

УДК 681.5.01

DOI 10.22213/2413-1172-2017-3-43-47

И. В. Абрамов, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

А. И. Абрамов, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

Е. М. Фёдоров, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАТРОННОГО ПЬЕЗОМОДУЛЯ ДЛЯ СБОРКИ КОНИЧЕСКИХ КЕРАМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ

### Введение

Современные технические требования, предъявляемые к высокоточным системам, часто предполагают, что исполнительные элементы таких систем должны иметь высокое линейное разрешение при сравнительно большом усилии на силовом передающем элементе. При этом такие системы должны обеспечивать фиксацию положения подвижного звена значительным усилием и обладать высокими динамическими характеристиками, малым временем переходного процесса.

### Выбор конструкции

Основным рабочим элементом установки является линейный пьезодвигатель. Работа двигателя основана на обратном пьезоэффекте [1]. Установка работает в микрометровом диапазоне исходя из требований сборки малоразмерных конических керамических соединений. Выполнен анализ базовых конструкций, которые заложены в основу большинства современных пьезодвигателей. К ним относятся:

- составная пакетная конструкция;
- биморфная конструкция;
- дифференциальная конструкция.

Пьезодвигатель пакетной конструкции может развивать большие усилия и служит для линейных микроперемещений объектов с достаточно большой массой [2].

Биморфная конструкция используется для увеличения диапазона линейных перемещений и получения угловых перемещений объектов небольшой массы. Конструктивной основой таких двигателей являются изгибные пьезоактуаторы [3].

Дифференциальная конструкция применяется в тех случаях, когда необходимо компенсировать температурную погрешность (тепловое расширение рабочего элемента) и увеличить диапазон перемещений без существенного увеличения величины управляющего напряжения и габаритов двигателя. Такая конструкция может быть построена как на элементах пакетного типа, так и на биморфных элементах [4].

Сравнительный анализ конструкции линейного пьезодвигателя показал целесообразность применения в мехатронной установке пакетной концепции. Для повышения механической устойчивости всей системы была разработана и применена пакетно-модульная конструкция, которая состоит из  $m$  модулей по  $n$  колец в каждом, с начальной длиной  $l_0$  и площадью сечения  $S_0$ .

Длина  $i$ -го модуля под действием электрического напряжения  $U$  изменяется на величину  $\Delta l_i$ . Для повышения механической жесткости пьезомодуль, защищенный термоусадочной трубкой, помещен в упругий корпус, в котором предусмотрена возможность его предварительного сжатия. Каждый пьезомодуль сформирован склеиванием с использованием токопроводящего клея, поверхностей через медные электроды, соединенных механически последовательно, а электрически – параллельно. Электрическая связь выполнена напылением меди по тонкопленочной технологии в установке магнетронного напыления либо лужением и пайкой выступающих концов. Для исключения короткого замыкания в каждом пьезомодуле применена изоляционная рубашка, изготовленная из резинового пластика на 3D-принтере. С целью оптимизации управляющего напряжения выбрана толщина пьезоэлемента 0,72 мм.

Кроме объекта перемещаются элементы объема активной части пакета, масса которого  $m_k$ . Учитывая то, что пакет одним концом закреплен и некоторая его часть не принимает участие в движении, обычно принимают во внимание суммарную приведенную массу [5].

На рис. 1 представлена конструкция установки сборки конических соединений с натягом.

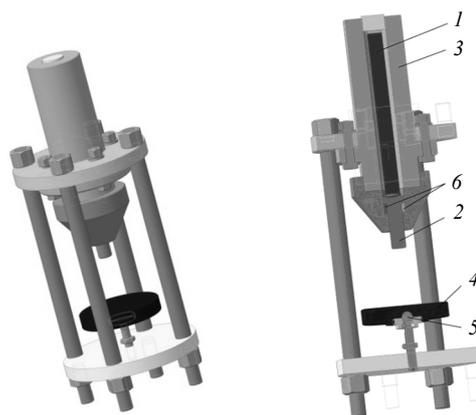


Рис. 1. Конструкция установки сборки конических соединений с натягом

Пьезопакет 1 состоит из 6 моделей по 25 пьезодисков в каждом и силовом передающем элементе 2. Пьезопакет 1 устанавливается в корпус 3, упираясь одним концом в датчик силы, другой конец под-

пружинен тарельчатой пружиной  $b$  для обеспечения предварительного сжатия пакета. Силопередающий шток  $2$  воздействует на модуль запрессовки, расположенный на столике  $4$ , который имеет шаровую опору  $5$  для компенсации перегиба во время запрессовки. Конструкцией предусмотрен встроенный датчик силы. Работа датчика основана на прямом пьезоэффекте [6]. Конструктивно датчик силы выполнен из пьезокерамических дисков, электроды которых соединены электрически параллельно, а суммарный сигнал подведен к АЦП-входу микроконтроллера.

Данная установка развивает усилие до 400 Н и служит для сборки конических керамических соединений с осевым натягом до 100 мкм. Запрессовка выполняется с микрометровой точностью. Частотный диапазон двигателя ограничен собственным электромеханическим резонансом, величина которого зависит от присоединенной массы. Высота рабочей зоны 40 мм.

### Система управления

Для установки сборки конических керамических соединений с натягом разработана система управления, структурная схема которой представлена на рис. 2.

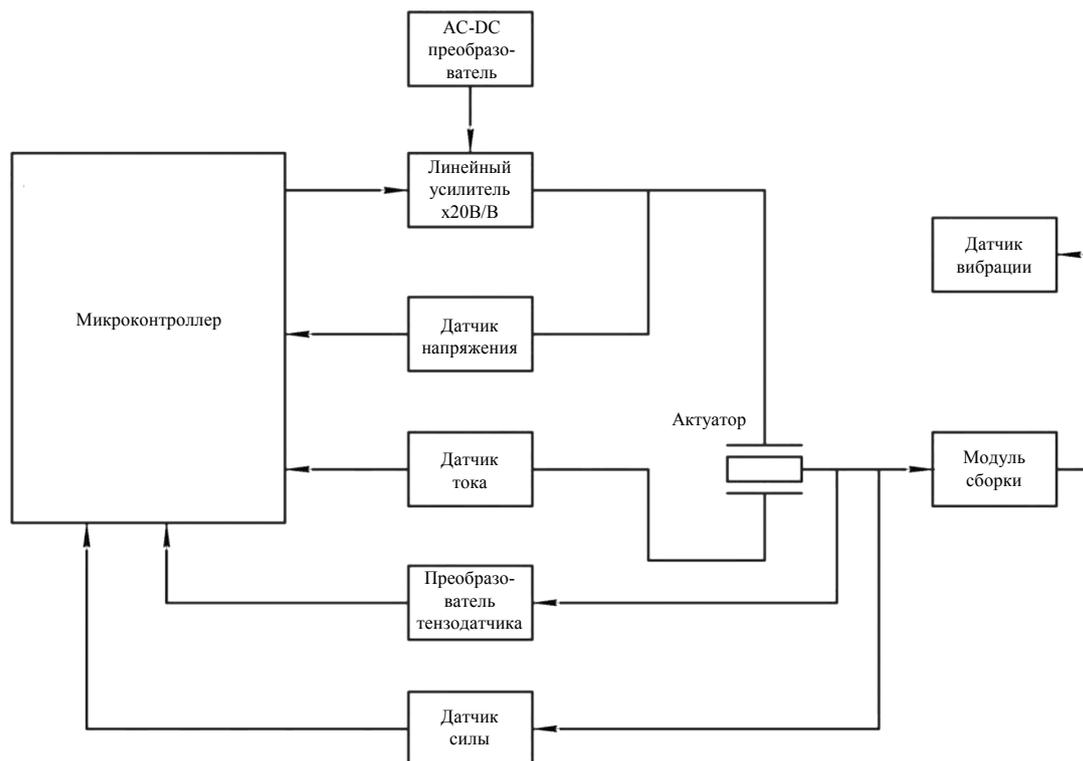


Рис. 2. Структурная схема системы управления установки сборки конических соединений с натягом

Система основана на базе микроконтроллера, оснащенного программным обеспечением, 4 АЦП, ЦАП, USB-портом, выполняющим функции ядра управления с петлей обратной связи и генератора сигналов. Для коррекции управляющих сигналов предусмотрена обратная связь с мониторингом па-

раметров процесса на основе датчиков перемещения, силы, тока и напряжения.

### Математическая модель системы управления

В таблице приведены параметры пьезодвигателя, обеспечивающие при подаче переменного напряжения 400 В перемещение 100 мкм.

### Параметры пьезодвигателя

| Параметр                    | Обозначение | Значение                            |
|-----------------------------|-------------|-------------------------------------|
| Длина                       | $L_0$       | 120 мм                              |
| Площадь поперечного сечения | $S_0$       | $78,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$    |
| Коэффициент усиления        | $K_u$       | 820                                 |
| Внутреннее сопротивление    | $R_{вн}$    | 100 Ом                              |
| Емкость пьезоэлемента       | $C_0$       | 0,217 мкФ                           |
| Пьезомодуль                 | $d_{33}$    | $410 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/Н}$   |
| Модуль Юнга                 | $Y$         | $58 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$       |
| Коэффициент упругости       | $K_y$       | $37,94 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$      |
| Коэффициенты пьезоэффекта   | $K_p$       | $15,556 \cdot 10^{-3} \text{ Кл/м}$ |
| Количество пьезодисков      | $n$         | 150                                 |
| Высота пьезоэлемента        | $h$         | 0,72 мм                             |

Математическая модель системы [7], представленная на рис. 3, включает механическую и электрическую составляющие. Условно ее можно разделить на две части:

1) электрическая, в которую входят аperiodическое звено первого порядка, учитывающее инерционность устройства усиления двигателя,  $K_o$  – обрат-

ный пьезоэффект и  $K_n$  – обратное влияние прямого пьезоэффекта;

2) механическая, учитывающая механическую инерционность двигателя с нагрузкой (первый интегратор), переход от скорости к перемещению (второй интегратор) и упругие свойства пьезопакета с демпфированием (элемент обратной связи).

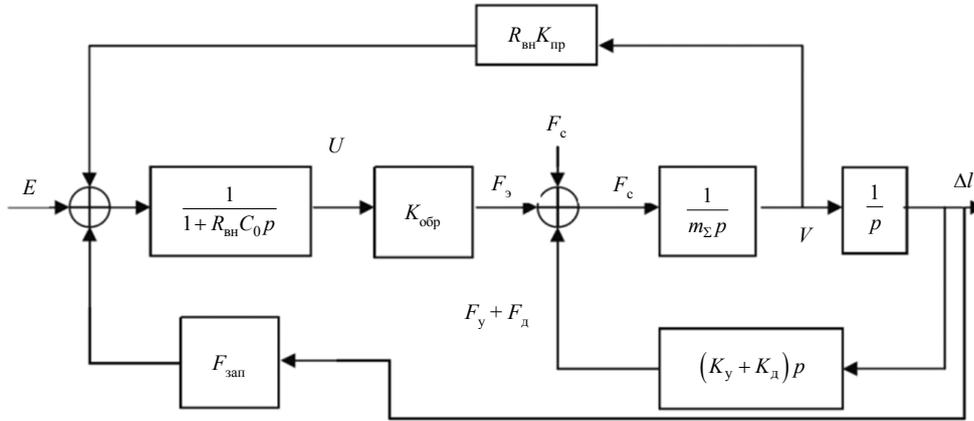


Рис. 3. Математическая модель системы управления установки сборки конических соединений с натягом

Введем следующие обозначения:

$K_n = K_{удп}$  – коэффициент прямого пьезоэффекта;

$K_o = K_{удо}$  – коэффициент обратного пьезоэффекта;

$V = d\Delta l/dt$  – скорость перемещения объекта;

$U = E l_0$  – напряжение управления пьезопакетом;

$C_0$  – емкость пьезопакета;

$R_{вн}$  – внутреннее сопротивление источника управляющего напряжения;

$T_3 = C_0 R_{вн}$  – электрическая постоянная времени, с.

Передаточная функция для такой системы будет иметь вид

$$W(p) = \frac{\Delta l(p)}{U(p)} = \frac{K_d/K_y}{1 + c_1 p + c_2 p^2 + c_3 p^3}, \quad (1)$$

где

$$c_1 = R_{вн} C_0 + \frac{K_d}{K_y} + R_{вн} K_{пр} \frac{K_d}{K_y},$$

$$c_2 = \frac{m_\Sigma}{K_y} + R_{вн} C_0 \frac{K_d}{K_y},$$

$$c_3 = R_{вн} C_0 \frac{K_o}{K_y}.$$

Если пренебречь внутренней обратной связью по скорости ( $K_n = 0$ ), влиянием внутреннего демпфирования ( $K_d = 0$ ) и инерционностью преобразователя ( $T_3 = 0$ ), то выражение примет вид передаточной функции консервативного звена:

$$W(p) = \frac{K_o/K_y}{1 + (m_\Sigma/K_y) p^2}. \quad (2)$$

Условие равновесия сил можно представить в виде

$$F_y = F_3 + F_c + F_d + F_{дин} + F_{зап}, \quad (3)$$

где  $F_y = K_y \Delta l$  – усилие упругой деформации пьезопакета, Н;

$F_3 = d_3 Y S_0$  – усилие в пакете, вызванное приложенным электрическим полем, Н;

$F_c$  – статическое усилие, приложенное к объекту управления, Н;

$F_d = -K_d d\Delta l/dt$  – демпфирующее усилие в пакете, Н;

$F_{дин} = -m_\Sigma d^2 \Delta l/dt^2$  – динамическое усилие в пакете, Н;

$F_{зап}$  – усилие запрессовки, Н;

$K_y = Y S_0 / l_0$  – коэффициент упругости пакета, Н/м;

$K_d$  – коэффициент внутреннего демпфирования, кг/с.

В математической модели предусмотрена обратная связь по перемещению и по силе [8, 9, 10], необходимая для автоматизации управления работой пьезодвигателя и обеспечения качества сборки конических керамических соединений с натягом.

Учитывая большой диапазон параметров пьезоматериалов, наилучшее совпадение динамических характеристик модели и реального двигателя получается для экспериментально определенных параметров  $m_\Sigma$ ,  $K_y$ ,  $K_{пр}$ ,  $K_{обр}$ ,  $C_0$ ,  $R_{вн}$  [11].

На рис. 4 представлена схема моделирования пьезодвигателя в программном продукте Simulink.

Данная модель позволяет построить переходные характеристики для пакетно-модульной и моноблочной конструкции пьезодвигателя.

На рис. 5 приведен график переходного процесса пакетно-модульного пьезодвигателя.

Для сравнения проведено моделирование моноблочного пьезоэлемента (размеры эквивалентны пакетно-модульному). График переходного процесса представлен на рис. 6.

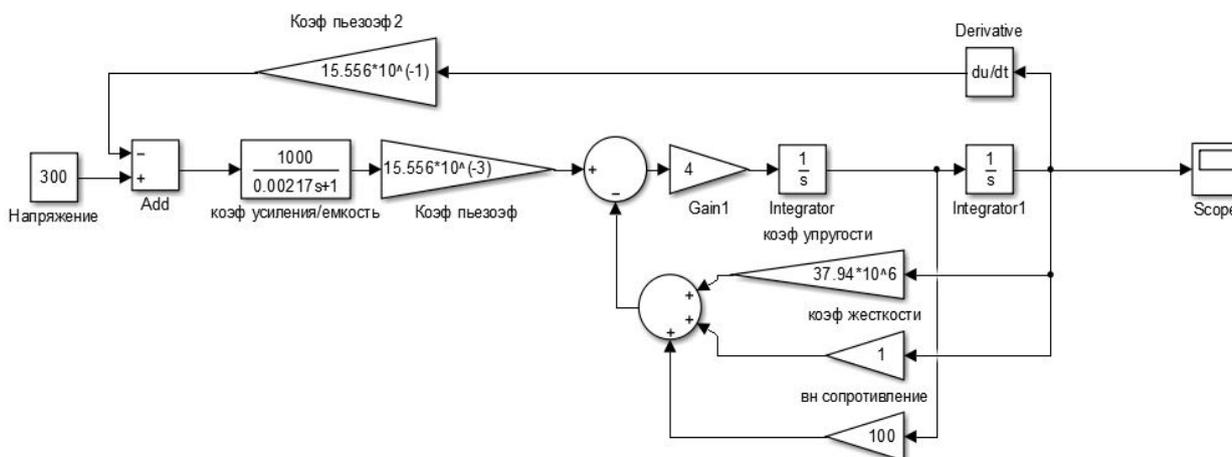


Рис. 4. Математическая модель пьезодвигателя в программном продукте Simulink



Рис. 5. График переходного процесса пакетно-модульного пьезодвигателя в программном продукте Simulink

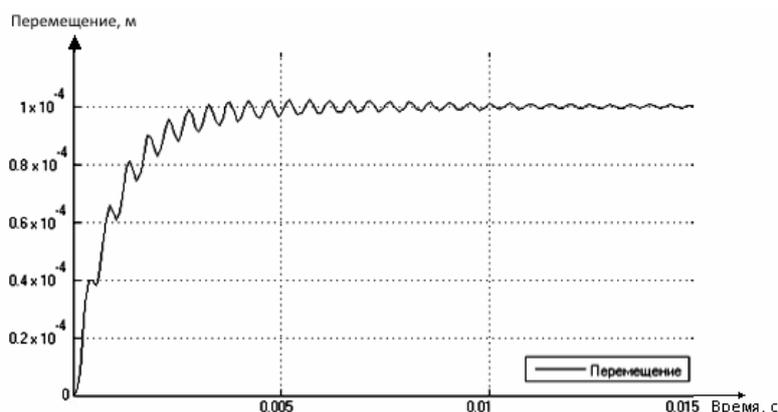


Рис. 6. График переходного процесса для модели моноблочного пьезодвигателя

Сравнительный анализ переходных процессов показывает, что пьезоэлемент моноблочной конструкции достигает перемещения 100 мкм за 0,006 с, а пакетно-модульная конструкция – за 0,013 с. Амплитуда колебаний пакетно-модульной конструкции существенно меньше, чем у элемента. Это объясняется нали-

чием клеевых и медных прослоек между дисками, которые оказывают демпфирующее действие. Полученные при моделировании данные о передаточной функции, блокирующей силе и системе управления следует учитывать при разработке технологии сборки малоразмерных конических соединений.

Таким образом, пакетно-модульная конструкция имеет более плавный переходный процесс, что делает эту конструкцию предпочтительной для запрессовки малоразмерных конических соединений из хрупких материалов.

#### **Заключение**

Для сборки малоразмерных конических керамических соединений с натягом была разработана мехатронная установка с использованием пакетно-модульного пьезоактуатора с обратной связью по силе и перемещению, обеспечивающая необходимую точность регулирования осевого натяга и компенсацию гистерезиса. Проведенное моделирование пакетно-модульного и моноблочного пьезоактуаторов и полученные характеристики переходных процессов, а также необходимая точность реализации техпроцесса [12, 13] подтверждают целесообразность применения пакетно-модульного актуатора для сборки малоразмерных керамических конических соединений.

На основании уравнения равновесия, учитывающего внутренние характеристики пьезоактуатора и силу запрессовки, определены величина рабочего напряжения, подаваемого на пьезодвигатель, а также сила, необходимая для подбора пружины предварительного нагружения.

#### **Библиографические ссылки**

1. *Петренко С. Ф.* Пьезоэлектрический двигатель в приборостроении. – Киев : Корнійчук, 2002. – 96 с.

Получено 05.05.2017

2. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений / А. А. Бобцов, В. И. Бойков, С. В. Быстров, В. В. Григорьев. – СПбГУ ИТМО, 2011. – 131 с.

3. Там же.

4. Там же.

5. *Петренко С. Ф.* Указ. соч.

6. Там же.

7. Там же.

8. Высоконапряженные соединения с гарантированным натягом / И. В. Абрамов, Ф. Ф. Фаттиев, В. А. Дулотин [и др.]. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2002. – 300 с.

9. Теория и технология гидрессовых соединений : монография / А. В. Щенятский, И. В. Абрамов, Э. В. Соснович [и др.]. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2012. – 496 с. : ил. – (Монографии ИжГТУ).

10. Совершенствование конических гидропрессовых соединений бумагоделательных машин / А. В. Щенятский, Э. В. Соснович, В. А. Дулотин [и др.] // Хим. и нефтегазовое машиностроение. – 2002. – № 11. – С. 7–9.

11. *Петренко С. Ф.* Указ. соч.

12. *Абрамов И. В., Лекомцев П. В., Трефилов Н. А.* Компьютерные исследования нагрузочной способности конического соединения с натягом с деталями из хрупких неметаллических материалов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2015. – № 2(26). – С. 44–51.

13. *Лекомцев П. В., Абрамов И. В.* Исследование нагрузочной способности конического соединения деталей из пары материалов «техническая керамика – стекло» // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке [Электронный ресурс] : электронное научное издание : сб. материалов III Всерос. науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и молодых ученых с междунар. участием (Ижевск, 22-23 апреля 2015 г.) / ИжГТУ имени М. Т. Калашникова ; ИННОВА-2015. – С. 193–200. – ISBN 978-5-9906108-6-6.