

УДК 621.319.3:621.3.082.72

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ЕМКОСТНЫЕ СРЕДЫ
В ИНТЕГРАЛЬНОМ ИСПОЛНЕНИИ

В.Л.Дятлов, В.В. Коняшкин, Б.С.Потапов

В в е д е н и е

Рассматриваются технические и технологические вопросы создания высокоэффективных и высокоэкологических пленочных емкостных двигателей, построенных на основе соединения в электромеханике принципа действия вибрационных и шаговых двигателей, интегральной технологии и принципа построения электромеханических сред. С этих позиций работу можно рассматривать как конкретизацию общей концепции электромеханических емкостных вибрационных сред, выраженной в [1].

Вибрационный принцип действия в емкостных двигателях пленочной электромеханики используется для повышения мощности. В вибрационном режиме движения ротора относительно статора непрерывно, без остановок, достигается наибольшая скорость перемещения ротора. Период движения передающего мощность от статора к ротору подвижного механического пленочного элемента равен полупериоду переменного напряжения питания двигателя. В соседних полупериодах переменного напряжения напряженность поля в диэлектрических слоях двигателя изменяет свое направление, что позволяет устранить накопление остаточных

электрических зарядов в этих слоях (т.е. выполняется одно из важнейших условий стабильной работы М-Г-Д-М-структур пленочной электромеханики - знакопеременность электрического напряжения питания [2]). Рассмотренный режим позволяет получить наиболее высокий к.п.д. двигателя, свойственный М-Г-Д-М-структурам со знакопостоянным напряжением питания.

Шаговый принцип действия в емкостных двигателях пленочной электромеханики используется для фиксации положения ротора относительно статора с точностью до длины одного шага. В шаговом режиме ротор неподвижен до появления управляющего импульса и останавливается после окончания действия этого импульса. Как правило, в шаговом емкостном двигателе можно реализовать как шаговый, так и вибрационный режимы. Это позволяет использовать вибрационный режим для быстрого перемещения, а шаговый - для точной фиксации положения ротора.

Рассмотрение физических и технических свойств вибрационных и шаговых емкостных двигателей пленочной электромеханики [3,4] показывает, что они в перспективе могут иметь не менее высокие электромеханические параметры (энергоёмкость, мощность, цену шага, надежность и т.д.), чем аналогичные пьезоэлектрические, магнитострикционные, а также индуктивные двигатели [5,6].

Вместе с тем есть одно принципиальное отличие пленочных емкостных вибрационных и шаговых двигателей от всех известных. Это то, что их можно изготовить, применяя технологию, подобную технологии интегральных схем, т.е. используя фотолитографию, напыление в вакууме и газах, селективное изотропное травление и т.п. Эту особенность следует считать большим преимуществом рассматриваемых емкостных двигателей. Ведь именно технология интегральных схем позволила найти в микроэлектронике решение проблемы повышения функциональности, производительности и надежности при значительном снижении стоимости изделий [7]. Есть

все основания ожидать, что и в электромеханике, при условии применения интегральной технологии, будет решена эта же проблема.

Принцип построения электромеханических сред естественным образом связан с применением в электромеханике как емкостного способа электромеханического преобразования энергии, так и интегральной технологии.

1. Основные результаты применения интегральной технологии для создания емкостных микродвигателей

В пленочной электромеханике с самого начала ее развития (середина 60-х годов) для создания встроенных пленочных емкостных микродвигателей (микрогенераторов) электромеханических миниатюрных фильтров, реле, матричных модуляторов света, акселерометров и т.д. [7,8] нашла применение интегральная технология. К настоящему времени эта технология достигла высокого уровня совершенства в создании указанных устройств на базе кристаллических кремниевых подложек [7], алюминиевых пластин [9], подложек из стекла и ситалла [8]. Встроенные емкостные микродвигатели представляют собой две обкладки конденсатора, одна из которых подвижная, другая - неподвижная. Подвижная обкладка выполняется в виде лепестка, мембраны, пластины на растяжках или торсионах либо из самого материала подложки, либо из отдельно напыляемой пленки или композиции пленок (металл-диэлектрик). Используется как фронтальное электростатическое взаимодействие обкладок, так и электростатический накат подвижной пленки (обкладки) на покрытую слоем диэлектрика неподвижную обкладку [10]. На подвижных обкладках укрепляется "инструмент" в виде контактов реле, зеркала модулятора света, дополнительной массы акселерометра и т.д. Встроенные микродвигатели рассматриваемых устройств выполняют весьма примитивную функцию воз -

вратно-поступательного перемещения подвижного элемента на расстояние порядка единиц микрометров.

Убедительной демонстрацией возможности интегральной технологии в электромеханике является изготовление емкостного микродвигателя вращения с диаметром ротора 70 мкм [11]. Этот двигатель имеет классическую конструкцию с зубчатым статором и ротором.

Более современную конструкцию, приспособленную для применения интегральной технологии, имеют разработанные в Институте математики СО АН СССР шаговые (вибрационные) микродвигатели [3,4]. Эти микродвигатели имеют тот же принцип действия, что и многие вибрационные и шаговые пьезоэлектрические и магнитострикционные двигатели, т.е. в конструкциях этих двигателей имеются некоторые подвижные элементы, которые последовательно выполняют функции механического захвата, перемещения на один шаг ротора, устранения захвата и возвращения в исходное положение и т.д. В конструкциях микродвигателей функция захвата осуществляется за счет электростатического притяжения части подвижной пленки к монолитному телу. Перемещение осуществляется в результате электростатического изгиба части подвижной пленки. Шаговые микродвигатели имеют большой общий ход и могут иметь высокую точность шага, вплоть до $0,1 \text{ \AA}$.

Итак, в настоящее время предложено большое число емкостных микродвигателей, конструкции которых приспособлены для применения интегральной технологии. В это число входят и двигатели возвратно-поступательного движения (подобные электромагнитам и простейшим пьезоэлектрическим и магнитострикционным двигателям со знакопостоянными напряжениями и токами питания) и двигатели вращения и, наконец, шаговые, которые можно легко преобразовать в вибрационные двигатели. Таким образом, интегральная технология позволяет создавать почти все основные типы двигателей электромеханики. В то же время специфика интегральной

технологии такова, что она ведет к созданию только миниатюрных емкостных двигателей с максимальными размерами в плоскости подложки не более единиц миллиметров. Мощность этих двигателей может быть оценена величиной 10^{-5} Вт и меньше. В этой связи следует заметить, что в современной электромеханике создание двигателей мощностью меньшей 0,1-1 Вт встречает большие затруднения, поскольку известные индуктивные и пьезоэлектрические (вибрационные) двигатели меньшей мощности имеют крайне низкую энергоемкость (высокую материалоемкость) [5,6].

Таким образом, если еще совсем недавно в электромеханике массовое применение электропривода ограничивалось мощностью двигателей 0,1-1 Вт, то теперь начинается заполнение диапазона мощностей ниже указанных, вплоть до мощности порядка 10^{-5} Вт. Большой диапазон мощностей между мощностями емкостных микродвигателей и минимальными мощностями индуктивных и пьезоэлектрических микродвигателей остается незаполненным. По существу речь идет о большом числе невостребованных применений.

2. Мощность емкостных двигателей

Благодаря применению интегральной технологии можно повысить мощность емкостных двигателей в результате механического соединения емкостных микродвигателей в электромеханическую среду.

Основная особенность интегральной технологии состоит в том, что на некоторой подложке одновременно создается множество одинаковых элементов. Такой параллельный процесс становится возможным благодаря тому, что уже на стадии фотолитографии применяют методы мультипликации. Это открывает возможность всю "статорную" часть двигателя изготовить на одной подложке, а "роторную" - на другой подложке. Совмещая статорную и роторную подложки (пластины) на малом расстоянии друг относительно друга (по плоскостям), применяя направляющие, можно получить еди-

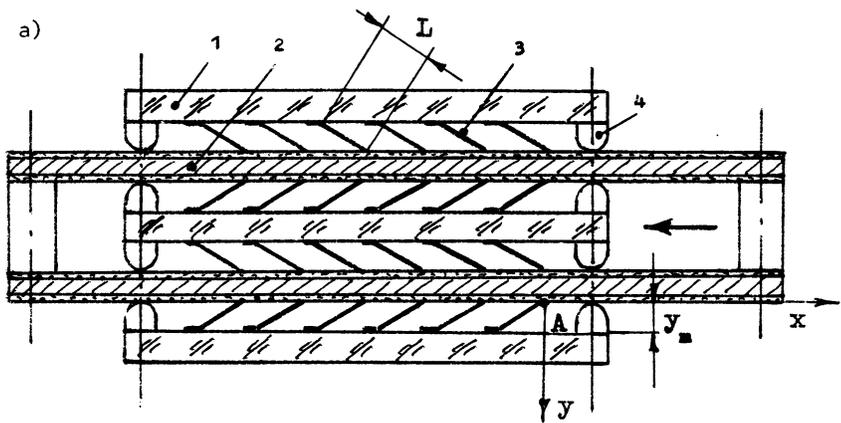
ный емкостной двигатель как механическое соединение множества микродвигателей. Располагая статорные и роторные подложки этажами так, чтобы каждая роторная подложка была расположена между двумя статорными, можно получить достаточно мощный емкостной двигатель. Подобные конструкции двигателя названы однородной электромеханической или моторной средой [1]. Термин "среда" отражает общие закономерности предельного развития применений интегральной технологии как в области вычислительной техники (вычислительные среды), так и в области электромеханики (моторные среды). Направление вычислительных сред было предложено еще в начале 60-х годов Э.В. Евреиновым и Ю.Г. Косаревым [12] и связанная с этим направлением идеология, существенно опирающаяся на понятие технологичности, сыграла решающую роль в становлении направления однородных электромеханических сред.

3. Однородные вибрационные электромеханические среды с касательным движением

На рис.1а показан пример однородной электромеханической среды с касательным движением (1 - статорные подложки с закрепленными на них пленочными лепестками; 2 - роторные металлические пластины, покрытые слоями изолирующего материала; 3 - пленочные металлические лепестки; 4 - закрепленные на статорных пластинах направляющие). Стрелкой показано направление движения роторных пластин относительно статорных подложек.

Наиболее простое электрическое соединение рассматриваемой среды будет в случае, когда все лепестки присоединяются к одному полюсу, а все металлические роторные пластины - к другому полюсу источника переменного напряжения.

На рис.1б показано движение координаты "y" конца одного из лепестков (точка "А" на рис.1а) в процессе работы двигателя в зависимости от времени t . На этом же рисунке показаны зависимости от времени: напряжения источника питания U ; квад-



б)

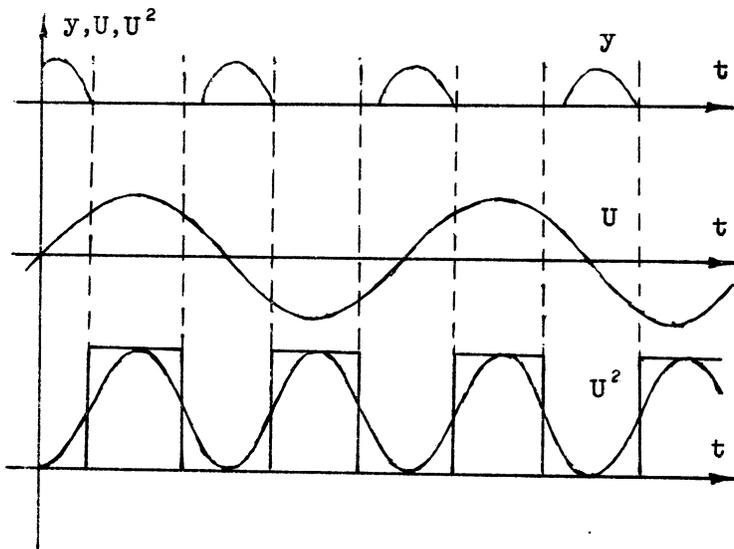


Рис.1. Однородная электромеханическая среда (а) и движение координаты "y" в процессе работы двигателя в зависимости от времени t (б)

рата этого напряжения U^2 (квадрат напряжения входит в формулу для сил), приблизительно эквивалентного по силовому действию переменному напряжению импульсов источника питания (со скажностью 0,5). Координата $y = y_n$ соответствует зазору между роторными и статорными пластинами.

В вибрационном режиме частота собственных механических колебаний лепестков приблизительно равна $2f$, где f - частота напряжения питания. В пределах периода колебаний $(2f)^{-1}$ лепестки совершают сложные движения: распластаются по поверхности диэлектрических слоев роторных пластин при высоких значениях напряжения (за время распластывания производится силовое воздействие статорных пластин на роторные пластины); отбрасываются упругими силами (самих лепестков) при малых значениях напряжения; возвращаются в исходное положение (до начала нового процесса электростатического наката) и т.д.

Рассмотренный пример электромеханической среды демонстрирует возможность применения в емкостной пленочной электромеханике некоторых хорошо известных принципов действия вибрационных и шаговых двигателей, связанных с повышением мощности, КПД, энергетической эффективности. Вместе с тем можно отметить и специфику применения этих принципов в емкостной пленочной электромеханике на примере следующего сопоставления. Для построения энергетически эффективной электромеханической среды с классической конструкцией зубчатых статора и ротора был бы необходим зазор между зубчатыми электродами статора и ротора порядка одного микрометра [13]. В рассмотренной же электромеханической среде оказывается возможным использовать зазор между статором и ротором порядка десяти-ста микрометров. Высокая энергетическая эффективность лепестковой среды связана с тем, что она имеет рабочие зазоры порядка единиц микрометра при на много большем технологическом зазоре между статором и ротором. Таким образом, использование принципа действия вибрационных

двигателей позволяет значительно упростить технологические проблемы создания энергетически эффективных емкостных двигателей.

4. Основы расчета параметров электрохимических сред с касательным движением

Анализ емкостных М-Г-Д-М-структур, из которых состоит среда, может быть проведен на основе энергетического баланса [14]. В случае импульсного напряжения питания может быть определена та энергия источника питания, которая идет на совершение механической работы в пределах времени действия импульса. Эту энергию, равную всем видам механических работ, дает соотношение

$$A = a_n \cdot b \cdot l \cdot n \cdot m, \quad (1)$$

где $a_n \cong C_0 U_m^2 / 2$ - удельная работа электростатических сил на единицу площади накатившейся части лепестка (C_0 - удельная емкость единицы площади в месте накатившейся части лепестка, U_m - напряжение импульса); l - длина наката лепестка; b - ширина лепестка; n - число лепестков на одной статорной подложке (пластины); m - число активных поверхностей статорных пластин в среде.

В вибрационном режиме электрохимической среды, режиме максимальной мощности, важное значение имеет достижение наибольшей длины электростатического наката лепестков элементарных двигателей, $l = l_n$. В этом случае

$$A = A_n = A_{\text{нагр.}} + A_{\text{мех.}}, \quad (2)$$

где $A_n = a_n b l_n n m$; $A_{\text{нагр.}}$ - работа, связанная с перемещением внешних тел, работа силы нагрузки; $A_{\text{мех.}}$ - все виды механических работ, включая работу изгиба лепестков, работы сил трения внутри двигателя и т.д.

За время действия импульса, т.е. за время $(4f)^{-1}$,

$$A_{\text{нагр.}} = \bar{F}' H_m, \quad (3)$$

где

$$\bar{F}' = \frac{1}{H_m} \int_0^m F_{\text{нагр.}} dH;$$

$F_{\text{нагр.}}$ - сила, действующая на нагрузку; H_m - перемещение ротора относительно статора за время действия силы $F_{\text{нагр.}}$, т.е. шаг.

Средняя сила, действующая на нагрузку за период следования импульсов, т.е. за время $(2f)^{-1}$,

$$\bar{F} = \bar{F}'/2. \quad (4)$$

При равномерном движении скорость ротора

$$v = \frac{H_m}{(4f)^{-1}} = 4fH_m. \quad (5)$$

Полезная мощность двигателя

$$\bar{P} = \bar{F}v. \quad (6)$$

Для сопоставления электромеханической среды с другими двигателями необходимо рассмотреть выражения для удельных параметров: энергоемкости \mathcal{E} и удельной силы тяги $F_{\text{уд.}}$, которые определяются так:

$$\mathcal{E} = \frac{\bar{P}}{M}; \quad F_{\text{уд.}} = \frac{\bar{F}}{M}, \quad (7)$$

где M - масса электромеханической среды.

Пространственный период среды включает в себя половину статорной и половину роторной пластин. Масса соответствующей

части среды

$$M = 0,5 (S_p h_p \rho_p + S_{CT} h_{CT} \rho_{CT}), \quad (8)$$

где S_p , h_p , ρ_p - площадь, толщина и плотность материала роторной пластины; S_{CT} , h_{CT} , ρ_{CT} - площадь, толщина и плотность статорной пластины.

Пространственному периоду среды соответствует один активный слой с лепестковыми двигателями ($m = 1$), поэтому согласно (1), (3)-(4) и (7)

$$\varepsilon = \frac{4a_n \cdot k_{CT} \cdot k_{нагр.}}{kh_p \rho_p + h_{CT} \cdot \rho_{CT}} \cdot f, \quad (9)$$

где $k = S_p / S_{CT} > 1$; $k_{CT} = hbl_m / S_{CT} < 1$; $k_{нагр.} = A_{нагр.} / A_m < 1$.

Согласно (5)-(7)

$$F_{уд} = \varepsilon / v = \varepsilon / 4fH_m. \quad (10)$$

Центральное место в расчетах параметров электромеханической среды по формулам (1)-(10) занимает определение наибольших допустимых величин удельной работы электростатического наката a_n и частоты напряжения питания f (или частоты $2f$ при импульсном питании).

В теории электростатического наката [9,13-14] оправдал себя феноменологический подход в определении предельных электрических напряжений М-Г-Д-М-структур, основанный на аппроксимации экспериментальных зависимостей электрического пробоя микронных промежутков при весьма широком выборе материалов электродов и разных условиях их технологической подготовки. Удобной аппроксимацией является

$$U = A \frac{kd}{1+kd} + Bkd, \quad (11)$$

где в случае заполнения пробивного промежутка d сухим воздухом при нормальном давлении: $A = 198$ В; $B = 2$ В; $k = 10^7$ м⁻¹; в случае вакуума - $A = 257$ В; $B = 25$ В; $k = 7,1 \cdot 10^6$ м⁻¹. Наибольшая ошибка этой аппроксимации составляет +40% - 10% при величинах пробивного промежутка $0 \leq d \leq 4$ мкм и $\pm 20\%$ при величинах пробивного промежутка 4 мкм $\leq d \leq 20$ мкм. Знак "+" здесь означает, что экспериментально определяемые напряжения пробоя лежат выше аппроксимирующей кривой.

Пробой М-Г-Д-М-структур с электростатическим накатом рассматривается по газовому промежутку (Г) толщиной d_e и по сквозной поре в слое диэлектрика (Д) толщиной d_i .

В первом случае пробой (газового промежутка) будет происходить при напряжении питания

$$U = U_{\Gamma} = \frac{d_e + d_i/\epsilon}{d_e} \cdot U_{\text{пр}}(d_e), \quad d = d_e, \quad (12)$$

где ϵ - диэлектрическая постоянная материала слоя диэлектрика. В этом случае наименьшее значение U_{Γ} определяется вариацией величины d_e .

Во втором случае пробой (по сквозной поре) будет происходить при напряжении питания

$$U = U_D = U_{\text{пр}}(d_i), \quad d = d_i. \quad (13)$$

Если $U = U_{\Gamma}$, $U < U_D$, то пробой будет по газовому промежутку, если $U = U_D$, $U < U_{\Gamma}$, то пробой будет по сквозной поре слоя диэлектрика.

На рис.2 показаны зависимости удельной работы наката $a_n = \epsilon \epsilon_0 U_{\Gamma}^2 / 2d_i$ ($U = U_{\Gamma}$ - сплошная кривая; $U = U_D$ - штриховые кривые при $\epsilon = 3,9,27$) от величины $\eta = kd_i/\epsilon = 10^7 d_i/\epsilon$ для случая заполнения свободного промежутка воздухом при его нормальном давлении. Видно, что при $\epsilon \geq 10$ пробой происходит только по газовому промежутку.

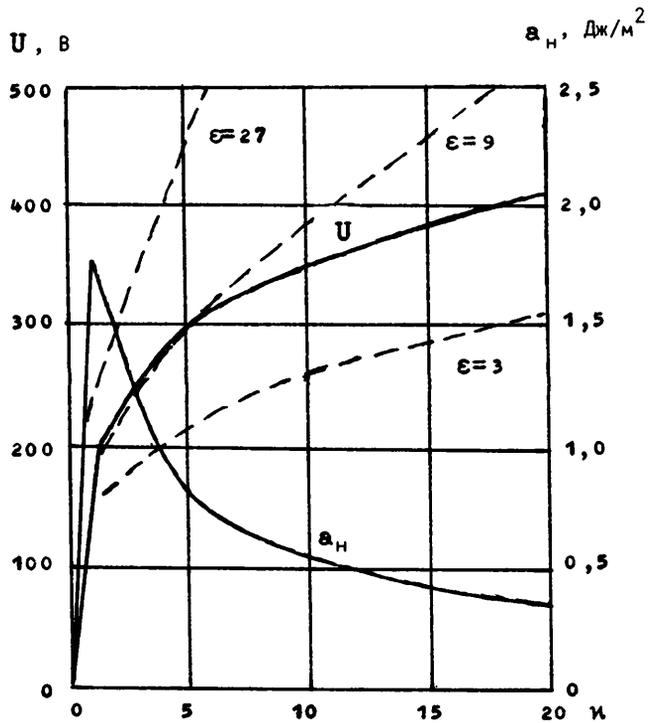


Рис.2

На рис. 3 показаны эти же зависимости от величины $\kappa = kd_1/\epsilon = 7,1 \cdot 10^6 d_1/\epsilon$ для случая вакуума в свободном промежутке. Видно, что при $\epsilon \geq 5$ пробой происходит по вакуумному промежутку.

Наибольшие значения удельной работы электростатического наката будут в случае использования газовой изоляции в виде сухого воздуха при его нормальном давлении: $a_n = 1,73 \text{ Дж/м}^2$ при $\kappa = 1,01$, $U = 200 \text{ В}$, $\epsilon \geq 10$ (при $\epsilon = 10$, $d_1 = 1,01 \text{ мкм}$); в случае вакуумной изоляции: $a_n = 2,75 \text{ Дж/м}^2$

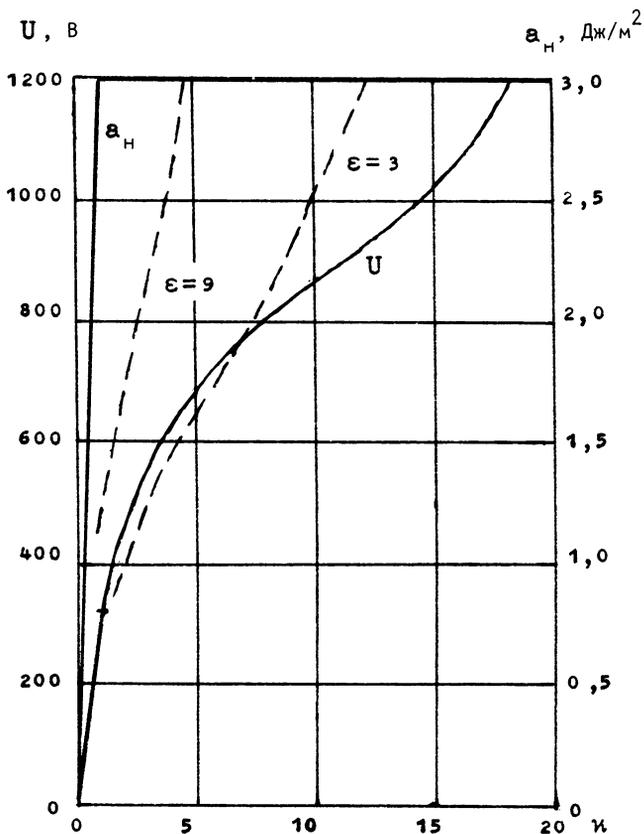


Рис. 3

при $\kappa = 1,1$, $U = 310$ В, $\epsilon \geq 5$ (при $\epsilon = 5$ $d_1 \cong \cong 0,8$ мкм).

Для получения некоторого запаса электрической прочности двигателя необходимо уменьшить величины удельных работ электростатического наката. Например, при снижении этих работ в 3,46 раза ($a_n = 0,5$ Дж/м² - воздух; $a_n = 0,8$ Дж/м² - вакуум) рабочие напряжения будут снижены в $\sqrt{3,46} = 1,86$ раза ($U =$

= 108 В - воздух; $U = 167$ В - вакуум). В этом случае практически снимаются ограничения на минимальные величины ϵ и может быть использован широкий круг пленочных материалов, исходя из условия физического пробоя, долговечности изоляции, тепловых потерь и т.п.

Предельная частота работы устройств с электростатическим накатом, создаваемых применением интегральной технологии, приблизительно равна 5 кГц [15]. Можно предположить, что величина этой частоты определяется поверхностными адгезионными силами, действующими на распластанные пленки, поскольку расчетные величины частоты работы этих устройств, соответствующие влиянию гидродинамических и инерционных сил в этих же условиях, были выше 5 кГц.

Влияние гидродинамических сил будет мало, если период колебаний лепестка (соответствующий частоте $2f$) будет значительно больше некоторой гидродинамической постоянной $\tau = 2\eta_r b^2 / \epsilon_0 U^2$, где η_r - коэффициент вязкости газа; b - ширина лепестка; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м [16], т.е. если

$$(2f)^{-1} \gg \tau. \quad (14)$$

Для возвращения лепестка в исходное положение в промежутке между импульсами необходимо, чтобы приблизительно совпали частота следования импульсов и собственная частота колебаний лепестка, т.е.

$$2f \cong 0,162 \frac{h}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (15)$$

где h - толщина лепестка; E , ρ - модуль упругости и плотность материала лепестка соответственно.

Из (14) вытекает следующее ограничение на ширину лепестка:

$$b \ll \frac{U}{2} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_0}{f \eta_r}}, \quad (16)$$

а из (15) - условие, налагаемое на длину лепестка,

$$L \cong 0,284 \frac{h^{1/2} E^{1/4}}{f^{1/2} \rho^{1/4}}. \quad (17)$$

К динамическим условиям (16)-(17) следует добавить условие силового взаимодействия статора и ротора. Это взаимодействие будет в случае, когда уже в самом начале электростатического наката лепестка, при некоторой начальной длине наката l_0 , сила трения лепестка о ротор будет больше силы начальной тяги лепестка. В рассматриваемом случае силы изгиба лепестка будут пренебрежимо малы, и можно использовать формулы электростатического наката и притяжения абсолютно гибкой ленты [16], т.е.

$$\frac{\epsilon_0 U^2 l_0}{2(d_1/\epsilon)^2} f_{\text{тр.}} \geq \frac{2 \epsilon \epsilon_0 U^2}{\alpha_0^2 2d_1}, \quad (18)$$

где $f_{\text{тр.}}$ - коэффициент трения поверхности лепестка о поверхность ротора; $\alpha_0 \cong y_m / L - l_0$; y_m - зазор между статорными и роторными пластинами (рис.2а).

Из анализа неравенства (18) следует, что силовое взаимодействие статора и ротора (электростатический захват) будет при

$$l_0 \geq L + \frac{Z}{2} - \sqrt{(L+Z/2)^2 - L^2}, \quad (19)$$

где $Z = \epsilon y_m^2 f_{\text{тр.}} / 2d_1$.

Для обеспечения высокой механической надежности элементарных двигателей среды необходимо выполнить условие, согласно ко-

торому механические напряжения в лепестках были бы меньшими предела усталости [17]. Пленочные лепестки этих двигателей прежде всего испытывают изгибные нагрузки. Поэтому указанное условие будет иметь вид [18]

$$\min R \geq \frac{Fh}{2\sigma_y}, \quad (20)$$

где $\min R$ - минимальный радиус кривизны лепестка, σ_y - напряжение предела усталости материала лепестка.

Одна из наиболее сложных частей расчета сред связана с определением зависимостей $H(l)$, $F_{\text{нагр.}}(H)$, $A_{\text{нагр.}}(H)$, $A_{\text{мех.}}(H)$, где H - координата перемещения ротора относительно статора, l - длина наката в процессе распластывания пленочного лепестка. Для получения этих зависимостей необходимо иметь в виду все конструктивные особенности лепесткового двигателя. Но, как видно из (1)-(10), рассматриваемые в настоящей работе основные параметры электромеханической среды: \bar{P} , \mathcal{E} , v , $F_{\text{уд}}$ требуют для своего определения лишь три величины из указанных выше зависимостей: H_{\square} , l_{\square} , $A_{\text{мех.}}(l_{\square})$. Эти величины можно задать как условия конструирования лепесткового двигателя:

$$l_{\square} \geq 0,5L; \quad A_{\text{мех.}} \leq A_{\text{нагр.}} \quad (A_{\text{мех.}} \leq 0,5A_{\square}) \quad (21)$$

и определить по результатам прикидочных расчетов:

$$H_{\square} \leq \frac{y_{\square}^2}{2L}. \quad (22)$$

В таблице представлены результаты расчетов основных параметров электромеханической среды с касательным движением, проведенные при следующих исходных данных: $d_1 = 1$ мкм; $\epsilon = 5$;

Т а б л и ц а

Тип двигателя		Р, Вт	Э, Вт/кг	v, м/сек	F _{уд.} , Н/кг	H* _м , мкм
Электро-механические среды		$1,1 \cdot 10^{-5}$ н.ш	150-200	0,011-0,10	1500-18000	5,6-50
Пьезоэлектрические двигатели	ДПЭЦ 32-К1	6,3	37	0,038	980	1,13
	ДПЭШ 46-К1	25	167	0,125	1340	3,3
	ДПЭШ 46-К2	4,7	38	0,047	810	1,24
	ДПЭШ 25-К1	1,26	49	0,094	520	1,50
	ДПРЭО К1-1	0,63	3,2	0,013	246	0,33
	ДПЭР35 К1-1	12,6	16,2	0,022	740	0,67

$f = 10^3$ Гц; $a_n = 0,5$ Дж/м²; $U = 108$ В; $f_{тр.} = 0,3$;
 $h = 1$ мкм; $k_{ст} = 0,4$; $k = 2$; $k_{нагр.} = 0,5$; $h_p =$
 $= 100$ мкм; $\rho_p = 8 \cdot 10^3$ кг/м³; $h_{ст} = 300$ мкм; $\rho_{ст} =$
 $= 2,5 \cdot 10^3$ кг/м²; $\eta_r = 1,72 \cdot 10^{-5}$ кг/мсек (воздух); $E =$
 $= 7 \cdot 10^{10}$ Н/м²; $\rho = 2,7 \cdot 10^3$ кг/м³ (алюминиевые лепестки);
 $E = 1,1 \cdot 10^{11}$ Н/м², $\rho = 8,9 \cdot 10^3$ кг/м³ (лепестки из бериллие-
вой бронзы); $y_n = 50-150$ мкм; $l_n = 0,5L$; $L = 450$ мкм,
согласно (17); $b = 100$ мкм, согласно (16); $l_0 = 25$ мкм, со-
гласно (19). В таблице также приведены сопоставимые параметры
пьезоэлектрических двигателей [19]. Значение $H_n^* = 2H_n$,
где H_n^* - перемещение ротора за период питающего напряжения
частоты $2f$. Величина H^* может быть подсчитана для пьезо-
электрических двигателей по частоте колебаний пьезоэлемента,
скорости вращения и диаметру ротора.

Из рассмотрения сравниваемых в таблице параметров видно, что в электро-механической среде должно быть не менее $10^5 - 10^6$

элементарных двигателей для получения той же мощности, что и у современных пьезоэлектрических двигателей. В остальном же величины параметров электромеханических сред весьма близки величинам параметров пьезоэлектрических двигателей с высокой энергоемкостью. Заметное отличие величин H_{Σ}^* обоих видов двигателей не изменяет такое представление, поскольку эта величина является некоторой "внутренней" характеристикой двигателей, связана со значительным отличием частот колебаний лепестков ($2f = 2$ кГц) и пьезоэлектрических элементов ($f = 33-63$ кГц). В шаговом режиме и у электромеханических сред можно получить очень небольшую цену шага при коротких управляющих импульсах. Оба вида двигателей имеют исключительно высокие значения $P_{уд}$, значительно превышающие сопоставимые величины для индуктивных двигателей.

В то же время нельзя не отметить, что энергоемкость пьезоэлектрических двигателей резко падает при уменьшении мощности (эта закономерность видна и при рассмотрении значительно большего числа пьезоэлектрических двигателей [6]). Напротив, принцип построения электромеханических сред позволяет сохранять высокую энергоемкость вплоть до мощности $2 \cdot 10^{-4}$ Вт, т.е. мощности в 10 раз большей мощности лепесткового двигателя.

Высокие значения энергоемкости электромеханических сред вызывают необходимость обратить особое внимание на тепловой расчет этих двигателей.

Если использовать понятие допустимой энергоемкости внутренних тепловых потерь двигателя $\bar{\varepsilon} = P_0 / \rho$, где P_0 - допустимые тепловые потери в единице объема двигателя, ρ - эффективная плотность материалов двигателя, то

$$\bar{\varepsilon} = (1 - \eta) \varepsilon; \quad \eta = \frac{\varepsilon - \bar{\varepsilon}}{\varepsilon}, \quad (23)$$

где η - к.п.д. двигателя.

Величина допустимых тепловых потерь $P_0 = 5 \cdot 10^4 - 10^5$ Вт/м³ для самых разнообразных устройств электронной техники [20], конденсаторов [21], электрических индуктивных машин [5]. При малых размерах устройств и машин эта величина достигается в условиях естественного охлаждения, а при относительно больших размерах - в условиях принудительной вентиляции.

Из (23) следует, что для электромеханической среды с емкостью 150-200 Вт/кг, эффективной плотностью материалов $\rho = 3,2 \cdot 10^3$ кг/м³, $\bar{e} = 16-32$ Вт/кг; $\eta = 0,79-0,92$. Возникает вопрос, можно ли в среде обеспечить такое тепловыделение, чтобы получить указанные значения к.п.д.? В ответе на этот вопрос фундаментальное значение имеет высокий к.п.д. электростатического наката, который для случая наката лавсановых лент составляет 0,89 и выше [10]. В случае электростатического наката металлических пленочных лепестков, изготовленных применением интегральной технологии, этот к.п.д. должен быть еще выше.

Тепловые потери энергии в среде также связаны с протеканием в проводниках электрического тока, релаксационными процессами в диэлектриках, адгезионными явлениями и трением в областях контакта поверхностей лепестков и слоев диэлектрика на роторе.

Потери энергии в проводниках емкостных машин значительно меньше, чем в проводниках индуктивных машин благодаря использованию параллельного соединения обкладок конденсаторов переменной емкости (в индуктивных машинах витки обмоток соединены последовательно).

Потери энергии в диэлектрических слоях могут заметно влиять на снижение к.п.д. среды при больших значениях тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$. При этом следует иметь в виду, что $\operatorname{tg} \delta$ пленок обычно выше, чем у соответствующих массивных материалов. Этот коэффициент для пленок SiO_2 равен $10^{-4}-10^{-3}$, для пленок $\text{Al}_2\text{O}_3 - 4 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-2}$ [22]. Если взять диапазон

$\operatorname{tg} \delta = 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-2}$, значение амплитуды электрического поля 10^8 В/м, частоту $f = 10^3$ Гц, то потери энергии в диэлектрических слоях будут оценены величинами 0,05-3 Вт/кг.

Потери энергии в местах контакта лепестков и слоев диэлектрика на роторе будут заметно меньшими, чем аналогичные потери энергии в подвижных толкающих элементах пьезоэлектрических двигателей благодаря резкому снижению удельных механических нагрузок. В пьезоэлектрических двигателях весь поток мощности от пьезоэлемента к ротору передается лишь через один подвижный элемент, а в средах поток мощности от статора к ротору передается через большое число подвижных пленочных элементов.

Если все рассмотренные выше виды тепловых потерь энергии можно ограничить подбором материалов, размеров и режимов, то энергия, идущая на изгиб лепестков, связана с самим принципом работы элементарных двигателей среды и она не может быть малой. Но именно эта энергия частично рекуперирована, поскольку распрямление лепестков связано с уменьшением емкости, т.е. с генераторным режимом.

Ресурс электромеханических сред связан с теми же факторами, что и ресурс пьезоэлектрических двигателей, т.е. с механическим износом подвижных элементов и поверхности ротора как из-за внутренних напряжений, так и из-за внешних истирающих сил. Но в средах открывается возможность использовать совершенно другие материалы - пленочные, как раз и отличающиеся высокими механическими свойствами [17].

5. Место электромеханических сред в электромеханике

Несмотря на то, что электромеханические среды состоят из очень большого числа слабощных элементарных двигателей, их сборка не связана с какими-либо специфическими затруднениями. В единую конструкцию собираются не элементарные двигатели, а под-

ложки с основными элементами этих двигателей. Если взять за основу данные проведенной выше оценки параметров среды с касательным движением, то следует учитывать, что на одном квадратном сантиметре статорной подложки расположено $2 \cdot 10^3$ лепестков. Таким образом, некоторая удельная мощность этой среды равна $2 \cdot 10^3 \times 1,1 \cdot 10^{-5} = 2,2 \cdot 10^{-2}$ Вт/см². Если активная площадь статорной подложки равна 10 см², то она будет вносить в среду $2 \times 2,2 \cdot 10^{-2} \times 10 = 0,44$ Вт мощности (лепестки расположены с обеих сторон статорной подложки). Далее, 30 статорных подложек, расположенных этажами, внесут в среду 13 Вт мощности (у крайних статорных подложек используются только по одной стороне поверхности). Далее возможна сборка в единую конструкцию двигателя самих сред путем параллельного и последовательного их механического соединения^{*)}. При исходной энергоемкости среды, например, 200 Вт/кг, энергоемкость законченного двигателя все еще будет высокой. В то же время и маломощные среды будут иметь ту же энергоемкость 200 Вт/кг, вплоть до мощности 10^{-4} Вт.

Таким образом, среды позволяют создавать двигатели с высокой энергоемкостью в диапазоне мощностей 10^{-4} - 100 Вт, а в перспективе и большей мощности. В то же время электромеханические среды имеют во всем указанном диапазоне мощностей высокий КПД, высокую точность позиционирования, высокую технологичность^{**)}. Двигатели с такой совокупностью свойств разительно отличаются от всех известных в настоящее время двигателей.

*)

Заметим, что сборка электромеханических сред аналогична сборке конденсаторов, аккумуляторов и т.д. в единую батарею.

**)

Рассмотренные электромеханические среды имеют относительно низкую скорость перемещения ротора, сопоставимую со скоростью перемещения поршня в гидравлических преобразователях. Но можно представить и сверхскоростные среды с зубчатыми статором и ротором [23].

Индуктивные двигатели имеют высокую энергоемкость, большую 100 Вт/кг, при мощности, большей 10 кВт [5]. При меньшей мощности их энергоемкость резко падает (100 Вт - 30 Вт/кг; 10 Вт - 10 Вт/кг; 1 Вт - 7 Вт/кг; 0,1 Вт - 1 Вт/кг [5]).

Пьезоэлектрические вибрационные двигатели имеют мощность от долей ватта, до нескольких десятков ватт, максимальное значение энергоемкости почти 200 Вт/кг при мощности около 25 Вт. При снижении мощности энергоемкость и этих двигателей также резко падает (1 Вт - 10 Вт/кг) [6,19].

К.п.д. индуктивных и пьезоэлектрических двигателей малой мощности не превышает 60% [5,6].

Современные устройства точного позиционирования прецизионной механики, основанные на применении шаговых индуктивных двигателей, потрясут воображение своей массивностью и большими размерами, несоответствием размеров и веса "обрабатываемой" детали с размерами и весом операционного оборудования. Но если иметь в виду особенности индуктивных двигателей: крайне низкую энергоемкость при малой мощности, относительно большую массу ротора (он должен нести часть магнитопровода), необходимость иметь соответствующую массу и размерам двигателя станину, то становится понятным и массивность устройств точного позиционирования и необходимость использования аэродинамической подвески и т.д. Между тем точность позиционирования в рассматриваемых устройствах составляет в лучшем случае доли микрометра [24].

Если иметь в виду применения туннельного микроскопа [25], то точность позиционирования при использовании пьезоэлектрических двигателей достигла предела (доли Å). В этой связи можно говорить лишь о повышении технического и экономического уровня соответствующих устройств.

Технологичность, в широком понимании этого термина (производительность, стоимость, относительное количество применяемых

редких, токсичных и дефицитных материалов, экологичность и т.д.), всех современных электрических двигателей весьма низка. Между тем проблема технологичности электрических двигателей осложняется в связи с массовым их применением и производством. Так, производство индуктивных двигателей заметно нагружает экологию в связи с относительно большим весом меди в конструкциях этих двигателей. Массовое производство пьезоэлектрических двигателей становится проблемой в связи с относительно большим весом пьезокерамического элемента. В состав пьезокерамики, например на основе ЦТС, входят такие элементы, как свинец, титан, цирконий (основной состав), ниобий, серебро, бериллий, скандий, иттербий, лантан, сурьма и т.д. (модификаторы) [26].

В таком рассмотрении электромеханические среды как раз и демонстрируют исключительно низкое потребление редких, токсичных и дефицитных материалов. Во-первых, снижение затрат всех видов материалов напрямую связано с высокой энергоемкостью. Во-вторых, основную массу среды составляет масса подложек. Масса активной частоты среды в виде конструкций из пленок составляет лишь доли одного процента. Поэтому если подложки статора и ротора будут выполнены из мало дефицитных, химически нейтральных материалов, то проблема употребления других материалов будет, по существу, снята. При технологических операциях с относительно малым количеством токсичных материалов производство может быть локализовано и экологически обеспечено.

В целом создание направления электромеханических емкостных вибрационных сред позволяет найти решение трем важным проблемам.

1. Обеспечить новые области применений там, где необходимы энергетически эффективные электрические двигатели с мощностью 10^{-5} - 1 Вт.

2. Обеспечить конкуренцию с известными электрическими двигателями, пневматическими и гидравлическими преобразовате-

лями при мощностях преобразователей энергии от 1 Вт и выше.

3. Осуществить большую экономию энергии, дефицитных материалов и финансовых средств во всех видах работ, где находят применения электрические двигатели и иные преобразователи энергии.

Проведенное в настоящей работе рассмотрение основано на оценочном расчете частного случая вибрационной электромеханической среды. Уже этот пример показывает большие технические, энергетические, технологические и экологические преимущества исследованных сред. Но также видно, что могут быть предложены и другие, более эффективные конструкции элементарных пленочных двигателей сред, сами электромеханические среды могут быть естественным образом соединены с вычислительными и рецепторными средами. Поэтому для получения более законченных выводов еще потребуются проведение широких исследований, основанных на применении математических и физических методов моделирования.

Л и т е р а т у р а

1. ДЯТЛОВ В.Л., КОСАРЕВ Ю.Г. Пленочные электростатические моторные среды как путь к экологической технологии //Настоящий сб.- С.1-18.

2. КОНЯШКИН В.В., ЛУЦЕТ М.К., ПОТАПОВ Б.С. Световой затвор с большой апертурой и модулятор излучения с электростатическим приводом // Моделирование в пленочной электромеханике.- Новосибирск. - 1985.- Вып.110: Вычислительные системы.- С.35-46.

3. КОНЯШКИН В.В. Электростатические силы в ленточных емкостных структурах с малыми углами наката// Моделирование в пленочной электромеханике.-Новосибирск.- 1989.- Вып.131: Вычислительные системы.- С.34-43.

4. ПОТАПОВ Б.С. О реализации принципа шагового перемещения в ленточной емкостной структуре// Там же.- С.44-59.

5. КОПЫЛОВ И.П. Электрические машины.-М.: Энергоатомиздат, 1986.- 360 с.

6. ЛАВРИНЕНКО В.В., КАРТАШЕВ И.А., ВИШНЕВСКИЙ В.С. Пьезоэлектрические двигатели.- М.: Энергия, 1980.- 112 с.
7. ПЕТЕРСЕН К.Э. Кремний как механический материал // ТИИЭР.- 1982.- Т.70, № 5.- С.5-49.
8. ДЯТЛОВ В.Л., СОЛДАТЕНКОВ И.С. Некоторые результаты исследования пленочных электростатических реле // Вычислительные системы. Труды I Всесоюз. конф. по вычислительным системам. - Новосибирск.- 1968.- Вып.5.- С.159-175.
9. ГРИГОРИШИН И.А., ДУБОВСКАЯ И.Е., ЕФРЕМОВ Г.И., КРАВЕЦ Г.М. Обзор некоторых физико-математических свойств и точности формообразования диэлектрических подложек из анодного оксида алюминия // Настоящий сб.- С. 46-55.
10. ДЯТЛОВ В.Л., КОНЯШКИН В.В., ПОТАПОВ Б.С. Пленочные емкостные структуры с накатом обкладок // Моделирование в пленочной электромеханике.- Новосибирск.- 1981.- Вып.84: Вычислительные системы.- С.33-53.
11. ANDERSON J. Motors on wider than a human hair // New Scientist.- 1988.- September, N1.- P.44.
12. ЕВРЕИНОВ Э.В., КОСАРЕВ Ю.Г. Однородные универсальные системы высокой производительности.- Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1966. - 308 с.
13. ДЯТЛОВ В.Л., КОНЯШКИН В.В., ПОТАПОВ Б.С. Использование размерных физических эффектов в пленочной электромеханике // Моделирование в пленочной электромеханике.- Новосибирск.- 1985.- Вып.110: Вычислительные системы.- С.18-34.
14. Их же. Структуры М-Г-Д-М с подвижными пленками // Моделирование в пленочной электромеханике.- Новосибирск.- 1982. - Вып.95: Вычислительные системы.- С.3-23.
15. Пленочные электростатические приборы - новые элементы вычислительной и информационной техники /Я.М.Диковский, В.Л.Дятлов, В.В.Коняшкин и др.// Всесоюз. науч. конф. "Специальные коммутационные элементы", Рязань, 16-18 сентября, 1981.- Материалы конф.- Рязань, 1982.- Т.2.- С.52-57.
16. ДЯТЛОВ В.Л. Пленочная электромеханика - основа создания универсальных пленочных двигателей с высокой энергоемкостью // Моделирование в пленочной электромеханике.- Новосибирск.- 1981.- Вып.84: Вычислительные системы.- С.3-32.
17. ЗИЛИНГ К.К. Прочностные свойства пленок и пленочная электромеханика // Моделирование в пленочной электромеханике. - Новосибирск.- 1975.- Вып.66: Вычислительные системы.- С.21-32.

18. ДЯТЛОВ В.Л., КОНЯШКИН В.В., ПОТАПОВ Б.С. Модели пленочных электростатических элементов и стабильность их характеристик// Моделирование в пленочной электромеханике.- Новоси - бирск.- 1975.- Вып.66: Вычислительные системы.- С.3-20.
19. Технические характеристики шаговых пьезоэлектрических двигателей вращательного перемещения (НТКП "Квант") // Изобретатель и рационализатор.- 1991.- № 5.- С.33.
20. ЗИ С.М. Технология СБИС. Т.1.- М.: Мир,1986.- 400 с.
21. ЕРМУРАТСКИЙ В.В., ЕРМУРАТСКИЙ П.В. Конденсаторы переменного тока в тиристорных преобразователях.- М.: Энергия,1979.- 219 с.
22. Технология тонких пленок. Справочник. Под ред.Л.Майсела, Р.Глэнга. Т.2.- М.: Сов.радио, 1977.- 768 с.
23. PARAMO P.G.L. Un motor electrico linneal// Metalurgia y electricidad.- 1985.- Marso, N 565.- P.78-82.
24. Техническое описание и инструкция по эксплуатации установок зондовых ЭМ-6010, ЭМ-6020. 0.268, 0003 ТО.- М.,1985. - 63 с.
25. Сканирующая туннельная микроскопия границы раздела в МДП-структуре /М.С.Хайкин, А.И.Трояновский, В.С.Эдельман и др. // Журн. exper. и теор.физики.- 1986.- Т.44, вып.4.- С. 193-197.
26. ФОСЕНКО Е.Г., ДАНЦИГЕР А.Я., РАЗУМОВСКАЯ О.Н. Новые пьезокерамические материалы. - Ростов-на-Дону, 1983. - 160 с. (Ростовский университет).

Поступила в ред.-изд.отд.

2 сентября 1991 года