

УДК 537.2.228

**В.К. Казаков, В.Г. Никифоров, А.Е. Панич, А.Я. Сафронов,
В.А. Чернов**

СОВРЕМЕННЫЕ МНОГОСЛОЙНЫЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АКТЮАТОРЫ. МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ ПАРАМЕТРОВ АКТЮАТОРОВ В СТАТИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМАХ

В [1-5] подробно описаны конструкции, технология изготовления и основные параметры многослойных актюаторов, а также области их применения. Данная статья является продолжением публикаций о современных многослойных актюаторах.

Зависимость основных эксплуатационных параметров актюаторов от их конструктивных параметров и режимов включения описываются в статическом режиме аналитическими соотношениями при линейной аппроксимации значений конструктивных параметров [1-3], включая свойства пьезокерамического материала, из которого изготовлен актюатор. Эти соотношения позволяют рассчитать его основные параметры с удовлетворительной точностью $\pm(10 - 15)\%$.

Измерения основных параметров актюаторов проводятся, как правило, также в статическом режиме и эти данные приводятся в документации. Однако в настоящее время расширяется сфера применения актюаторов в современных системах контроля и управления, работающих в динамических режимах.

Параметры актюаторов в динамическом (импульсном) режиме зависят не только от параметров актюаторов, определяемых свойствами пьезокерамического материала, но также определяются согласованием источника питания с нагрузочными параметрами актюатора и конструктивным элементом, на который он воздействует. Реальные параметры могут быть определены в составе аппаратуры, однако учитывая, что длительность одиночного управляющего импульса весьма мала (единицы мкс), а вызываемые деформации составляют доли микрона, прямые измерения параметров деформации сталкиваются со значительными трудностями. Кроме того, натурное моделирование требует больших материальных затрат и значительного времени, поэтому задачи математического моделирования актюаторов с учетом их работы на конкретную нагрузку являются актуальной задачей.

На основе анализа существующих методов математического моделирования был выбран программный комплекс ANSYS, проводящий моделирование методом конечных элементов. Этот метод оптимален для расчета статических и динамических задач электроупругости (т.е. связанных задач пьезоэлектричества и акустики) для составных областей, описывающие пьезоэлектрические, упругие и акустические среды [6]. К данному семейству относятся практически все пьезоэлектрические изделия, включая актюаторы.

В ходе исследования были проведены расчеты с целью выявления влияния конструкций и свойств материалов на характеристики актюаторов. Большинство моделей аттестовано путем сравнения расчетных и экспериментальных характеристик. Показано, что в большинстве случаев расхождения лежат в интервале $(\pm 5 - 15)\%$. Иллюстрации и сравнительные данные приведены ниже.

На первом этапе выполнения работы были проведены расчеты и моделирование работы актюатора типа АМП-010х04х10 в соответствии с математической моделью на базе ANSYS, целью которых было определение смещения его рабочей поверхности в зависимости от режимов включения. В первоначальном варианте расчету подвергался только актюатор с целью определения смещений его рабочей поверхности, при этом актюатор имел отдельные плюсовые электроды, сигнал возбуждения на которые мог подаваться со сдвигом по фазе. В процессе модели-

рования было установлено, что величина смещения рабочей поверхности не зависит от формы возбуждающего импульса (прямоугольный или трапецеобразный) и от сдвига фаз между управляющими сигналами, поэтому в дальнейшем перешли к более простой схеме актюатора с одним входом.

Этот тип актюатора предназначен для работы в составе лазерного затвора для оптических дальномеров. Эскиз затвора, поясняющий механизм его работы, приведен на рис. 1.

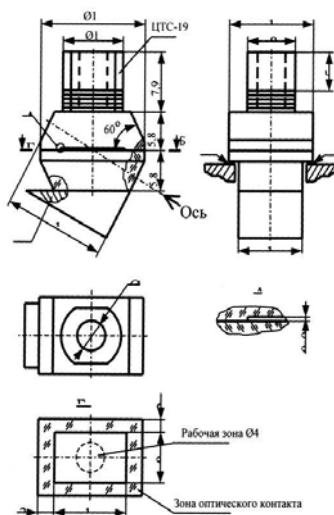


Рис. 1. Оптический затвор с актюатором

Оптический затвор состоит из актюатора, жестко закрепленного на оптической части и самой оптической части, установленной на корпусе затвора.

Оптическая часть состоит из 2-х полупризм и оптической пластины. Между верхней полупризмой и оптической пластиной имеется зазор толщиной 0,35 мкм. При наличии зазора луч распространяется по оптической оси и отражается от границы раздела между оптической пластиной и зазором внутри оптической пластины по закону полного внутреннего отражения и выходит через левую часть нижней полупризмы. К нижней части нижней полупризмы приклеен призматической оптический компенсатор, гасящий отраженный луч. Весь затвор закреплен при помощи клея по боковым сторонам оптической пластины на основании прибора.

При подаче на управляющие электроды актюатора возбуждающего импульса он деформируется, волна деформаций проходит в оптическую часть затвора, что приводит к смыканию щели между полупризмой и оптической пластиной и срабатыванию затвора.

При смыкании зазора под воздействием механических деформаций, вызываемых актюатором, луч проходит насквозь через зазор и выходит через левую часть верхней полупризмы. Условием срабатывания затвора является сомкнутость зазора на пятне диаметром 4 мм в рабочей зоне.

С целью выявления механизма взаимодействия актюатора с оптической частью было проведено моделирование проходящих процессов с использованием метода конечных элементов и соответствующее моделирование конструктивных параметров актюаторов в импульсном режиме.

В результате решения конечно-элементной задачи были получены деформации актюатора и оптического затвора в разных зонах и в разное время после воздействия возбуждающего импульса. Пример деформаций приведен на рис. 2.

В различных вариантах решения задачи изменялись напряжение и длительность возбуждающего импульса, количество и толщина пьезоэлементов, материал актюатора, диаметр актюатора и центрального отверстия. На основании результатов математического моделирования исходная конструкция была изменена с целью улучшения рабочих характеристик затвора, что позволило определить параметры изделия:

- материал актюатора – НЦТС-1;
- количество активных слоев – 16;
- толщина слоя – 0,5 мм;
- диаметр внутреннего отверстия – 3,6 мм;
- напряжение срабатывания затвора – 100В.

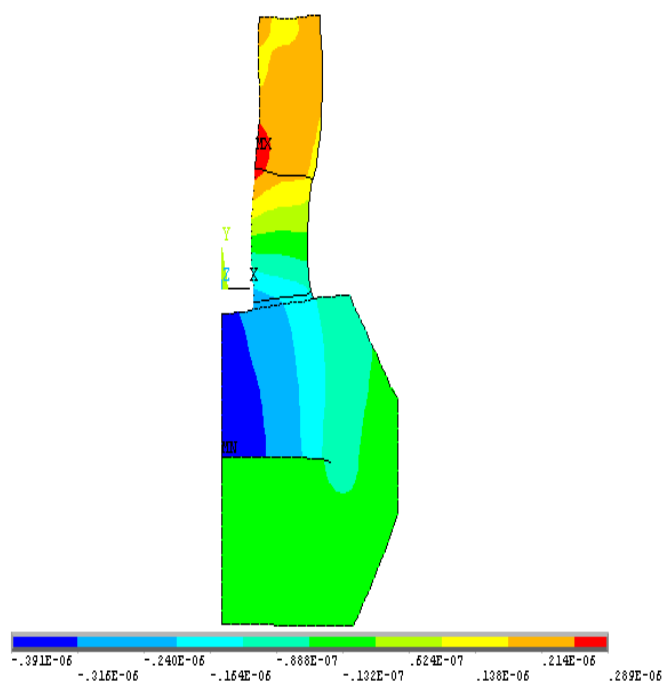


Рис. 2. Деформация актюатора и оптического затвора через 2,5 мкс после подачи возбуждающего импульса.

Результаты расчета деформаций поверхности актюатора и точки на поверхности щели затвора приведены на рис. 3.

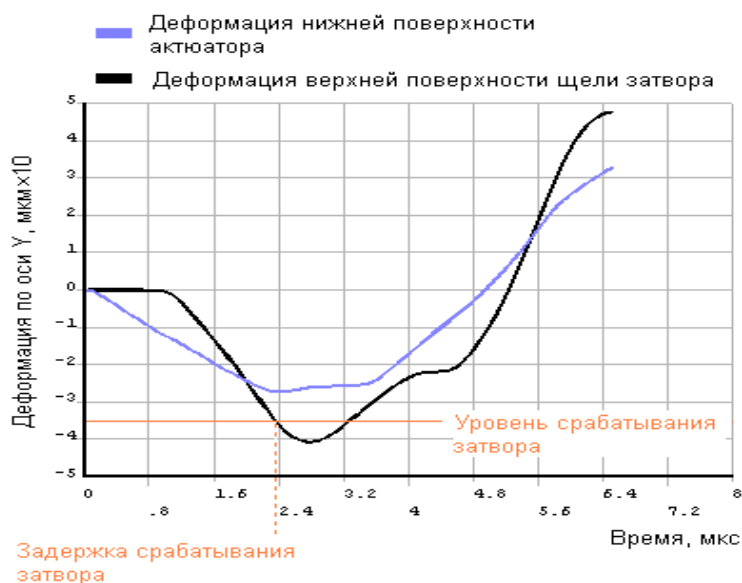


Рис. 3. Деформации поверхности актюатора и точки щели затвора

Как видно из приведенных графиков, величина деформации поверхности щели оптического затвора превышает величину деформации нижней поверхности актюатора на 32%, что связано с разными условиями нагружения и разницей упругих свойств стекла и керамики.

В качестве второй задачи моделирования было избрано построение модели многослойного актюатора размерами 060x020x20 мм, который работает при переменном напряжении питания с амплитудой 500 В. Исследовалась зависимость перемещения актюатора от частоты и величины предварительного сжатия, который предназначен для перемещения массивных тел в низкочастотном диапазоне.

Схематичный чертеж актюатора приведен на рис. 4.

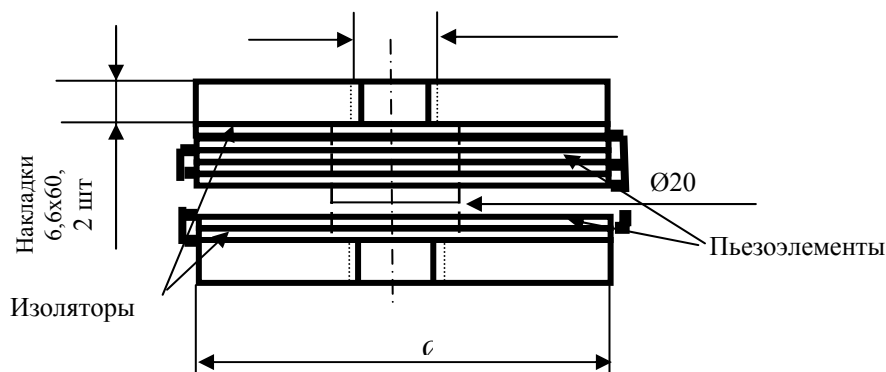


Рис. 4. Актюатор $\varnothing 60 \times \varnothing 20 \times 20$ мм

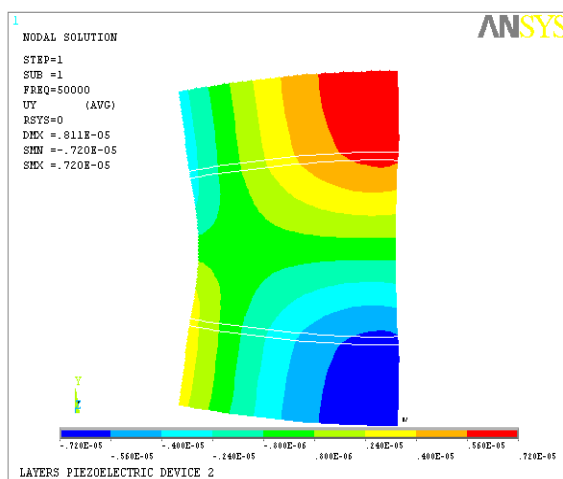
В результате проведенных расчетов было установлено:

1. Резонансная частота актюатора составляет 50 кГц, т.е. данные актюаторы можно использовать вплоть до частот 20 – 25 кГц.

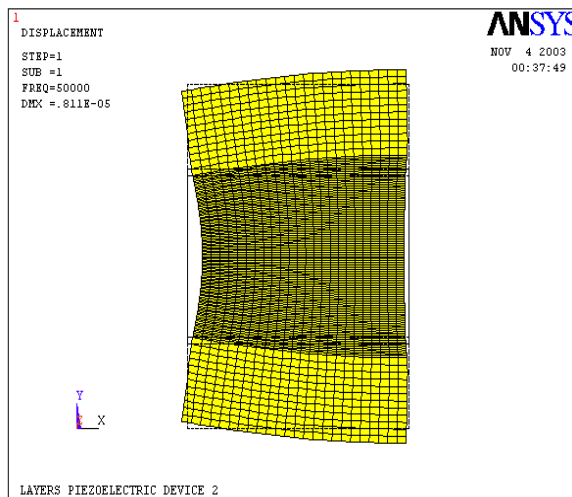
2. Амплитуда перемещения актюаторов мало зависит от величины предварительного сжатия по вертикальной оси, а именно приложение статического усилия в 5000 Н уменьшает амплитуду колебаний на 22,2%.

3. Перемещения верхней части актюатора не строго вертикальны (рис. 5), а имеют изгибную составляющую.

Наличие этой составляющей связано с металлическими накладками на торцах пакета, которые не деформируются по радиусу, а только растягиваются за счет приложения к ним внешних усилий. Деформации и напряжения в слоях актюатора приведены на рис. 6.



а



б

Рис. 5. Перемещения верхней части актюатора

Результаты расчетов максимальных значений амплитуды перемещений по осевой переменной $2y$ при частоте 50 кГц в зависимости от величины силы предварительного сжатия сведены в табл. 1.

Таблица 1

Величина силы сжатия (Н)	Перемещение \bar{b} (мкм)
0	7,2
100	7,17
500	7,04
1000	6,88
5000	5,61

Величина максимального смещения незакрепленного актюатора при сжатии 500 Н составляет 7,04 мкм.

В качестве следующей задачи был проведен расчет многослойных актюаторов размерами $6 \times 6 \times N$, где N – число элементарных блоков размерами $6 \times 6 \times 2,7$ мм.

Расчет проводился в трехмерной постановке с вычислением деформации многослойного актюатора под действием заданной разности потенциалов и давления на верхнем торце. Для конструкции квадратного сечения для сокращения времени счета и минимизации машинных ресурсов рассматривалась четвертая часть актюатора по сечению, а на соответствующих гранях ставились условия симметрии (такая постановка эквивалентна расчету полной конструкции).

Для построения блочных конструкций применены операции циклических построений слоев по числу слоев в блоке. Фрагмент конструкции актюатора приведен на рис. 6 при $N=16$.

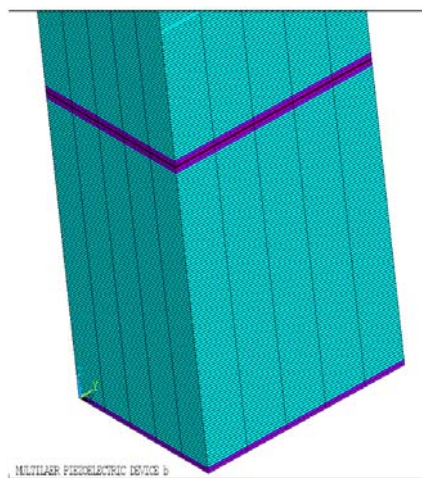


Рис. 6. (Увеличенный масштаб) показано используемое конечно-элементное разбиение на части актюатора, причем разным цветом показаны конечные элементы с разными свойствами

Формирование многослойной конструкции в программе производится автоматически, как и задание электродов на поверхности пар встречно-поляризованных слоев. Фрагмент распределения электрического потенциала на части конструкции показан ниже на рис. 7.

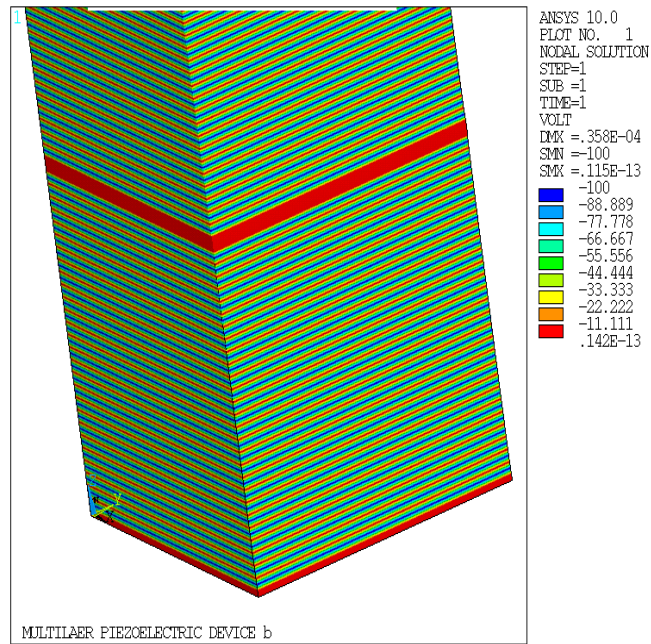


Рис. 7. Фрагмент распределения электрического потенциала

В результате расчетов по умолчанию в программах в постпроцессоре выводится распределение осевых перемещений. Значения осевого перемещения в центральной точке актюатора приведены на рис. 8.

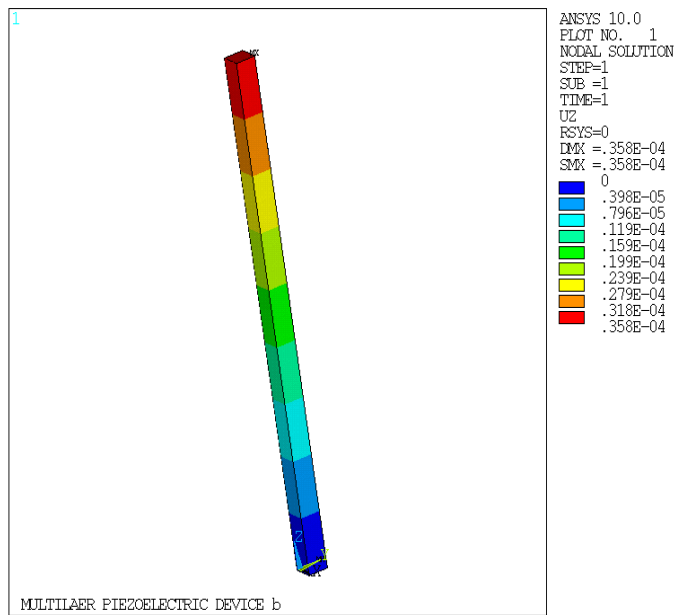


Рис. 8. Осевые перемещения актюатора

Результаты расчетов осевого смещения в верхней центральной точке актюатора при $N=16$, $U=100$ В для различных значений сил приведены в табл. 2.

Таблица 2

№	U, (В)	F, (Н)	Z, мкм
1	100	0	35,83
2	100	1000	6,4
3	100	2000	-23,02

Аналогичные результаты для актюаторов с меньшим числом блоков $N=9$, $Z=100$ В для различных сил приведены в табл. 3.

Таблица 3

№	U, (В)	F, (Н)	Z, мкм
1	100	0	14,66
2	100	1000	2,82
3	100	2000	-9,41

Отметим: из табл. 2 и 3 видно, что при $F=0$ осевые смещения фактически совпадают с ожидаемыми: 37 мкм для табл. 2 и 15 мкм для табл. 3. Значение силы, компенсирующей подаваемую разность потенциалов в 100 В и обеспечивающую нулевое смещение верхнего торца, равно приблизительно 1235 Н.

На основании расчетов были изготовлены актюаторы типа АПМ-6, состоящие из блоков в количестве 16 шт., количество пьезокерамических слоев в блоке 54, толщина слоя 50 мкм и проведены исследования перемещения и усилия при напряжении 50 и 100 В.

На рис. 9 и 10 представлены результаты расчета и экспериментальные данные характеристик многослойных пьезокерамических актюаторов.

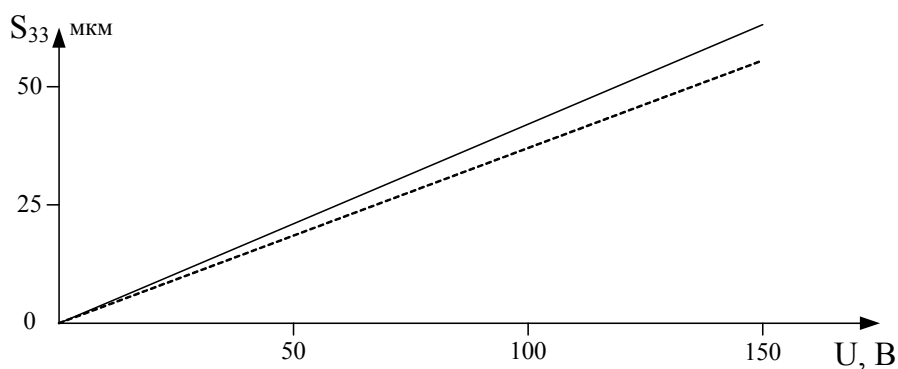


Рис. 9 Расчетная и экспериментальная зависимость перемещения многослойного актюатора $6 \times 6 \times 40$ мм ($N=16$) от напряжения:
 _____ расчетная; ----- экспериментальная

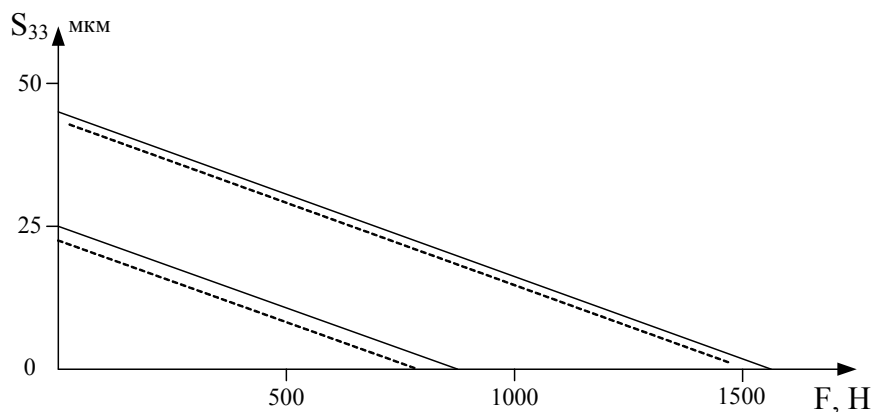


Рис. 10. Расчетная и экспериментальная зависимость перемещения Z и развиваемого усилия (F) многослойного актюатора при напряжениях $+50$ и $+100$ В

Как видно из приведенных данных, расчетные характеристики совпадают с измеренными с точностью $\pm 10\%$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сафронов А.Я., Климашин В.М., Парфенов Б.Г., Ярошевич В.А., Никифоров В.Г. Пьезокерамические пакетные и моноблочные актюаторы. Компоненты и технологии. –2002. – №6. – С. 26-28.
2. Waanders W. Piezoelectric Ceramics (Properties and Applications) Eindhoven - The Netherlands 4-91.
3. Пьезоэлектрическая керамика: принципы, применение. – Минск: ООО «ФУ Аинформ», 2003.
4. Казаков В.К., Сафронов А.Я., Климашин В.М., Никифоров В.Г., Чернов В.А. Многослойные пьезоэлектрические актюаторы и особенности их применения. Компоненты и технологии. –2007. –№6. – С.62-65.
5. Казаков В.К., Сафронов А.Я., Никифоров В.Г., Чернов В.А. Актюаторы для оптических затворов и методы измерений их характеристики. Нано- и микросистемная техника. –2007. –№10. – С. 52-55.
6. Беляков Ю.Н., Наседкин А.В., Сафронов А.Я. Опыт моделирования работы пьезоэлектрических устройств с использованием конечно-элементного пакета от вычислительных экспериментов до стандартизации технологии основных этапов расчетов. Материалы международной научно-практической конференции «Фундаментальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения». Пьезотехника – 2003, 26-29 ноября 2003г. – М., 2003. – С. 219-224.