

УДК 681.58

П. В. Карев, С. В. Быстров, В. И. Бойков

ПРИМЕНЕНИЕ ПЬЕЗОДВИГАТЕЛЕЙ В НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Рассмотрено применение ультразвуковых двигателей в системах микросканирования для низкоорбитальных систем. Показано, что технологии микросканирования успешно реализуются в космической технике.

Ключевые слова: пьезодвигатель, ультразвуковой пьезодвигатель, пьезопровод для космоса, пьезодвигатель для работы в вакууме, низкоорбитальные системы

Снижение стоимости запуска спутников приводит к появлению новых группировок спутников. Каждая из таких группировок потенциально состоит из сотен спутников, предназначенных для связи и обработки изображения. В большинстве этих спутников применяются электроприводы. В частности, в видеоинформационных системах они применяются для автоматической фокусировки изображения и для микросканирования фотоприёмных матриц для повышения чёткости изображения (обмена кадровой частоты на чёткость) [1].

Следовательно, задача создания бюджетных электроприводов серийного производства для применения в космосе становится актуальной. В устройствах микросканирования низкоорбитальных систем применяют электроприводы на пьезоэлектрических двигателях (пьезопровод).

Во время вывода спутника на орбиту электроприводы на пьезоэлектрических двигателях обычно находятся в неактивном состоянии и подвергаются воздействию вибрации и ударных нагрузок. Низкоорбитальные спутники подвержены более низким ударным нагрузкам, чем средневысотные и геостационарные. Обычно низкоорбитальные системы должны сохранять основные характеристики и параметры после воздействия многократных механических ударов с амплитудой виброускорения $250...400 \text{ м/с}^2$ на частоте до 100 Гц и с амплитудой виброускорения 10000 м/с^2 на частоте $1000...10000 \text{ Гц}$. Также низкоорбитальные системы обычно должны быть рассчитаны на воздействие синусоидальной вибрации с частотой $20...20000 \text{ Гц}$ с амплитудой

виброускорения 100 м/с^2 с длительностью 120 секунд [2]. В табл. 1 приведены значения спектральных плотностей мощности в рассматриваемых диапазонах частот для низкоорбитальных спутников. Спектральная плотность мощности (СПМ) определяет мощность случайного колебательного процесса. Она равна среднеквадратическому ускорению в рассматриваемом диапазоне частот [3] и обычно выражается в единицах $[g^2/\text{Гц}]$. Зависимость спектральной плотности мощности от частоты при испытаниях пьезоприводов для низкоорбитальных спутников на воздействие ударных нагрузок и вибрации показано на рис. 1.

Таблица 1. Значения спектральной плотности в рассматриваемых диапазонах частот для низкоорбитальных спутников

Широкополосная вибрация [Гц]	Спектральная плотность мощности по 3-м ортогональным осям X, Y, Z $[\text{м}^2/\text{с}^3]$
20 Гц	1,05
150...280 Гц	7,69
280...320 Гц	28,85
320...380 Гц	19,23
380...850 Гц	9,61
850...1000 Гц	3,84
1000 Гц	2,16
Среднеквадратическое значение	102,3 $[\text{м/с}^2]$
Продолжительность	120 с

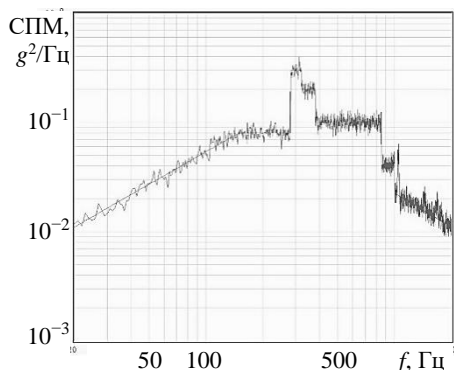


Рис. 1. Распределение мощности по частотам

Конструкция пьезодвигателей *Nanomotion* позволяет выдерживать высокие ударные нагрузки и вибрацию без каких-либо внутренних повреждений. Пьезоэлементы в двигателе закрепляются на пружинах. Керамический толкатель пьезодвигателя прижимается к керамической полоске, наклеенной на подвижную часть сборки. В случае если внешняя сила в направлении движения будет превышать статическую удерживающую силу, подвижная часть сборки может проскальзывать без повреждений. На рис. 2 показан макет 3-осевой сборки из пьезоактюаторов, установленный на вибростенде.

макет 3-осевой сборки из пьезоактюаторов, установленный на вибростенде.



Рис. 2. Испытания на вибростойкость 3-х осевой сборки на пьезодвигателях

Все космические системы в неактивном состоянии потенциально подвергаются воздействию температур в диапазоне от $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Иногда и рабочие температуры находятся в этом диапазоне, но обычно рабочие температуры находятся в более узком диапазоне от $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако вращение спутника по орбите и вращение его вокруг своей оси служат причиной появления многократных (до 16 раз в сутки) циклов изменения рабочей температуры, что потенциально приводит к десяткам тысяч циклов за весь период службы. Чтобы обеспечить проведение испытаний в разумные сроки циклы изменения температуры ускоряются (см. рис. 3).

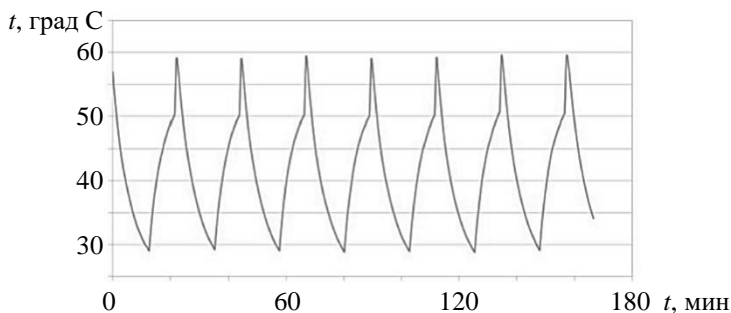


Рис. 3. Изменение температуры пьезоэлемента во времени при испытаниях теплоотводящих технологий

Тепловое расширение, создаваемое температурными циклами, может создавать механическое напряжение на подвижной сборке, электронике, пайках и т. д. Поэтому при разработке прецизионной электромеханической системы для устройств микросканирования низкоорбитальных систем очень важно учитывать циклический характер изменения температуры внешней среды. Также нужно учесть, что сам пьезодвигатель при работе выделяет тепло. Иногда тепло выделяет и полезная нагрузка пьезодвигателя (рис. 4).

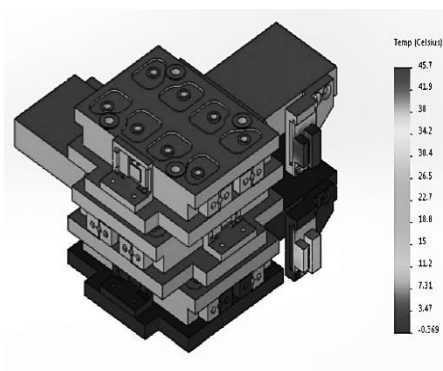
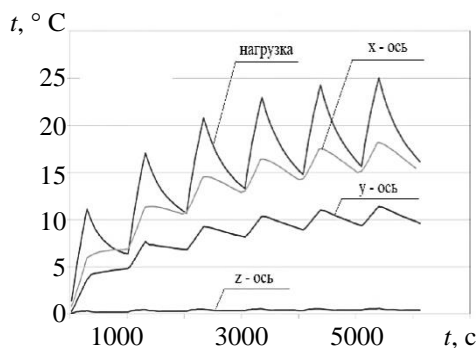
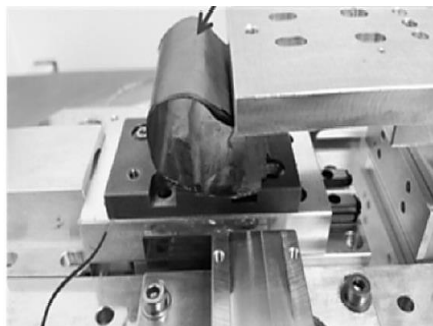
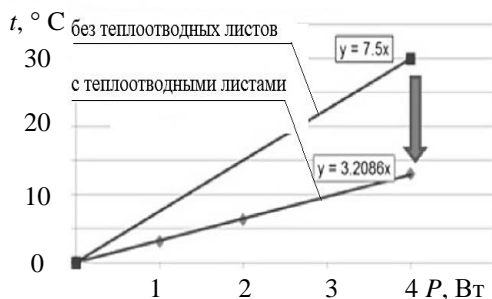


Рис. 4. Изменения температуры на пьезосборке и нагрузке: изменение температуры во времени для нагрузки и пьезосборки по осям X, Y, Z – а; распределение температуры в условных цветах – б

Особенно этот эффект проявляется в вакууме, где теплоотдача ограничена. Поэтому были применены методы увеличения надёжности путём управления тепловым потоком. Компания *Nanomotion* разработала гибкий и прочный теплопроводящий шлейф из 10-и тонких листов графена, каждый толщиной 20 мкм. Теплопроводность графена в 4 раза больше, чем у медных листов и в 15 раз больше, чем у чистой алюминиевой фольги. Этот механизм был испытан в вакууме на осуществление более 150 млн. циклов перемещения [2]. На рис. 5 показано влияние теплоотводящих листов на рабочую температуру привода. Видно, что использование указанных теплоотводящих элементов позволяет существенно улучшить тепловой режим работы устройства.



а

б

Рис. 5. Разность температур подвижной части сборки и основания сборки при наличии и отсутствии теплоотводных листов – а; внешний вид теплоотводных листов – б

Также хорошо зарекомендовали себя покрытия с высокой излучательной способностью. Применение теплоотводных листов и покрытий с высокой излучающей способностью позволяет уменьшить температуру сборки с + 60 °С до + 24 °С (см. рис. 3 и 4).

Для управления сборкой использовался стандартный контроллер/усилитель *XCD* из компонентов промышленного уровня исполнения. На рис. 6 показан внешний вид блока, результаты теплового расчёта и изображение платы в ИК-спектре для оценки нагрева. Испытания усилителя/контроллера *XCD* в термовакуумной камере (рис. 7) показали, что электронные компоненты усилителя/контроллера *XCD* нагреваются до температуры + 45°С до + 57°С. Также была проведена оценка времени наработки на отказ при температуре окружающей среды + 60°С и температуре платы и компонентов + 80°С. Расчётное время наработки на отказ составило 1 802 058 часов.

Низкоорбитальные спутники могут испытывать большее аэродинамическое сопротивление по сравнению со средневысотными и геостационарными, но они подвержены значительно более низким уровням излучения. Поэтому для работы на высоких и средних орбитах требуются радиационно-стойкие компоненты. Требования по радиационной стойкости к низкоорбитальным системам являются менее существенными. Обычно низкоорбитальные системы рассчитываются на получение дозы облучения 1 мкГр в секунду, накапливая до 300 Гр в течение 10 лет службы.

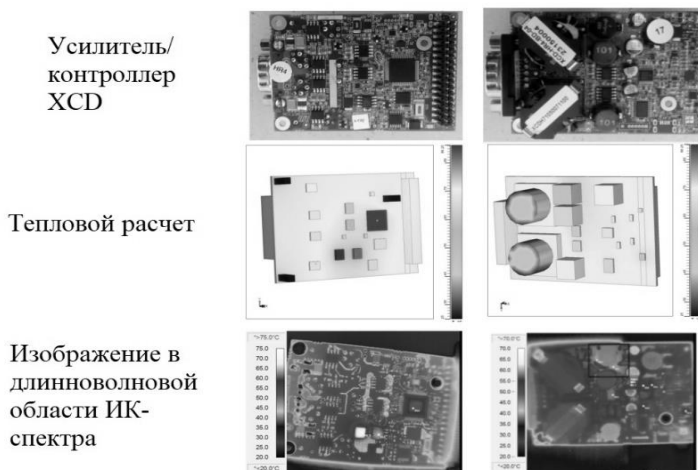


Рис. 6. Анализ нагрева усилителя/контроллера XCD

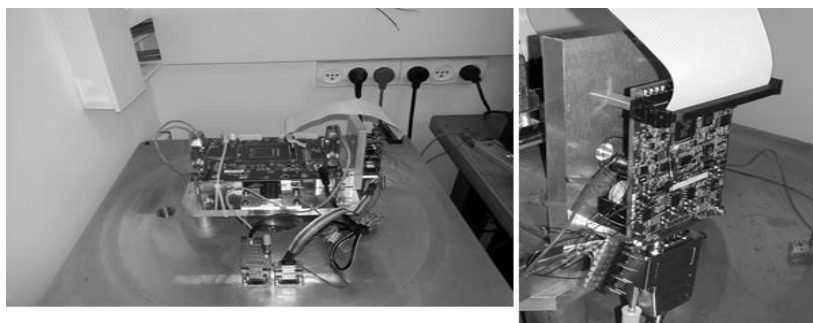


Рис. 7. Испытания усилителя/контроллера XCD в термобарокамере

Поскольку для многих задач низкоорбитальных спутников срок службы составляет 3...5 лет, то большинство имеющихся в продаже компонентов промышленного уровня исполнения могут оказаться подходящими. Компания *Nanomotion* провела испытания стандартного промышленного усилителя/контроллера собственного производства на уровне 150 Гр. Выбор компонентов по величине общей накопленной дозы, повреждению нейтронами и единичными эффектами может быть подтвержден процедурами оценки радиационной стойкости. Такие квалификационные процедуры могут служить гарантией функциональности компонентов, но становятся основным источником затрат. При разработке конструкции усилителя/контроллера XCD компания *Nanomotion* подбирает материалы и механические и электрические компоненты системы таким образом, чтобы гарантировать работоспособность изделия при заданных уровнях облучения в течение заданного срока службы. Прогнозируется, что стандартные усилители/контроллеры XCD смогут выдерживать уровни радиации низкоорбитальных спутников для работы в течение 5 лет.

Для спутниковой системы обработки изображений была разработана трёхосевая (XYZ) сборка (рис. 8).

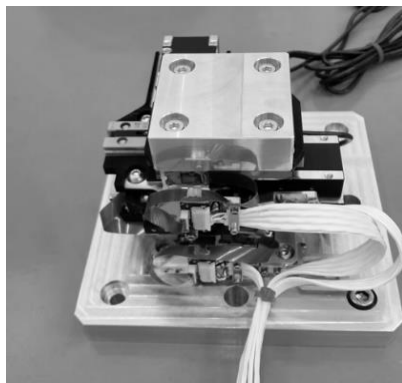


Рис. 8. Вид 3-х осевой пьезосборки для низкоорбитальных систем

Сборка обеспечивает сканирование на частоте 8 Гц в диапазоне хода 1 мм на постоянной скорости 35 мм/с по оси X. При сканировании по оси X пользователь получает перемещения на половину пикселя и повышает чёткость изображения. Ось Y используется для корректировки положения видеодетектора. Ось Z используется для фокусировки. Механизм рассчитан на функционирование в условиях космоса. Сборка должна поддерживать постоянную скорость 35 мм/с на частоте до 8 Гц во всем диапазоне рабочих температур. В ней использовались покрытия с повышенным излучением и листы графена для эффективной теплоотдачи с целью термостабилизации системы. Сборка рассчитана на работу в течение 3 лет с обеспечением более 150 млн. циклов движения (рис. 8).

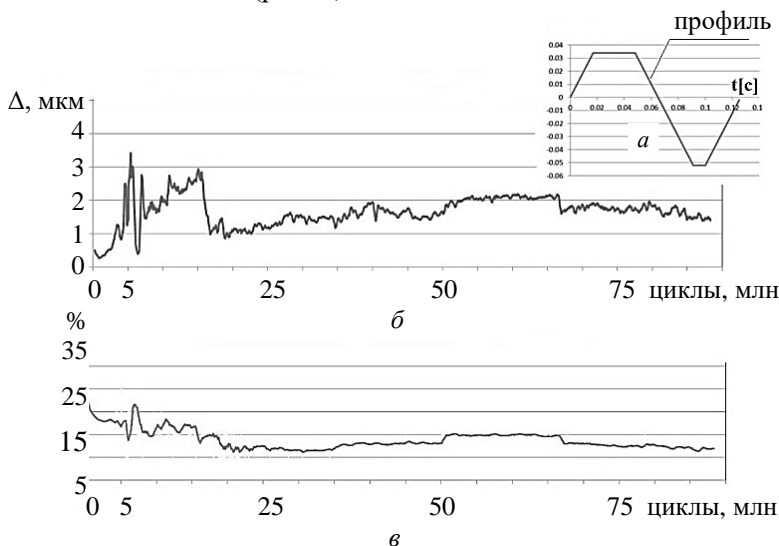


Рис. 8. Испытания пьезосборки на срок службы.

Профиль движения – *a*; зависимость ошибки позиционирования от количества рабочих циклов – *б*; зависимость амплитуды управляющей команды от количества рабочих циклов – *в*

Характеристики разработанной 3-х осевой пьезосборки для низкоорбитальных систем приведены в табл. 2.

Таблица 2: Характеристики 3-х осевой пьезосборки для низкоорбитальных систем

Параметр	Значение
Срок службы на низкой орбите	3 года
Температура хранения	от - 30 °С до + 60 °С
Рабочая температура	от - 10 °С до + 25 °С
Рабочий цикл	5 минут ВКЛ / 12 минут ВЫКЛ
Ход	X = 35 мм; Y = 35 мм; Z = 3,5 мм
Скорость сканирования по оси X	35 мм/с
Повторяемость	менее 0,5 мкм
Разрешение	менее 0,1 мкм
Ср. кв. точность позиционирования при постоянной скорости сканирования 35 мм/с с частотой 8 Гц	менее 3,0 мкм
Габариты	100×90×60 мм
Вес	610 г
Энергопотребление во время сканирования	менее 5,5 Вт
Общее энергопотребление во время сканирования, включая усилитель и контроллер	менее 8,0 Вт
Энергопотребление при удержании положения	0 Вт
Количество циклов сканирования на частоте 8 Гц	150 млн
Вакуум	от 10^{-6} до 10^{-8} мм рт. ст.

В настоящее время пьезосборки *Nanomotion* отвечают требованиям, предъявляемым к системам, устанавливаемым на спутниках и предназначенным для обработки изображения и связи. Кроме того, ультразвуковые пьезодвигатели обладают высокой плотностью мощности для данного веса двигателя. Стандартно производятся пьезосборки для прямолинейного перемещения по горизонтальной и вертикальной осям, а также поворотные пьезосборки. Несмотря на то, что каждая система движения может быть уникальной конфигурации, в каждой из них используются компоненты и технология, соответствующие требованиям поставленной задачи.

Литература

1. Л. И. Хромов, А. К. Цыцулин, А. Н. Куликов. *Видеоинформатика. Передача и компьютерная обработка видеоинформации* / М.: Радио и связь. 1991. 192 с.
2. *Meeting the Motion Challenges of Space Operation / NANOMOTION*. 2016. 7 с.
3. *Введение в теорию виброиспытаний / LING DYNAMIC SYSTEMS / Ричард Бейкер*. 44 с.

Статья поступила 27 июня 2018 г.