

УДК 621.318.56(088.8)

ПЛЕНОЧНАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА - ОСНОВА СОЗДАНИЯ
УНИВЕРСАЛЬНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ ЕМКОСТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
С ВЫСОКОЙ ЭНЕРГОЕМКОСТЬЮ

В.Л. Дятлов

В в е д е н и е

Пленочная электромеханика [1-3] - новое научно-техническое направление, в котором для разнообразных применений используют преобразование электрической энергии в механическую работу путем взаимодействия сверхтонких пленок с электрическим полем.

К настоящему времени в пленочной электромеханике проведены исследования пленочных электростатических реле мембранного [4] и консольного [5] типов; пленочных электростатических резонансных фильтров [1,6]; пленочных электростатических матричных модуляторов света мембранного [1] и консольного [1] типов (для параллельного ввода данных в ЭВМ и для широкоэкранного телевидения); пленочных электростатических индикаторов [7] (для широкоформатных систем отображения информации); пленочных электростатических световых затворов [7]; мембранных зеркал телескопов с управляемо-подвижной поверхностью [8] (для устранения оптических искажений, возникающих из-за турбулентности атмосферы); пленочных акселерометров и датчиков колебаний [1]; пленочных покрытий летательных тел с волнообразным движением поверхности [9] (для уменьшения влияния турбулентности при дозвуковых скоростях); пленочных электростатических (емкостных) двигателей возвратно-поступательного движения [10].

Становление и развитие пленочной электромеханики стало возможным с появлением технологий сверхтонких пленок из неорганических (в микроэлектронике) и полимерных (в химической промышленности) материалов. Совокупность свойств таких пленок: относительно малая упругая энергия большого изгиба; малая масса при более вы-

соких, чем у "монолитных" материалов, удельных механических и электрических параметрах; относительно малое электрическое напряжение, необходимое для получения максимально допустимого электрического поля (электростатических сил) и т.п. - все это делает их почти идеальным "промежуточным рабочим телом" в цепи преобразования электрической энергии в механическую работу.

Указанные свойства сверхтонких пленок (толщиной в единицы микрона и менее) открыли возможность создания новых емкостных структур для преобразования электрической энергии в механическую работу (в принципе и обратно), отличных от классических и неизмеримо более эффективных. Известно [11], что в классической структуре емкостных машин (электрофорных, появившихся во второй половине XIX века и основанных на открытом Эпинусом в середине XVIII века явлении электростатической индукции) энергия преобразуется в результате перемещения относительно друг друга и параллельно своим плоскостям заряженных жестких пластин. Последние используются для сохранения постоянных величин рабочих зазоров при действии значительных электростатических сил. В свою очередь, для обеспечения жесткости пластин затрачивается большое количество материала, что приводит к относительно большим габаритам и весу соответствующих машин. Кроме того, недостатком классических структур является невозможность обеспечения малых величин рабочих зазоров, а при относительно больших их величинах для получения достаточных электрических полей (сил) требуются высокие электрические напряжения.

В новых же структурах преобразование энергии происходит в результате смещения тонких пленок относительно жестких пластин-электродов или смещения тонких пленок относительно тонких же пленок, причем это смещение происходит путем изгиба в направлении, перпендикулярном плоскости пленок. Варианты этих структур изображены на рис. I, а-е (1 - металлические пленки, 2 - диэлектрические пленки, 3 - монолитные электроды), где стрелками с индексом v изображены скорости движения под действием электростатических сил определенных точек в подвижных пленках, а стрелками с индексом N изображены силы, которые от изображенных элементов могут быть приложены к внешней нагрузке. В электрооптических пленочных устройствах [1] все изображенные на рис. I структуры используются при преобразовании электрической энергии в механическую работу перемещения и деформации пленок. В пленочных электростатических реле мембранного типа [4, 12] используется структура рис. I, а для пере -

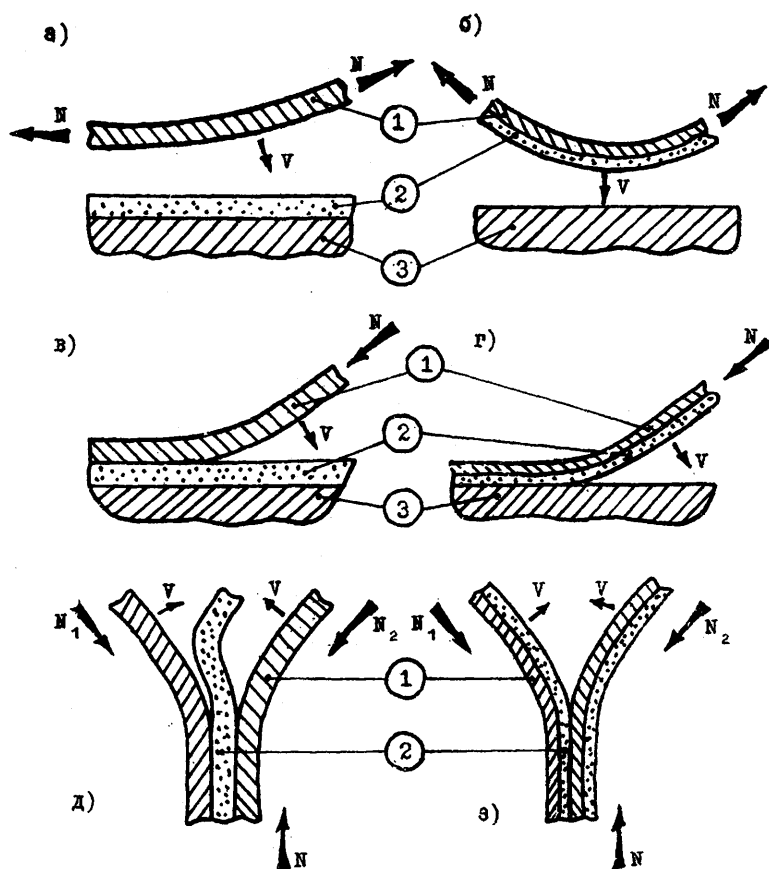


Рис. I

мещения контактов, а структура рис. I, в - для создания контактного давления. Структуры, изображенные на рис. I, д, е, возникают как компоненты структуры пленочных емкостных (электростатических) двигателей возвратно-поступательного движения [10], например, при вытеснении газа из плоскостей ячеек, и они используются для передачи сил на внешнюю нагрузку.

В пленочных емкостных структурах эффективность преобразования электрической энергии в механическую работу довольно высока.

Она может быть определена посредством энергоемкости - отношения работы либо к объему (весу) подвижного элемента, либо к объему (весу) всего устройства в целом. Первое определение имеет смысл для оценки таких устройств, в которых важен не объем (вес) элементов конструкции, а скорость преобразования энергии (корень квадратный из весовой энергоемкости пропорционален максимальной скорости подвижного элемента); второе определение имеет смысл для оценки эффективности универсальных двигателей. По первому определению [7] объемная энергоемкость структур рис. I, а, в выразится так:

$$a_C = \frac{1}{V} \int_{C_{\min}}^{C_{\max}} \frac{U^2}{2} dC = k_C \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2} \cdot \frac{\Delta}{h}, \quad (1)$$

где U - напряжение между пленкой и монолитным электродом; E - рабочая напряженность электрического поля (в диэлектрике); V, C - соответственно объем подвижной пленки и емкость между подвижной пленкой и электродом на единицу площади; ϵ - диэлектрическая постоянная диэлектрической пленки; Δ, h - толщины диэлектрической пленки и подвижной пленки соответственно; k_C - коэффициент, позволяющий учесть плотность прижатия подвижной пленки к диэлектрическому слою.

При использовании полимерных металлизированных подвижных пленок (рис. I, б, г) объемная энергоемкость, по первому определению, выразится так:

$$a_C = k_C \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2} \cdot \frac{\Delta}{\Delta + h}, \quad (2)$$

где Δ, h - толщины диэлектрического слоя и металлизации соответственно. Весовые энергоемкости могут быть получены из (1) и (2) делением a_C на удельный вес материала подвижных пленок.

Эффективность пленочных емкостных структур можно показать сравнивая численные значения, рассчитанные по (1) и (2), с аналогичной энергоемкостью, например, для электромагнитов. Для электромагнитов объемная энергоемкость (без учета объема катушек), определенная как отношение работы к объему подвижной части якоря (с учетом нелинейности кривой намагничивания магнитных материалов [13]), имеет вид:

$$a_L = \frac{1}{V} \int_{\delta_{\min}}^{\delta_{\max}} d\delta \int_0^{\phi} \frac{\partial i}{\partial \phi} d\phi = k_L \frac{1}{l_J} \int_0^{H_m} B dH, \quad (3)$$

где i - ток; ϕ - потокоцепление; V - объем якоря; δ - величина зазора; B, H - магнитные индукция и поле в магнитном материале (одинаковом для якоря и сердечника); l - длина силовой линии поля якоря и сердечника; l_J - длина силовой линии якоря; k_L - коэффициент, позволяющий учесть влияние потоков рассеивания.

В табл. I представлены расчетные значения величин $a_L = \int_0^{H_m} B dH$, где H_m - значение H на кривых намагничивания наиболее энергоёмких электротехнических сталей при $\mu = B/H = 500$ [14]; $a_C = \frac{\epsilon \epsilon_0 E_m^2}{2}$, где $E_m = 5 \cdot 10^7$ в/см принято, исходя из анализа значений рабочих электрических полей в действующих пленочных емкостных устройствах. В табл. I эти величины представлены как в Дж/м³, так и в Дж/кг (в последнем случае учтен удельный вес материалов подвижных элементов). Величины a_L и a_C существенно определяют энергоёмкость электромагнитов и пленочных структур соответственно, так как коэффициент $k_L 1/l_J$ в (3) незначительно превышает единицу, коэффициент $k_C = \frac{\Delta}{\Delta + h}$ в (2) меньше единицы, но близок к ней (для полимерных металлизированных лент $h \ll \Delta$), коэффициент $k_C \Delta/h$ в (1) может быть больше единицы, но практически близок к единице. Сравнивая значения a_L и a_C , видим, что первые существенно меньше вторых. Это обстоятельство отражает более высокую эффективность преобразования электрической энергии в механическую работу в пленочных структурах по сравнению с электромагнитами. Более высокую энергетическую эффективность пленочных устройств, чем электромагнитов отражает и сравнение соответствующих им времен переключений: так, в пленочных реле 10^{-4} - 10^{-5} сек (см. [15, 16]) и модуляторах 10^{-3} - 10^{-7} сек (см. [17, 18]), а в электромагнитных реле $2 \cdot 10^{-3}$ - 10^{-2} сек (см. [14]) и молотках $(1-2) \cdot 10^{-2}$ сек (см. [19]). Следует подчеркнуть, что мы проводили сравнение энергоёмкостей только относительно подвижных элементов структур, а не структур в целом.

В связи с последующим рассмотрением энергоёмкостей пленочных емкостных двигателей возвратно-поступательного движения уместно

Т а б л и ц а I

Сравнение энергоемкостей электромагнитов
и пленочных емкостных структур

Устрой- ство	Материалы: магнитопровода или диэлектрика и под- вижной пленки	B_m [Т]	H_m [а/м]	E_m [в/м]	ϵ	a_L $\left[\frac{\text{дж}}{\text{м}^3} \right] / \left[\frac{\text{дж}}{\text{кг}} \right]$	a_C $\left[\frac{\text{дж}}{\text{м}^3} \right] / \left[\frac{\text{дж}}{\text{кг}} \right]$
Э л е к т р о м а г н и т ы	Пермаллой	2,15	3500	-	-	$4,2 \cdot 10^3$ 0,6	
	Сталь Э-330	1,85	4000	-	-	$4,2 \cdot 10^3$ 0,6	
	Сталь низколе- гированная, Э.	1,65	3000	-	-	$2,8 \cdot 10^3$ 0,4	
	Сталь конструк- ционная 10 (от- ожженная)	1,60	2800	-	-	$2,6 \cdot 10^3$ 0,4	
	Пермаллой 50Н	1,42	1500	-	-	$1,2 \cdot 10^3$ 0,15	
Пленочные устройства	Полиэтилентереф- талат - металли- зированный поли- этилентерефталат	-	-	$5 \cdot 10^7$	3		$3 \cdot 10^4$ 20
	Моноксид крем- ния-бронза БрБ ₂			$5 \cdot 10^7$	5		$5 \cdot 10^4$ 6

показать энергоемкости современных наиболее широко применяемых таких двигателей. Эти энергоемкости (а также КПД, ход и время хода) представлены в табл.2 для электромагнитных, пневматических (на примерах молотков) и гидравлических двигателей, а также мышц человека (давление в поперечном сечении мышц 10-15 атм, ход 30-60% [21]). Для получения косвенных представлений о возможностях увеличения энергоемкости некоторых пленочных емкостных двигателей приведены также энергоемкости современных рулонных конденсаторов.

Из проведенного в табл.2 сравнения видно, что наиболее высокие энергоемкости характерны для пневматических и гидравлических двигателей возвратно-поступательного движения (вес молотков существенно определяет вес двигателей), с чем и связано их широкое применение в технике, несмотря на существенные их недостатки (плохая управляемость, утечка "рабочего тела", сложная схема энергетического обеспечения, малая удельная мощность гидравлических двигателей и т.д.). Энергоемкость электромагнитных двигателей (они используются в пружинных электромеханических и электропневматических молотках) почти на порядок меньше энергоемкости гидравлических и меньше энергоемкости пневматических двигателей. Напомним [24], что низкая энергоемкость, присущая электромагнитным машинам, обуславливается массивностью магнитопроводов, служащих только для искусственного создания разноименных зарядов на границах рабочего зазора, а энергоемкость классических емкостных машин [11] еще ниже (на один-два порядка), чем у электромагнитных, т.е. применение жестких монолитных пластин в емкостных машинах приводит к большему увеличению веса, чем применение магнитопроводов в индуктивных машинах.

Из табл.2 видно, что энергоемкость мышц человека на два порядка выше, чем у современных двигателей возвратно-поступательного движения. Этот факт приобретает большое значение в связи с развитием робототехники [25,26], так как к роботам предъявляют требование, по которому они "...должны занимать не больше места, чем заменяемые ими люди" [26].

Итак, целью настоящей работы является анализ энергоемкостей структур пленочных емкостных двигателей возвратно-поступательного движения; допустимых электрических и механических нагрузок в пленочных элементах, существенно определяющих энергоемкость.

Сравнение энергоемкостей

Наименования	Энерго - емкость, дж/кг	КПД	Время на полный ход, сек	Ход, мм или в %
Электромагнитные молотки [19]	0,24-1,0	0,18-0,45	0,01-0,02	9-60
Пружинные электро- механические мо- лотки [19]	0,9 -2,1	0,20-0,55	0,03	15-85
Электропневматиче- ские молотки [19]	0,48-1,8	0,29-0,39	0,02-0,03	37-75
Пневматические мо- лотки [19]	1,3 -4,6	0,1 -0,15	0,01-0,02	50
Гидравлические двигатели (пример) [20]	12,5	0,5	1	100 за 1 сек
Мышцы человека (спринтеры) [21]	200-600	0,03-0,35	0,1 -0,15	30-60%
Конденсаторы обще- го назначения [22]	0,34-9,9	-	-	-
Импульсные конден- саторы [23]	25-250	-	-	-

§1. Анализ структур пленочных емкостных двигателей
возвратно-поступательного движения

В основе пленочных емкостных двигателей лежит использование многослойных пленочных конденсаторов с подвижными пленками (пленочных пакетов). Пример конструкции такого двигателя показан на рис.2 (1 - коллектор, 2 - диэлектрическая пленка, 3 - металлическая пленка - металлизация; 4 - скрепляющая прослойка) [10]. Пакеты пленок позволяют получить двигатели с достаточно большим усилием и ходом. Использование же пакетов пленок, взаимодействующих с электрическим полем, выдвигает новую задачу в пленочной электромеханике - это создание более или менее синхронного перемещения пленок при действии такого двигателя. Обеспечение таких ус-

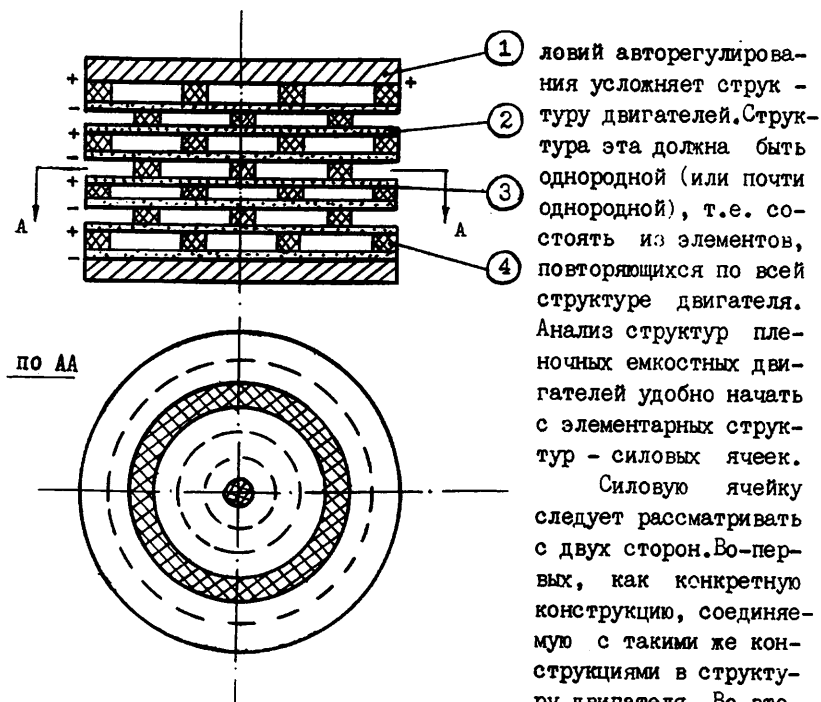


Рис. 2

ловый авторегулирования усложняет структуру двигателей. Структура эта должна быть однородной (или почти однородной), т.е. состоять из элементов, повторяющихся по всей структуре двигателя. Анализ структур пленочных емкостных двигателей удобно начать с элементарных структур - силовых ячеек. Силовую ячейку следует рассматривать с двух сторон. Во-первых, как конкретную конструкцию, соединяемую с такими же конструкциями в структуру двигателя. Во-вторых, как некое абстрактное геометриче-

ское тело, на поверхности которого показаны точки приложения сил и заданы зависимости этих сил от перемещений точек поверхности. Оба рассмотрения позволяют провести целостный математический анализ структур двигателей: первое - получить силовые зависимости для ячеек, второе - представление об эффективности преобразования энергии по структуре в целом (в том числе при тех или иных дестабилизирующих факторах).

На рис.3,а показано схематическое изображение в целом структуры (с распределенными силами и с сосредоточенными силами) двигателей с перемещениями только по вертикали. Штриховыми линиями выделены силовые ячейки 2.

Из рис.3,а видно, что в двигателе силовые ячейки соединены последовательно-параллельно, т.е. образуют решетку. Крайние ячейки решетки соединены с коллекторами I - монолитными пластинами, служащими для суммирования сил по решетке.

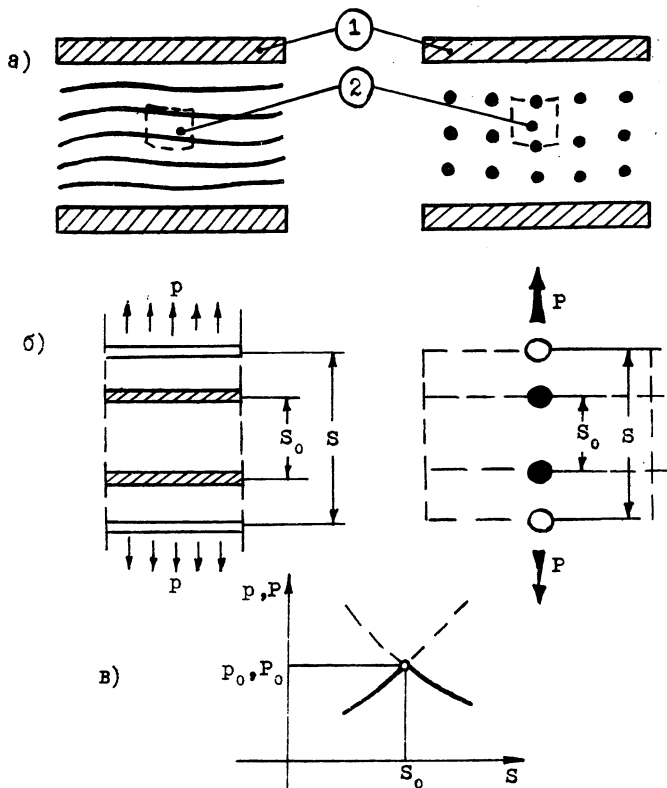


Рис.3

На рис.3,б показаны силовые ячейки в двух состояниях: в исходном S_0 и в рабочем S . Ход ячеек $x = S - S_0$. Основные свойства ячеек характеризуются зависимостями $p(S)$, $P(S)$ соответственно для случая распределенных p и для сосредоточенных P сил, действующих от данной ячейки на соседние. Из теории решеток известно [27, 28], что для ячеек с расширением условие синхронного (равномерного) расширения будут $\frac{dp}{dS}$, $\frac{dP}{dS} < 0$, а для ячеек с сокращением будет $\frac{dp}{dS}$, $\frac{dP}{dS} > 0$, если p , P определить положительными как для яче-

ек со сжатием, так и для ячеек с расширением. На рис.3, в ход зависимостей $p(s)$ и $P(s)$, обеспечивающий синхронное расширение или сокращение, показан сплошными кривыми. Условия, налагаемые на силовые характеристики ячеек, являются основными в теории пленочных емкостных двигателей, так как они обеспечивают одинаковое преобразование энергии по всем ячейкам структуры двигателей.

Приведем три схемы такого преобразования.

Схема 1: энергия электрического поля $\rightarrow$ внешняя механическая работа.

Схема 2: энергия электрического поля $\rightarrow$ упругая энергия сжатия диэлектрического слоя $\rightarrow$ внешняя механическая работа.

Схема 3: энергия электрического поля $\rightarrow$ упругая энергия сжатия-растяжения диэлектрического слоя $\rightarrow$ кинетическая энергия движения пленок $\rightarrow$ внешняя механическая работа.

Ниже показаны примеры силовых ячеек для каждой из перечисленных схем преобразования энергии и проведен анализ силовых характеристик соответствующих силовых ячеек.

С х е м а 1. Энергия электрического поля $\rightarrow$ внешняя механическая работа (электрическая энергия непосредственно переходит во внешнюю механическую работу).

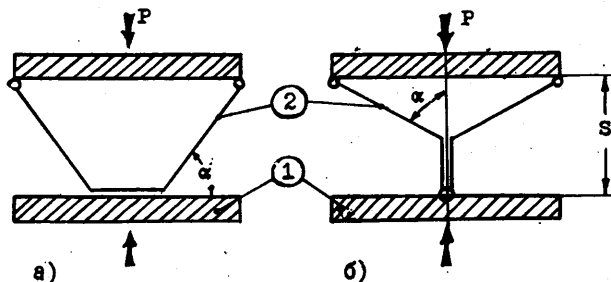


Рис. 4

На рис.4 показаны две силовые ячейки для схемы 1 (причем 1 - локальные коллекторы-распорки, 2 - пленки). На рис.4,а изображена ячейка, в которой пленочная лента под действием электростатических сил распластывается путем наката на нижней пластине. Структура этой ячейки аналогична структурам, изображенным на рис.1,в,г. На рис.4,б изображена ячейка, в которой две пленочные ленты под действием электростатических сил накатываются друг на друга. Структура этой ячейки аналогична структурам, изображенным на рис.1,д,е.

Для силовых ячеек рис.4 характерен высокий коэффициент электро-механического преобразования

$$k_{эм} = \frac{\frac{\Delta C U^2}{2}}{\frac{CU^2}{2}} = \frac{C_K - C_H}{C_K}, \quad (4)$$

где C_H, C_K - соответственно емкости до и после наката пленочных лент. Для этих ячеек $k_{эм} \cong 1$. Из (4) и (1) видно, что энергоемкость, определяемая через запасаемую в конденсаторе энергию, пропорциональна $k_{эм}$.

Силовые характеристики ячеек можно получить, используя баланс энергий [7] и пренебрегая жесткостью пленочных лент. В указанном приближении силовая характеристика для ячейки рис.4,а

$$\bar{p} = 2\bar{s} \frac{\sin \alpha_0}{1 - \cos \alpha_0}, \quad (5)$$

где $\bar{p} = \frac{P}{N_0}$; $N_0 = \frac{C_0 U^2}{2}$; C_0 - емкость на единицу площади накатываемой ленты; $\bar{s} = \frac{s}{s_0}$; s_0 - размер ячейки до наката ленты (размер s показан на рис.4,а); α_0 - угол до наката лент (угол α показан на рис.4,а). Зависимость $\bar{s}$ этой ячейки от угла α получается из геометрических соотношений:

$$\frac{\bar{s}}{s} = \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_0} \cdot \frac{1 - \cos \alpha_0}{1 - \cos \alpha}. \quad (6)$$

Из (6) видно, что рассматриваемая ячейка при малых значениях угла имеет большой ход. Например, при изменении угла α_0 от некоторого малого значения α_0 до значения 90° : $\bar{s} = \bar{s}(\alpha - \alpha_0) - \bar{s}(\alpha = 90^\circ) \cong$

$$\cong 1 - \frac{\alpha_0}{2}, \text{ где } \bar{s} = \frac{s_0 - s(\alpha = 90^\circ)}{s_0}. \text{ Силовая характеристика ячейки}$$

рис.4,б в указанном приближении выразится

$$\bar{p} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2 \alpha_0}{(1 - \bar{s} \cos \alpha_0)^2} - 1 \right]; \quad (7)$$

а зависимость характерного ее размера от угла α как

$$\bar{s} = \frac{1}{\cos \alpha_0} - \operatorname{tg} \alpha_0 \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} . \quad (8)$$

Эта ячейка при малых значениях угла α_0 имеет малый ход

$$\bar{x} = \bar{s}(\alpha = \alpha_0) - \bar{s}(\alpha = 90^\circ) \cong \alpha_0 .$$

Силовые характеристики ячеек (5), (7) удовлетворяют условию $\frac{d\bar{p}}{d\bar{s}} > 0$, т.е. условию синхронности при сжатии.

Решетка из ячеек, изображенных на рис.4, имеет удовлетворительную объемную энергоемкость только при малых значениях углов α_0 . При малых углах α_0 для ячейки рис.4,а можно получить удовлетворительную весовую энергоемкость при компенсации относительно больших поперечных сил, например, располагая эти ячейки в кольцо в конструкции двигателя, изображенной на рис.2. При этом же условии для ячейки рис.4,б можно легко получить относительно большую весовую энергоемкость благодаря относительно малым силам сжатия, действующим на распорки. Следует, конечно, учитывать, что из ячеек рис.4,б при малых α_0 невозможно получить двигатели с большим ходом.

При малых углах α_0 и холостом ходе время сокращения рассматриваемых ячеек в большей мере зависит от скорости вытеснения газа из зазора, чем от инерции подвижных элементов ячейки. Поэтому уравнение движения пленочных лент можно получить, приравнявая электростатическое давление к давлению вытесняемого газа (предполагая, что газ вытекает поперек лент [4]):

$$\frac{\epsilon_0 U^2}{2\left(\frac{\Delta}{\epsilon} + y\right)^2} = - \frac{\eta b^2}{y^3} \frac{dy}{dt} , \quad (9)$$

где y - величина переменного зазора; η - коэффициент вязкости газа; b - ширина ленты. При любом разумно малом α_0 в исходном положении ленты $y \gg \frac{\Delta}{\epsilon}$ почти по всей ее длине, т.е. в (9) можно пренебречь величиной $\frac{\Delta}{\epsilon}$. Следовательно, время сокращения ячеек можно оценить постоянной времени линейного уравнения, получаемого из (9) при $\frac{\Delta}{\epsilon} = 0$:

$$\tau = \frac{2\eta b^2}{\epsilon_0 U^2} = \frac{2\eta b^2}{\epsilon_0 E^2 \Delta^2}. \quad (10)$$

Например, при $\eta = 1,72 \cdot 10^{-5}$ кг/мсек (воздух), $b = 10^{-2}$ м, $\Delta = 3 \cdot 10^{-6}$ м, $E = 5 \cdot 10^6$ в/м, $\tau \approx 1,7 \cdot 10^{-2}$ сек.

С х е м а 2. Энергия электрического поля $\rightarrow$ упругая энергия сжатия диэлектрического слоя $\rightarrow$ внешняя механическая работа (электрическая энергия переходит в энергию упругого сжатия диэлектрического слоя и частично переходит во внешнюю механическую работу; энергия упругого сжатия переходит во внешнюю механическую работу).

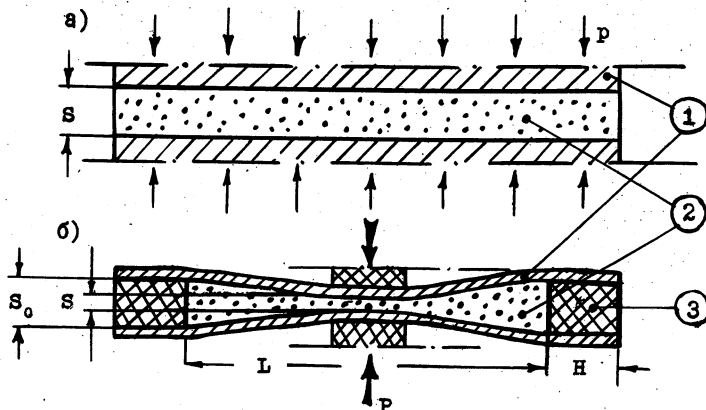


Рис.5

На рис.5 показаны силовые ячейки рассматриваемой схемы (1 - металлические пленки или полимерные металлизированные, 2 - сжимаемая диэлектрическая среда, 3 - скрепляющие прослойки (распорки)). На рис.5,а изображена ячейка, в которой тонкий слой упругой изолирующей среды расположен между двумя металлическими пленками. При разности потенциалов между пленками электростатические силы сжимают упругий слой. Структура этой ячейки аналогична структуре мишени электронно-лучевой трубки с эластичной металлизированной пленкой [29]. На рис.5,б изображена та же силовая ячейка, но со скрепляющими распорками. При одинаковом сжатии упругой среды в этой ячейке ход приблизительно в два раза больше, чем в первой.

В ячейке рис.5,а упругий слой может быть выполнен из резиноподобного вещества с коэффициентом упругости при сжатии (с посто-

янным поперечным сечением "образца"), равном $E_{эф} = E/1 - 2\mu$, где E и μ - значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона. Так, например, для мягкой резины $E \approx 200$ атм; $\mu \approx 0,47$ и, следовательно, $E_{эф} = 3300$ атм. В то же время достижимое электростатическое давление при использовании тонких слоев резины в качестве диэлектрика составляет около 1 атм. При таком давлении ход $\bar{x} = S_0 - S/S_0 = P_{эл.ст.}/E_{эф} \approx 3 \cdot 10^{-4}$, т.е. весьма мал. При этом мал и коэффициент $k_{эм} \approx \bar{x}$, и соответственно мала емкость.

В ячейке на рис.5,б упругий слой может быть выполнен не только из резины, но и из жидкого или газообразного изолирующего вещества.

Сжимаемость жидкостей (β) меньше сжимаемости мягких резин (керосин $E_{эф} = \frac{1}{\beta} = 1,5 \cdot 10^4$ атм). Хотя целесообразность их применения для рассматриваемых целей проблематична, тем не менее возможна, например, для выполнения ячеек рис.5,б из эластичных (заметно растяжимых) пленок.

Ниже исследуются силовые характеристики ячеек рис.5,б, заполненных газом, при $L \gg H$ и $L \approx H$. Предполагается, что сжатие происходит при некотором постоянном значении разности потенциалов, а расширение при разности потенциалов, равной нулю. В первом случае, при сжатии, силовая характеристика в нормированном виде $\bar{p}(\bar{s}) = \bar{P}_{эл.ст.} - \bar{P}_{газа}$, где $\bar{P}_{эл.ст.} = P_{эл.ст.}/P_0$; $P_{эл.ст.}$ - среднее по длине L электростатическое давление; P_0 - начальное давление газа в полости ячейки и вне ее; $\bar{P}_{газа} = \frac{P_{газа} - P_0}{P_0}$;

$P_{газа}$ - абсолютное давление газа в ячейке. Во втором случае, при расширении, значение $\bar{p}(\bar{s}) = \bar{P}_{газа}$. При $L \gg H$, пренебрегая жесткостью гибких пленок и считая, что их сечения - прямые линии, можно получить следующие выражения:

$$\bar{P}_{эл.ст.} = \frac{k \bar{\delta}^2}{(\bar{s} + \bar{\delta})(1 - \bar{\delta})},$$

$$\bar{P}_{газа} = \frac{2\gamma}{(1 - \bar{s})\gamma} - 1,$$

где $\bar{\delta} = \Delta/\epsilon S_0$; Δ - толщина изолирующей пленки; $k = \epsilon^2 \epsilon_0 U^2 / 2 \Delta^2 P_0$ - отношение максимального расчетного электростатического давления к

начальному давлению газа; γ - коэффициент политропы, а при $L \approx H (L > H + S_0)$ получаем:

$$\bar{p}_{\text{эл.ст.}} \approx \frac{k\bar{\delta}^2}{(\bar{\alpha} + \bar{\delta})^2}, \quad (12)$$

$$\bar{p}_{\text{газа}} = \frac{1}{\bar{\alpha}\gamma} - 1.$$

На рис.6,а,б изображены зависимости $\bar{p}(\bar{\alpha})$ при $L \gg H$, а на рис.7,а,б - при $L \approx H$. Расчеты проведены по формулам (II) и (12) при $\gamma = 1$ (ниже будет показано, что в рассматриваемой структуре показатель политропы близок к единице при любом показателе адиабаты газа). Значения k и $\bar{\delta}$ указаны на рисунках (при напряженности электрического поля $5 \cdot 10^7$ в/м; $\epsilon = 3$; $p_0 = 10^5$ н/м; $k \approx 1$). На рис.6,б для примера показан цикл сжатия-расширения ячейки (аб - сжатие, вг - расширение). Площадь фигуры абг соответствует превышению работы электростатических сил над работой сжатия газа (нормированные на $S_0 p_0$). Площадь фигуры бгв соответствует работе расширения газа. Сумма площадей этих фигур равна энергии источника, идущей на все виды механической работы. Таким образом, в рассматриваемых ячейках электрическая энергия, идущая на работу, может быть полностью использована только за два хода: сжатие и расширение, в то время как в ячейках рис.4,а,б эта энергия может быть использована за один ход - сжатие.

Из сравнительного рассмотрения данных, представленных на рис. 6,а,б и рис.7,а,б видно, что при $L \gg H$ в ячейках можно получить заметно больший ход при меньших значениях электростатических сил (меньших k), чем в ячейках при $L \approx H$. Однако в ячейках при $L \approx H$ сжатие-расширение газа происходит при меньшем послойном трении в газе, чем в ячейках при $L \gg H$. Соответственно скоростные свойства вторых ячеек выше скоростных свойств первых. Из представленных данных видно, что путем подбора значений k и $\bar{\delta}$ можно обеспечить выполнение условий синхронности при сжатии ячеек во всех точках зависимости $\bar{p}(\bar{\alpha})$, а при расширении - всегда.

В рассматриваемых ячейках действуют небольшие поперечные силы и для их компенсации не требуется применения элементов с большой жесткостью. Эти ячейки при достаточно большом ходе обладают относительно высокой энергоемкостью.

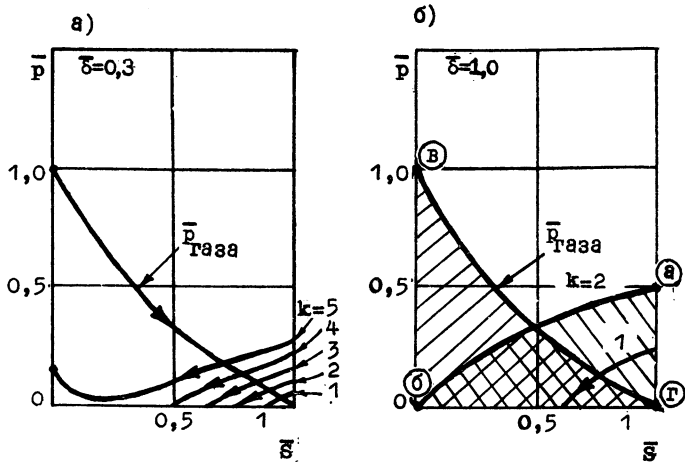


Рис.6. Зависимости $\bar{p}(\bar{s})$ для ячейки рис.5,б при $L \gg H$.

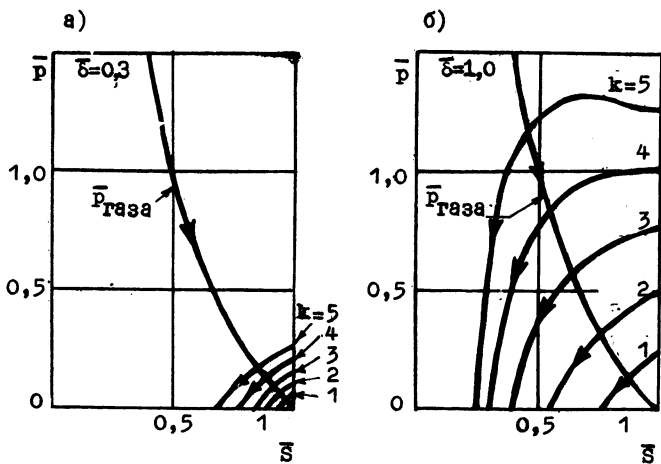


Рис.7. Зависимости $\bar{p}(\bar{s})$ для ячейки рис.5,б при $L \approx H$.

С х е м а 3. Энергия электрического поля $\rightarrow$ упругая энергия сжатия-растяжения диэлектрического слоя $\rightarrow$ кинетическая энергия движения пленок $\rightarrow$ внешняя механическая работа (электрическая энергия переходит в механическую энергию резонансных колебаний пленок, а энергия колебаний - частично переходит во внешнюю механическую работу). Модель структуры для схемы преобразования энергии представлена на рис.8. Для этой схемы подходит структура из рассмотренных выше ячеек рис.5,6 (при заполнении полостей газом). Вариант такой структуры изображен на рис.2. Отметим две специфические особенности рассматриваемой схемы: период колебаний переменного напряжения питания должен быть заметно меньше времени хода структуры; частота напряжения питания должна совпадать с резонансной частотой колебаний пакета пленок между коллекторами структуры. При выполнении этих требований и достаточно высокой добротности колебаний, во-первых, механическая энергия колебаний многократно превышает электростатическую и, во-вторых, значительно возрастает коэффициент электромеханического преобразования из-за более сильного сближения пленок при резонансе. Оба указанных фактора приводят к накоплению в структуре большой механической энергии. Последняя преобразуется во внешнюю работу благодаря нелинейной зависимости давления газа от хода сжатия и расширения.

Для исследования схемы 3 требуется анализ как силовых характеристик ячеек и структуры, так и собственных частот структуры, зависимости внешних сил от добротности колебаний.

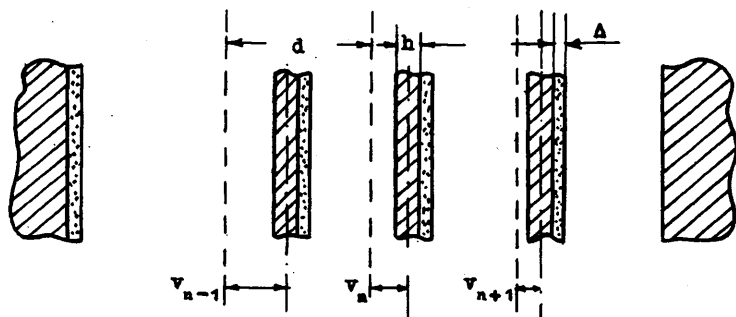


Рис. 8

На рис.8 показана модель структуры, представляющая собой систему параллельно расположенных изолированных металлических пленок, первоначальное (исходное) расположение которых показано штриховыми линиями. Предполагается, что в начальном положении зазор между пленками $S_0 = d - \Delta - h$ заполнен газом, имеющим давление p_0 , структура состоит из $m-1$ пленок; значениям $n=0$ и $n=m$ соответствует расположение коллекторов; между соседними пленками действует одна и та же разность потенциалов переменного напряжения; v_n - отклонение n -й пленки от своего начального положения.

Уравнение колебаний пленок в рассматриваемой модели структуры без учета сил трения имеет вид:

$$M_0 \frac{d^2 v_n}{dt^2} = \frac{\epsilon_0 U^2}{2 \left(S_n^+ + \frac{\Delta}{\epsilon} \right)^2} - \frac{\epsilon_0 U^2}{2 \left(S_n^- + \frac{\Delta}{\epsilon} \right)^2} - p_0 \frac{S_0^Y}{(S_n^+)^Y} + p_0 \frac{S_0^Y}{(S_n^-)^Y}, \quad (13)$$

где $S_n^+ = S_0 + v_{n+1} - v_n$; $S_n^- = S_0 + v_n - v_{n-1}$; $M_0 = \rho_m h + \rho_d \Delta$, ρ_m , ρ_d - удельный вес металлической и диэлектрической пленок; h - толщина металлической пленки. Уравнение (13) следует решать (с учетом сил трения) при граничных условиях $v_n = v_0 = 0$. В результате его решения необходимо получить спектр резонансных частот и среднее значение давления на коллекторах при заданном напряжении питания $U(t)$

$$p_{\text{кол.}} = \frac{1}{T} \int_0^T \left[p_0 \frac{S_0^Y}{(S_{n-1}^+)^Y} - p_0 \right] \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T \left[p_0 \frac{S_0^Y}{(S_1^-)^Y} - p_0 \right] dt, \quad (14)$$

где T - период колебаний напряжения $U(t)$.

Ниже, исходя из (13), проведен анализ спектра собственных частот колебаний структуры в линейном приближении; исходя из (14) и баланса энергий, проведен анализ среднего значения давления на коллекторы.

Для малых $v_n \ll d$ при $U = U_m \sin \omega t$ уравнение (13) после введения некоторых обозначений приобретает вид:

$$\frac{d^2 v_n}{d\tau^2} = \left\{ \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \left[1 - \frac{k\delta^2}{\gamma(1+\delta)^3} \right] + \frac{\omega_0^2 k \delta^2}{\omega^2 \gamma (1+\delta)^3} \cos 2\tau \right\} \Delta_n v, \quad (15)$$

где $v_n = v_n/s_0$; $k = \epsilon^2 \epsilon_0 U_m^2 / 2 \Delta^2 p_0$; $\tau = \omega t$; $\omega_0^2 = p_0 \gamma / M_0 s_0$; $\Delta_n v = v_{n+1} - 2v_n + v_{n-1}$.

Решение дифференциально-разностного уравнения (15), удовлетворяющего граничным условиям $v_0 = 0$, $v_m = 0$, можно представить в виде $v_n = \xi(\tau) \sin \Gamma nd$, где выражение для Γ имеет вид

$$\Gamma = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{md}, \quad i = 1, 2, \dots, m-1. \quad (16)$$

После подстановки указанного выражения для v_n в (15) получаем дифференциальное уравнение для определения $\xi(\tau)$

$$\frac{d^2 \xi}{d\tau^2} + (a + 16q \cos 2\tau) \xi = 0, \quad (17)$$

где

$$a = 4 \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \left[1 - \frac{k \bar{\delta}^2}{\gamma(1+\bar{\delta})^3} \right] \sin^2 \frac{\Gamma d}{2};$$

$$q = \frac{1}{4} \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \cdot \frac{k \bar{\delta}^2}{\gamma(1+\bar{\delta})^3} \sin^2 \frac{\Gamma d}{2},$$

т.е. уравнение возбуждения параметрических колебаний есть уравнение Матье [30]. В этом уравнении области возбуждения параметрических колебаний определены в координатах a и q (при малых q величина $a \cong j^2$, где j — номер субгармоники равный 1, 2, 3, ...). Итак, с учетом (16) и (17), спектр параметрических колебаний пленок структуры будет

$$\omega = \frac{2\omega_0}{j} \left[1 - \frac{k \bar{\delta}^2}{\gamma(1+\bar{\delta})^3} \right]^{1/2} \cdot \sin \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{m}. \quad (18)$$

Например, при $p_0 = 10^5 \text{ Н/м}^2$; $h = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$; $\Delta = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}$; $\rho_M = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; $\rho_q = 1,4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; $s_0 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ из (15) и (18) следует, что

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \cong \frac{4,4 \cdot 10^5}{j} \sin \frac{\pi}{4m} \text{ Гц},$$

если положить член под корнем равным единице.

Среднее значение давления на коллекторы можно приближенно оценить на основе следующих представлений: ход сжатия газа в любом промежутке между пленками равен ходу разряжения газа; в каждый момент времени в одной половине промежутков между пленками газ сжат, в другой - разряжен. При этих предположениях среднее избыточное значение давления на коллекторы, согласно (14), выразится как

$$\bar{p} \approx \frac{1}{2} \left[\frac{1}{(1-\bar{x})^\gamma} - \frac{1}{(1+\bar{x})^\gamma} \right], \quad (19)$$

где $\bar{p} = p_{cp} / p_0$; p_{cp} - среднее значение давления за период колебания; $\bar{x} = x / s_0$; x - амплитуда колебаний одновременного сжатия и разряжения газа в промежутке. Эту амплитуду можно оценить исходя из баланса энергии сжатия газа и умноженной на добротность энергии электрического поля, предположив, что переменное электрическое напряжение - периодическая последовательность импульсов с частотой колебаний, равной резонансной, и скважностью, равной 0.5. Этот баланс, с учетом одновременного сжатия и разряжения газа, имеет вид

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\gamma-1} \left[\frac{1}{(1-\bar{x})^{\gamma-1}} + \frac{1}{(1+\bar{x})^{\gamma-1}} - 2 \right] = \\ & = Qk\bar{s}^2 \left[\frac{1}{1+\bar{s}-\bar{x}} + \frac{1}{1+\bar{s}+\bar{x}} - \frac{2}{1+\bar{s}} \right], \end{aligned} \quad (20)$$

где Q - добротность.

На рис.9 представлены рассчитанные по (19) и (20) зависимости $\bar{p}(kQ)$ (сплошные линии) при $\bar{s} = \Delta / \epsilon s_0 = 1,0(1); 0,65(2); 0,3(3)$ и при $\gamma = 1$. В рассматриваемом случае показатель политропы близок к единице в связи с тем, что между тонкими слоями газа и металлическими пленками происходит быстрый обмен тепла за время $(1-5 \cdot 10^{-8})$ сек при толщине слоев газа и металлических пленок в единицы микрона и меньше), существенно меньшее периода колебаний пленок. Значение показателя политропы может быть оценено следующим образом [31]. Из рассмотрения структуры, представленной на рис.8, видно, что каждый слой металла и газа заключен между двумя слоями диэлектрика. Температуропроводности слоев газа и металла имеют высокие и приблизительно равные значения (воздух при нормальном давлении имеет $a = 4,5 \cdot 10^{-3}$ м/сек^{1/2}; алюминий - $a = 9,4 \cdot 10^{-3}$ м/сек^{1/2}).

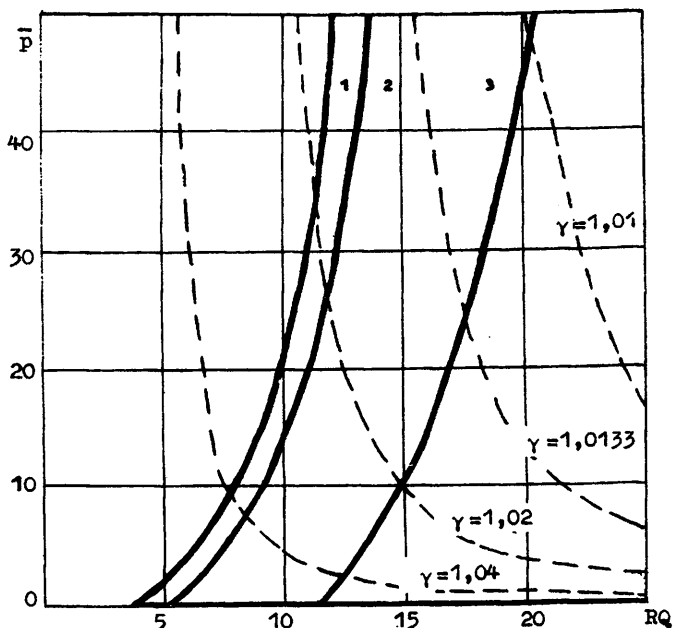


Рис. 9

Температуропроводность слоев диэлектриков заметно меньше (фторопласт 4 - $\alpha = 3,25 \cdot 10^{-4}$). Таким образом, слои газа и металла относительно теплоизолированы. С другой стороны, при малом времени теплообмена между слоями газа и металла можно предположить, что во время сжатия-разрядки газа эти слои имеют одинаковое приращение температуры dT . При этом в выражении для внутренней энергии газа $dU = dQ - dA = G_T \cdot G_V dT$, $dQ = -G_M C_M dT$, где A - механическая работа газа, G_T , G_M , C_M - массы слоев газа и металлической пленки на единицу площади и теплоемкость материала металлической пленки. Совместное рассмотрение приведенных соотношений с уравнением состояния газа $pV = RT$ и выражением для $A = pV$, где v - удельный объем, R - газовая постоянная, дает уравнение политропы $pV^\gamma = \text{const}$ где

$$\gamma = \frac{G_T S_0 C_P + G_M n C_M}{G_T S_0 C_V + G_M n C_M}.$$

Например, при исходной толщине слоя воздуха $s_0 = 3 \cdot 10^{-6}$ м и толщине слоя алюминия $h = (0,1-5) \cdot 10^{-6}$ м, $\gamma = 1,005-1,0006$.

На рис.9 штриховыми линиями показаны зависимости $\bar{p}(kq)$, рассчитанные при $k = 1$ и $\gamma = 1,01-1,04$ в предположении, что сжатие газа происходит за относительно малое время при начальной температуре T_0 без потери тепла в системе газ-металл. К концу сжатия температура $T_{сж} > T_0$. За относительно большое время нахождения в сжатом состоянии $T_{сж}$ уменьшается до значения T_0 (за счет непрерывного отвода тепла от структуры). За относительно малое время разрядки без потери тепла температура $T_{разр.} < T_0$, а за время нахождения в разряженном состоянии она увеличивается до T_0 и т.д. В рассмотренном цикле произведены расчеты потерь энергии и добротности. Давление $\bar{p}$ определено по (19).

Зависимости $\bar{p}(kq)$ при $\bar{\gamma} = \text{const}$ показывают, что, во-первых, давление на коллекторы можно значительно увеличить, используя резонанс структуры. Во-вторых, сопоставляя эти зависимости с зависимостями $\bar{p}(kq)$ при $\gamma = \text{const}$ ($k=1$) и учитывая полученные оценки, видим, что величины добротностей, необходимые для получения указанных давлений, существенно не ограничиваются потерями энергии при сжатии-разрядке газа. Ее величину ограничивают потери энергии трения в газе и релаксационные потери в диэлектриках и пр. Эти потери можно уменьшить, подбирая соответствующие материалы и конструктивные их размеры. В то же время при добротности выше 25 можно достичь давления более 10 атм при значениях $k < 1$. Уменьшение k желательно, так как оно приводит к увеличению электрической надежности структуры.

Расчет давления на коллекторы проведен при их неподвижности и резонансе. Но условия этого расчета пригодны и для подвижных коллекторов, если время их движения больше величины $t^{-1}q$. При этом давление $\bar{p}$ будет соответствовать возрастающим значениям среднего расстояния между пленками s_0 при условии непрерывного совпадения частот напряжения с собственной резонансной частотой структуры. Расчетные данные показывают (рис.9), что с увеличением s_0 значения $\bar{p}$ уменьшаются $\left(\bar{\gamma} = \frac{\Delta}{\epsilon s_0} \right)$ при $kq \approx \text{const}$, что подтверждает синхронность движения пленок в пакете при расширении структуры.

При выполнении указанных выше условий (ограничение времени движения коллекторов и поддержание резонанса при движении) энер-

гоемкость рассматриваемой структуры может быть весьма высокой. Например, при $\bar{r} \geq 10$ она приближается к энергоемкости мышц живот - ных (ход рассматриваемой структуры может быть большим).

§2. Анализ допустимых механических нагрузок в пленочных емкостных структурах

Правильный выбор механических нагрузок гарантирует работу пленок при минимальной их толщине в течение заданного срока. Кинетическая теория прочности позволяет установить зависимость долговечности пленок (временной промежуток от начала приложения нагрузки до наступления разрыва) из металлов и полимеров от величины механического напряжения растяжения, т.е. определить максимально возможное значение этого напряжения, а следовательно, и минимальную допустимую толщину пленки. Долговечность определяется [32] по формуле:

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma \sigma}{RT}, \quad (21)$$

где σ - механическое напряжение растяжения; T - абсолютная температура; U_0 - начальная энергия активации; γ - активационный объем; $\tau_0 = 10^{-11} - 10^{-13}$ сек. Таким образом, зная параметры пленки U_0 и γ , при заданной долговечности τ можно определить допустимое значение σ , и наоборот.

Исключительное значение в пленочной электромеханике имеет применение для тонких пленок критерия Бейли [32]

$$\int_0^T \frac{dt}{\tau[\sigma(t)]} = 1; \quad \sigma \geq 0, \quad (22)$$

означающего, что долговечность пленок при переменной нагрузке не меньше долговечности при статическом нагружении, если максимальные напряжения при переменной нагрузке равны напряжению при статическом нагружении (если отсутствуют условия применения критерия Бейли, то максимальное значение переменного напряжения должно быть заметно меньше напряжения статического нагружения при одинаковых в обоих случаях долговечностях). Толщина пленок, для которых применим критерий Бейли, много больше толщины пленок, применяемых в пленочной электромеханике [32]. Ниже приведено краткое сравнение параметров долговечности U_0 и γ для металлических и по-

лимерных пленок с этими же параметрами для "монолитных" материалов.

Для тонких металлических пленок, благодаря особенностям их структуры, значения γ значительно меньше, чем для монолитных образцов из тех же материалов. Параметры же U_0 для пленок и монолитных образцов практически одинаковые (что свойственно не только для металлов, но и для полимеров). Например, для пленок меди $\gamma = 0,15 - 1,2$ ккал·мм²/моль·кг, а для монолитных образцов меди $\gamma = 3 - 9$ ккал·мм²/моль·кг [33]. Во многих работах отмечено значительное улучшение параметров релаксации и ползучести, косвенно связанных с долговечностью, по сравнению с этими же параметрами для монолитных образцов из тех же материалов (например, пленок бериллиевой бронзы [33], пленок никеля, молибдена, титана [8]). В настоящее время разработаны технологии получения металлических пленок с параметрами долговечности, соответствующими сроку службы более 10 лет, при напряжениях (растяжения) в несколько десятков кг/мм².

Технология получения тонких полимерных пленок связана с увеличением плотности материала и с ориентацией макромолекул. Известно, что эти же технологические процессы приводят к значительному уменьшению активационного объема в тонких нитях по сравнению с исходным материалом. Так, например, для капрона это уменьшение составляет от $\gamma = 1,8 - 4,6$ до $\gamma = 0,29$ ккал·мм²/моль·кг [32]. Значения начальной энергии активации у полимеров заметно меньше, чем у металлов (сравним полиэтилентерефталат - 53; капрон - 45; полипропилен - 31 ккал/моль, в то время как никель - 87; медь - 81; алюминий - 50 - 53 ккал/моль [32]). Это означает, что для полимерных пленок с достаточно малыми значениями активационного объема долговечность будет такой же, как и у металлических при напряжениях приблизительно на порядок меньших.

Используя тонкие пленки как при постоянно действующих, так и при переменных механических нагрузках, можно обеспечить заданную долговечность, если правильно выбрать допустимые напряжения, значения которых заметно больше, чем для монолитных элементов из тех же материалов.

§3. Анализ допустимых электрических нагрузок в пленочных емкостных структурах

Для определения долговечности диэлектриков пленочных элементов могут быть использованы результаты теории долговечности конденсаторов [23, 34]. В пленочной электромеханике большую роль играет теория старения конденсаторов под действием электрических разрядов (частичных разрядов) в прослойках и порах изоляции. При этом под действием электрических разрядов не только устаревает изоляция, но и уменьшается стабильность электростатических структур. Как показали опыты, величина электростатической силы является функцией не только электрического напряжения, но и интенсивности и времени действия частичных разрядов (насыщение силы от напряжения связано с действием частичных разрядов [7]). Исходя из опытных данных, можно получить простое средство определения напряженности электрического поля частичных разрядов, по крайней мере тех из них, которые наиболее ощутимо влияют на силы. Для тонких пленок из полиэтилентерефталата (толщиной 3 - 6 мкм) отечественного и зарубежного производства (при металлизации из алюминия) напряженность электрического поля, выше которой происходит насыщение электростатической силы (при поляризации остаточных зарядов, равной нулю), несколько превышает значение $5 \cdot 10^7$ в/м (см. [7]). Имеется в виду средняя напряженность, рассчитанная по напряжению и толщине пленки. Указанное значение напряженности близко к напряженности начальных частичных разрядов в пленочных конденсаторах ($3,4 - 6,5 \cdot 10^7$ в/м для бумажно-пропиленовой изоляции, пропитанной эпоксидным компаундом; разряды возникают в воздушных включениях [34]). Истинная усредненная напряженность электрического поля в газовых прослойках составляет $E_{расч} \cdot k \cdot \epsilon$, где k - отношение экспериментально определяемой удельной емкости к расчетной емкости (соответствующей плотному прижатию диэлектрика к электродам). Коэффициент $k \approx 0,7$ [7] при $\epsilon = 3$, $k\epsilon \approx 2$. Таким образом, усредненная напряженность электрического поля в воздушных прослойках (толщиной в 0,1 - 0,2 мкм), при которой еще не наступает насыщение силы, имеет высокое значение, составляющее около 10^8 в/м.

При полях, меньших поля частичных разрядов, долговечность изоляции может быть определена по методике, основанной на термофлуктуационной теории о причине старения изоляции под действием механических и электрических нагрузок [35]. По этой концепции долговечность

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma\sigma - \beta E}{RT}, \quad (23)$$

где E — рабочая напряженность электрического поля, β — коэффициент, определяемый экспериментально, а остальные параметры те же, что и в уравнении долговечности (20). Уравнение (23) дает хорошие результаты в случае отсутствия частичных разрядов. Так, для полипропиленовой изоляции (в ней газовые прослойки устраняются пропитков в трихлордифениле) при действии постоянного поля и при $U_0 = 3I$ ккал/моль, взятом из результатов механических испытаний ($\tau_0 = 10^{-12}$ сек; $\gamma = 0,42$ ккал·мм²/моль·кг [32]), долговечность, определенная из (23), при $\beta = 0,07$ ккал·мкм/моль·в и $\sigma = 0$ совпадает с экспериментальной, $\tau(E, T)$ [34]. Согласно (23), при $\tau = 10^5$ час: $E = 40$ в/мкм = $4 \cdot 10^7$ в/м; $\sigma = 0$ и $E = 0$; $\sigma = 6,6$ кг/мм². В пленочной электромеханике описанный выше подход определения долговечности полезен и для оценки совместного действия механических и электрических нагрузок.

При переменном напряжении значения полей критических частичных разрядов совпадают со значениями полей начальных частичных разрядов [34]. Критические частичные разряды приводят к быстрому износу изоляции. Следовательно, допустимое максимальное значение поля при достаточно высоких частотах не должно превышать значения поля начальных частичных разрядов.

Итак, в пленочной электромеханике для определения долговечности изоляции могут быть использованы методы теории пленочных конденсаторов [34]. Использование в качестве изоляции современных тонких полимерных пленок и тонких слоев сухого воздуха допускает напряженность поля около 10^8 в/м.

З а к л ю ч е н и е

Из приведенного рассмотрения видно, что для повышения эффективности пленочных емкостных двигателей можно использовать следующие размерные факторы: уменьшение энергии изгиба тонких пленок до такого уровня, что в ряде случаев ее можно пренебречь; значительное увеличение усталостных свойств тонких пленок при постоянных и особенно переменных механических нагрузках, увеличение допустимых электрических нагрузок при тонких слоях газовой изоляции; резкое уменьшение тепловых потерь при циклическом сжатии-разряджении тонких слоев газа, находящегося в тепловом контакте с тонкими металлическими пленками. Совокупность

этих факторов придает пленочным структурам новые, ранее неизвестные физические свойства. Энергоемкость пленочных структур может превосходить даже энергоемкость мышц животных.

Рассматриваемая структура пленочных двигателей не имеет прямых аналогий с существующими конструкциями современной механики, но отдаленно напоминает структуру мышц животных, состоящую из клеток-тонкопленочных оболочек, заполненных жидкой субстанцией (в этом смысле мышца - тонкопленочная структура).

В современной механике трудно найти аналогии и для вытерасмотренного преобразования энергии для случая возбуждения резонансных колебаний при существенной нелинейности упругих сил среды, но аналогией здесь является механизм теплового расширения твердых тел, возникающий благодаря агармоническим колебаниям атомов и молекул в решетках твердых тел.

В заключение автор выражает глубокую благодарность многим специалистам в разных областях науки и техники, и среди них ведущему инженеру В.С.Потапову, старшему инженеру В.В.Коняшкину, к.ф.-м.н. С.И.Фадееву, к.ф.-м.н. К.К.Зилингу, к.т.н. Д.Г.Суворову, д.т.н. А.К.Реброву, д.ф.-м.н. В.Б.Курзину, академику С.Л.Соболеву за внимание к работе и полезные обсуждения.

Л и т е р а т у р а

1. НАТАНСОН, ГОЛЬДБЕРГ. Приборы, основанные на механическом перемещении тонких пленок. - В кн.: Физика тонких пленок. Том 8. М., 1978, с.331-356.

2. ДЯТЛОВ В.Л., РОГАЛЕВ А.И. Электромеханические пленочные элементы. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 49. Новосибирск, 1972, с. 132-146.

3. ДЯТЛОВ В.Л., ФАДЕЕВ С.И. Пленочная электромеханика. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 58. Вычислительные системы и проблемы обработки информации. Новосибирск, 1974, с.100-110.

4. ДЯТЛОВ В.Л., СОЛДАТЕНКОВ И.С. Некоторые результаты исследований пленочных электростатических реле. - В кн.: Вычислительные системы. Труды I Всесоюзной конференции по вычислительным системам. Вып. 5. Новосибирск, 1968, с.159-175.

5. PETERSEN K.E. Dynamic Micromechanics on Silicon: Techniques and Devices. - IEEE Transaction on electron devices, 1978, v.ED-25, N 10, October, p.1241-1250.

6. НАТАНСОН, НЬЮЭЛЛ, УИКСТОН. Транзистор с резонирующим затвором. - Электроника, 1965, т.38, № 19, с.3-7.

7. ДЯТЛОВ В.Л., КОНЯШКИН В.В., ПОТАПОВ В.С. Пленочные емкостные структуры с накатом обкладок. - Настоящий сборник, с.33-53.

8. GROSSO R.P., YELLIN M. The membrane mirror as an adaptive optical element. - J. Opt. Am., 1977, v. 67, N 3, March, p. 399-406.
9. WEINSTEIN L.M., BALASUBRAMANIAN R. An electrostatically driven surface for flexible wall drag reduction studies. - Presented at the Second International Conference on Drag-Reduction. Cambridge, England, August 31-September 2. 1977. - 34 p.
10. Электростатический двигатель с возвратно-поступательным движением/Дятлов В.Л., Колмогоров А.Б., Коняшкин В.В., Лупет М.К., Потапов В.С. Авт.свид. СССР № 744877. - Бюл. изобрет. 1980, №24.
11. ПОЛОТОВСКИЙ Л.С. Емкостные машины постоянного тока высокого напряжения. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. - 154 с.
12. ПОЛИНА Т.В., ПОТАПОВ В.С. Статические характеристики пленочных электростатических реле с выступающим контактом. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 46. Новосибирск, 1971, с.8-13.
13. ГОРДОН А.В., СЛИВИНСКАЯ А.Г. Электромагниты постоянного тока. - М.-Л.: ГЭИ, 1960. - 100 с.
14. ВИТЕНБЕРГ М.И. Расчет электромагнитных реле для аппаратуры автоматики и связи. - М.-Л.: Энергия, 3-е изд. 1966. - 705 с.
15. Основные параметры пленочных электростатических реле/Дятлов В.Л., Полина Т.В., Потапов В.С., Рогов А.И. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 46. Новосибирск, 1971, с.48-52.
16. ИГНАТЕНКО П.С., СОЛДАТЕНКОВ И.С. Влияние давления газовой среды на динамику процессов в пленочных электростатических реле. - В кн.: Вычислительные системы. Материалы II Всесоюзной конференции по вычислительным системам, секция IV. Новосибирск, 1969, с.64-67.
17. Исследование пленочных консольных структур/Дятлов В.Л., Карилюк А.Г., Коняшкин В.В., Потапов В.С., Фадеев С.И. - В кн.: Техника индикации. Киев, 1976, с.89-96.
18. ПРЕСТОН. Мембранный световой модулятор и его применение в оптических ЦВМ - Зарубежная радиоэлектроника, 1970, №10, с.112-116.
19. АЛАБУЖЕВ П.М. Области параметров ручных электрических машин ударного действия. - В кн.: Электрические машины ударного действия. Новосибирск, 1969, с.3-31.
20. Справочник конструктора дорожных машин. Под ред. Борада - чева И.П. - М.: Машиностроение, 1973. - 490 с.
21. ГАЛПЕРИН С.И., ВАСЮТОЧИН А.М. Курс анатомии и физиологии человека. - М.: Ущедгиз, 1950. - 500 с.
22. Прейскурант №36-05. Оптовые цены на радиодетали общего применения. Вводится в действие с 1 января 1976 г. Прейскурантиздат, М., 1976, ГК Цен. СМСССР.
23. КУЧИНСКИЙ Г.С. Высоковольтные импульсные конденсаторы. - Л.: Энергия, 1973. - 173 с.
24. НЕЙМАН Л.Р., КАЛАНТАРОВ П.Л. Теоретические основы электротехники. Ч. I. - М.-Л.: ГЭИ, 1954. - 209 с.
25. ТИМОФЕЕВ А.В. Работы и искусственный интеллект. - М.: Наука, 1978. - 187 с.
26. Научные проблемы робототехники. Под ред. Охотинского Д.Е. и Попова Е.П. - М.: Наука, 1980. - 93 с.

27. ПИННИ. Обыкновенные дифференциально-разностные уравнения. -М.: Изд.иностр.лит., 1961. - 224 с.
28. ДЯТЛОВ В.Л. Решение линейных дифференциально-разностных уравнений для n -мерного пространства целочисленных координат с помощью функций Бейтмена. -В кн.: Вычислительные системы. Вып.43, Новосибирск, 1971, с.146-154.
29. Запоминающий индикатор с деформируемой пленкой. - Электроника, 1972, т.2, № 2, с.16-17.
30. ХАЯСИ Т. Нелинейные колебания в физических системах. - М.: Мир, 1968. - 424 с.
31. ХОЛЗУНОВ А.Г. Основы расчета пневматических приводов. -М.: Л.: Машиностроение, 1964. - 265 с.
32. РЕГЕЛЬ В.Р., СЛУЦКЕР А.И., ТОМАШЕВСКАЯ Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. -М., Наука, 1974. - 532 с.
33. ЗИЛИНГ К.К. Прочностные свойства пленок и пленочная электромеханика. -В кн.: Моделирование в пленочной электромеханике (Вычислительные системы, вып. 66). Новосибирск, 1975, с.21-32.
34. ЕРМУРАТСКИЙ В.В., ЕРМУРАТСКИЙ П.В. Конденсаторы переменного тока в тиристорных преобразователях. -М.: Энергия, 1979.-219 с.
35. ГУЛЬ В.Е. Структура и прочность полимеров. -М.: Химия, 1978. - 303 с.

Поступила в ред.-изд.отд.
30 марта 1981 года