

В.Я. Гальченко, Ю.Ю. Бондаренко, С.А. Филимонов, Н.В. Филимонова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ НА АМПЛИТУДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЕЙНОГО ПЬЕЗОДВИГАТЕЛЯ

Метою статті є визначення впливу геометричних параметрів статора лінійного п'єзокерамічного двигуна у вигляді п'єзокерамічної пластини на характеристики її амплітудних коливань. Для проведення досліджень використовувалося математичне моделювання в середовищі пакета програм COMSOL Multiphysics з урахуванням взаємозв'язку електростатичних і механічних явищ. Шляхом чисельного моделювання процесу функціонування лінійного п'єзокерамічного двигуна визначено раціональне відношення ширини до довжини п'єзокерамічної пластини. Встановлено також раціональне значення товщини h п'єзокерамічної пластини двигуна. Запропоновані апроксимаційні залежності для визначення параметрів зв'язку між геометричними розмірами п'єзокерамічної пластини лінійного п'єзодвигуна, що дозволяє прогнозувати його характеристики. Адекватність модельних розрахунків підтверджена експериментальними дослідженнями. Отримані результати можуть використовуватися при проектуванні п'єзокерамічних двигунів. Бібл. 15, рис. 8.

Ключові слова: п'єзокераміка, п'єзокерамічний двигун, п'єзокерамічна пластина.

Целью статьи является определение влияния геометрических параметров статора линейного пьезокерамического двигателя в виде пьезокерамической пластины на характеристики ее амплитудных колебаний. Для проведения исследований использовалось математическое моделирование в среде пакета программ COMSOL Multiphysics с учетом взаимосвязи электростатических и механических явлений. Путем численного моделирования процесса функционирования линейного пьезокерамического двигателя определено рациональное отношение ширины к длине пьезокерамической пластины. Установлено также рациональное значение толщины h пьезокерамической пластины двигателя. Предложены аппроксимационные зависимости для определения параметров связи между геометрическими размерами пьезокерамической пластины линейного пьезодвигателя, что позволяет прогнозировать его характеристики. Адекватность модельных расчетов подтверждена экспериментальными исследованиями. Полученные результаты могут использоваться при проектировании пьезокерамических двигателей. Библ. 15, рис. 8.

Ключевые слова: пьезокерамика, пьезокерамический двигатель, пьезокерамическая пластина.

Введение. Пьезоэлектрические двигатели применяются в микроскопии, робототехнике, фототехнике, нанометрологии, нанолитографии, нанопечате, микродозировании и др. Они могут использоваться для вакуумного и криогенного оборудования, а также сверхточного позиционирования объектов и систем, в частности, для систем радиолокации [1-3].

Пьезодвигателями называют устройства, в которых механическое перемещение достигается за счёт обратного пьезоэлектрического эффекта. Материалы, составляющие основу таких приводов, называют пьезоэлектриками. Обратный пьезоэлектрический эффект заключается в изменении линейных размеров пьезоэлектрика при приложении к нему электрического поля.

Актуальность применения пьезоэлектрических двигателей в различных прецизионных измерительных и следящих системах, регулируемые величинами которых являются угловое и линейные перемещения, объясняется несколькими факторами. Это, прежде всего, их высокая разрешающая способность (вплоть до 0,1 нм), возможность самостопорения приводного звена, максимальная длительность безотказной работы, а также их высокая надёжность [3]. Показательное приращение на основе пьезодвигателей – теодолит [4], представляющий собой точный инструмент, на котором монтируется подвижный телескоп для измерения углов в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Пьезоэлектрические двигатели обладают рядом преимуществ над электромагнитными, а именно [2]: отсутствием излучаемых магнитных полей и неподверженностью к их влиянию; возможностью миниа-

туризации; широким диапазоном частот вращения и моментов на валу; огнестойкостью; отсутствием обмоток; простой технологией изготовления и, как следствие, более высокой эффективностью.

В то же время за внешней конструктивной простотой пьезоэлектрического двигателя скрывается целый ряд физических явлений, которые сложным образом взаимосвязаны между собой [5, 6]. Трудности их совместного учета существенно сдерживают развитие и совершенствование данного вида двигателей.

Объектом исследования являются процессы взаимодействия поперечных изгибных и продольных механических колебаний статора линейного пьезокерамического двигателя. **Предметом исследования** является пьезоэлемент линейного пьезокерамического двигателя, т.е. статор.

Цель работы – определение влияния геометрических параметров пьезокерамической пластины линейного пьезокерамического двигателя на характеристики ее амплитудных колебаний.

Постановка задачи. Для достижения поставленной цели необходимо последовательно решить ряд задач: определить частоту резонанса, на которой пьезокерамический элемент, а именно, толкатель статора, приобретает колебания эллиптической формы; определить максимальную амплитуду колебаний толкателя при изменении геометрии (ширины и длины) пьезокерамической пластины; определить рациональное отношение ширины к длине пьезокерамической пластины и рациональную толщину пьезокерамической пластины при выбранном эффективном отношении ее ширины к длине.

© В.Я. Гальченко, Ю.Ю. Бондаренко, С.А. Филимонов, Н.В. Филимонова

Обзор литературы. Пьезоэлектрические двигатели по принципу конечного перемещения ротора (каретки) можно классифицировать на линейного и вращательного типов. В рамках данной статьи рассматривается линейный пьезоэлектрический двигатель. Одним из наиболее распространённых видов линейных пьезоэлектрических двигателей является конструкция, представленная на рис. 1 [4, 7-9]. Основными элементами этого пьезоэлектрического двигателя являются: прямоугольная монолитная пьезокерамическая пластина (статор) 1 с электродами 2, 3; фрикционный наконечник (толкатель) 4, а также каретка (ротор, который на рисунке не показан). Электрод 2 разделен на две секции – 5, 6. Толкатель и пластина представляют собой цельную конструкцию, выполненную из пьезокерамического материала. Пьезокерамическая пластина со стороны 7 под действием внешней силы F прижимается к каретке (ротору).

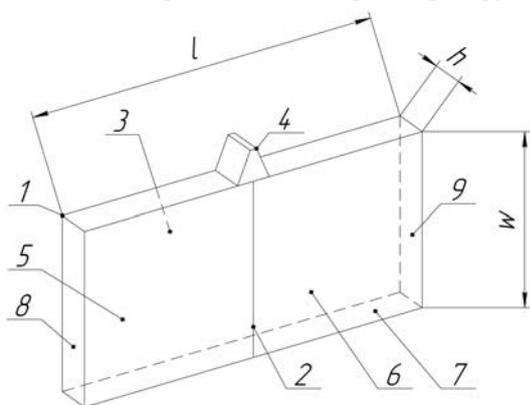


Рис. 1. Пьезокерамическая пластина линейного пьезокерамического двигателя компании Physik Instrumente

Пьезоэлектрический двигатель работает следующим образом (рис. 1). Управляющее напряжение прикладывается к одну из секций 5 или 6 электрода 2, что зависит от выбранного направления движения каретки, и на противоположный электрод 3, являющийся общим («земля»). В данной конструкции пьезодвигателя для получения линейного перемещения каретки в толкателе возбуждаются колебания по двум взаимно перпендикулярным направлениям. При этом продольные колебания в толкателе возбуждаются за счет продольных колебаний пьезопластины (статора), а поперечные изгибные колебания – механическим путем, за счет взаимодействия толкателя с поверхностью каретки. Таким образом, толкатель начинает выполнять колебания в форме эллипса и проталкивать каретку.

Одним из основных критериев при проектировании такого линейного пьезоэлектрического двигателя является сложное согласование геометрических параметров пьезокерамической пластины, а именно, длины, ширины и толщины, для максимальной передачи энергии его каретке [10]. Некорректный выбор этих параметров существенно влияет на технические характеристики линейного пьезокерамического двигателя.

В работах [11, 12] приводится описание данной конструкции пьезокерамического двигателя, в котором говорится, об «определенном отношении длины к ширине выбранного элемента».

В работах [5, 7-9] приводится лишь одно из возможных соотношений ширины к длине пластины, при котором можно получить приемлемые результаты. При этом не приводится зависимость от изменения ее толщины. В то же время неизвестно, является ли такой выбор близким к оптимальному.

Теоретически возможными являются и иные соотношения ширины к длине пьезоэлемента, при которых достигаются максимальные колебания или близкие к ним.

Анализ технической литературы, научных статей, а также патентов, показал, что в имеющихся работах не рассматривается выбор параметров, а также не представлены зависимости для геометрии пьезокерамической пластины линейного пьезокерамического двигателя, обеспечивающие эффективный режим работы.

Таким образом, определение рациональных параметров пьезокерамической пластины линейного пьезокерамического двигателя является важной и актуальной задачей.

Материалы и методы. Известны математические зависимости для расчета пьезокерамических элементов стандартных форм (пластина, диск, кольцо, брусок и стержень) без наличия мелких конструктивных деталей на них [13].

Определить параметры пьезокерамической пластины (статический сдвиг по длине Δl , ширине Δw и толщине Δh) можно по представленным ниже эмпирическим формулам [13]:

$$\begin{aligned} \Delta l &= \frac{d_{31} \cdot V_l}{h}; \\ \Delta w &= \frac{d_{31} \cdot V_w}{h}; \\ \Delta h &= d_{33} \cdot V; \end{aligned} \quad (1)$$

где Δl – статический сдвиг по длине, Δw – статический сдвиг по ширине, Δh – статический сдвиг по толщине, d_{31} и d_{33} – пьезоэлектрические модули, h – толщина пьезокерамической пластины, V_l , V_w и V – приложенное электрическое напряжение к соответствующей стороне пластины (длине, ширине и толщине).

В то же время применение элементарных методов расчета не позволяет визуализировать форму колебания всего пьезокерамического элемента, а значит, не делает возможным определение приемлемой формы его колебаний.

Учитывая технические особенности пьезоэлектрических двигателей, затрудняющие экспериментальное определение и выбор правильной формы колебаний пьезоэлемента, оптимальным является использование с этой целью численных методов расчета, реализуемых специализированными САПР.

Для исследования влияния конструктивных параметров пьезокерамической пластины линейного пьезоэлектрического двигателя было проведено численное моделирование процесса работы пьезоэлемента с использованием пакета программ COMSOL Multiphysics 3.5.

Интерфейс пьезоэлектрических устройств COMSOL объединяет функции моделирования модулей механики твердого тела и электростатики

COMSOL's Solid Mechanics and Electrostatics в один инструмент для моделирования пьезоэлектрических материалов. Моделирование пьезоэлектрических устройств в COMSOL Multiphysics 3.5 осуществляется при помощи модуля Piezoelectric Effects. Так как работа пьезоэлектрических двигателей основана на обратном пьезоэффекте, поэтому в модуле Piezoelectric Effects выбирается режим Stress-Charge Form.

Пьезоэлектрический элемент характеризуется связью между деформацией и электрическим полем, которая определяется материальными или конститутивными соотношениями [13]:

$$T = c_E S - e^T E; \quad D = e S - \epsilon_S E; \quad (2)$$

где S – деформация, T – механическое напряжение, E – напряженность электрического поля, D – электрическое смещение.

Параметры материала c_E , e и ϵ_S в (2) соответствуют жесткости материала, коэффициенту электро-механической 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 [14].

Для моделирования использовались лагранжевы конечные элементы с элементарными базисными функциями второго порядка – Lagrange-Quadratic.

Анализ линейного пьезокерамического двигателя осуществлялся в режиме Frequency response. Расчетная сетка конечных элементов в пункте «Mesh» выбирается ортогонализированной – Normal. Исследуемая трехмерная модель представлена совокупностью элементов, полученных в результате построения сетки с тетрагональным разбиением. В качестве решателя используется Direct, в котором выбран численный метод SPOOLES для решения систем линейных уравнений с разреженными матрицами.

В качестве материала для моделирования пьезокерамической пластины использовалась марка пьезокерамики – PZT-5Н. Варианты геометрии пьезокерамической пластины представлены параметрами $K=w/l$ в безразмерной форме, полученными отношениями ширины w к её длине l .

На первом этапе моделирования параметр K изменялся от 0,125 до 1,25 с шагом 0,125, при этом толщина оставалась постоянной 3 мм. На этом этапе определялось рациональное соотношение между длиной и шириной пьезокерамической пластины. На втором этапе моделирования при выбранном соотношении параметра K изменялась толщина пьезокерамической пластины от 1 до 6 мм с шагом 1 мм. Геометрические размеры толкателя не изменялись (рис. 2).

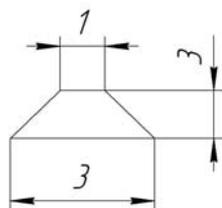


Рис. 2. Размеры толкателя линейного пьезоэлектрического двигателя

Граничные условия для модели пьезоэлектрического двигателя следующие: пьезокерамическая пластина 1 по ширине с обеих сторон 8, 9 (рис. 1) имеет тип граничных условий Roller; электрическое напряжение (Electric potential) 100В приложено к секционированному электроду 5, а земля (Ground) ко всему электроду 3 на противоположной стороне.

При проведении численного моделирования в пакете программ COMSOL Multiphysics сначала определялась частота резонанса, на которой пьезокерамический элемент, а именно толкатель, приобретает колебания эллиптической формы. Динамика эллиптических движений толкателя пьезодвигателя является достаточно сложной и обеспечивается резонансными явлениями, что достаточно подробно описано в [3]. Важным для их реализации является обеспечение режима резонанса, который фиксируется при ступенчатом варьировании частоты управляющего напряжения и проявляется в резком увеличении амплитудных периодических колебаний размеров пьезоэлемента на одной из модельных частот. Ориентировочная резонансная частота приблизительно без учета влияния толкателя может быть определена, пользуясь рекомендациями [15]. В окрестности этой частоты с шагом 100 Гц проводились численные эксперименты с использованием пакета программ COMSOL для определения ее точного значения. Затем, при изменении геометрических размеров пьезокерамической пластины определялась максимальная амплитуда колебания толкателя, и осуществлялся выбор рационального отношения ширины к длине пьезокерамической пластины. В завершение проводились исследования по выбору рациональной толщины пьезокерамической пластины.

Экспериментальные исследования проводились с целью проверки адекватности результатов, полученных при численном моделировании. На рис. 3 показано схематическое представление экспериментального линейного пьезоэлектрического двигателя.

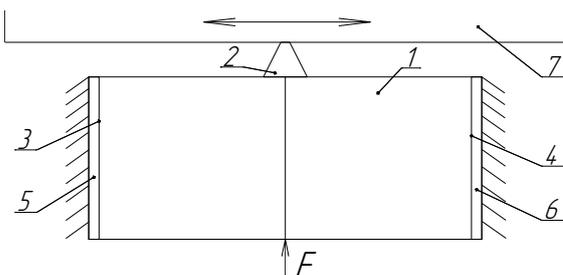


Рис. 3. Схематическое представление экспериментального линейного пьезоэлектрического двигателя

Методика проведения экспериментов заключается в следующем. Пьезоэлектрическая пластина 1 с концентратором 2 закрепляется таким образом, чтобы она была зафиксирована с противоположных сторон по ширине 3, 4 через демфирующие резиновые прокладки 5, 6. Концентратор 2 пьезоэлектрической пластины 1 жестко упирается в направляющую качения (карытку) 7 за счет силы прижатия F , действующей с противоположной стороны и создаваемой пластинчатой пружиной. Сила прижатия может изменяться с помощью регулировочных винтов.

Результаты исследований. Некоторые из результатов численного моделирования колебаний пьезокерамической пластины линейного двигателя представлены на рис. 4, где иллюстрируются колебания пьезокерамической пластины двигателя. На рис. 4 и рис. 6 справа на вертикальной оси приведена цветовая шкала градации амплитуды колебаний геометрических размеров пьезопластины. Значения резонансной частоты колебаний снимаются основываясь на графических изображениях проведенных численных исследований в среде COMSOL Multiphysics в области тол-

кателя. Числовые значения частоты выводятся в окно постпроцессора пакета автоматически и соответствуют максимальной амплитуде колебаний пьезопластины. Таким образом, получаем совокупность значений частот, снятых для различных соотношений геометрических параметров пьезокерамической пластины. Например, частота $f_{theor} = 74,9$ кГц получена при следующих размерах пластины $l = 40$ мм; $w = 20$ мм; $h = 3$ мм. При моделировании размеры пьезокерамической пластины изменялись в диапазоне $w = 10 \div 60$ мм, $l = 10 \div 60$ мм.

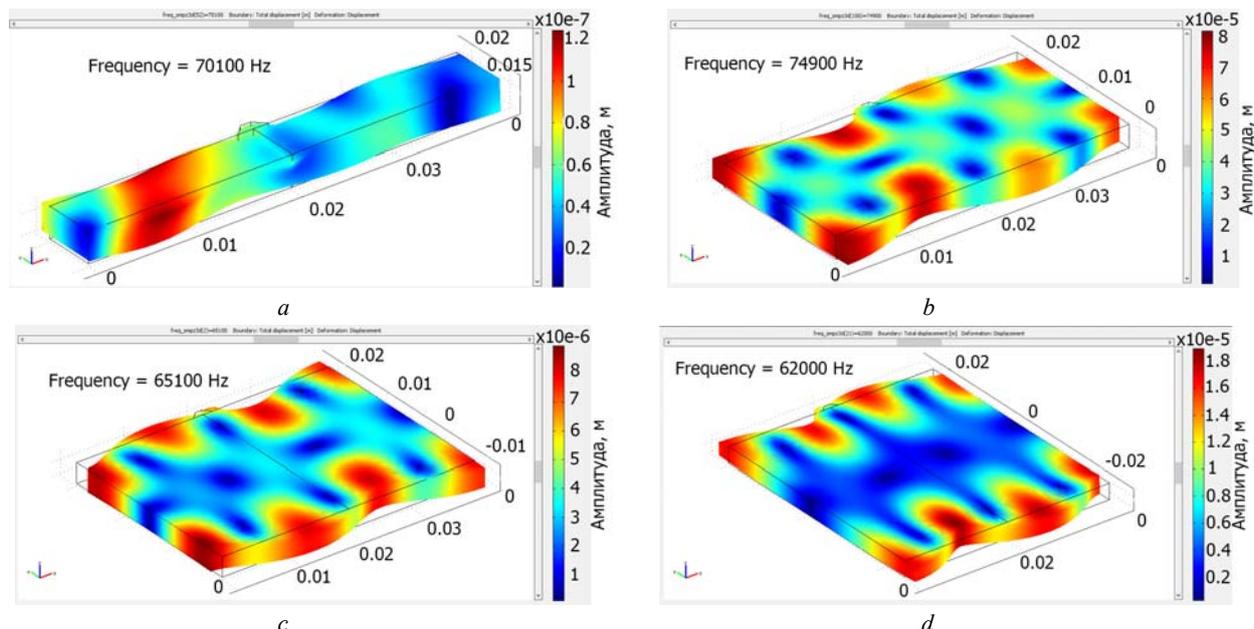


Рис. 4. Некоторые из результатов моделирования амплитудных колебаний пьезоэлемента линейного двигателя с разными отношениями ширины к длине пластины: $a - K = 0,125$; $b - K = 0,5$; $c - K = 0,875$; $d - K = 1,125$

В результате моделирования были определены резонансные частоты, которые соответствуют эллиптической форме колебания толкателя.

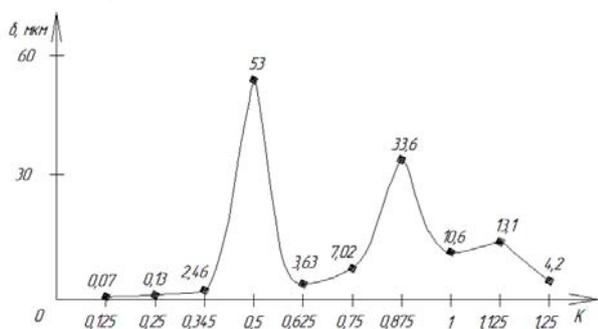


Рис. 5. Зависимость амплитуды колебаний толкателя от параметра K пьезокерамической пластины

Полученные результаты численного моделирования представлены в графическом виде зависимостью амплитуды колебаний толкателя от параметра K пьезокерамической пластины и приведены на рис. 5.

Как видно, из графиков можно выделить два соотношения, при которых достигается максимальная амплитуда толкателя, а именно 53 мкм при $K = 0,5$, а также 33,6 мкм при $K = 0,875$.

Полученная в результате численного моделирования графическая зависимость для амплитуды коле-

баний толкателя была аппроксимирована с применением метода наименьших квадратов функцией полинома второго порядка

$$\delta = \frac{1}{a + bx + cx^2}, \quad (3)$$

где δ – амплитуда колебания толкателя, x – параметр K пьезоэлектрической пластины, $a = 4,074768$, $b = -16,243571$, $c = 16,263542$, $d = 1206,5824$ – коэффициенты.

Эта модель является адекватной в диапазоне изменения параметра K пьезоэлектрической пластины от 0,345 до 0,625.

После выбора геометрии пьезокерамической пластины была определена его рациональная толщина. Для этого при моделировании этот параметр варьировался в диапазоне от 1 до 6 мм с шагом 1 мм.

Некоторые из результатов численного моделирования колебаний пьезокерамической пластины линейного двигателя представлены на рис. 6.

Полученные результаты приведены в графическом виде на рис. 7.

Очевидно, что рациональной толщиной пьезокерамической пластины является 3 мм, при этом амплитуда колебаний толкателя составила 53 мкм, что следует из анализа графических зависимостей, представленных на рис. 5 и рис. 7.

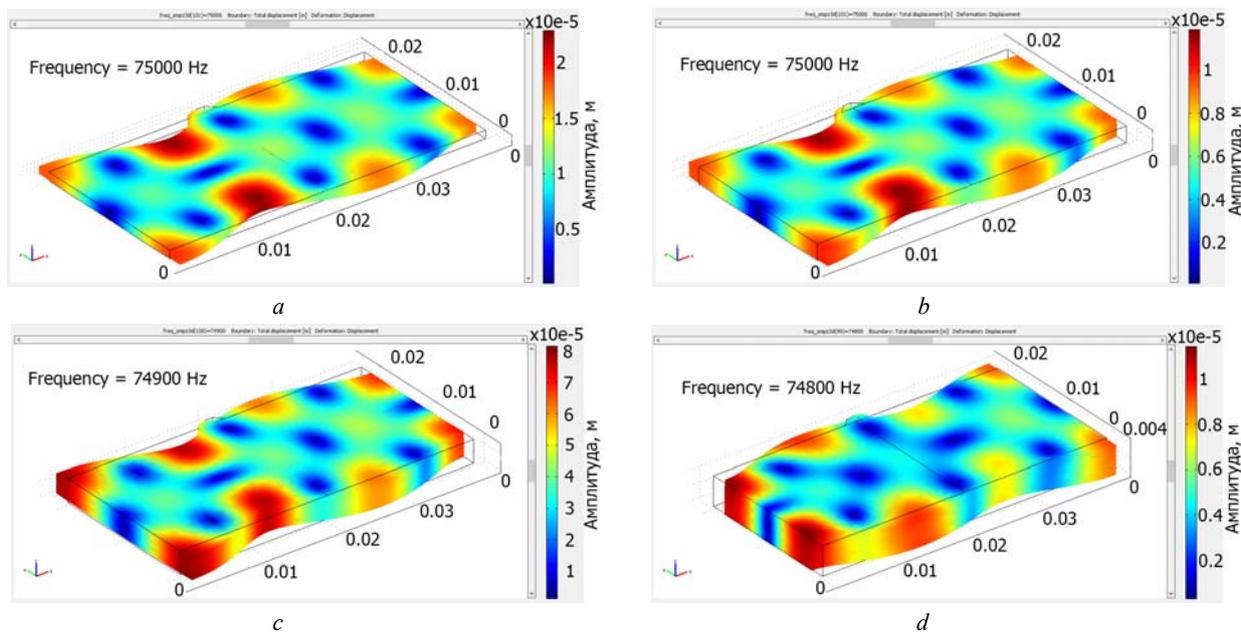


Рис. 6. Некоторые из результатов моделирования амплитудных колебаний пьезопластины линейного двигателя с разной толщиной при постоянном параметре $K = 0,5$: $a - h = 1$; $b - h = 2$; $c - h = 3$; $d - h = 4$

Зависимость, представленная на данном рисунке, была аппроксимирована функцией Гаусса, которая имеет вид:

$$\delta = ae^{-\frac{(h-b)^2}{2c^2}}, \quad (4)$$

где δ – амплитуда колебаний толкателя, h – толщина пьезоэлектрической пластины, $a = 53.247361$, $b = 2.9480015$, $c = 0.50561783$ – коэффициенты.

Эта модель является адекватной в диапазоне изменения толщины пьезокерамической пластины от 2 до 4 мм.

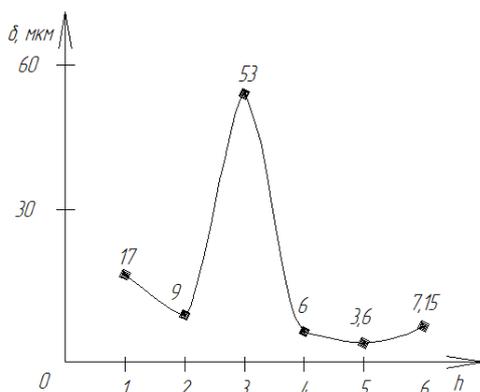


Рис. 7. Зависимость амплитуды колебаний толкателя от толщины пьезокерамической пластины h при параметре $K = 0,5 = \text{const}$

Для выбора рациональных размеров пьезокерамической пластины целесообразно воспользоваться графическими (рис. 5, рис. 7) и аналитическими (3), (4) зависимостями. Руководствуясь графиками по максимальной амплитуде толкателя можно выбрать рациональное соотношение параметров K и толщины h . При необходимости в случае отсутствия пьезокерамики необходимых размеров выбор рациональных размеров K и h может быть осуществлен с использованием аналитических зависимостей. При этом

амплитуда колебаний толкателя выбирается предельно приближенной к максимальной.

По выбранным рациональным размерам пьезокерамической пластины, которые составили $l = 40$ мм; $w = 20$ мм; $h = 3$ мм, был изготовлен экспериментальный образец линейного пьезокерамического двигателя (рис. 8). Исследование его работы в соответствии с описанной ранее методикой подтвердило адекватность определения резонансной частоты и работоспособность двигателя. Экспериментально определенное значение резонансной частоты составило $f_{exp} = 77,2$ кГц, что совпадает с теоретически определенной ($f_{theor} = 74,9$ кГц), при помощи пакета программ COMSOL Multiphysics (рис. 4, b и рис. 6, c), с приемлемой точностью не превышающий 3 %.

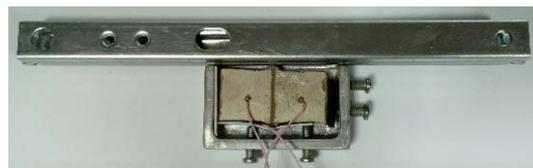


Рис. 8. Экспериментальный образец линейного пьезокерамического двигателя

Выводы.

1. Путем численного моделирования процесса функционирования линейного пьезокерамического двигателя были определены влияние геометрических параметров пьезоэлемента двигателя на его амплитудные характеристики, установлены графические и аналитические зависимости для выбора рациональных их соотношений.

2. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании пьезокерамических линейных двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sharapov V. Piezoceramic sensors. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, 2011. – 498 p. doi: 10.1007/978-3-642-15311-2.

2. Панич А.Е., Жуков С.Н. Пьезоэлектрическое приборостроение. Т.4. Пьезоэлектрические актуаторы. – Ростов-на-Дону: ЦВВР, 2008. – 159 с.
3. Петренко С.Ф. Пьезоэлектрический двигатель. – Киев: Изд-во Корнійчук, 2002. – 96 с.
4. <https://en.wikipedia.org/wiki/Theodolite>.
5. Смирнов А.Б. Мехатроника и робототехника. Системы микроперемещений с пьезоэлектрическими приводами. – СПб: СПбГПУ, 2003. – 160 с.
6. Хмелев В.Н. Источники ультразвукового воздействия. Особенности построения и конструкции. Бийск: АГТУ, 2013. – 196 с.
7. Spanner K., Wishnewskiy O., Vyshnevskyy W. New Linear Ultrasonic Micro motors for Precision Mechatronic Systems // In Proceedings of the 10th International Conference on New Actuators. – Bremen, Germany. – 14-16 June 2006. – pp. 439-443.
8. Yokoyama K., Tamura H., Masuda K., Takano T. Single-Phase Drive Ultrasonic Linear Motor Using a Linked Twin Square Plate Vibrator // Japanese Journal of Applied Physics. – 2013. – vol.52. – no.7S. – p. 07HE03. doi: 10.7567/jjap.52.07he03.
9. Vyshnevskiy O., Kovalev S., Wischnewskiy W. A novel, single-mode piezoceramic plate actuator for ultrasonic linear motors // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. – 2005. – vol.52. – no.11. – pp. 2047-2053. doi: 10.1109/tuffc.2005.1561674.
10. Петренко С.Ф., Филимонов С.А., Филимонова Н.В., Батраченко А.В., Лавданский А.А. Линейный пьезоэлектрический двигатель на основе круговой цилиндрической пластины // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2014. – №2. – С. 48-52.
11. Spanner K., Koc B. Piezoelectric Motors, an Overview // Actuators. – 2016. – vol.5. – no.1. – p. 6. doi: 10.3390/act5010006.
12. Shafik A., Ben Mrad R. Piezoelectric Motor Technology: A Review // Nanopositioning Technologies, 2016, pp. 33-59. doi: 10.1007/978-3-319-23853-1_2.
13. Жуков С.Н. Пьезоэлектрическая керамика: принципы и применение. – Мн.: ООО ФУАуинформ, 2003. – 112 с.
14. Spicci L., Cati M. Ultrasound Piezo-Disk Transducer Model for Material Parameter Optimization // Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference, Paris 2010. Режим доступа: https://uk.comsol.com/paper/download/63120/spicci_paper.pdf.
15. Maslennikova S., Sitnikov A., Mironova I. Calculating the Ultra-Sound Engine Piezoelectric Element Characteristics // Radiooptics Scientific Journal. – 2016. – vol.16. – no.04. – pp. 25-40. doi: 10.7463/rdopt.0416.0847731.
8. Yokoyama K., Tamura H., Masuda K., Takano T. Single-Phase Drive Ultrasonic Linear Motor Using a Linked Twin Square Plate Vibrator. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2013, vol.52, no.7S, p. 07HE03. doi: 10.7567/jjap.52.07he03.
9. Vyshnevskiy O., Kovalev S., Wischnewskiy W. A novel, single-mode piezoceramic plate actuator for ultrasonic linear motors. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2005, vol.52, no.11, pp. 2047-2053. doi: 10.1109/tuffc.2005.1561674.
10. Petrenko S.F., Filimonov S.A., Filimonova N.V., Batrachenko A.V., Lavdanskii A.A. Linear piezoelectric motor based on circular cylindrical plate. *Bulletin of Cherkasy State Technological University. Series: Technical sciences*, 2014, no.2, pp. 48-52. (Rus).
11. Spanner K., Koc B. Piezoelectric Motors, an Overview. *Actuators*, 2016, vol.5, no.1, p. 6. doi: 10.3390/act5010006.
12. Shafik A., Ben Mrad R. Piezoelectric Motor Technology: A Review. *Nanopositioning Technologies*, 2016, pp. 33-59. doi: 10.1007/978-3-319-23853-1_2.
13. Zhukov S.N. *Piezoelktricheskaya keramika: printsipy i primeneniye* [Piezoelectric ceramics: principles and applications]. Minsk, OOO FUAuinform Publ., 2003. 112 p. (Rus).
14. Spicci L., Cati M. Ultrasound Piezo-Disk Transducer Model for Material Parameter Optimization. *Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference, Paris 2010*. Available at: https://uk.comsol.com/paper/download/63120/spicci_paper.pdf (accessed on 20 May 2018).
15. Maslennikova S., Sitnikov A., Mironova I. Calculating the Ultra-Sound Engine Piezoelectric Element Characteristics. *Radiooptics Scientific Journal*, 2016, vol.16, no.04, pp. 25-40. doi: 10.7463/rdopt.0416.0847731.

Поступила (received) 13.07.2018

Гальченко Владимир Яковлевич¹, д.т.н., проф.,

Бондаренко Юлия Юрьевна¹, к.т.н., доц.,

Филимонов Сергей Александрович¹, к.т.н., доц.,

Филимонова Надежда Викторовна¹, к.т.н.,

¹Черкасский государственный технологический университет,

18006, Черкассы, бул. Шевченко, 460,

тел/phone +380 472 710092,

e-mail: halchvl@gmail.com, s.filimonov@chdtu.edu.ua

V.Ya. Halchenko¹, Yu.Yu. Bondarenko¹, S.A. Filimonov¹,
N.V. Filimonova¹

¹Cherkasy State Technological University,

460, Shevchenko Blvd., Cherkasy, 18006, Ukraine.

Determination of influence of geometric parameters of piezoceramic plate on amplitude characteristics of linear piezomotor.

Purpose. The purpose of the paper is to determine the influence of the geometric parameters of the stator of a linear piezoceramic motor in the form of a piezoceramic plate on the characteristics of its amplitude oscillations. **Methodology.** For the research, mathematical modeling in the COMSOL Multiphysics software package was used, taking into account the interrelation of electrostatic and mechanical phenomena. **Results.** By numerical simulation of the process of operating of a linear piezoceramic motor, a rational ratio of the width to the length of the piezoceramic plate is determined. **Originality.** The rational value of the thickness h of the piezoceramic plate of the motor is also established. Approximate dependencies are proposed for determining the parameters of the relationship between the geometric dimensions of the piezoceramic plate of a linear piezomotor, which makes it possible to predict its characteristics. The adequacy of calculation models is confirmed by experimental studies. **Practical value.** The results obtained can be used in the design of piezoceramic motors. References 15, figures 8.

Key words: piezoceramics, piezoceramic motor, piezoceramic plate.

REFERENCES

1. Sharapov V. *Piezoceramic sensors*. Heidelberg, Dordrecht, London, New York, Springer Verlag, 2011. 498 p. doi: 10.1007/978-3-642-15311-2.
2. Panich A.E., Zhukov S.N. *P'ezoelektricheskoe priborostroenie. T.4. P'ezoelektricheskie aktuatory* [Piezoelectric instrument making. T.4. Piezoelectric actuators]. Rostov-on-Don, TsVVR Publ., 2008. 159p. (Rus).
3. Petrenko S.F. *P'ezoelektricheskii dvigatel'* [Piezoelectric motor]. Kiev, Korniiichuk Publ., 2002. 96 p. (Rus).
4. *Theodolite*. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Theodolite> (accessed on 13 July 2018).
5. Smirnov A.B. *Mekhatronika i robototekhnika. Sistemy mikroperemeshchenii s p'ezoelektricheskimi privodami* [Mechatronics and Robotics. Micro-movement systems with piezoelectric drives]. St. Petersburg, SPbGPU Publ., 2003. 160 p. (Rus).
6. Khmelev V.N. *Istochniki ul'trazvukovogo vozdeistviya. Osobennosti postroeniya i konstruktssii* [Sources of ultrasonic action. Features of construction and construction]. Biisk, AGTU Publ., 2013. 196 p. (Rus).
7. Spanner K., Wishnewskiy O., Vyshnevskyy W. New Linear Ultrasonic Micro motors for Precision Mechatronic Systems. *In Proceedings of the 10th International Conference on New Actuators*. Bremen, Germany. 14-16 June 2006, pp. 439-443.