

Многослойные пьезоэлектрические актюаторы и особенности их применения

Владимир КАЗАКОВ
Виталий КЛИМАШИН
Виктор НИКИФОРОВ
Алексей САФРОНОВ
Владимир ЧЕРНОВ
info@elpiezo.ru

Пьезоэлектрические актюаторы уверенно завоевывают области техники, где требуется высокая точность при малых перемещениях. Обладая точностными характеристиками в единицы нанометров и усилиями 30 Н/мм², они прекрасно работают в оптических системах различного уровня. В [1–3] приведены конструкции и параметры различных типов актюаторов и рассмотрены возможные области их применения.

Многослойные пьезоэлектрические актюаторы

Многослойные пьезоэлектрические актюаторы созданы на базе многослойных керамических блоков, состоящих из 50 активных слоев толщиной 50 мкм, 4 пассивных слоев той же толщины и внутренних электродов толщиной 6–12 мкм (рис. 1). Необходимость введения пассивных слоев вызвана тем, что при высокотемпературном обжиге блоков они за счет усадки материала принимают «подушкообразную» форму с отклонением от плоскости до 70 мкм. За счет пассивных слоев, имеющих толщину по 100 мкм с каждой стороны блока, применив операцию доводочного шлифования, можно добиться плоскостности и параллельности его основных граней.

Соединение слоев между собой осуществляется путем спекания под давлением внешних металлических электродов каждого слоя, при этом образуется многослойный керамический блок с плотностью, близкой к теоретическому пределу плотности монолитной керамики. Принципиально такая технология изготовления блоков отработана на других материалах при изготовлении многослойных керамических конденсаторов [4, 5], однако для ее успешного применения при изготовлении пьезоэлектрических многослойных актюаторов был создан мягкий пьезокерами-

ческий материал ЦТС-46 с пониженной температурой спекания [6, 7]. Это позволило использовать в качестве материала электродов относительно дешевый сплав «серебро-палладий» вместо традиционного сплава «платина-палладий», что не только снижает стоимость, но и повышает надежность соединения слоев.

Электроды одной полярности соединены между собой параллельно, смежные слои пьезокерамики поляризованы во встречном направлении. Применение мягкого материала и слоистой структуры при толщине каждого слоя порядка 0,05 мм обусловлено желанием получить максимальную деформацию актюатора при минимальном управляющем сигнале. При подаче на управляющие электроды блока возбуждающего импульса он деформируется в основном по вертикальной оси и при этом деформирует нагружающую систему.

Одиночный блок из 50 поляризованных слоев сегнетомягкого материала ЦТС-46 имеет перемещение около 2,5 мкм. Для получения актюаторов, имеющих более значительные перемещения, отдельные блоки склеивают между собой, и общее количество слоев может достигать 1000 и более. Перемещение, создаваемое структурой, является суммой перемещений всех слоев. В качестве клея при изготовлении составных актюаторов используются клеевые композиции на основе эпоксидных смол.

Пьезоэлектрические актюаторы (пьезопроводы) характеризуются механическим перемещением (ходом), которое осуществляется под воздействием электрического сигнала и, если перемещение предотвращено (заблокировано), силой (блокирующей силой), величина которой определяется жесткостью актюатора, придаваемой ему при его создании. Существует приблизительно линейная зависимость между входным напряжением и реакцией актюатора, как ходом, так и блокирующей силой.

Величина емкости, составляющей микрофарады, совместно с выходным сопротивлением возбуждающего генератора, в значительной степени определяет быстродействие актюатора.

Методы измерений параметров

Наиболее просто измерить емкость актюатора, которая косвенно указывает на величину поляризации составляющих актюатор слоев, но эта связь не является прямо пропорциональной, поэтому нет полной гарантии его работоспособности.

Более достоверную информацию дает измерение заряда на электродах актюатора при приложении статического усилия к рабочим поверхностям актюатора. Между измеренным таким образом пьезомодулем актюатора и возможным перемещением поверхностей актюатора при его возбуждении внешним полем имеется прямо пропорциональная зависимость. Это измерение является косвенным и для многослойных конструкций не позволяет судить о наличии или отсутствии расслоений, которые могут существенно влиять на качество изделия.

Наиболее точным способом оценки качества актюатора является непосредственное измерение перемещения рабочих поверхностей актюатора при подаче управляющих напряжений. Структурная схема проведения таких измерений приведена на рис. 2.

При проведении измерений на актюатор плавно подается напряжение той или иной полярности, и соответствующее изменение линейных размеров актюатора фиксируется измерителем перемещений. В качестве измерителя перемещений удобнее всего использовать измеритель линейных размеров — например, модель 275К, которую выпускает завод «Калибр». Этот измеритель имеет выносной зонд, непосредственно контактирующий с измеряемой поверхностью,

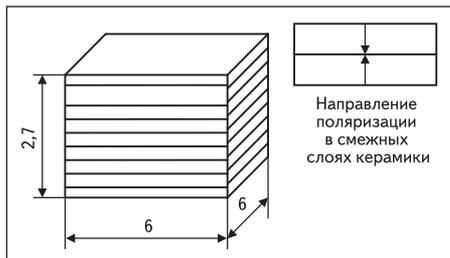


Рис. 1. Многослойный керамический блок осевого актюатора

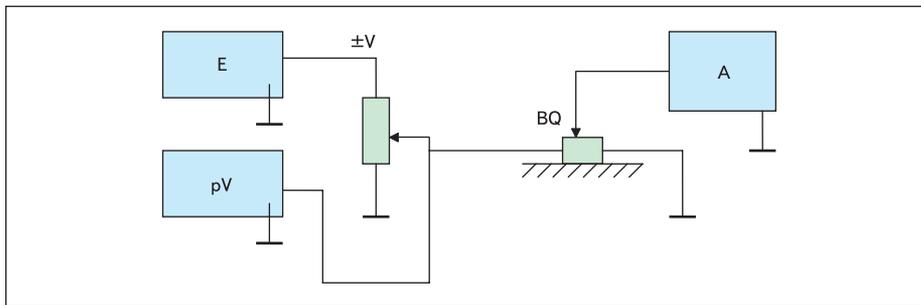


Рис. 2. Структурная схема измерений перемещений поверхности актюатора под действием приложенного напряжения: E — источник постоянного напряжения; pV — вольтметр; BQ — измеряемый актюатор на жесткой опоре; A — измеритель микроперемещений

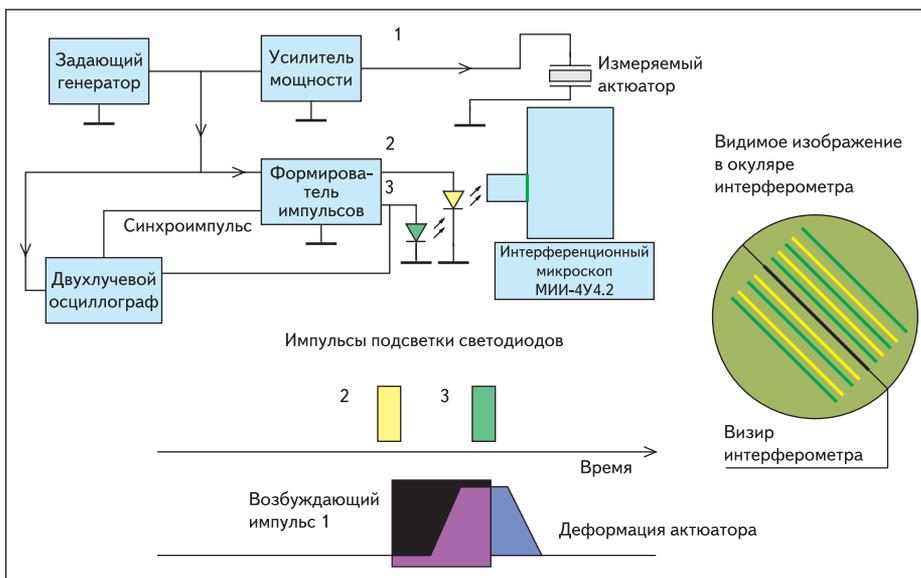


Рис. 3. Структурная схема измерения перемещений поверхности актюатора в динамическом режиме

и приемлемую точность измерения размеров (0,1 мкм). Недостаток данного метода в том, что выносной зонд является механическим устройством и не позволяет проводить измерения в динамическом режиме, то есть при подаче на актюатор синусоидального или импульсного сигнала.

Возможно проведение измерений перемещений актюатора при помощи интерференционного микроскопа. При подаче на управляющие электроды актюатора напряжения той или иной полярности поверхности актюатора перемещаются за счет его продольных деформаций, и система интерференционных полос также будет перемещаться в прямом или обратном направлении на величину, пропорциональную деформации. Величина этого перемещения при помощи микрометрического механизма интерферометра может быть измерена в единицах длины волны источника освещения. При возбуждении актюатора переменным напряжением система полос начинает колебаться с частотой возбуждающего напряжения, что визуально наблюдается как «размывание» полосы гашения света. Величина этого «размывания» также может быть измерена для не очень больших перемещений

(порядка $\lambda/2$) при помощи нониусной шкалы микроскопа.

Проведение прямых измерений перемещений поверхности актюатора в динамическом режиме возможно при замене стандартного источника освещения интерференционного микроскопа на пару светодиодов, установленных в фокусе системы освещения микроскопа. Длины волн излучения этих светодиодов должны различаться между собой. Структурная схема проведения измерений приведена на рис. 3.

Для проведения измерений актюатор с отражающим зеркалом устанавливается в фокусе интерференционного микроскопа и возбуждается последовательностью импульсов с длительностью τ_1 и периодом следования τ_2 , превышающим время релаксационных процессов при колебаниях актюатора. На светодиоды подается импульсное напряжение питания от формирователя, синхронизированного с задающим генератором. Длительность включения импульсов питания светодиодов намного меньше времени возбуждения преобразователя. При подаче импульса питания актюатора (или чуть раньше) поверхность еще недеформированного

актюатора освещается одним из светодиодов (опорным), то есть в поле зрения микроскопа мы имеем систему интерференционных полос, например зеленого цвета, соответствующую недеформированному состоянию актюатора. Второй светодиод (стробирующий, или измерительный) включается с задержкой τ_2 относительно первого светодиода и дает в поле зрения систему полос, соответствующую состоянию актюатора через время τ_3 после начала деформации актюатора под действием возбуждающего импульса.

Вывод импульсов включения светодиодов и возбуждающего напряжения на экран двухлучевого осциллографа позволяет визуально контролировать время сдвига включения измерительного светодиода относительно опорного светодиода и возбуждающего импульса. Естественно, вся система возбуждения актюатора, подсветки и контроля должна быть жестко синхронизирована. Изменяя время задержки относительно возбуждающего импульса от 0 до периода следования возбуждающих импульсов, при коротких импульсах включения второго светодиода мы можем измерить деформации поверхности актюатора в течение всего времени возбуждения актюатора.

Особенности характеристик актюаторов

С целью получения высоких значений перемещений в данных актюаторах используют в качестве управляющего поля напряженности, значительно превышающие поля поляризации пьезокерамического материала, из которого изготовлен блок актюатора, поэтому при приложении к электродам напряжения противоположной полярности происходит реполяризация блоков актюатора. Типичная зависимость перемещения одного блока актюаторов приведена на рис. 4.

На рис. 4 видно, что при напряжении 50–70 В блок начинает резко менять направление перемещения, при дальнейшем увеличении напряжения оно меняется уже не так значительно. Во время изменения величины и направления перемещения ток через актюаторный блок также возрастает в десятки раз, достигая величины 100 мкА, а затем спадает. Все это свидетельствует об изменении направления поляризации в слоях пьезокерамики. При снижении напряжения, изменении его знака и дальнейшем увеличении напряжения при 1200–1500 кВ/м снова происходит процесс реполяризации керамики, в результате чего формируются петли в виде «бабочки». Все это указывает на то, что величина напряжения обратной полярности в 50 В соответствует коэрцитивному полю для данных блоков, в силу чего обратное напряжение во всех режимах работы не должно быть более 25 В для данных блоков и актюаторов.

При работе только с напряжениями одной полярности изменение перемещения от на-

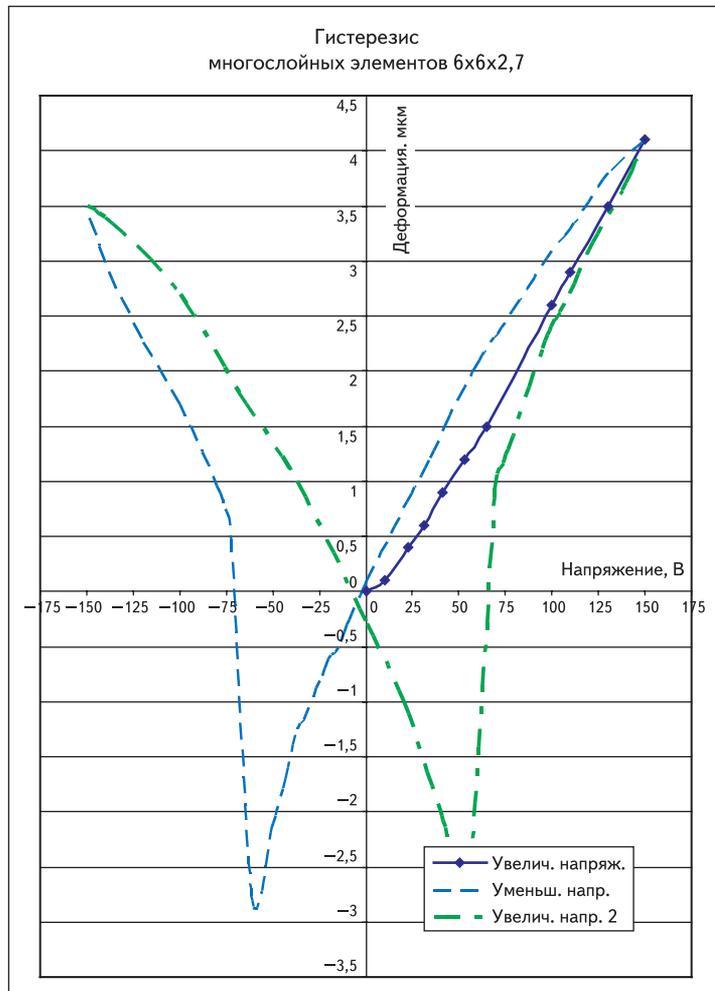


Рис. 4. Зависимость перемещения элементарного блока актюатора от приложенного напряжения

пряжения проходит по частичной петле гистерезиса, приведенной в правой части рис. 4. Ширина петли гистерезиса может достигать 20% от величины максимального перемещения.

Получение характеристик с малым гистерезисом (порядка 1%) в пьезоактюаторах возможно только при применении активной обратной связи с установкой датчиков позиционирования для определения действительного положения.

Несмотря на то, что актюатор представляет собой в основном емкостную нагрузку, наличие петли гистерезиса свидетельствует о том, что часть запасенной в нем электрической энергии преобразуется непосредственно в тепловую. При работе с синусоидальным источником питания (разумеется, с «положительной подставкой»), чтобы напряжение не изменяло свою полярность) величина этой части энергии может быть определена по формуле $P = U \times I \times \text{tg}\delta = U^2 \omega C_0 \times \text{tg}\delta$, где $\text{tg}\delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь пьезо-керамического материала, в нашем случае $\text{tg}\delta = 0,02$.

Нами проводилось определение температуры нагрева элементарных блоков от вре-

мени при разных значениях частоты и напряжения возбуждающего сигнала. Схема эксперимента приведена на рис. 5.

Напряжение возбуждения подавалось с синусоидального генератора 1 на актюатор через разделительный конденсатор большой емкости и контролировалось вольтметром 2. Наличие диода, включенного параллельно с исследуемым актюатором, обеспечивало подачу на актюатор только положительного напряжения, то есть на входе актюатора формировался синусоидальный сигнал с вольт-добавкой, равной половине амплитуды возбуждающего напряжения. Сигнал с генератора и на актюаторе контролировался также при помощи двухлучевого осциллографа. Температура поверхности актюатора измерялась термопарой (на рис. не приведена).

Экспериментальные зависимости температуры нагрева поверхности актюаторов на разных частотах при входном напряжении 100 В (эффективное значение на входе схемы) приведены на рис. 6.

Как видно из приведенных данных, уже по истечении 3 минут блоки приходят в состояние теплового равновесия, причем темпера-

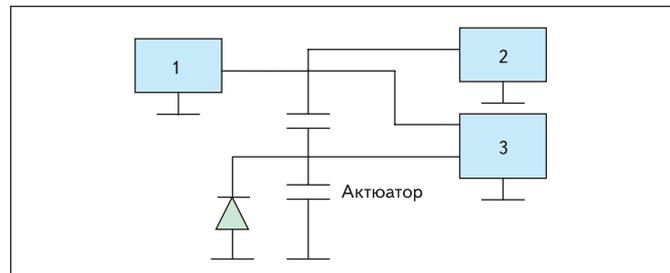


Рис. 5. Схема определения температуры нагрева актюатора: 1 — генератор; 2 — вольтметр; 3 — двухлучевой осциллограф

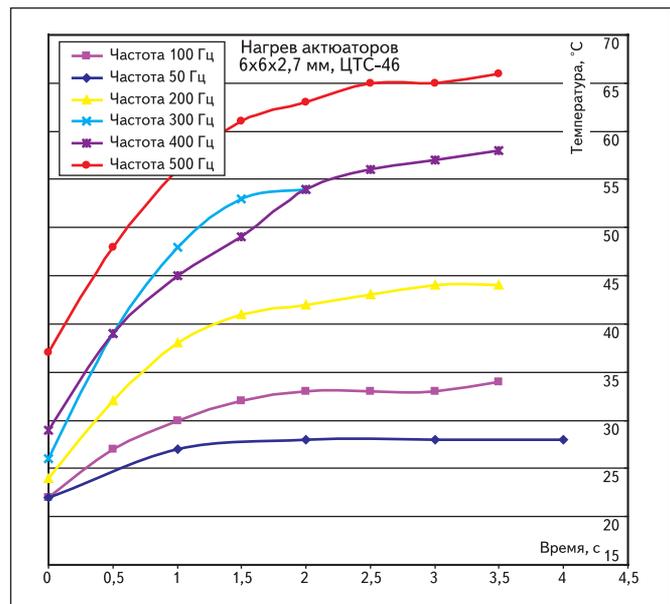


Рис. 6. Зависимость температуры нагрева поверхности актюаторов на разных частотах при входном напряжении 100 В_{эф}

тура теплового равновесия растет с частотой напряжения возбуждения актюатора.

Зависимость температуры нагрева поверхности актюатора от активной составляющей входной мощности приведена на рис. 7.

График температуры перегрева актюатора относительно среды приведен на рис. 8.

Очевидно, что температура перегрева практически линейно зависит от активной входной мощности, которая рассчитывалась согласно вышеприведенной формуле. Как видно из приведенных графиков, величина рассеиваемой входной мощности на актюаторе не должна превышать 0,5 Вт на один блок, так как в противном случае за счет теплового разогрева температура работающего актюатора превысит 80 °C при температуре окружающей среды 40 °C, что может привести к разрушению клеевых соединений между блоками в составных актюаторах, у которых прочностные свойства клеевого соединения резко снижаются при температуре выше 80 °C.

Ввиду того, что рассеиваемая в актюаторах мощность пропорциональна частоте изменения управляющего напряжения и квадрату его амплитуды, возникает естественное ограничение на частоту и амплитуду переключе-

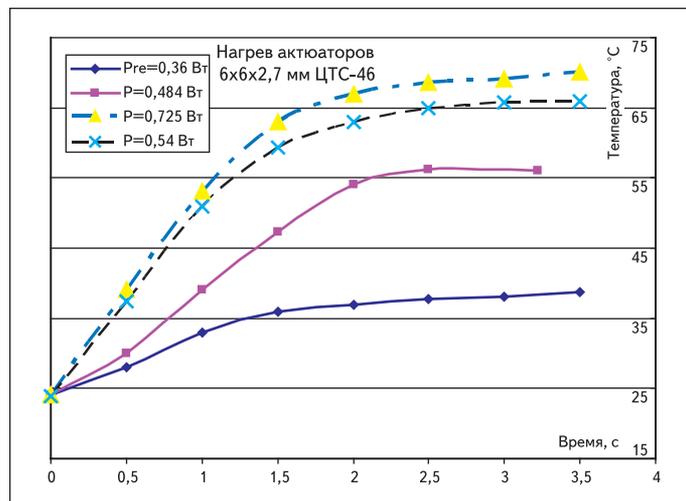


Рис. 7. Зависимость температуры нагрева поверхности актюатора от активной составляющей входной мощности

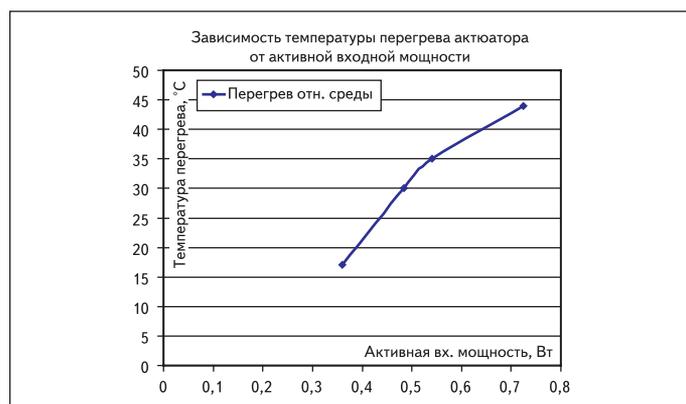


Рис. 8. График температуры перегрева актюатора относительно среды

ющего напряжения. В квазистатическом режиме работы на актюаторы может подаваться напряжение до 250 В, однако в районе 1000 Гц оно уже не может превышать 100 В и в дальнейшем предельное напряжение возбуждения быстро падает с частотой. Увеличение количества элементарных блоков в актюаторах повышает эту зависимость.

С увеличением числа блоков в актюаторе так же пропорционально растет емкость актюаторов (примерно на 0,4 мкФ на 1 блок), что приводит к возрастанию переключающих токов, которые могут превышать единицы ампер, и снижению быстродействия актюаторов. ■

Литература

1. Сафронов А. Я., Климашин В. М., Парфенов Б. Г., Ярошевич В. А., Никифоров В. Г. Пьезокерамические пакеты и многоблочные актюаторы // Компоненты и технологии. 2002. № 6.
2. Wanders W. Piezoelectric Ceramics (properties and Applications). Eindhoven. The Netherlands 4-91.
3. Пьезоэлектрическая керамика: принципы, применения. Минск: ОАО ФУ Аинформ. 2003.
4. Ротенберг Б. А. Керамические конденсаторные диэлектрики. Санкт-Петербург. 2000.
5. Окадзаки К. Технология керамических диэлектриков. Перевод с японского. М.: Энергия. 1976.
6. Мирошников П. В., Сегалла А. Г., Сафронов А. Я., Никифоров В. Г., Чернов В. А. Пьезокерамический материал. Решение о выдаче патента на изобретение от 7 апреля 2006 г. по заявке 200510962(03(011604).
7. Материал пьезокерамический ЦТС-46. Технические условия ЖКГД.430327008 ТУ.