

**Ю. Ю. Бондаренко**, к.т.н., доцент,

e-mail: julybo110976@gmail.com

**С. О. Филимонов**, к.т.н., доцент,

e-mail: s.filimonov@chdtu.edu.ua

**А. А. Мисан**, аспирант

e-mail: andreyka.misan@gmail.com

Черкасский государственный технологический университет

б-р Шевченко, 460, м. Черкасы, 18000, Украина

## ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА АМПЛИТУДУ КОЛЕБАНИЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АКТУАТОРА МАЛОГАБАРИТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Работа посвящена исследованию возможностей применения пьезокерамических актуаторов в малогабаритных летательных аппаратах. Определено рациональное отношение длины к ширине актуатора, что является крайне необходимым при конструировании малогабаритных летательных аппаратов. В результате исследований получены математические зависимости для прогнозирования амплитуды колебаний в зависимости от геометрических размеров пьезоэлектрической пластины. Адекватность модельных расчетов подтверждена экспериментальными исследованиями.*

**Ключевые слова:** пьезокерамика, пьезокерамический актуатор, моделирование, малогабаритные летательные аппараты.

**Введение.** Одно из важных направлений в современной авиации связано с разработкой беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Широкий спектр практических применений БПЛА охватывает решение следующих основных задач: оптическая, радиолокационная, химическая, бактериологическая и радиационная разведка; мониторинг экологической обстановки; поддержание сетевых телекоммуникаций; контроль морского судходства и т.д. [1].

Одним из направлений развития БПЛА является проектирование малогабаритных летательных аппаратов (МЛА). Пример МЛА представлен на рис. 1 [2].



**Рис. 1. Floureon FX 10**

В качестве движущей силы в МЛА такого типа используются электромагнитные

двигатели. Дальнейшее уменьшение таких конструкций требует уменьшения габаритов электромагнитных двигателей, что в свою очередь, приводит к уменьшению коэффициента полезного действия [3], а это не допустимо. Иным способом уменьшения габаритов МЛА является использование пьезоэлектрических актуаторов.

Пьезоактуатор – пьезомеханическое устройство, предназначенное для приведения в действие механизмов, систем или управления ими на основе пьезоэлектрического эффекта.

К преимуществам использования пьезоактуаторов как приводов относятся: не лимитированные возможности по разрешению; скорость срабатывания; развитие больших сил; отсутствие магнитного поля; низкое потребление энергии; не подверженность износу; возможность работы в экстремальных условиях [4].

Однако применение пьезоактуаторов связано с рядом физических явлений, которые сложным образом взаимодействуют между собой.

**Постановка задачи.** Одним из примеров использования пьезоактуаторов в малогабаритных летательных аппаратах является разработка ученых Гарвардского университета робот «RoboBee» [5] (рис. 2).

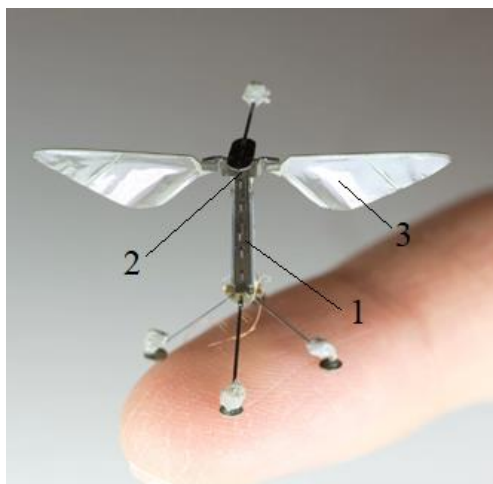


Рис. 2. МЛА RoboBees:

1 – пьезоэлектрический актуатор,  
2 – редукторный механизм, 3 – крылья

Основным элементом Robobees является пьезоактуатор 1. Выбор пьезоэлектрической пластины сильно зависит от ее геометрических размеров. Анализ технической литературы, научных статей, а также патентов, показал, что не рассматривается выбор параметров актуатора в МЛА. Таким образом, определение оптимальных параметров пьезокерамического актуатора является важной и актуальной задачей, а ее решение является целью данной работы.

**Описание объекта и метода исследования.** Учитывая технические особенности пьезоэлектрических актуаторов, затрудняющие экспериментальное определение и выбор правильной формы их колебаний, оптимальным является использование с этой целью численных методов расчета, реализуемых специализированными САПР.

Для исследования влияния конструктивных параметров пьезоэлектрического актуатора было проведено численное моделирование процесса работы пьезоэлемента с использованием пакета программ COMSOL Multiphysics 5.2.

COMSOL Multiphysics – это интегрированная платформа для моделирования, включающая в себя все его этапы: от создания геометрии, определения свойств материалов и описания физических явлений, до настройки решения и процесса постобработки, что позволяет получать точные и надежные результаты [6].

Таким образом, пакет моделирования COMSOL 5.2 дает возможность для проведения численного моделирования трёхмерных

моделей пьезоэлектрических актуаторов, с необходимыми параметрами и граничными условиями.

Внутри пьезоэлектрического элемента существует связь между деформацией и электрическим полем, которая определяется материальным или конститутивным соотношением:

$$\begin{aligned} T &= c_E S - e^T E \\ D &= eS + \varepsilon_S E, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $S$  – деформация,  $T$  – напряжение,  $E$  – электрическое поле,  $D$  – электрическое смещение поля.

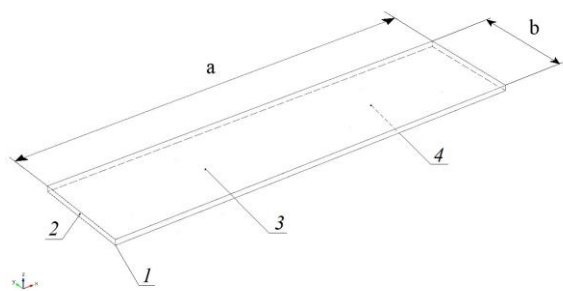
Параметры материала  $c_E$ ,  $e$  и  $\varepsilon_S$  соответствуют жесткости материала, коэффициенту электромеханической связи и диэлектрической проницаемости. Эти величины являются тензорами 4, 3 и 2 ранга соответственно, но, поскольку тензоры симметричны по физическим причинам, они могут быть представлены в виде матриц в сокращенной записи, что обычно более удобно [7].

Использовались Лагранжевы конечные элементы с элементарными базисными функциями второго порядка – Lagrange-Quadratic.

Анализ пьезокерамического актуатора осуществлялся в режиме Frequency response. Расчетная сетка конечных элементов в пункте «Mesh» выбиралась ортогонализированной – Normal. Сетка построена тетрагональным разбиением, исследуемые трехмерные модели представлены совокупностью из больше чем тысячи элементов каждая. В качестве решателя используется Direct, в котором выбран численный метод SPOLES для решения систем линейных уравнений с разреженными матрицами.

Для получения амплитуды максимальных колебаний пьезоэлектрического актуатора (рис. 3), было проведено моделирование, для определения рациональных геометрических параметров. Размеры пьезокерамической пластины представлены коэффициентом  $K = b/a$  в безразмерной форме, в результате отношения ширины  $b$  к длине  $a$ .

На первом этапе моделирования коэффициент  $K$  изменялся от 0.44 до 0.147 с шагом 0.02, при этом толщина была постоянной 0.6 мм. На втором этапе моделирования, изменялась ширина  $b$  при этом длина  $a$  оставалась постоянной и соответствовала размеру, при котором были определены максимальные колебания пьезокерамической пластины на первом этапе.



**Рис. 3. Аксонометрическая проекция пьезоэлектрического актуатора**

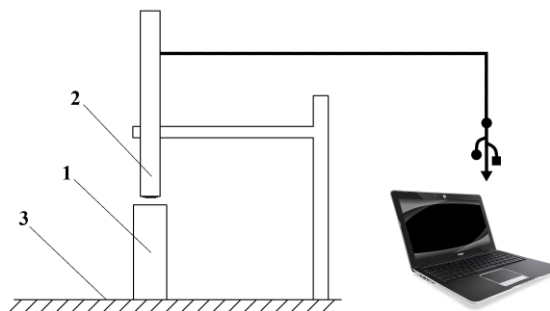
Граничные условия для модели пьезоэлектрического актуатора (рис. 3) следующие: пьезокерамическая пластина 1 по ширине стороны 2 имеет тип граничных условий Fixed, электрическое напряжение (Electric potential) 100В приложено к электроду 3, а земля (Ground) к электроду 4 на противоположной стороне.

При проведении численного моделирования в пакете программ COMSOL Multiphysics сначала определялась частота резонанса, на которой пьезокерамический элемент приобретает колебания. Затем определялась его максимальная амплитуда колебаний и осуществлялся выбор рационального отношения длины к ширине.

Также проводились экспериментальные исследования с целью проверки адек-

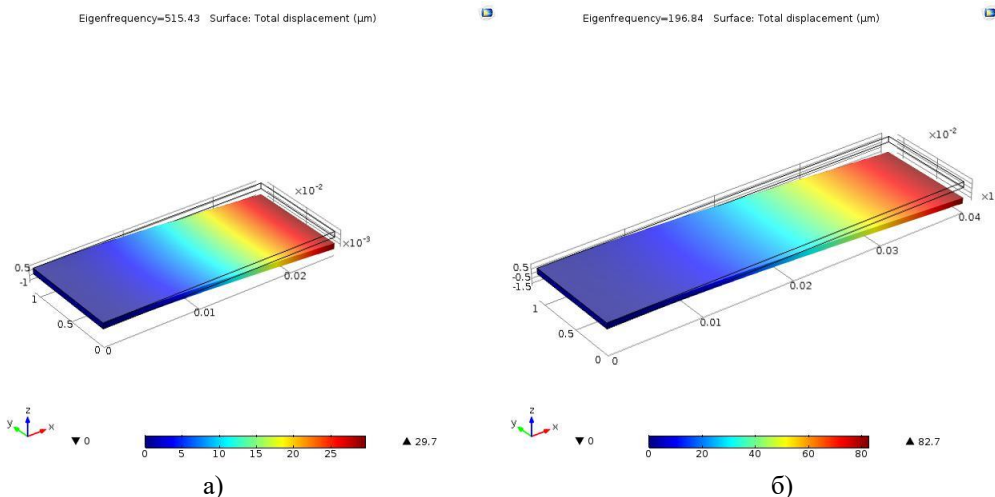
ватности полученных при моделировании результатов.

Методика проведения экспериментов заключается в следующем. Пьезоэлектрическая пластина 1 жестко закреплена на основании 3 (рис. 4). При подаче переменного электрического напряжения на электроды пьезоэлектрической пластины 1, в последней возникают механические колебания, которые фиксируются USB микроскопом 2.



**Рис. 4. Схематическое представление экспериментальной установки определения колебаний пьезоэлектрической пластины:**  
1 – пьезоэлектрическая пластина,  
2 – USB микроскоп, 3 – основание

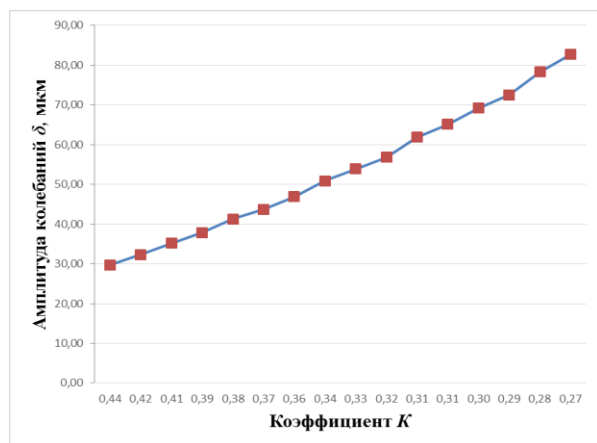
**Описание результатов.** Некоторые результаты численного моделирования пьезоэлектрического актуатора в случае изменении длины при постоянной ширине представлены на рис. 5.



**Рис. 5. Результаты моделирования пьезоэлектрического актуатора с отношением длины к ширине, при постоянной ширине: а) 25x11x0.6 мм; б) 40x11x0.6 мм**

Полученные результаты численного моделирования представлены графически в виде

зависимости амплитуды колебаний  $\delta$  от коэффициента  $K=b/a$  актуатора и показаны на рис. 6.



**Рис. 6. График зависимости амплитуды колебаний  $\delta$  пьезоэлектрического актуатора с разными значениями коэффициента  $K$  при постоянной ширине**

Из рис. 6 видно, что максимальная амплитуда колебаний  $\delta=82.7$  мкм пьезоэлектрического актуатора соответствует коэффициенту  $K=0.27$ , что эквивалентно длине 40 мм.

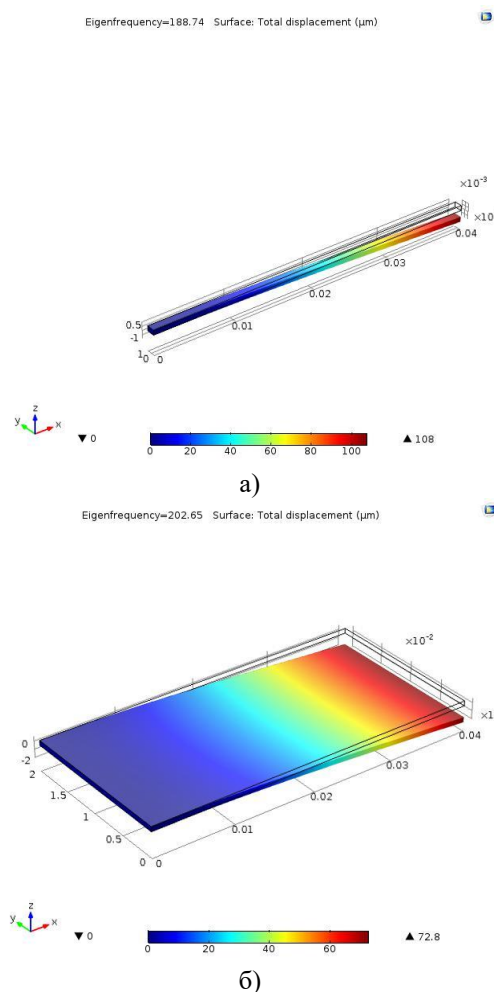
Полученная в результате численного моделирования графическая зависимость для амплитуды колебаний актуатора была аппроксимирована при помощи показательной функции

$$\delta = ax^b, \quad (2)$$

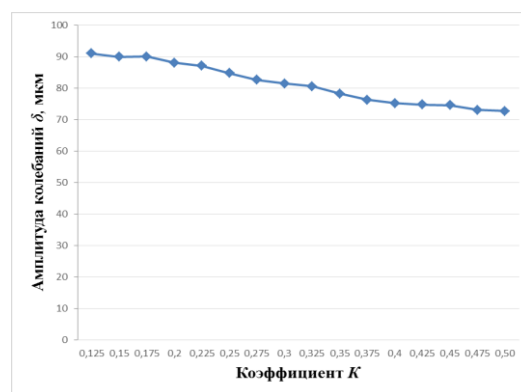
где  $\delta$  – амплитуда колебания актуатора,  $x$  – коэффициент  $K$ ,  $a = 5.1053748$ ,  $b = -2.1533905$  – коэффициенты.

Следующим шагом определялась амплитуда колебаний  $\delta$  при изменении ширины  $b$  пьезоэлектрической пластины, при постоянном значении длины  $a = 40$  мм. Некоторые из результатов численного моделирования представлены на рис. 7. Ширина  $b$  изменяется в пределах от 5 до 20 мм, с шагом 1 мм. Уменьшение ширины меньше чем 5 мм приводит к большим механическим напряжениям в основании пьезоэлектрической пластины, что может привести к ее разрушению. На основе результатов численного моделирования построен график зависимости амплитуды колебаний  $\delta$  пьезоэлектрического актуатора с разными значениями коэффициента  $K$  при постоянной длине, который представлен на рис. 8.

Из рис. 8 видно, что максимальная амплитуда колебаний пьезоэлектрического актуатора соответствует коэффициенту  $K = 0.125$ , что эквивалентно ширине 5 мм.



**Рис. 7. Результаты моделирования пьезоэлектрического актуатора с отношением длины к ширине, при постоянной длине: а) 40x1x0.6 мм; б) 40x20x0.6 мм**



**Рис. 8. График зависимости амплитуды колебаний  $\delta$  пьезоэлектрического актуатора с разными значениями коэффициента  $K$  при постоянной длине**

Полученная в результате численного моделирования графическая зависимость для амплитуды колебаний актуатора была аппроксимирована с применением метода

наименьших квадратов квадратичной функцией второго порядка

$$\delta = a + bx + cx^2, \quad (3)$$

где  $\delta$  – амплитуда колебания актуатора,  $x$  – коэффициент  $K$  толкателя,  $a = 132.03914$ ,  $b = -123.4657$ ,  $c = 84.762335$  – коэффициенты.

Для подтверждения адекватности моделирования проведен эксперимент с образцом пьезоэлектрической пластины (рис. 9) по рациональным данным.

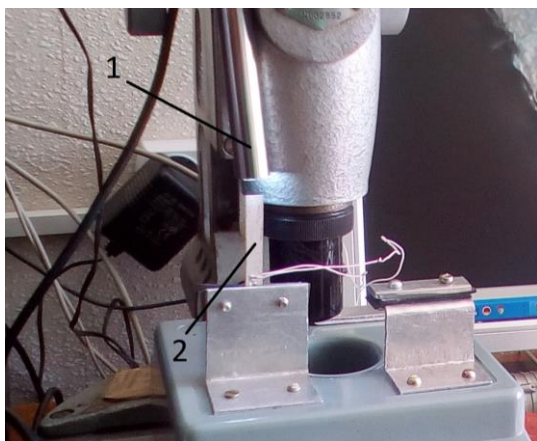


Рис. 9. Экспериментальная установка для определения амплитуды колебаний пьезоактуатора: 1 – USB микроскоп; 2 – пьезоэлектрическая пластина

Результат экспериментальных исследований, приведенный на рис. 10.



Рис. 10. Экспериментальные результаты свободной стороны пьезоактуатора под микроскопом, увеличение 250 крат: а) в состоянии покоя; б) при подаче напряжения 100 В с частотой 146 Гц

**Выводы.** Основные результаты исследований следующие: путем численного моделирования процесса функционирования пьезоэлектрической пластины было определено рациональное отношение ширины к его длине, которое составляет  $K = 0,125$ . Данной геометрии пьезоэлектрической пластины соответствует амплитуда колебаний  $\delta = 82.7$  мкм; полученные данные можно использовать при проектировании малогабаритных летательных аппаратов на основе пьезо-

керамических актуаторов. Полученные математические зависимости помогут спрогнозировать амплитуду колебаний пьезоактуатора в зависимости от геометрических размеров пьезоэлектрической пластины.

### Список литературы

1. Лохин В. М. Тенденции развития беспилотных летательных аппаратов мини и микро классов. *Нано- и микросистемная техника*, №2. 2005.
2. GearBest. URL: [https://www.gearbest.com/rc-uadcopters/pp\\_198338.html?vip=3010299&gclid=Cj0KCQjwuYTYBRDsARIsAJnrUXBfTESptb3huxr11ZmQ9jxMt-WrkMghrzYV152Y702yXQipFjGLHVQaAsyrEALw\\_wcB](https://www.gearbest.com/rc-uadcopters/pp_198338.html?vip=3010299&gclid=Cj0KCQjwuYTYBRDsARIsAJnrUXBfTESptb3huxr11ZmQ9jxMt-WrkMghrzYV152Y702yXQipFjGLHVQaAsyrEALw_wcB)
3. Смирнов А.Б. Мехатроника и робототехника. Системы микроперемещений с пьезоэлектрическими приводами Санкт-Петербург СПбГПУ, 2003.
4. Панич А. Е., Жуков С. Н. Пьезоэлектрическое приборостроение. Т.4. Пьезоэлектрические актуаторы. Ростов-на-Дону: ЦВВР, 2008.
5. Wyss Institute. URL: <https://wyss.harvard.edu/technology/autonomous-flying-microrobots-robobees/>
6. Егоров В. И. Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности. Санкт-Петербург: СПб ГУ ИТМО, 2006.
7. Spicci L, Cati M. Термический анализ пьезо-диска ультразвукового зонда. Парижская Comsol конференция 2012.
8. Шарапов В. М., и др. Пьезокерамические трансформаторы и датчики. Нью-Йорк, 2011.
9. Жуков С. Н. Пьезоэлектрическая керамика: принципы и применение. Мн: ООО ФУАинформ, 2003.

### References

1. Lokhin V.M. (2005) Trends in the development of pilotless flying vehicles of mini and micro classes. *Nano- and microSystem technology*, No. 2 [in Russian].
2. GearBest. URL: [https://www.gearbest.com/rc-uadcopters/pp\\_198338.html?vip=3010299&gclid=Cj0KCQjwuYTYBRDsARIsAJnrUXBfTESptb3huxr11ZmQ9jxMt-WrkMghrzYV152Y702yXQipFjGLHVQaAsyrEALw\\_wcB](https://www.gearbest.com/rc-uadcopters/pp_198338.html?vip=3010299&gclid=Cj0KCQjwuYTYBRDsARIsAJnrUXBfTESptb3huxr11ZmQ9jxMt-WrkMghrzYV152Y702yXQipFjGLHVQaAsyrEALw_wcB)

3. Smirnov A.B. (2003) *Mechatronics and Robotics. Systems of micro-displacements with piezoelectric drives*. St.Petersburg: SPbSPU [in Russian].
4. Panich, A.E., Zhukov, S.N. (2008) *Piezoelectric Instrument Making. T.4. Piezoelectric actuators*. Rostov-on-Don: CVUR [in Russian].
5. Wyss Institute. URL: <https://wyss.harvard.edu/technology/autonomous-flying-microrobots-robobees/>
6. Egorov V.I. (2006) *Application of a computer for solving problems of heat conduction*. St. Petersburg: SPb NRU ITMO [in Russian].
7. Spicci L, Cati M. (2012) *Thermal Analysis of a piezo-disk ultrasound probe*. In: *Comsol Conference* [in Paris].
8. Sharapov V. (2011) *Piezoceramic sensors*. New York: Springer Verlag [in USA].
9. Zhukov S.N. (2003) *Piezoelectric ceramics: principles and applications*. Mn: OOO FU-Auinform [in Belarus].

**Yu. Yu. Bondarenko**, *Ph.D., associate professor*

e-mail: julybo110976@gmail.com

**S. A. Filimonov**, *Ph.D., associate professor*

e-mail: s.filimonov@chdtu.edu.ua

**A. A. Misan**, *graduate student*

e-mail: andreyka.misan@gmail.com

Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

#### **INFLUENCE OF GEOMETRIC PARAMETERS ON THE AMPLITUDE OF SMALL-SIZED FLYING APPARATUSES PIEZOELECTRIC ACTUATOR VIBRATIONS**

*The work is devoted to the investigation of the possibilities of using piezoceramic actuators in small-sized aircrafts. The rational relation of the length to the width of the actuator is determined, which is extremely necessary for the design of small-sized aircraft. As a result of the research, mathematical dependencies were obtained for predicting the amplitude of oscillations depending on the geometric dimensions of the piezoelectric plate. The adequacy of model calculations has been confirmed by experimental studies.*

**Keywords:** *piezoceramics, piezoceramic actuator, modeling, small-size aircraft.*

*Стаття надійшла 15.05.2018.*

*Рецензенти: С. В. Заболотний, д.т.н., доцент,*

*М. П. Мусієнко, д.т.н., професор.*