

интенсивности воздействия факторов и других данных. В справочной литературе приводятся данные регламентированные ГОСТом, снятые на типовых стандартных образцах, при воздействии слабых электрических полей и в нормальных условиях окружающей среды ($T=25\pm 10^\circ\text{C}$, влажность $65\pm 15\%$, давление $10^5\pm 4\cdot 10^3$ Па).

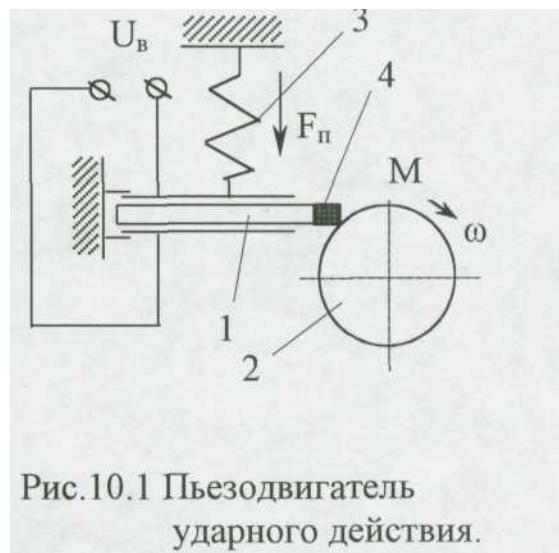
Особенности конструкций пьезодвигателей

В настоящее время на практике применяется большое разнообразие пьезоэлектрических двигателей, отличающихся по своему характеру создаваемых перемещений, конструкции, диапазонам перемещений и т.д. Представляется возможным подразделить их на три основные группы:

1. Резонансные двигатели (ударного действия)
2. Силовые двигатели с ограниченным диапазоном угловых и линейных перемещений.
3. Шаговые двигатели микроманипуляторы.

К первой группе относятся устройства, в которых осуществляется ударное взаимодействие между "статором" и "ротором" в зоне их контакта. Подвижная часть приводится в движение под действием ударных импульсов следующих с частотой равной собственной частоте пьезоэлемента. Частота собственных колебаний может достигать до нескольких МГц.

Конструктивно статор 1 (или ротор, или оба совместно) представляют собой пьезорезонатор, преобразующий электрическую энергию в механическую. Статор и ротор 2 прижаты друг к другу силой F_n , которая создается упругим предварительно напряженным элементом 3. На статоре в месте соприкосновения с ротором крепится опора из износостойкого материала 4 (например, алунда), акустически согласованная с пьезорезонатором. Геометрическая форма пьезорезонатора может быть разнообразной: пластины, стержни, спирали, диски, полые цилиндры. Пьезорезонаторы крепятся к опорам в



точках колебательной скорости с помощью акустически изолирующего материала. Произведение толщины материала на модуль Юнга должно быть не менее, чем в 10 раз меньше соответствующего значения пьезорезонатора (например, фторопласт, резина, дерево). К электродам пьезорезонатора подводится переменное напряжение возбуждения $U_{в}$. Под действием напряжения пьезорезонатор совершает механические колебания вдоль своей длины (в других конструкциях могут быть использованы изгибные, крутильные и др. колебания) и совершает микроудары по ротору, передавая ему полезный момент. Ротор приводится во вращение. Нужно сказать, что величина полезного момента невелика, кроме того при контактном сцеплении пьезорезонатора и подвижной части может происходить их проскальзывание относительно друг друга. Это приводит к износу, снижению КПД и точности отработки перемещений. Развиваемая мощность таких двигателей находится в диапазоне от 1 до 10 Вт и по сравнению с микромашинами такой же мощности они имеют ряд преимуществ: более высокие динамические свойства, высокая разрешающая способность по перемещению, в 1,5 - 2 раза лучшие массогабаритные показатели, они имеют высокую равномерность вращения и более широкий частотный диапазон отработки внешних воздействий. Наиболее перспективной областью их применения являются различные электромеханические системы лентопротяжки.

Ко второму типу относятся пьезодвигатели линейных и угловых перемещений, работающие соответственно в субмикрометровом и микрометровом, секундном и минутном диапазонах. Причем, их частотный диапазон ограничен областью до первого электромеханического резонанса. Хотелось бы остановиться на трех базовых конструкциях, которые заложены в основу большинства современных пьезо двигателей. К ним относятся:

1. Составная пакетная конструкция.
2. Биморфная конструкция.
3. Дифференциальная конструкция.

Пакетная конструкция представляет собой набор из отдельных пьезоэлементов (шайб, дисков, цилиндров), число которых может находиться до 200 шт (по старой технологии) и 1500 – по новой, и определяется требуемым диапазоном перемещений. Пакет формируют склеиванием однополярных поверхностей, соединяя их механически последовательно, а электрически параллельно. Допустимая напряженность электрического поля пьезокерамики около 1-2 кВ/мм,

следовательно для уменьшения управляющего напряжения необходимо уменьшать толщину пьезоэлемента (обычно она находится в пределах от 0,3 до 0,6 мм). При этом максимальное значение напряжения управления составляет 300 - 600 В. Электрическая емкость двигателя зависит от его конструкции (количество элементов, их толщина, площадь поверхности, диэлектрическая проницаемость материала) и составляет 0,02-5 мкФ. Для повышения механической жесткости, выборки внутренних межэлектродных зазоров пакет обычно помещают в упругий корпус, в котором предусмотрена возможность его предварительного сжатия. На рис. 10.2 представлена конструкция такого двигателя. Пьезопакет 2 состоит из пьезодисков и силопередающих

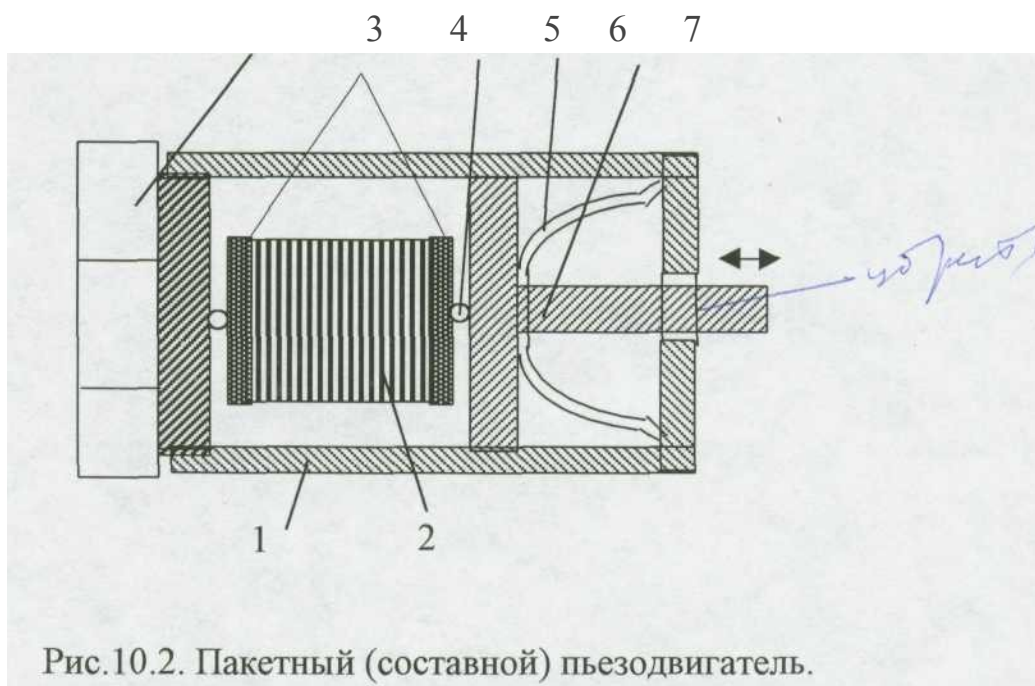


Рис.10.2. Пакетный (составной) пьезодвигатель.

прокладок 4. Он устанавливается в корпусе 1 между винтом 3 и штоком 7. Механический контакт штока и винта с силопередающими прокладками осуществляется через стальные центрирующие шарики. Тарелочная пружина 6 служит для обеспечения предварительного сжатия пакета при повороте винта 3. Такой двигатель может развивать достаточно большие усилия (до 200 Н) и служит для линейных микроперемещений объектов с достаточно большой массой (десятки кг). Его частотный диапазон ограничен собственным электрожюмеханическим резонансом (1-2 кГц), величина которого зависит от массы перемещаемого объекта. Диапазон перемещения от 2 до 50 мкм (зависит от количества элементов).

Тогда можно записать уравнение обратного пьезоэффекта, на котором основан принцип действия пьезоэлектрических двигателей:

$$\frac{\Delta l_i}{l_{0i}} = -\sum_{j=1}^3 \frac{\sigma_j}{Y_{ij}} + d_{ij} E_i, \quad (10.2)$$

где $i=1,2,3$. $d_j - E_i$

В пьезоэлектрических двигателях основные усилия действуют в направлении рабочего перемещения. При этом появляется возможность рассматривать приближенную одномерную модель движения только вдоль интересующего нас направления (например, вдоль оси 3) вне связи с динамикой пьезосреды по другим осям. Для этого случая все буквенные индексы в уравнении могут быть заменены на 3:

$$\frac{\Delta l_3}{l_{03}} = -\frac{\sigma_3}{Y_{33}} + d_{33} E_3, \quad (10.3)$$

где механическое напряжение в образце, направленное по оси 3. Зная значение пьезомодуля керамики, из которой изготовлен пьезоэлемент можно определить относительную деформацию образца по оси 3 для случая не зажатого элемента при $m_3=0$.

Для управления пьезоэлементами, обычно, требуется создание интенсивного электрического поля с напряженностью $E_{\text{тах}}=10$ В/м. Источник напряжения 300-600 В создает такую напряженность в пластине толщиной 0,3 - 1 мм. Абсолютное изменение толщины пластины составит 0,05 - 0,3 мкм.

Характеристики пьезоматериалов. Функциональные возможности пьезоэлементов и их характеристики существенно зависят от свойств пьезоматериалов. При выборе материала для пьезоэлектрических двигателей основное внимание уделяют следующим параметрам:

1. d_{ij} - пьезомодуль (по направлению рабочих деформаций) определяет рабочий диапазон перемещений.
2. $K_{эм}$ - коэффициент электромеханической связи характеризует эффективность преобразования электрической энергии, подводимой к материалу, в механическую.
3. Y_{jj} - модуль Юнга определяет упругие и резонансные свойства материала.
 1. Q_M - механическая добротность влияет на степень затухания колебательных процессов.

2. Статическая характеристика имеет гистерезисный характер, значение которого находится в пределах 10 -30 % и определяется главным образом свойствами пьезоматериала, степенью предварительного сжатия пакета и величиной управляющего напряжения.

Биморфная конструкция используется для увеличения диапазона линейных перемещений (до ед. мм) и получения угловых перемещений объектов небольшой массы до десятков грамм. Простейшая биморфная конструкция рис. 10.3 представляет собой две склеенные между собой пьезоэлектрические пластины, напряжение управления на которые подается таким образом, чтобы одна из них сокращалась, а другая расширялась. При этом происходит изгиб всей конструкции (по аналогии с биметаллической пластиной). Если конструкция закреплена только с одной стороны рис.10.3,а), то свободный конец совершает угловые перемещения, а если с двух сторон рис. 10.3,б), то центральная ее часть совершает линейные перемещения, равные прогибу всей конструкции.

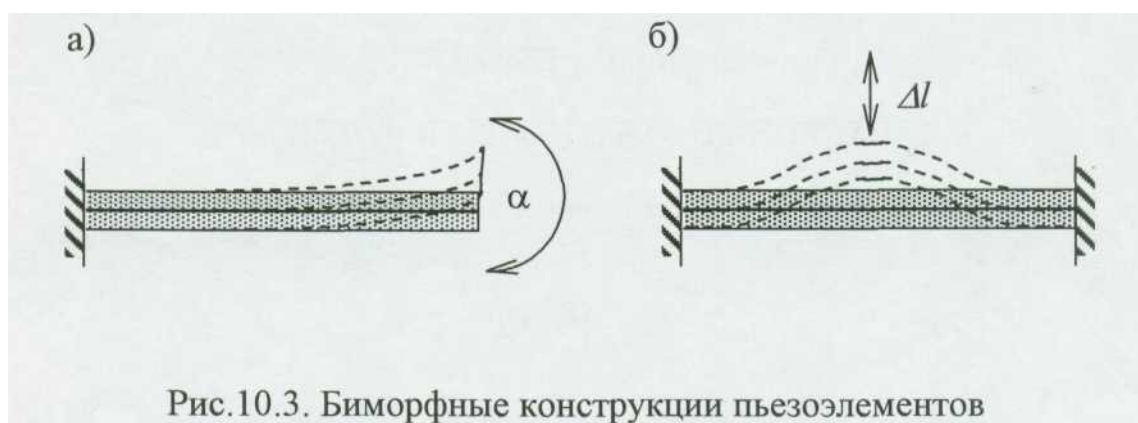


Рис.10.3. Биморфные конструкции пьезоэлементов

Возможна компоновка биморфной конструкции, когда один из элементов пьезопассивен т.е. это может быть металлическая пластина или мембрана.

Конструкции с угловым перемещением используются в системах сканирования и пространственного управления оптическим излучением, в литературе их называют диффлекторами. А конструкции с линейным перемещением в системах юстировки и позиционирования различных оптикомеханических систем.

Дифференциальная конструкция применяется, когда необходимо компенсировать температурную погрешность (тепловое расширение рабочего элемента) и расширить диапазон перемещений без

существенного увеличения величины управляющего напряжения и габаритов двигателя. Такая конструкция может быть построена как на элементах пакетного типа, так и на биморфных элементах. На рис. 10.4 представлена дифференциальная конструкция на элементах пакетного типа. Рабочий элемент 2 состоит из пьезоэлементов, выполненных в виде шайб (дисков), а элемент 3 - из колец. Оба элемента крепятся к

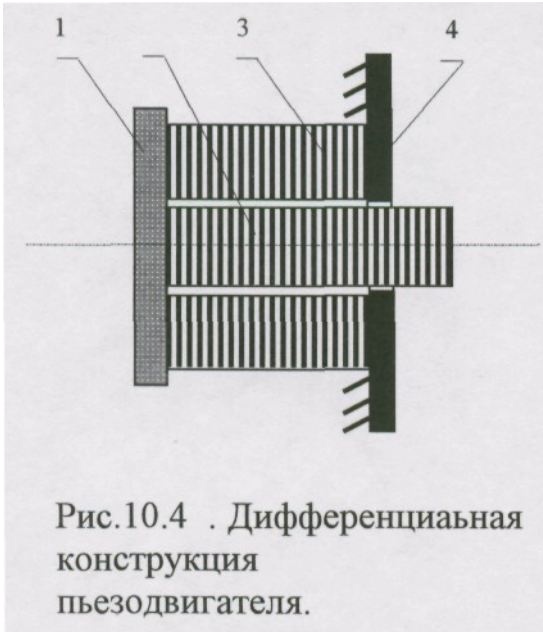


Рис.10.4 . Дифференциальная конструкция пьезодвигателя.

подвижному основанию 1, а элемент 3 своим вторым торцом жестко закреплен на неподвижном основании 4. Свободный торец элемента 2 совершает рабочие перемещения.

Управляющее напряжение подается одновременно на оба элемента так, что элемент 2 - расширяется, а 3-сжимается. Рабочее перемещение

относительно неподвижного основания будет результатом суммирования величин их деформаций. Тепловые деформации будут вычитаться. При точном расчете габаритов пьезоэлементов можно добиться полной компенсации температурной погрешности.

К третьей группе относятся шаговые двигатели манипуляторы,

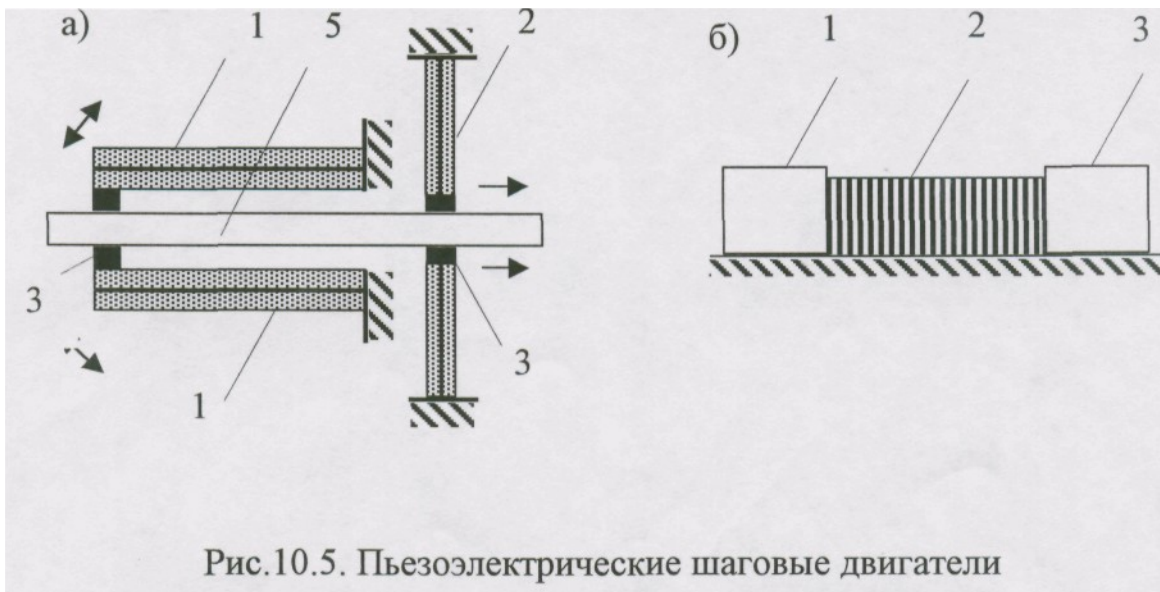


Рис.10.5. Пьезоэлектрические шаговые двигатели

которые служат для перемещения объектов на плоскости или в

пространстве. В основе их конструкций заложены те же принципы построения, что и во второй группе. Т.е. рабочий элемент может быть как биморфным (рис. 10.4,а), так и пакетным (рис. 10.4.б). Для обеспечения шагового режима в конструкции, как правило, имеются фиксирующие устройства, различного принципа действия от электромагнитных до электрореологических (изменение вязкости вещества под действием электрического поля). Биморфная конструкция (рис. 10.4,а) отличается тем, что в ней роль фиксирующих и рабочих элементов выполняют пьезоэлектрические элементы. Рабочие 2 и фиксирующие 1 элементы контактируют с перемещаемым объектом 5 через фрикционные прокладки 3. Напряжение управления подается сначала на рабочие элементы, которые захватывают объект и перемещают его на один шаг. Затем напряжение подается на фиксирующие элементы, которые фиксируют объект в данном положении. Напряжение управления снимается с рабочего элемента, и он занимает исходное положение. Такой цикл повторяется, и объект линейно перемещается. Шаговый двигатель (рис. 10.4,б) имеет два фиксирующих элемента 1 и 3, например, электромагнитного типа и рабочий пьезопакет 2. Элементы 2 фиксируют положение рабочего пакета относительно горизонтальной поверхности. Рабочий цикл начинается с подачи напряжения на элемент 1, затем напряжение управления подается на пакет 2, который удлиняется и перемещает элемент 3 на один шаг, после чего срабатывает элемент 3. Напряжение с элемента 1 и пакета 2 снимается. Элемент 1 перемещается на один шаг в том же направлении. При многократном повторе цикла двигатель будет перемещаться по плоскости в заданном направлении. При необходимости двух координатного перемещения в конструкции используют два таких набора, расположенных перпендикулярно друг другу.

Диапазон перемещений таких двигателей ограничен лишь размерами рабочей поверхности. Минимальный шаг перемещения определяется свойствами и размерами пьезоэлементов и величиной управляющего напряжения. Плавность хода зависит от минимального шага и частоты следования управляющих импульсов напряжения.

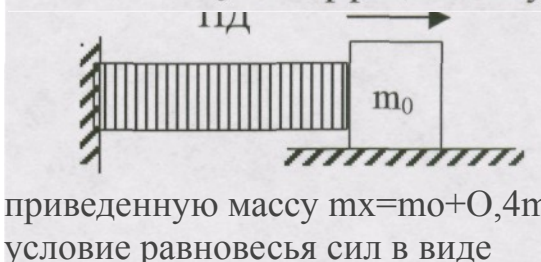
ЛЕКЦИЯ №11

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рассмотрим математическую модель составного пьезодвигателя с некоторой нагрузкой массой m_0 рис. 11.1. Пьезопакет состоит из N дисков, начальная его длина l_0 площадь сечения S_0 . Длина пакета под действием электрического поля E изменяется на величину Δl . Кроме объекта перемещаются элементы объема активной части пакета, масса которого m_k . Учитывая то, что пакет

$$F_y = F_y + F_c + F_d + F_{дин}, \quad (11.1)$$

где $F_y = K_y \Delta l$ – усилие упругой деформации пьезопакета, Н;
 $F_y = d_3 Y S_0$ – 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.



и некоторая его часть не
 ении, обычно,
 принимают во внимание суммарную

приведенную массу $m_x = m_0 + 0,4m_k$. Для данного случая можно записать условие равновесия сил в виде

Введем следующие обозначения: $K_{п} = K_y \epsilon_3$ – коэффициент прямого пьезоэффекта; $K_0 = K_y \epsilon_1 \epsilon_3$ – коэффициент обратного пьезоэффекта; $V = d\Delta l/dt$ – скорость перемещения объекта; $U = E l_0$ – напряжение управления пьезопакетом; C_0 – емкость пьезопакета; R_B – внутреннее сопротивление источника управляющего напряжения $T_3 = C_0 R_B$ – электрическая постоянная времени, с. Тогда, с учетом уравнения равновесия модель пьезодвигателя можно представить структурной схемой рис.11.2.

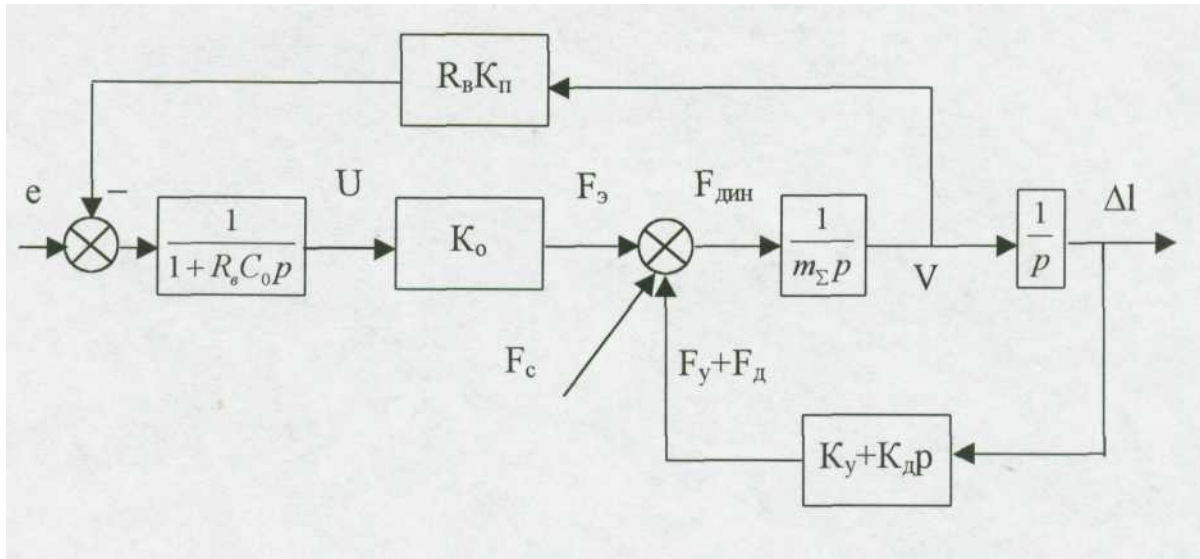


Рис.11.2 Структурная схема пьезодвигателя.

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 характеристик модели и реального двигателя получается для экспериментально определенных параметров τ^{\wedge} , K_y , K_o , K_n , C_o , R_B . Модель условно можно разбить на две части: одна - электрическая, в которую входят апериодическое звено первого порядка, учитывающее инерционность устройства усилитель двигатель, K_o - обратный пьезоэффект и K_n - обратное влияние прямого пьезоэффекта; вторая - механическая, учитывающая механическую инерционность двигателя с нагрузкой (первый интегратор), переход от скорости к перемещению (второй интегратор) и упругие свойства пьезопаета с демпфированием (элемент обратной связи). Передаточная функция для такой модели будет иметь вид

$$W(p) = \frac{\Delta l(p)}{U(p)} = \frac{K_o / K_y}{1 + c_1 p + c_2 p^2 + c_3 p^3}, \quad (11.2)$$

$$\text{где } c_1 = R_o C_o + \frac{K_o}{K_y} + R_o K_n \frac{K_o}{K_y},$$

$$c_2 = \frac{m_{\Sigma}}{K_y} + R_o C_o \frac{K_o}{K_y},$$

$$c_3 = R_o C_o \frac{m_\Sigma}{K_y}$$

Если пренебречь внутренней обратной связью по скорости ($K_n=0$), влиянием внутреннего демпфирования ($K_d=0$) и инерционностью преобразователя $T_3=0$, то выражение 11.2 примет вид передаточной функции консервативного звена

$$W(p) = \frac{K_o / K_y}{1 + \frac{m_\Sigma}{K_y} p^2}, \quad (11.3)$$

а чтобы учесть демпфирование, можно использовать передаточную функцию колебательного звена

$$W(p) = \frac{K_o / K_y}{1 + 2\xi T_m p + T_m^2 p^2}, \quad (11.4)$$

где $T_m = \sqrt{\frac{m_\Sigma}{K_y}}$, $\xi = \frac{1}{2Q}$, ($Q=10-100$)- 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 u определяется как отношение максимальной ширины петли по координате перемещения Δh к максимальному для данной петли значению перемещения l_{\max} , т.е.

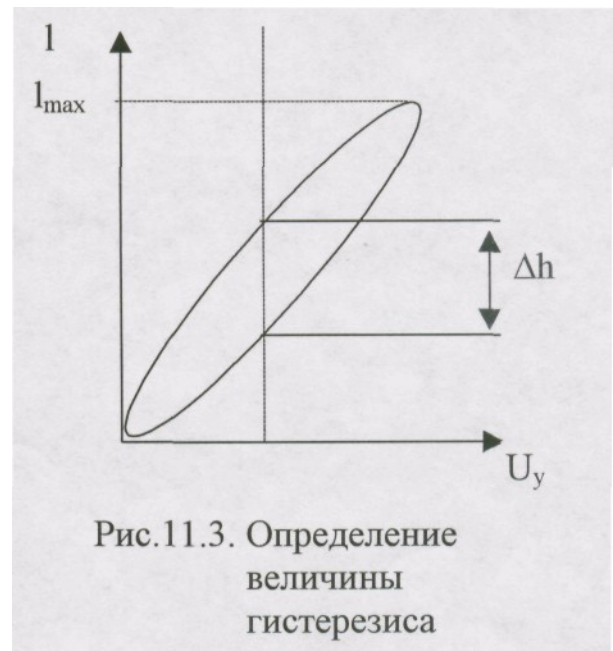


Рис.11.3. Определение величины гистерезиса

$u = \frac{\Delta h}{l_{\max}}$ (рис.11.3). И можно доказать, что при гармоническом входном воздействии величина фазового сдвига с хорошим приближением определяется по формуле ($\varphi = \arcsin(u)$). Этот фазовый

сдвиг можно учитывать в модели двигателя звеном чистого запаздывания с передаточной функцией вида

$$W(p) = e^{-tp}, \quad (11.5)$$

где t - время запаздывания.

Величина фазового сдвига вносимого звеном чистого запаздывания является функцией круговой частоты т.е. $\phi(\omega) = -\omega t$. Поэтому при моделировании нужно учитывать этот фактор и вносить коррекцию в величину t , в зависимости от частоты управляющего воздействия.

ЛЕКЦИЯ №12

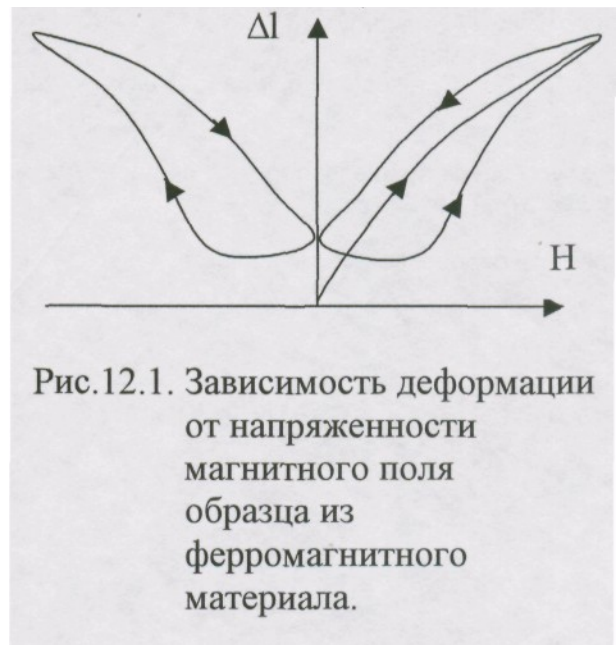
МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Магнитострикцией называется изменение размеров и формы образца из ферромагнитного материала при его намагничивании. Обратное магнитострикции явление изменения намагниченности ферромагнитного образца при его деформации называется магнитоупругим эффектом. Магнитострикционными являются ферромагнитные металлы (никель) и сплавы (на основе железа, кобальта, платины и др.), а также керамические ферриты, образцы из которых обладают наиболее выраженной способностью изменять размеры при изменении намагниченности.

Связь между магнитострикционной деформацией и параметрами намагничивающего поля, в отличие от пьезоэлектрических материалов, имеет четный характер с явно выраженным гистерезисом рис. 12.1.

Техническое применение магнитострикционных материалов связано с работой на одной ветви четной зависимости. Линейное изменение размеров образцов из ферромагнитных материалов характеризуется коэффициентом магнитострикции $X = \Delta l / l$. Величина Δl невелика и ее максимальное значение X_s (магнитострикция насыщения) для большинства материалов лежит в пределах от 20×10^{-6} до 90×10^{-6} .

Характер изменения коэффициента магнитострикции в зависимости от величины напряженности магнитного поля для различных материалов показан на рис. 12.2. Нужно отметить, что знак X у одних материалов "+", т.е. они только расширяются, а у других "-" и они только сужаются. Данные величины X_s относятся к тому случаю, когда деформация ничем не ограничена. Если же стержень зажат и его перемещения сведены к нулю, то при намагничивании в стержне будут



возникать силы, максимальная величина которых на единицу площади поперечного сечения составит $\langle r_s = Yl_s$, где Y - модуль Юнга. Эти усилия значительны, например, для никеля составляет $7,2 \times 10^6$ Н/м². Т.е. никелевый стержень сечением в 1 см² способен развивать усилие в 70 кГ.

Величина магнитострикции существенно зависит от направления вектора самопроизвольной намагниченности по отношению к кристаллографическим осям. Т.е. имеет место анизотропия материала. На практике математическое описание процессов производится вдоль оси рабочих деформаций.

Между уравнениями пьезоэффекта и линеаризованными уравнениями магнитострикции существует формальная аналогия.

Так для магнитострикции (обратный эффект) имеем а для магнитоупругого эффекта (прямой эффект)

$$\frac{\Delta l}{l} = -\frac{\sigma}{Y} + d_m H, \quad (12.1)$$

$$B = -d_m \sigma + \mu_r \mu_0 H, \quad (12.2)$$

где B – магнитная индукция в образце, Тл;
 H – напряженность магнитного поля, А/м;
 σ – механическое напряжение, Н/м²;
 Y – модуль упругости Юнга, Па;
 μ_0 – магнитная постоянная ($4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м);
 μ_r – относительная магнитная проницаемость материала;
 d_m – пьезомагнитный модуль, м/А.

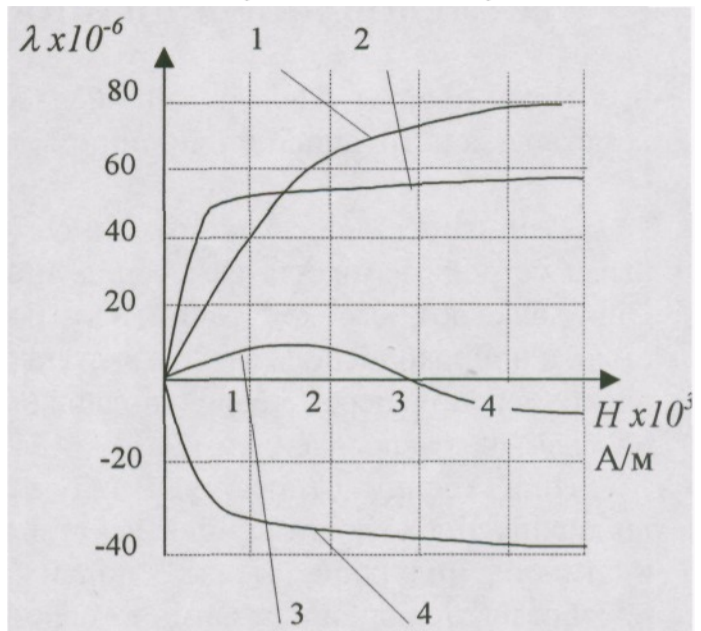


Рис.12.2. Зависимость коэффициента магнитострикции от напряженности магнитного поля (1 – пермендюр, 2 – альфер, 3 – железо, 4 – никель).