

Д. А. Суровцев

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ РЕЗОНАНСНОГО ВИБРОСТЕНДА ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ВИБРОУСКОРЕНИЙ АМПЛИТУДОЙ ДО 100 000 м/с²

D. A. Surovtsev

STUDY THE POSSIBILITY OF CREATING A RESONANCE SHAKER TO REPRODUCE THE AMPLITUDE OF VIBRATION ACCELERATION UP TO 100 000 m/s²

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. С развитием космического двигателестроения к датчикам параметров вибрационных и ударных колебаний предъявляются все более жесткие требования. В связи с неэквивалентностью воздействия гармонической вибрации и энергетического воздействия на датчик удара представляется необходимым до начала эксплуатации проводить испытания на получение предельных диапазонов измерений и механической прочности конструкций. С целью получения достоверных результатов испытаний актуальной задачей является разработка соответствующего испытательного оборудования, в частности стержневых резонансных вибростендов с пьезоэлектрическим возбуждением. **Материалы и методы.** Проведен сравнительный анализ предельных возможностей серийных вибростендов известных зарубежных фирм. Определена возможность создания вибростендов на основе пакета пьезоэлектрических актюаторов. Методика основана на исследовании возможностей использования обратного пьезоэлектрического эффекта для воспроизведения динамических виброускорений. **Результаты.** В результате проведенных исследований определено, что максимальная амплитуда виброускорений, воспроизводимых серийно выпускаемыми вибростендами с прорезными резонансными балками и другими резонансными конструкциями, может в 10–20 раз увеличивать максимальное значение амплитуды виброускорения вибростенда, достигая 500–1400 g. Проведен выбор пьезоактюатора, обеспечивающего воспроизведение ускорений до 100 000 м/с² и крепление к его подвижной части акселерометра без переходных конструкций. Обоснован выбор аналогового усилителя для управления режимами работы пьезостека.

A b s t r a c t. Background. With the development of space engine building, more stringent requirements are imposed on the sensors of vibration and shock parameters. In connection with the nonequivalence of the effect of harmonic vibration and the energy impact on the shock sensor, it is necessary to perform tests to determine the ultimate measurement ranges and mechanical strength of structures before operating. In order to obtain reliable test results, the actual task is the development of appropriate test equipment, and in particular, rod resonance shakes with piezoelectric excitation. **Materials and methods.** A comparative analysis of the limiting capabilities of the standard vibration shakers of well-known foreign firms is carried out. The possibility of creating shaker stands based on a package of piezoelectric actuators is determined. The technique is based on a study of the possibilities of using the inverse piezoelectric effect to reproduce dynamic vibration acceleration. **Results.** As a result of the conducted studies it is determined that the maximum amplitude of vibration acceleration reproduced by serially

produced shaker stands with slotted resonance beams and other resonant structures can increase 10–20 times the maximum amplitude of vibration acceleration of the shaker, reaching 500–1400 g. A piezoactuator has been selected that ensures the reproduction of accelerations up to 100,000 m/s² and attachment to its moving part of the accelerometer without transient designs. The selection of an analog amplifier for controlling the operating modes of the piezo-cast is substantiated.

К л ю ч е в ы е с л о в а: вибростенд, пьезоактюатор, пьезостек, собственная частота виброусилителя, виброперемещение, виброускорение.

Key words: shaker, piezoactuator, piezoelectric glass, natural frequency of the vibration amplifier, vibration displacement, vibration acceleration.

Введение

Пьезоэлектрические акселерометры относятся к уникальному классу средств измерений, в которых по сравнению с другими известными типами могут быть реализованы миниатюрные габариты, широкие частотные и амплитудные диапазоны измерений. Для обеспечения достоверности результатов испытаний пьезоакселерометров их уникальные свойства должны экспериментально подтверждаться при выпуске из производства, а само производство должно быть метрологически обеспечено в соответствии с государственными стандартами. В связи с вышеперечисленным актуальной задачей является исследование возможности создания вибростенда для воспроизведения ускорений до $(5-10) \cdot 10^3$ g на фиксированной частоте внутри интервала от 1 до 20 кГц.

Типы вибростендов для воспроизведения гармонических ускорений

Для воспроизведения гармонических ускорений в интервалах частот от единиц десятков герц до десятков килогерц наиболее распространено использование электродинамических вибростендов, среди которых первые места по точности, простоте обслуживания, эксплуатационным характеристикам и сферам применения занимают вибростенды фирм Bruel&Kjaer (Дания) и Tira (Германия).

Предельные возможности электродинамических вибростендов по амплитуде воспроизводимого ускорения определяются отношением плотности материала провода к индукции в зазоре магнитной системы [1]. Как правило, предельная амплитуда ускорения, воспроизводимого калибровочными вибростендами, не превышает 50–70 g. Для увеличения указанного ускорения на одной из частот широко используются различные конструкции так называемых виброусилителей или концентраторов в виде прорезных балок или «колоколов» специальной формы. Согласно данным, полученным по результатам анализа патентной и технической информации, коэффициент усиления амплитуды колебаний на собственной частоте виброусилителя не превышает 10–20, что позволяет воспроизвести виброускорение амплитудой 500–1400 g и не решает поставленной цели [2, 3].

Принцип действия пьезоэлектрического вибростенда основан на использовании вместо магнитоэлектрического преобразователя силы пьезоэлектрических актюаторов или пьезоэлектрических обратных преобразователей электрической величины в механическую. Потенциально для множества частных применений пьезоэлектрические вибростенды способны воспроизводить ускорения на два порядка выше, чем вибростенды других типов. Серийные образцы пьезоэлектрических вибростендов в настоящее время не выявлены. В связи с этим исследованы возможности создания пьезоэлектрического вибростенда для оценки механической прочности вибродатчиков, метрологические характеристики которых заранее известны и определены в полном соответствии с нормативной и конструкторской документацией.

Исследование современного состояния технологий создания пьезоактюаторов для построения высокочастотных пьезоэлектрических вибростендов

Безусловными лидерами по исследованию и производству пьезоэлементов и пьезоактюаторов в РФ являются НКТБ «Пьезоприбор», ОАО «Элпа», ООО «Глобал-Тест». Этими предприятиями создана широкая номенклатура вибродатчиков различного назначения, в том числе

и статические пьезоактюаторы для позиционирования телескопов и атомных силовых микроскопов. В монографии [4], выпущенной сотрудником НКТБ «Пьезоприбор» В. В. Янчиным, представлены конструкции пьезоэлектрических вибростендов для воспроизведения ускорения $A = 1,5 \cdot 10^5 \text{ м/с}^2$ на частоте $f = 3800 \text{ Гц}$. Представленные автором характеристики вибростенда можно расценивать только как принципиальную возможность создания подобных устройств из-за противоречия между деформацией пьезопакета и названной автором амплитудой управляющего напряжения 60 В.

Обратным пересчетом из заданного ускорения и значения частоты получаем, что перемещение X стола вибростенда составляет 263 мкм. При этом удлинение пьезопакета высотой 15 мм с учетом коэффициента виброусиления стержневого резонатора, равного 20, будет составлять 13,2 мкм.

Учитывая то, что значение пьезомодуля d_{11} для пьезокерамики типа ЦТС составляет $\approx 100 \text{ В/мкм}$, подключение к пьезопакету напряжения амплитудой 60 В может вызвать изменение хода пьезопакета не более, чем на 0,6 мкм вместо ожидаемых 13 мкм.

Для обеспечения перемещения пьезопакета на 13 мкм к нему необходимо подключение управляющего напряжения амплитудой 1300 В, что требует использования специализированного источника напряжения. Приведенный пример является дополнительным основанием для исследования возможностей современных технологий создания пьезоактюаторов для воспроизведения знакопеременных виброперемещений и виброускорений с целью создания испытательной установки для миниатюрных широкополосных ИСР-акселерометров.

В зависимости от назначения и конструктивного исполнения пьезоактюаторы подразделяются на пакетные, трубчатые, изгибные, сдвиговые, ламинарные и управляемые пьезофлексерные [5].

Пакетные актюаторы конструируются с использованием принципов дискретного пакетирования и совместного спекания. Пакетные актюаторы, изготовленные дискретным способом, позволяют использовать при изготовлении различную форму пьезокерамических элементов, а также обеспечивают более широкий выбор пьезокерамических материалов. Кроме этого, такие актюаторы имеют меньшее тепловыделение при работе на высоких частотах. Толщина отдельных пьезокерамических слоев, которые могут быть изготовлены и собраны в пакет, должна быть не менее 1 мм, поэтому для управления пакетными актюаторами, собранными по дискретной технологии, требуется высокое напряжение в пределах 500–1000 В. Для выполнения указанных требований вся керамико-электродная структура должна конструироваться и обжигаться целиком (технология совместного спекания). Теоретически любая пьезоэлектрическая керамика может использоваться для изготовления актюаторов по технологии совместного спекания, но в настоящее время керамика с высокой точкой Кюри редко используется для этих целей. Как следствие, большинство пакетных актюаторов, изготовленных по технологии совместного спекания, не могут работать при температурах выше 220 °С. В настоящее время предлагаются наборы пакетных актюаторов для решения различных задач, подразделяемые в зависимости от свойств пьезокерамики и технологии производства на высоковольтные (дискретные) и низковольтные многослойные (монокристаллы).

Высоковольтные пакетные актюаторы изготавливаются из разных типов пьезокерамических материалов: стандартных, высокоомощных, высокостабильных и высокотемпературных. В рамках решаемой задачи интерес представляют высокостабильные пакетные актюаторы, отличающиеся стабильными характеристиками деформации и силы во всем диапазоне рабочих температур благодаря свойствам пьезокерамики.

Электрическая емкость таких актюаторов приблизительно равна емкости актюаторов, изготовленных из стандартных пьезоматериалов. Рабочее напряжение лежит в пределах от –100 В до +500 В и от –200 В до +1000 В (управление актюаторами может осуществляться в биполярном режиме или однополярном). Главным достоинством высокостабильных актюаторов является их способность к эксплуатации в динамическом режиме [6] на достаточно высоких частотах.

Одной из важнейших особенностей эксплуатации высокостабильных актюаторов является решение проблем их монтажа и передача перемещения образцу через торцевые поверхности пакета. Для бескорпусных пьезоактюаторов недопустимо боковое крепление, в связи с чем они выполняются из кольцевых пьезоэлементов. Основным достоинством бескорпусных актюаторов является простота охлаждения за счет поступления охлаждающей среды на внеш-

ную и внутреннюю поверхности пьезоэлемента, а недостатком – сложность обеспечения механической прочности. Корпусные пакетные актюаторы с предварительным механическим напряжением имеют металлический корпус, за счет которого обеспечиваются их механическая прочность и стабильность работы в условиях механических ударов. Встроенный в корпус механизм предварительного механического напряжения компенсирует растягивающие напряжения, которые исключительно вредны для пьезокерамики (рис. 1) [7].

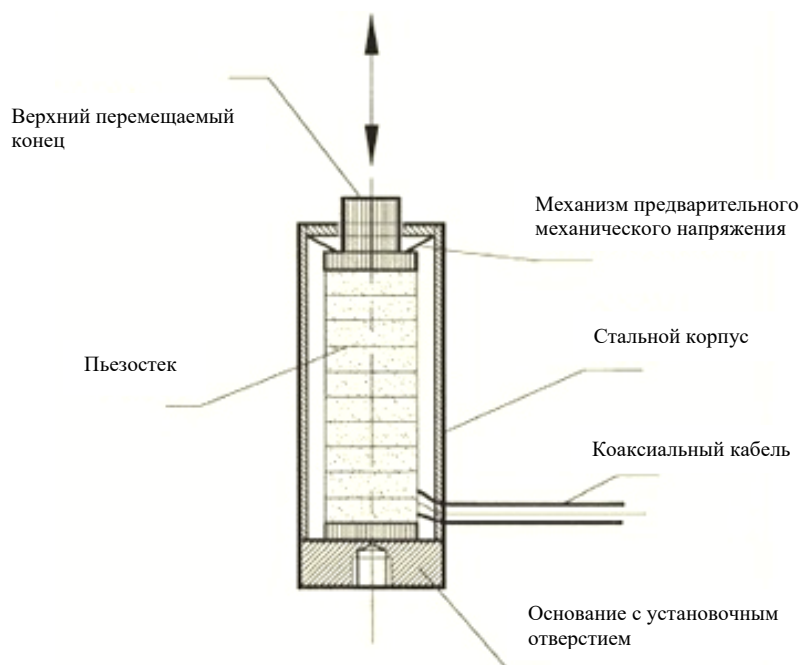


Рис. 1. Корпусной актюатор с предварительным механическим напряжением

Полярность управляющего напряжения в статическом режиме

Пьезопакеты в статическом режиме могут управляться однополярным или неполным двухполярным напряжением. Возможно также управление режима симметричным двухполярным напряжением. В случае управления пьезоактюатора с помощью однополярного или неполного двухполярного сигнала при его подключении к источнику питания важно соблюдать правильную полярность. В противном случае он может быть поврежден за счет деполяризации, которая наступит при достижении максимального значения управляющего напряжения. Для бескорпусных актюаторов соблюдение полярности не имеет значения.

Любая пьезокерамика может работать в определенных пределах с напряжением, полярность которого противоположна направлению поляризации керамики. Поэтому на практике пьезоактюаторы управляются неполным двухполярным напряжением, что по сравнению с однополярным управлением увеличивает максимальный ход актюатора, его блокирующую силу и удельную энергию. Пьезоактюатор из любого пьезоматериала может управляться противодействующим напряжением величиной 20 % от максимального управляющего напряжения, указанного в спецификации. Увеличение максимального хода и блокирующей силы может в этом случае достигать 30 % по сравнению с однополярным управлением. Удельная энергия может быть выше на 50 % и более. Сегнетожесткие высокостабильные высокотемпературные ЦТС пьезокерамические материалы могут выдерживать без частичной деполяризации электрические поля, имеющие направленность противоположной поляризации, величиной даже более 20 % от напряженности поля, при которой проводилась поляризация.

Динамический режим работы пьезоактюатора

Пьезоактюаторы способны обеспечивать ускорения до нескольких тысяч g и поэтому идеальны для использования в динамических режимах. На динамический режим работы пьезоактюатора

зоактюатора значительное влияние оказывают скорость нарастания управляющего напряжения (В/с) и максимальный ток усилителя, рабочая и собственная частоты пьезоактюаторной системы.

Для динамического режима работы пьезоактюатора одним из важных условий, обеспечивающих его правильную эксплуатацию, является уменьшение собственного тепловыделения. Мощность пьезоактюатора, затрачиваемая на выделение тепла при его гармоническом возбуждении, рассчитывается по формуле

$$P \approx \pi/4 \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot f \cdot C \cdot U_{p-p}^2,$$

где P – мощность, затрачиваемая на нагрев пьезоактюатора, Вт; $\operatorname{tg} \delta$ – диэлектрический фактор (приблизительно равен коэффициенту мощности, $\cos \varphi$ при малых углах δ и φ).

Для стандартных пьезокерамических актюаторов тангенс диэлектрических потерь в условиях слабых сигналов обычно составляет величину 0,01–0,02. Это означает, что до 2 % электрической мощности, потребляемой актюатором, преобразуется в тепловую энергию. Для сильных сигналов эта доля составляет около 8–12 % в зависимости от частоты, амплитуды, температуры окружающей среды и т.п. В этой связи при больших амплитудах и высоких частотах необходимо применять принудительное охлаждение пьезоактюаторной системы.

Выбор пьезоактюатора для построения вибростенда

Исходные данные:

- амплитуда воспроизводимого ускорения – 100 000 м/с²;
- частота воспроизведения 10–15 кГц.

При этом ориентировочное значение максимального хода актюатора должно составлять $f = 10$ кГц; $\omega_0 = 6,28 \cdot 10^4$ рад/с; $\omega_0^2 = 39,44 \cdot 10^8$ рад/с²:

$$x = \frac{A}{\omega_0^2} = \frac{10^5}{39,44 \cdot 10^8} = 0,025 \cdot 10^{-3} = 25 \text{ мкм};$$

$f = 15$ кГц; $\omega_0 = 6,28 \cdot 1,5 \cdot 10^4$ рад/с; $\omega_0^2 = 88,74 \cdot 10^8$ рад/с²;

$$x = \frac{10^5}{88,74 \cdot 10^8} = 11,2 \text{ мкм}.$$

Кроме этого, пьезоактюатор как преобразователь динамической силы должен отвечать следующим дополнительным условиям:

- 1) обеспечение возможности крепления акселерометра на верхнюю торцевую поверхность пьезоактюатора без дополнительных конструктивных элементов. Так, при диаметре хвостовика акселерометра, равном М5, на торце пьезоактюатора должна быть выполнена внутренняя резьба такого же диаметра;
- 2) обеспечение заданной прочности крепления пьезоактюатора к опоре;
- 3) обеспечение заданной амплитуды воспроизводимого ускорения за счет соответствующего выбора сочетания значения перемещения x и рабочей частоты f .

Указанным выше условиям и возможности воспроизведения ускорения амплитудой 10⁵ м/с² или 10 000 g отвечает пьезоактюатор типа PST 500/10/25 VS18 на частоте 10 кГц.

Для обеспечения управления режимами работы указанного пьезоактюатора необходимо использование генератора гармонических колебаний с амплитудой 500 В, частотным диапазоном от 1 до 10 кГц, номинальным напряжением до 1000 В, средним значением тока не менее 10 мА.

Заключение

По результатам проведенных исследований определена возможность создания резонансного вибростенда для воспроизведения виброускорений амплитудой до 100 000 м/с². Выбран тип пьезостека и специального генератора для управления режимами его работы. Выявлена необходимость реализации охлаждения пьезопреобразователя в процессе эксплуатации. Отличительной особенностью является отсутствие калибровки предлагаемого испытательного

вибростенда на основе пьезостека в связи с тем, что он предназначен для определения прочности акселерометра как средства измерений, метрологические характеристики которого определяются в соответствии с Государственной поверочной схемой МИ 2070-90 методом прямых измерений в интервале до 1000 м/с^2 и в соответствии с ГОСТ ИСО 5347-2-97 воздействием удара амплитудой до $100\,000 \text{ м/с}^2$ с использованием баллистического метода измерений.

Библиографический список

1. Мокров, Е. А. Статико-динамические акселерометры для ракетно-космической техники / Е. А. Мокров, А. А. Папко. – Пенза : ПАИИ, 2004. – 164 с.
2. А. с. 773966 СССР, G 01 P 21/00. Пьезоэлектрический вибростенд / Дунаевский В. П., Вуколов А. Н., Донсков В. И., Крайненко В. И., Янчик В. В. – № 2724233/18-10 ; заявл. 13.02.79 ; опубл. 23.10.80, Бюл. № 39.
3. А. с. 497057 СССР, B 06b 1/06. Пьезоэлектрический вибростенд для калибровки вибропреобразователей / Абыкин К. П., Шумский П. М., Пашков Г. В. – № 1984266/18-10 ; заявл. 21.12.73 ; опубл. 30.12.75, Бюл. № 48.
4. Янчик, В. В. Пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи (акселерометры) : монография / В. В. Янчик. – Ростов н/Д : Изд-во ЮФУ, 2010. – 304 с. – (Пьезоэлектрическое приборостроение).
5. Баринев, И. Н. Проблемы создания адаптивных смарт-материалов и структур со свойствами прямого и обратного пьезоэффекта / И. Н. Баринев, Е. В. Кучумов, В. С. Волков, С. П. Евдокимов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 3 (13). – С. 20–29.
6. РМГ 29-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. – М., 2013.
7. Панич, А. Е. Пьезокерамические актюаторы / А. Е. Панич. – Ростов н/Д : РГУ, 2008. – 12 с.

Суровцев Денис Александрович

инженер,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10);
аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: surovcev-65@mail.ru

Surovtsev Denis Aleksandrovich

engineer,
Scientific-research Institute of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia);
postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Суровцев, Д. А. Исследование возможности создания резонансного вибростенда для воспроизведения виброускорений амплитудой до $100\,000 \text{ м/с}^2$ / Д. А. Суровцев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 1 (27). – С. 42–47. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-1-6.