

УДК 531

В.П. КВАСНИКОВ¹, А.Л. ПЕРЕДЕРКО², С.В. УВАРОВ³¹Национальный авиационный университет, Киев, Украина²ООО «АРАМИС», Черкассы, Украина³УМГ «Донбастрансгаз», Донецк, Украина

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ВИБРООПОРЫ ДЛЯ КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

Рассмотрена математическая модель пьезоэлектрической виброопоры для координатно-измерительной машины.

пьезоэлектрическая виброопора, пьезодвигатель, математическая модель, гистерезис двигателя

Введение

Необходимость в контроле точности производимой продукции, повышения эффективности на стадии разработки и технологической подготовки, сделали координатно-измерительные машины (КИМ) неотъемлемой частью производственных процессов на многих заводах мировых производителей в области машиностроения, авиастроения, авиакосмического строения, двигателестроения и т.д.

Современные контрольно-измерительные машины представляют собой высокоточные устройства, обеспечивающие до пяти степеней свободы при ориентации измерительного механизма в пространстве. Управляемые ЭВМ, они комплектуются развитыми библиотеками программ для проведения и обработки измерений изделий различной формы. Прежде всего, они ориентированы на измерение составляющих поверхность изделий типовых геометрических объектов, таких как плоскости, призмы, тела вращения и др.

Измерения и обработка результатов на КИМ сопряжены с решением ряда проблем обеспечения условий их проведения. Для получения достоверных результатов необходимы лабораторные условия, что удаляет КИМ от производственного процесса.

В последнее время ведущие мировые производители с целью повышения точности проводимых из-

мерений оснащают свои КИМ сложными системами термостабилизации и защиты от воздействий вибрации. Особо интенсивно ведутся работы по защите КИМ от вибраций. Если раньше для этой цели использовались пассивные виброопоры, то в настоящее время в серийных моделях начали применять активные виброопоры. К примеру, КИМ модели SCIROCCO 140907 CNC Brown and Sharpe-DEA (рис. 1), которая используется для измерений геометрических элементов деталей, как основного производства, так и деталей технологической оснастки (имеет пространственную погрешность измерения – $E = (1,9 + 3L/1000)$ мкм, где L – измеряемая длина в мм), оснащена системой термокомпенсации с тремя датчиками температуры машины и одним датчиком детали, находится в термоконстантном помещении и установлена на активные виброопоры.



Рис. 1. КИМ модели SCIROCCO 140907 CNC

Активные средства гашения вибрационных колебаний предполагают наличие широкополосного линейного привода. Для этих целей предлагается использовать пьезоэлементы.

В данной работе рассмотрена математическая модель пьезоэлектрической виброопоры для КИМ.

Решения задачи

Рассмотрим математическую модель составного пьезодвигателя с некоторой нагрузкой массой m_0 (рис. 2).

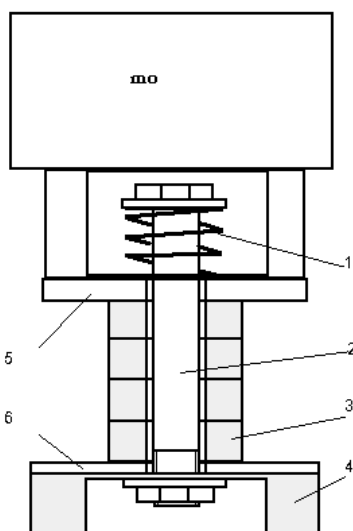


Рис. 2. Составной пакетный пьезодвигатель с нагрузкой

Элементы конструкции пакетного пьезодвигателя:

- 1 – упругий элемент (пружина работающая на сжатие);
- 2 – болт для стягивания пакета пьезоэлектрических колец;
- 3 – пьезоэлектрические кольца;
- 4 – подложка основания опоры;
- 5 – подвижная шайба;
- 6 – основание опоры.

Пьезопакет состоит из n колец, начальная его длина – Δl , площадь сечения – S_0 . Длина пакета под действием электрического поля E изменяется на величину Δl . Кроме объекта перемещаются элемен-

ты объема активной части пакета, масса которого m_k . Учитывая то, что пакет одним своим концом закреплен и некоторая его часть не принимает участия в движении, обычно, принимают во внимание суммарную приведенную массу $m_\Sigma = m_0 + 0,4m_k$.

Для данного случая можно записать условие равновесия сил в виде:

$$F_y = F_\rho + F_c + F_d + F_{дин}, \quad (1)$$

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

$F_\rho = d_3 Y S_0$ – 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;

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

K_d – коэффициент внутреннего демпфирования, кг/с.

Введем следующие обозначения:

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

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

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

$U = E l_0$ – напряжение управления пьезопакетом;

C_o – емкость пьезопакета;

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

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

Тогда, с учетом уравнения равновесия модель пьезодвигателя можно представить структурной схемой рис. 3.

Полученная модель справедлива для целого ряда конструкций пьезодвигателей (кольцеобразных,

дисковых, биморфных и д.р.), работающих в области частот от 0 до первого механического резонанса. Учитывая большой разброс параметров пьезоматериалов, наилучшее совпадение динамических харак-

теристик модели и реального двигателя получается для экспериментально определенных параметров $m_{\Sigma}, K_y, K_{обр}, K_{np}, C_0, R_{вн}$.

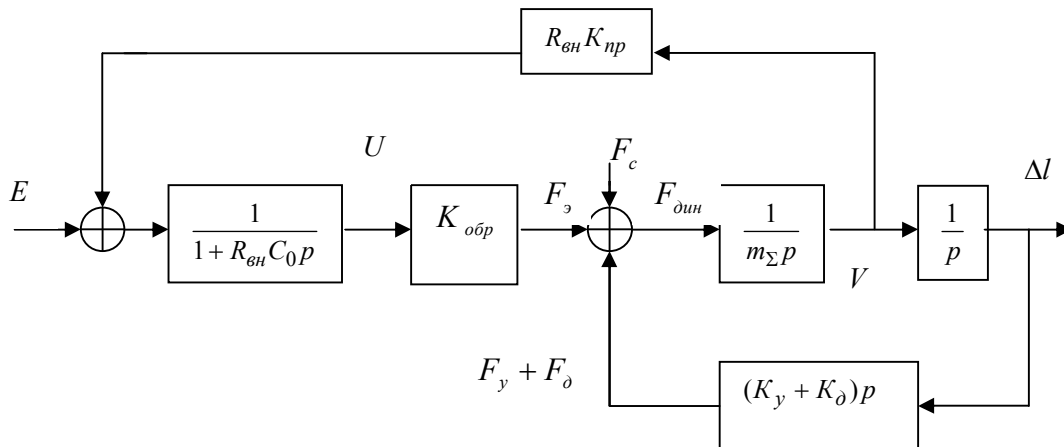


Рис. 3. Структурная схема пьезодвигателя

Модель условно можно разбить на две части:

– электрическая, в которую входят аperiodическое звено первого порядка, учитывающее инерционность устройства усилитель двигатель, K_o – обратный пьезоэффект и K_n – обратное влияние прямого пьезоэффекта;

– 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).

Передаточная функция для такой модели будет иметь вид:

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

$$c_1 = R_{вн} C_0 + \frac{K_o}{K_y} + R_{вн} K_{np} \frac{K_o}{K_y};$$

$$c_2 = \frac{m_{\Sigma}}{K_y} + R_{вн} C_0 \frac{K_o}{K_y};$$

$$c_3 = R_{вн} C_0 \frac{K_o}{K_y}.$$

Если пренебречь внутренней обратной связью по скорости ($K_n = 0$), влиянием внутреннего демпфирования ($K_o = 0$) и инерционностью преобразователя $T_s = 0$, то выражение 2 примет вид передаточной функции консервативного звена

$$W(p) = \frac{K_o / K_y}{1 + \frac{m_{\Sigma}}{K_y} p^2}, \quad (3)$$

а чтобы учесть демпфирование, можно использовать передаточную функцию колебательного звена

$$W(p) = \frac{K_o / K_y}{1 + 2\xi T_M p + T_M^2 p^2}, \quad (4)$$

где

$$T_M = \sqrt{\frac{m_{\Sigma}}{K_y}}; \quad \xi = \frac{1}{2Q},$$

где $Q = 10 \dots 100$ – механическая добротность.

Кроме того, если гистерезис двигателя превышает 10% его необходимо учитывать. Для случая, когда в керамике создается напряженность электрического поля много меньше напряженности предварительной поляризации и форма петли гистерезиса близка к эллипсу, единственным его проявлением

является вносимый отрицательный фазовый сдвиг между перемещением и управляющим напряжением. Величина фазового сдвига является некоторой функцией амплитуды управляющего напряжения и не зависит от частоты в дорезонансной области. Гистерезис y определяется как отношение максимальной ширины петли по координате перемещения Δh к максимальному для данной петли значению перемещения l_{\max} , т.е. $y = \Delta h / l_{\max}$ (рис. 4).

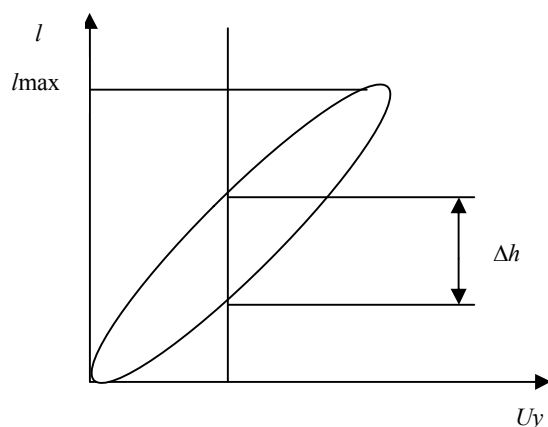


Рис. 4. Определение гистерезиса пьезодвигателя

В силу своих физико-механических свойств: значение предела прочности пьезоэлектрической керамики на растяжение на порядок меньше, чем предел прочности на сжатие, пьезоэлектрические материалы могут реально создавать усилие только в одном направлении - в направлении увеличения своей длины. Поэтому неотъемлемой частью пьезодвигателя является механическое, упругое устройство 1 (рис. 1), которое осуществляет предварительное нагружение элементов пьезодвигателя с усилием, заведомо превышающим максимальное растягивающее усилие во время работы. Предварительное на-

гружение уменьшает основной недостаток таких пьезодвигателей – значительный гистерезис, а также повышает жесткость системы "пьезодвигатель – нагрузка", исключая возможность появления люфта.

Выходное усилие пьезодвигателя чрезвычайно высоко и составляет до нескольких десятков тысяч ньютонов. Управление пьезодвигателями на базе пьезоэлектрической керамики разработано, в настоящее время, достаточно подробно. С помощью встроенных пьезоэлектрических датчиков (акселерометров) осуществляется коррекция такого недостатка, как значительная колебательность пакета из пьезоэлектрической керамики.

При гармоническом входном воздействии величина фазового сдвига с хорошим приближением определяется по формуле $(p) = \arcsin(y)$. Этот фазовый сдвиг можно учитывать в модели двигателя звеном чистого запаздывания с передаточной функцией вида:

$$W(p) = e^{-\tau p},$$

где τ – время запаздывания.

Выводы

Величина фазового сдвига вносимого звеном чистого запаздывания является функцией круговой частоты. Поэтому при проектировании необходимо учитывать этот фактор и вносить коррекцию в величину τ , в зависимости от частоты управляющего воздействия.

Поступила в редакцию 16.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.В.Куц, Национальный авиационный университет, Киев.