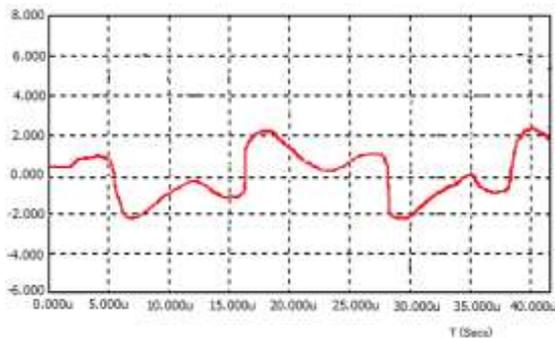
а)



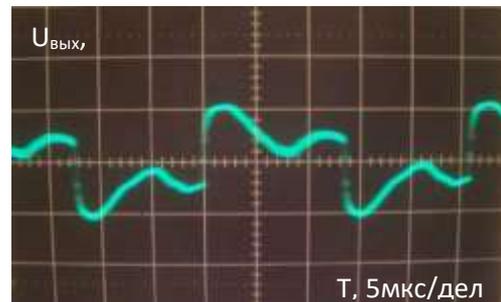
б)

Рис. 9 – Форма выходного сигнала для ПЭ в виде бруска при условии $a > b$, $a > h$:

а) теоретическая зависимость; б) экспериментальная зависимость



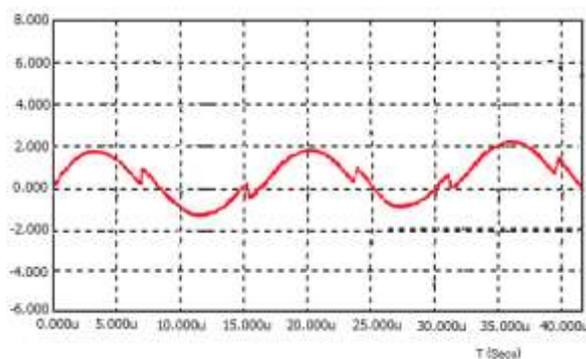
а)



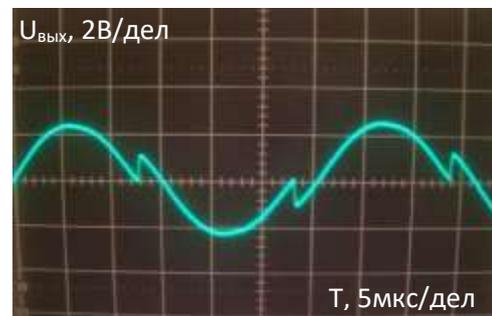
б)

Рис. 10 – Форма выходного сигнала для ПЭ в виде бруска при условии $a \gg b$, $a \gg h$:

а) теоретическая зависимость; б) экспериментальная зависимость



а)



б)

Рис. 11 – Форма выходного сигнала для ПЭ в виде бруска при условии $h \gg b$, $h \gg a$:

а) теоретическая зависимость; б) экспериментальная зависимость

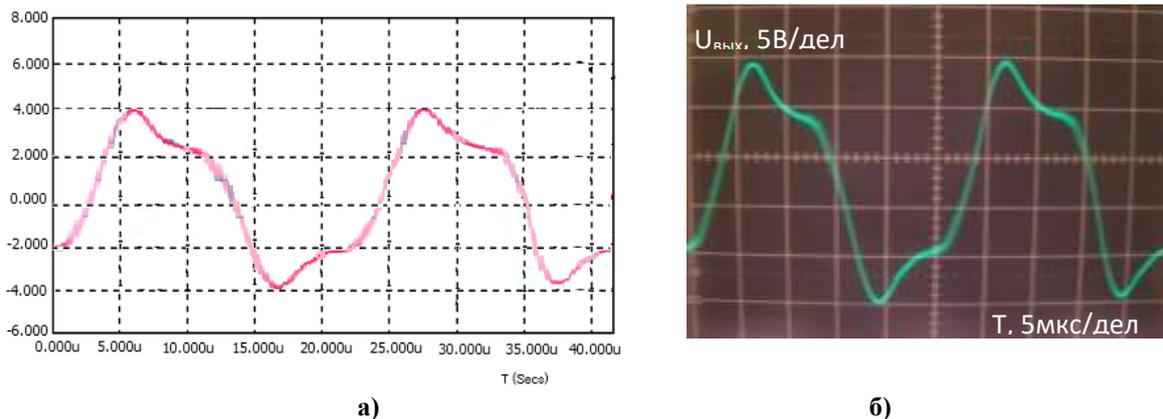


Рис. 12 – Форма вихідного сигналу для ПЕ в вигляді бруска при умові $b \gg a, b \gg h$:
а) теоретична залежність; б) експериментальна залежність

Як видно з рис. 9 – 12, експериментально отримані результати з великою точністю повторюють результати теоретичних досліджень.

Висновки. В результаті аналізу часових характеристик було встановлено оптимальне співвідношення геометричних параметрів чутливого елемента МПП для вимірювання двох фізичних величин: $a > b$ і $a > h$. Іменно таке геометричне співвідношення лінійних розмірів ПЕ в формі бруска (довжина > висота; довжина > ширина) є найкращим, оскільки при такому співвідношенні були отримані максимальні значення вихідного напруги і можливість виділити дві різні форми сигналу: прямокутні імпульси і синусоїдальний сигнал.

Отримані результати досліджень дозволили вимірювати дві фізичні величини, повільно змінюючись в часі, з допомогою одного п'єзокерамічного перетворювача, скоротити час на отримання інформації в два рази, а також зменшити кількість датчиків в поліізмерительній системі.

Список літературних джерел

1. Шарапов В. М. П'єзоелектричні датчики / В. М. Шарапов, М. П. Мусиєнко, Е. В. Шарпова. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
2. Мусиєнко М. П. Моделювання форм п'єзоелементів для поліізмерительних мономорфних п'єзокерамічних перетворювачів / Мусиєнко М. П., Коваленко А. М., Куценко С. В. // Наукові праці ЧДУ ім. Петра Могили. – Серія: «Комп'ютерні технології». – Миколаїв, 2011. – № 161. – Т. 173. – С. 26 – 30.
3. Спосіб вимірювання декількох фізичних величин за допомогою п'єзоелемента: Пат. №45979 Україна, МК G01L 1/16, G01P 15/09 / Мусиєнко М.П., Коваленко А.М., Куценко С.В., Дідук В.А. – № u200902029; Заяв. 06.03.2009; Опубл. 10.12.2009, Бюл. № 23. – 2 с.
4. Коваленко А. М. Розробка вимірювальних систем на базі багатовимірних п'єзокерамічних перетворювачів / Коваленко А. М., Трофименко Е.Г., Буката Л. Н. // Праці Одеського політехнічного університету: Науковий та науково-виробничий збірник. – Одеса, 2012. – № 2(39). – С. 262 – 267.