



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

А В Т О М Е Т Р И Я

№ 3

1999

**ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
МИКРОМЕХАНИКИ И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ**

УДК 621.319.082.72

В. Л. Дятлов, Э. Г. Косцов

(Новосибирск)

**ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ МИКРОДВИГАТЕЛИ
НА ОСНОВЕ ТОНКИХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК**

Рассматривается принцип работы шаговых лепестковых микродвигателей, основанных на эффекте электростатического наката металлических пленок на поверхность сегнетоэлектрика. Такие микродвигатели, изготавливаемые с помощью микроэлектронной технологии, отличаются исключительно высокой энергоемкостью (свыше $0,3-1 \text{ Дж/м}^2$ при напряжениях $10-50 \text{ В}$) и прецизионностью перемещения (шаг от 1 нм до 100 мкм). Приводятся теоретические и экспериментальные данные, характеризующие энергетические и механические параметры таких микродвигателей.

Введение. Планарные электрические двигатели – новые микродвигатели, создаваемые на базе технологии микроэлектроники.

Хорошо известно, что с данной технологией связано исключительно успешное развитие электроники, когда при значительном уменьшении стоимости достигнуто и существенное увеличение функциональных возможностей изделий.

В рамках этой базовой технологии создано большое число новых технологических методик, которые можно использовать также в микромеханике и микроэлектромеханике. В свое время для развития микроэлектроники пришлось создавать дорогостоящую технологическую базу. Теперь же для развития микромеханики эта база уже практически создана, и планарные микродвигатели могут сыграть в микромеханике роль, подобную роли транзисторов в микроэлектронике.

Известно несколько направлений развития планарных электрических двигателей, но не все они выдержат в итоге жесткую конкуренцию на применение в микромеханике. Поэтому в настоящее время большой интерес вызывает вопрос о том, какие из них смогут занять в ближайшем будущем центральное место в микромеханике. Очевидно, что таким направлением станет направление, в котором в пределах реальных физических эффектов и

современной технологии будут удовлетворены стандартные требования к параметрам устройств микромеханики.

В планарных электрических микродвигателях возможно получение мощностей порядка 10^{-6} – 10^{-5} Вт и более, но допускается и их наращивание до значений 1 Вт и более за счет объединения нескольких микродвигателей. Такие мощности имеют современные пьезоэлектрические, а также мало-мощные индуктивные двигатели, применяемые в современной точной механике. Наиболее перспективными в настоящее время считаются первые из них. Можно ожидать, что планарные микродвигатели будут иметь более высокие параметры и характеристики по точности позиционирования, глубине регулирования и даже надежности, чем пьезоэлектрические двигатели. Основным ориентир при выборе направления развития планарных электрических моторов – достижение наиболее высоких электромеханических параметров и соотношений мощность – масса при низкой стоимости, которые достигаются за счет использования технологии микроэлектроники и создания унифицированных микромеханических микросхем.

Известны следующие типы планарных микромоторов:

ЭВПД – электростатические воздушные планарные двигатели [1–5]. Основное отличие этих микромоторов от классических электростатических двигателей – малый зазор между статором и ротором, равный 1–2 мкм (в классических электростатических машинах он равен 1–2 мм). Малый зазор в межэлектродном пространстве определяет относительно высокую плотность «накачиваемой» в образец электрической энергии и, следовательно, эффективность двигателя. Разрабатываются ЭВПД вращательного и возвратно-поступательного движения. Ротор в первом случае расположен в подшипниках, во втором – скользит по направляющим. Можно обеспечить достаточно высокую надежность этих двигателей при указанных в литературе основных параметрах (для микромотора вращения с диаметром ротора 100 мкм): напряжение электропитания 100 В; скорость вращения ротора 50000 об./мин; мощность 10^{-6} Вт. В ЭВПД трудно осуществить суммирование мощностей. Поэтому маловероятно, что они найдут применение в точной механике широкого назначения. В технологии этих микродвигателей используются дорогостоящие операции: изготовление размеров деталей с точностью не ниже 0,1 мкм; глубокое прецизионное химическое травление и т. д.

ПЭПД – пьезоэлектрические планарные двигатели [6,7]. Конструкции этих микромоторов подобны конструкциям классических пьезоэлектрических двигателей с керамическим элементом в виде консоли, один конец которой закреплен, а другой колеблется, совершая эллипсоидальное движение. В ПЭПД основной элемент изготавливается из пленочного конденсатора, в котором диэлектрическая пленка выполняется как из неорганических, так и из органических пьезоэлектриков, например из пленки ПВДФ (поливинил-девинилфторида). Изготовлены экспериментальные образцы ПЭПД в виде многослойных пленочных консолей. Такие двигатели могут быть использованы в микро- и электрооптике. Однако трудно найти способ эффективной передачи энергии движения консолей на подвижный ротор. Кроме того, эффективность электромеханического преобразования энергии в консолях ПЭПД низкая из-за малого значения коэффициента электромеханической связи в пленочных пьезоэлектриках.

ЭТПД – электротепловые микродвигатели [8] – тонкопленочный аналог «биметаллических» устройств, используемых, например, в автоматах от-

ключения электрических сетей. Подвижный элемент ЭТПД выполняется в виде трехслойной пленочной консоли из органических пленок с разными коэффициентами термического расширения, а средний слой – из металлической пленки как нагревательного элемента. Известны экспериментальные образцы ЭТПД в виде матриц многослойных пленочных электротепловых консолей. Основным практический интерес к этим микродвигателям связан с возможностью получения низких напряжений электропитания (ниже 10 В), но при значительных токах – 5–50 мА. В то же время понятно, что энергетическая эффективность ЭТПД низкая (КПД ниже 5 %). В экспериментальных образцах ЭТПД электротепловые консоли передают движение на подвижную пластину-ротор благодаря тому, что касаются ее плоскости под небольшим углом. Таким образом, передача энергии от статора (в виде матрицы электротепловых консолей, расположенной на неподвижной пластине) к пластине-ротору осуществляется достаточно неэффективно.

ЭДПД – электростатические диэлектрические планарные двигатели [9,10]. В этих устройствах движение создается при электростатическом накате металлизированной органической пленки на поверхность металла или диэлектрика (слой SiO_2 , Al_2O_3) в зависимости от того, куда обращен слой металлизации. Основным элементом ЭДПД является пленочная петля (диаметр – несколько мм) из металлизированной пленки полиэтилентерефталата. Характерная особенность ЭДПД – накопление объемного заряда в диэлектрике при каждом электростатическом накате. Этот заряд формируется на глубоких энергетических центрах (ловушках), характерных для широкозонных некристаллических диэлектриков, и препятствует повторному накату металлической пленки. Уменьшение влияния объемного заряда возможно за счет использования импульсов напряжения с более сложной формой, в частности, наполнения их более короткими импульсами с разной полярностью. Однако в этом случае значительно снижается энергетическая эффективность микродвигателя.

Ранее сообщалось о разработке принципиально новых микродвигателей – ЭСПД – электростатических сегнетоэлектрических лепестковых микродвигателей, которые создаются методами технологии микроэлектроники [11,12]. Принципиальное отличие ЭСПД от ЭДПД (оба типа таких микроприборов можно назвать диэлектрическими микродвигателями) связано с уникальными свойствами сегнетоэлектриков:

1) большая величина диэлектрической постоянной ϵ , которая превосходит значение ϵ линейных диэлектриков на 2–3 порядка, что определяет возможность «накачки» в образец исключительно большой энергии и использования низких рабочих напряжений;

2) нелинейная зависимость поляризации от напряженности электрического поля с выходом на участок насыщения, при этом коэрцитивные поля очень низкие (до $1-3 \cdot 10^4$ В/см);

3) существенно меньшая концентрация центров захвата носителей заряда и меньшая их энергетическая глубина – следствие совершенной кристаллической структуры сегнетоэлектрика.

По сравнению с ЭДПД микродвигатели ЭСПД обладают еще и другими преимуществами: меньшими рабочими напряжениями, более высокой механической и электрической надежностью, простой системой управления, а также большей технологичностью.

Перечисленные выше свойства сегнетоэлектриков определяют более высокую эффективность электромеханического преобразования энергии при электростатическом накате, чем в ПЭПД при использовании обратного пьезоэлектрического эффекта. Электростатический накат металлических пленок (лепестков) дает возможность снизить межэлектродный зазор до минимальных значений, определяемых шероховатостью поверхностей металлической пленки и сегнетоэлектрика, на уровне 3–10 нм. Перемещающийся по поверхности сегнетоэлектрика лепесток способен при изгибе передать движение подвижному внешнему объекту (пластине-ротору) и таким образом осуществить электромеханическое преобразование энергии. Скорость перемещения участка лепестка, накатывающегося на сегнетоэлектрик, определяется амплитудой напряжения, а накапливаемая энергия (преобразуемая в механическую) – толщиной сегнетоэлектрической пленки и значением ϵ . Оценки показывают, что давление в межэлектродном пространстве в момент касания двух поверхностей (начиная с расстояния между ними 10 нм и менее) достигает значений 100–150 атм и соответственно сила натяжения металлической пленки может иметь значения до 100 кг/мм².

Целью настоящей работы является более детальное (по сравнению с [11,12]) описание принципа функционирования шаговых микродвигателей, создаваемых методами технологии микроэлектроники и основанных на эффекте электромеханического преобразования энергии в процессе электростатического наката металлических лепестков на поверхность сегнетоэлектрических пленок, а также проведение математического моделирования работы таких двигателей, рассмотрение их надежности, представление первых экспериментальных характеристик лепестковых микродвигателей.

Бесконтактный и контактный способы передачи энергии от статора к ротору в планарных двигателях. Еще до появления планарных микродвигателей в электромеханике были известны два способа передачи энергии от статора к ротору – контактный и бесконтактный.

В случае контактного способа передачи энергии от статора к ротору используются специальные элементы (фрикционная вставка в элемент пьезоэлектрического двигателя, ферромагнитная лента между статором и ротором в индуктивных волновых двигателях и т. д.) либо статор и ротор контактируют между собой за счет волновой деформации пьезоэлектрической керамики. В таких двигателях при использовании точных датчиков положения ротора достигается исключительно высокая точность его позиционирования. Вместе с тем в этих двигателях серьезной проблемой становится механический износ контактирующих элементов статора и ротора.

В ЭВПД используется бесконтактный, а в ПЭПД, ЭТПД, ЭДПД и ЭСПД – контактный способы передачи энергии. При первом способе передачи энергии (мощности), когда ротор не касается поверхности статора, силовое сцепление ротора со статором осуществляется благодаря концентрации полей (электрического или магнитного) над зубцами ротора и статора. Здесь проявляются преимущества и недостатки бесконтактного способа передачи энергии от статора к ротору. Преимущество связано с тем, что отсутствует износ поверхностей ротора и статора. Основной недостаток – невысокая точность позиционирования (в шаговых двигателях), которая определяется размерами зубцов ротора и статора. Высокой точности позиционирования можно достичь только при чрезвычайно малых размерах этих зубцов и при очень высокой точности их изготовления. Такое решение значительно

усложняет технологию изготовления двигателя, существенно увеличивает его стоимость.

Известен контактный способ передачи энергии от статора к ротору с помощью электростатического наката. Простейшим примером такого наката является перемещение металлического цилиндра под действием напряжения между ним и электродом, покрытого диэлектриком, в сторону электрода. Для того чтобы такое перемещение стало возможным при напряжениях не более 200–250 В (напряжение начала процесса разряда в газе), необходимо, чтобы расстояние между цилиндром и электродом было не более 2–3 мкм. Можно отметить, что по мере уменьшения этого расстояния сила притяжения между цилиндром и электродом увеличивается: она максимальна, когда указанное расстояние становится 100 нм или меньше. Поскольку время действия этой силы очень мало и площадь контакта цилиндра с электродом в том месте, где напряженность поля максимальна, незначительна, то сила притяжения и соответственно работа наката также незначительны. Таким образом, электромеханическое преобразование энергии при движении металлического образца с фиксированной геометрической формой относительно электрода не является эффективным.

Большую протяженность взаимодействия двух проводящих плоскостей, сопровождающегося механическим перемещением одного из проводников, можно получить при накате проводящей жидкости по поверхности диэлектрика, отделяющего жидкость от электрода. Пример такого процесса – электроосмос. Однако возможность превращения такого наката в механическую работу ограничена: происходит только перемещение в пространстве массы тонкого слоя жидкости, поскольку в этом случае также отсутствует эффективный способ преобразования энергии.

Более эффективный способ преобразования энергии имеет место при использовании гибких и тонких проводящих лент или металлических пленок (лепестков). Толщина этих пленок должна быть небольшой, такой чтобы обеспечивался их изгиб под действием электрического поля в момент электростатического наката на поверхность диэлектрика (сегнетоэлектрика). Тогда во время этого процесса площадь контакта лепестка с поверхностью диэлектрика возрастает, а небольшой зазор между двумя контактирующими поверхностями поддерживается в течение всего процесса наката. Перемещающаяся в пространстве металлическая пленка способна при изгибе передать движение внешнему объекту и таким образом осуществить электромеханическое преобразование энергии.

Три стадии контактного способа передачи энергии от статора к ротору в диэлектрических микродвигателях. Движение ротора относительно поверхности статора складывается из нескольких стадий изменения состояния лепестка.

На рис. 1 показан вариант ЭДПД или ЭСПД в виде подвижной платформы 1 с прикрепленным к ней пленочным лепестком-консолью 2, передвигающейся по плоскому основанию 3 благодаря направляющим 4. Основание 3 из электропроводящего материала покрыто слоем диэлектрика (ЭДПД) или сегнетоэлектрика (ЭСПД) 5.

На рис. 1, а микродвигатели ЭДПД или ЭСПД (далее мы будем называть их «диэлектрическими микродвигателями») представлены в исходном положении, когда напряжение электропитания между лепестком 2 и основанием 3 равно нулю.

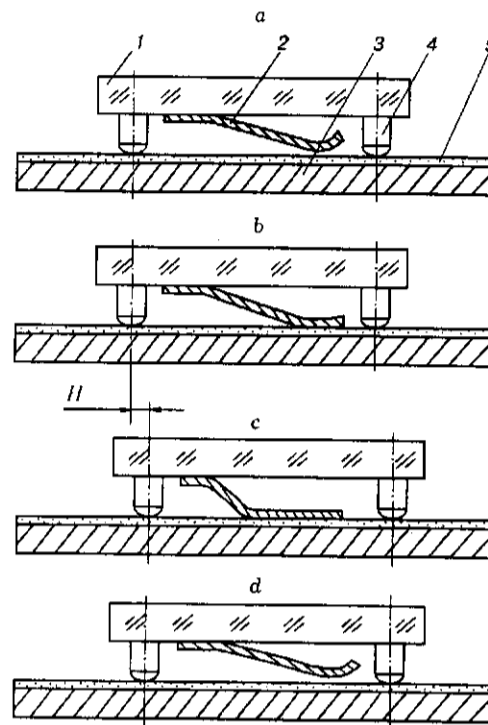


Рис. 1

На рис. 1, *b* диэлектрический микродвигатель показан в режиме первой стадии – «захвата», т. е. в режиме прочного механического сцепления платформы 1 и основания 3 в результате электростатического прижатия (включения «электронного клея») конца лепестка 2 к слою сегнетоэлектрика 5. «Захват» происходит в первые моменты времени действия импульса напряжения, приложенного к лепестку и основанию. Необходимым условием выполнения «захвата» является касание конца металлического лепестка и поверхности сегнетоэлектрика таким образом, чтобы угол между плоскостью сегнетоэлектрика и касательной к поверхности лепестка имел минимальное значение. В противном случае «захват» будет требовать затрат дополнительной энергии на изгиб лепестка и придания ему формы, обеспечивающей начало электростатического захвата, и происходить при более высокой амплитуде импульса напряжения. Указанное условие легче выполнить в случае придания лепестку еще в процессе его изготовления «S-образной» формы.

При таких условиях распластывание лепестка под действием электростатических сил начинается с момента касания поверхности лепестка и сегнетоэлектрика.

Этот процесс – «захват» лепестка – определяет дальнейший характер «электронного приклеивания» лепестка к поверхности сегнетоэлектрика, после чего начинается стадия «движения» за счет электростатического наката все большей и большей части поверхности лепестков на слой сегнетоэлектрика, происходит изгиб лепестков и их механическое натяжение в направлении движения. Это натяжение настолько велико, что может иметь

место разрыв металлического лепестка, что свидетельствует о наличии сил натяжения свыше 100 кг/мм^2 .

На рис. 1, с показан режим «движения» платформы 1 относительно основания 3 в результате электростатического наката лепестка (распространения действия «электронного клея» от конца лепестка на другую часть его поверхности, сопровождающегося изгибом лепестка) на поверхность слоя диэлектрика или сегнетоэлектрика.

На рис. 1, d показан принцип «отпускания», т. е. режим отсоединения лепестка 2 (выключения «электронного клея») и последующий отрыв всего лепестка (или его части) от поверхности сегнетоэлектрика 5 после прекращения действия импульса напряжения между лепестком и основанием. Размер H – величина «шага» перемещения платформы относительно основания за время одного такта.

После прекращения действия импульса напряжения лепестки под влиянием упругих сил должны быстро прийти в исходное положение. От длительности этого процесса зависит минимальный промежуток времени между соседними импульсами напряжения, т. е. максимальная частота следования f этих импульсов и, следовательно, мощность, развиваемая микро-двигателем, $P = Af$. Этот промежуток времени можно назвать временем «отлипания» – временем задержки до принятия формы лепестками, способной вновь обеспечить движение ротора при последующем действии импульса напряжения.

Для получения максимальной величины частоты f необходимо сократить время «отлипания» лепестков Δt . В этой связи рассмотрим факторы, приводящие к временной задержке выхода лепестков из контакта с диэлектриком.

По окончании импульса напряжения на части лепестков, распластанных по поверхности диэлектрика, действуют значительные силы упругости, направленные в сторону мест закрепления лепестков, способствующие их отрыву от поверхности диэлектрика. Однако не только эти силы ведут к отлипанию лепестков. Лепестки и поверхность диэлектрика имеют микронеровности, куполообразные деформации и, наконец, изогнутую форму в поперечном и продольном сечениях. При электростатическом накате все места таких «неровностей» оказываются в механически напряженном состоянии. Поэтому после прекращения действия электростатических сил в распластанных частях лепестков вблизи указанных неровностей возникают вертикальные упругие силы, также способствующие быстрому отрыву лепестков от поверхности слоя диэлектрика.

Кроме того, существуют и силы, удерживающие концы лепестков у поверхности диэлектрика: адгезионные, гидродинамические, электростатические силы, связанные с остаточными электрическими зарядами в диэлектрике, точнее, с поверхностной неоднородностью распределения зарядов под площадью лепестка.

Таким образом, после прекращения действия импульса напряжения в распластанной части лепестков вблизи микронеровностей возникает противодействие упругих сил локально деформированных участков лепестков и трех сил: адгезионной, гидродинамической и электростатической. Это противодействие сил можно выразить соотношением для давлений:

$$P_D - P_A - P_G - P_{EQ} = 0,$$

где P_D, P_A, P_G, P_{EQ} – соответственно давления сил локальных деформаций лепестков, адгезионных, динамических, электростатических сил остаточных электрических зарядов.

Указанное соотношение можно использовать для оценки времени Δt . Величину давления P_D оценим следующим образом. При действии импульса напряжения U в режиме «движения» в распластанных частях лепестков устанавливается равновесие, при котором $P_G = 0$ ($P_{EQ} = 0$), $P_A = 0$ (уравновешены на вершинах микронеровностей). В этом случае $P_D = \epsilon_0 E_c^2 / 2$, где E_c – напряженность электрического поля в микрозазорах между поверхностями лепестков и диэлектрика (лепестки только частично касаются слоя диэлектрика); $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; P_{sum} – электростатическое давление в микрозазорах. Поле E_c в микрозазорах не превышает величины $2 \cdot 10^9$ В/м. Поэтому давление P_D не превышает величины $8,85 \cdot 10^{-12} \times 4 \cdot 10^{18} / 2 \approx 1,8 \cdot 10^7$ Н/м² (180 атм).

После прекращения действия импульса напряжения, т. е. в режиме «отпускания», указанное равновесие нарушается. Происходит движение в распластанный части лепестков (лепестки начинают «отрываться» от слоя диэлектрика), и микрозазоры y начинают увеличиваться. В этом случае гидромеханическое давление для узкой полосы равно

$$P_G = \eta b^2 / y^3 \partial y / \partial t,$$

где b – ширина полосы; $\eta = 1,72 \cdot 10^{-5}$ кг/мс – вязкость воздуха.

В режиме «отрывания» динамическое равновесие в распластанных частях лепестков отражает уравнение

$$P_D - P_A - P_{EQ} = \eta b^2 / y^3 \partial y / \partial t.$$

Можно рассмотреть случай, когда $P_{EQ} = 0$. Давление P_A быстро уменьшается при увеличении микрозазора y , поэтому положим $P_A = 0$. Таким образом, можно оценить время Δt из решения уравнения

$$P_D = \eta b^2 / y^3 \partial y / \partial t.$$

Из этого уравнения следует связь между величиной зазора y и t :

$$t = \eta b^2 / 2P_D (1/y_0^2 - 1/y^2),$$

где y_0 – величина микрозазоров в начальный момент времени $t = 0$. Эта величина определяется размерами микронеровностей поверхностей лепестка и слоя диэлектрика.

Из зависимости t от y видно, что происходит ускоренное увеличение зазора y в момент времени $t = \Delta t = \eta b^2 / 2P_D y_0^2$. Например, при $y_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ м, $b = 500$ мкм, $P_D = 1,8 \cdot 10^7$ Н/м² $\Delta t = 1,33 \cdot 10^{-4}$ с.

При оценке времени Δt не учтены силы отрыва лепестков, направленные вдоль направления движения ротора. Поэтому приведенная оценка дает завышенные величины времени «отлипания». Видно, что с уменьшением ширины лепестков можно увеличить тактовую частоту диэлектрических

микродвигателей. Этого можно также достигнуть и изменением размеров микронеровностей на контактирующих поверхностях. Таким образом, возможно увеличение тактовой частоты с 1 до 10 кГц и более. Отметим, что в эксперименте была достигнута тактовая частота 20 кГц при длине лепестков 1 мм.

В режиме «отрывания» адгезионные силы P_4 и силы остаточных электрических зарядов играют отрицательную роль, увеличивая время «отлипания». В частности, при условии $\bar{P}_2 - \bar{P}_4 - P_{EQ} < 0$ диэлектрический микродвигатель полностью теряет работоспособность (лепестки «залипают» после первого же такта, и движение ротора прекращается).

Как показывают исследования, адгезионные силы значительно меньше сил, связанных с остаточными электрическими зарядами. Площадь физического касания лепестков с диэлектриком много меньше видимой площади их касания, а адгезионные силы проявляют себя только при прямом контакте двух тел. Кроме того, не происходит абсолютно плотного касания двух поверхностей, воздушный зазор между ними составляет по оценкам от 3 до 20 нм в зависимости от шероховатости поверхности диэлектрика.

Влияние объемных зарядов на время отлипания лепестка определяется, прежде всего, величиной заряда Q и временем t_c его существования в приповерхностном слое диэлектрика после прекращения действия импульса напряжения. Если $t_c < t_{\text{осв}}$, то в этом случае влияние объемного заряда на тактовую частоту незначительно. Накопление короткоживущего заряда в диэлектрике может осуществляться в виде свободных носителей заряда и в виде заряда на мелких энергетических центрах (ловушках). Первый вариант маловероятен, поскольку он требует высокого уровня инжекции, отсутствия центров захвата носителей заряда или очень низкого значения сечения их захвата ловушками σ , когда во время действия импульса заряд на них практически не накапливается. Поэтому рассмотрим случай формирования заряда на ловушках. Время освобождения носителей заряда с ловушек равно $t_{\text{осв}}$, в первом приближении $\exp(E_i/kT)/(v\sigma N_c)$, где E_i – энергетическая глубина ловушек; T – абсолютная температура; k – постоянная Больцмана; v – тепловая скорость носителей заряда; N_c – число квантовых состояний в зоне проводимости диэлектрика. Полагая, что $v = 10^5$ м/с, $\sigma = 10^{-19}$ м⁻², $N_c = 2,5 \cdot 10^{25}$ м⁻³ и тактовая частота порядка 1 кГц, $t_c \sim 10^{-3}$ с, можно оценить минимальную энергетическую глубину ловушек, при которой объемный заряд в приповерхностном слое не оказывает серьезного влияния на движение ротора: $E_i < 0,5$ эВ. С учетом возможных вариаций сечения захвата на два порядка как в сторону уменьшения, так и в сторону возрастания можно сказать, что E_i должно быть меньше 0,4–0,6 эВ. В том случае, если это условие не выполняется и концентрация центров $N_i > 2\epsilon\epsilon_0 V/d_e e$ (где e – заряд электрона, d_e – толщина диэлектрика), после прекращения действия импульса напряжения поле у поверхности лепестка может быть значительным вплоть до значений, равных полю в начальные моменты наката. В этом случае лепесток остается распластанным по поверхности диэлектрика и движение уже на втором такте становится невозможным в течение промежутка времени, равного времени стекания заряда с локальных центров. Такая ситуация характерна для большинства широкозонных линейных диэлектриков.

Отметим, что три основные стадии работы контактных двигателей были характерны и для классических пьезоэлектрических двигателей. В ПД для осуществления функции «захвата» используются внешние силы, прижима-

ющие ротор к статору через контактный элемент. При небольшом числе контактных элементов (контактирующих участков поверхностей) на них концентрируется вся мощность ПД. Это приводит к быстрому износу контактных элементов и плохой воспроизводимости параметров двигателя. Конструкция ПД из-за использования внешних прижимных сил получается громоздкой.

Но именно в ПД были получены рекордные значения точности позиционирования и глубины регулирования электрических емкостных двигателей.

Электрическая надежность диэлектрических микродвигателей. В микрорадиоэлектронике обычно используется запас электрической прочности, при котором рабочая напряженность электрического поля не менее чем в 2 раза меньше напряжения пробоя диэлектрика. Нетрудно показать, что рабочие напряжения диэлектрических микродвигателей не должны превышать 100 В. Такое ограничение следует из условия обеспечения достаточно высокой электрической надежности и особенностей их функционирования.

Анализ специфики работы рассматриваемых микродвигателей показывает, что для получения значения удельной работы $a_R > 0,1$ Дж/м² при напряжении источника питания $U < 100$ В необходимо выполнение определенного соотношения между ϵ и d_i : для $\epsilon > 1$ параметр a_R имеет максимум при $d_i/\epsilon \approx 10^{-7}$ м. Для заданного значения ϵ можно определить d_i^{opt} и напряженность электрического поля E^{opt} , а также a_R^{max} [9].

Недостатки диэлектрических микродвигателей с органическими пленками связаны не только с малыми значениями КПД, но и с малыми значениями ϵ . Поэтому в таких микродвигателях, например, при использовании полиэтилентерефталатных пленок толщиной 3–4 мкм удельная работа a_R имеет величину, большую 0,1 Дж/м², только при напряжениях питания $U > 200$ В.

Оценки показывают, что работу $a_R \approx 0,4$ Дж/м² при напряжении $U = 10$ –30 В можно получить в случае применения сегнетоэлектрических пленок с поляризацией насыщения, равной $P_0 \approx 2 \cdot 10^{-2}$ Кл/м², при этом начальное значение ϵ (при напряженности электрического поля, равной нулю) должно быть порядка 1000 и выше.

Предложенный критерий получения максимального значения a_R относится к диэлектрикам, которые не имеют пор, заполненных газом (воздухом). В случае газовых включений необходимо учитывать не только пробивные напряженности электрического поля, но и так называемые «частичные разряды», возникающие в заполненных газом порах и других газовых включениях. В случае диэлектрических микродвигателей создается в последний момент наката искусственное газовое включение тех же геометрических масштабов: воздушный зазор металл–диэлектрик. При напряжениях, превышающих напряжение порога начала частичных разрядов, в заполненных газом порах (полостях) происходит ионизация газа. В этих условиях наблюдается ускоренная деградация изоляции: она «старееет». Частичные разряды недопустимы в диэлектрических микродвигателях в связи с накоплением в диэлектрике при таких разрядах больших электрических зарядов, снижающих эффективность наката. Поэтому величина рабочего напряжения должна быть существенно меньше величины напряжения начала частичных разрядов в диэлектрике. Ниже все оценки проводятся при рабочем напряжении, в 2 раза меньшем напряжения начала частичных разрядов.

В этой связи можно определить запас по напряжению для диэлектрических микродвигателей, изготавливаемых на основе металлизированных лент из полиэтилентерефталата толщиной 3–4 мкм. При влажности 60 % для этих диэлектриков напряжение начала частичных разрядов равно 280 В, а при влажности 20 % – 300 В. Таким образом, в этом случае запас по напряжению практически отсутствует. Даже при таких высоких напряжениях работа электростатического наката ленточных микродвигателей мала: 0,075 Дж/м² при влажности 60 % и 0,125 Дж/м² при влажности 20 %.

Таким образом, при $d_i = d_i^{\text{opt}}$ можно определить величины напряжения U , напряженности электрического поля $E_i^{\text{opt}} = U/d_i^{\text{opt}}$ и работу электростатического наката a_R^{opt} для любых линейных диэлектриков при условии двойного запаса по электрической надежности.

В таблице представлены параметры ϵ , U , E_i^{opt} и E_H – напряженность электрического поля пробоя, характерные для различных диэлектриков. Из таблицы можно сделать следующие выводы:

Неорганические окислы дают удовлетворительные значения работы электростатического наката 0,30–0,44 Дж/м² при двойном запасе напряжения по частичным разрядам и запасе напряжения 3–15 по пробоям; типичный сегнетоэлектрик ВаТiО₃ имеет $a_R^{\text{opt}} = 0,44$ Дж/м² при двойном запасе по частичным разрядам и запасе 7–8 по пробоям; органические диэлектрики, такие как полиэтилентерефталат и полиимид, имеют $a_R^{\text{opt}} = 0,27$ Дж/м² при двойном запасе напряжения по частичным разрядам, но практически не имеют запаса напряжения по пробоям.

Исходя из критериев электрической надежности, перспективными линейными диэлектриками для диэлектрических микродвигателей являются только диэлектрики с $\epsilon > 11$ и с достаточно высокими значениями пробивной напряженности электрического поля, такие как Та₂О₅, ZrО₂, а также сегнетоэлектрики, например титанат бария. Тонкие органические диэлектрики с малыми значениями ϵ (полиэтилентерефталат, полиимид и т. д.) практически непригодны по надежности для применения в диэлектрических микродвигателях. Все изложенное характерно только для относительно высоковольтных диэлектрических микродвигателей ($U \geq 100$ В). Для создания низковольтных диэлектрических микродвигателей необходимо обеспечить еще

Диэлектрик	U_H , В	ϵ	E_i^{opt} , В/м	E_H , В/м	N	d_i^{opt}	a_R , Дж/м ²
SiO ₂	82	4	$2 \cdot 10^8$	$8 \cdot 10^8$	3,9	0,4	0,3
Al ₂ O ₃	90	6	$1,5 \cdot 10^8$	$7 \cdot 10^8$	4,1	0,6	0,36
Ta ₂ O ₅	100	25	$0,4 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^8$	15	2,5	0,44
BaTiO ₃	100	230	$0,045 \cdot 10^8$	$0,35 \cdot 10^8$	7,8	22,5	0,44
Полиэтилентерефталат	78	3,2	$2,4 \cdot 10^8$	$1-4 \cdot 10^8$	0,41–1,6	0,32	0,27

одно условие: зависимость поляризации от электрического поля диэлектриков должна быть нелинейной и иметь участок резкого насыщения поляризации.

Механическая надежность диэлектрических микродвигателей. В диэлектрических микродвигателях с контактным способом электромеханического преобразования энергии механическая надежность контактного узла выступает на первый план. Для большинства практических задач (кроме устройств однократного применения) параметры надежности являются доминирующими по сравнению с другими характеристиками двигателя, в том числе с его мощностью. Механическая надежность контактного узла диэлектрического двигателя определяется временем до наступления усталостного разрушения подвижных пленок, а также до такого истирания (износа) поверхностей пленок и диэлектрика, при котором уже существенно изменяются основные параметры микродвигателя.

Механическая долговечность пленок при их циклической нагрузке зависит от величины этой нагрузки. Достаточно высокую долговечность при циклическом нагружении можно получить и при применении некоторых полимерных пленок, например, из полиэтилентерефталата, полиимидов. Однако для указанных полимерных пленок напряжение предела усталости равно всего лишь 2 кг/мм^2 . При рассмотрении возможностей таких микродвигателей, как ЭДПД и ЭСПД, использующих полимерные пленки, следует учитывать низкие значения предела усталости этих пленок. Кроме того, в указанных микродвигателях возникают и другие проблемы в связи с тем, что полимерные пленки подвергаются воздействию не только механических, но и электрических нагрузок, приводящих к ускоренному износу подвижных элементов. Особенно быстро в этом случае изнашиваются даже не сами полимерные пленки, а имеющиеся на них слои металлизации (Al) толщиной около $0,1 \text{ мкм}$.

В ЭДПД и ЭСПД, в которых подвижные пленки в виде лепестков выполнены из металлов, характеристики надежности значительно выше. Усталостные свойства металлических пружин и пленок хорошо изучены. Возможно достижение достаточно большого времени до разрушения металлических пленок при циклической нагрузке (исходя из требований их работы в течение 10–30 лет) при общепринятом условии, когда сумма напряжений изгиба и растяжения не превышает напряжения предела усталости. Предел усталости ряда металлических пленок равен $40\text{--}50 \text{ кг/мм}^2$. Поэтому конструкции контактных элементов электростатических диэлектрических планарных двигателей являются высокоэффективными в механическом отношении. В лепестковых двигателях промежутки времени, когда в них возникают максимальные растягивающие (основные) и изгибные (вспомогательные) напряжения, разделены. При максимальной тяге практически действуют только одни растягивающие напряжения, а изгибные напряжения начинают действовать только тогда, когда первые становятся минимальными.

Математическое моделирование работы диэлектрических микродвигателей. Для анализа основных закономерностей функционирования лепестковых микродвигателей рассмотрим их математическую модель (рис. 2). Сегнетоэлектрик расположен на поверхности статора. При подаче на образец импульса напряжения с амплитудой V подвижная платформа совершает перемещение на один шаг H вследствие включения «электронного клея», электростатического наката лепестка, натяжения его и изгиба. Начальная

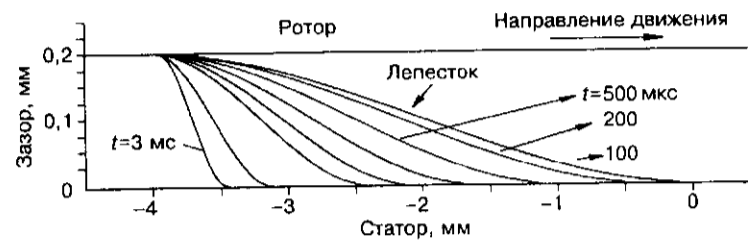


Рис. 2

стадия движения – «захват» конца лепестка – происходит в первые моменты времени действия импульса напряжения, приложенного к лепестку и основанию.

Удельная работа электростатического наката a_R (важнейшая характеристика микродвигателя) определяется как

$$a_R = k_0 C_0 V^2 / 2,$$

где C_0 – удельная емкость; k_0 – коэффициент, учитывающий неплотное прилегание лепестка к поверхности сегнетоэлектрика. Работа за время электростатического наката $A_R = a_R S_R$; $S_R = bl$ – площадь наката лепестка за время действия импульса напряжения; b – ширина лепестка; l – длина наката. Общая длина лепестка $L_0 = l + H + L$, где L – длина изогнутой части лепестка; D – расстояние ротор–статор.

Математическая модель двигателя основана на методе энергетического баланса. Баланс энергий двигателя имеет следующий вид:

$$A_R = M/2(dH/dt)^2 + \int_0^H F(x)dx + A_m, \quad (1)$$

где M – масса ротора; F – сила нагрузки двигателя (сила трения); A_m – механическая работа деформации лепестка.

Форма изогнутой части лепестка $y(x)$ описывается в первом приближении кубической параболой с плавным касанием поверхностей лепестка и сегнетоэлектрика:

$$y(x) = -3/2(Dx/L_0) + 2(D^3/L_0^3), \quad -L_0/2 \leq x \leq L_0/2, \quad t < 0,$$

$$y(x) = -3/2(Dx/L) + 2(D^3/L^3), \quad -L/2 \leq x \leq L/2, \quad 0 \leq t < t_0,$$

$$H = 1/2 \int_{-l/2}^{l/2} (dy/dx)^2 dx - 1/2 \int_{-l_0/2}^{l_0/2} (dy/dx)^2 dx.$$

Сила нагрузки двигателя F равна силе трения скольжения, кроме того, учитывается и сила давления на направляющие, определяемая нормальной составляющей натяжения лепестка (второй член этого выражения):

$$F \cong k[gM + 3/2 a_R b(D/(H + 3D^2/5L_0))],$$

где k – коэффициент трения; g – ускорение силы земного притяжения.

На рис. 2 схематически показано последовательное изменение во времени формы лепестка и соответствующее изменение местоположения ротора.

При исследовании особенностей движения ротора определялись следующие параметры: $t_{\text{имп}}$ – длительность импульса напряжения; ΔH – шаг ротора за время $t_{\text{имп}}$; v – скорость ротора в момент окончания импульса; F – сила тяги; $T_{\text{л}}$ и $H_{\text{сум}}$ – время свободного движения и путь ротора после выключения импульса напряжения (наблюдаемый экспериментально шаг); $W = kMgvt_0$ – мгновенная мощность в момент окончания действия импульса; $L_{\text{топ}}$ – длина электростатического наката за время $t_{\text{имп}}$; $A_{\text{сум}}(t)$ – электрическая энергия при накате; A_k – энергия сил трения (сил тяги); $A_f(t)$ – энергия упругости лепестка; $A_{\text{кр}}(t)$ – кинетическая энергия ротора, равная $0,5Mv^2$; M_p – максимальная масса ротора, которую может сдвинуть двигатель при выбранных его параметрах и режимах работы.

Поскольку при проведении численного анализа используются все основные параметры как лепестка (b, L_0, h, E – модуль Юнга), так и конструкции двигателя ($D, k, M, \epsilon\epsilon_0, d$), а также параметры источника напряжения $t_{\text{имп}}, V$, то возможно определять оптимальные параметры для конкретных конструкций двигателя и режимов его работы.

На рис. 3 представлена кривая, характеризующая типичное изменение силы тяги F двигателя во времени для четырех разных нагрузок (разных масс ротора M). Здесь и далее используются следующие параметры лепестка: $L = 4$ мм, $b = 1$ мм, $h = 0,2$ мм, $A_R = 0,3$ Дж/м², что соответствует удельной емкости наката в 1000 пФ/мм² при напряжении 24,5 В, величина k выбиралась равной 0,2. Можно отметить, что в реальном эксперименте при осуществлении электростатического наката металлического лепестка на поверхность сегнетоэлектрической пленки толщиной 1–2 мкм величина k_0 имела значение 0,1–0,5 в зависимости от качества этой пленки.

Из рис. 3 видно, что двигатель обладает высокой стартовой силой в первые моменты времени после начала действия напряжения. Эта сила в течение времени уменьшается, поскольку из-за движения ротора уменьшается натяжение лепестка. Видно, что чем больше нагрузка, тем более эффективно используется энергия электростатического наката. Из этого следует вывод, что для эффективного использования энергии, получаемой при накате, $t_{\text{имп}}$ должна быть оптимальной и согласованной с нагрузкой.

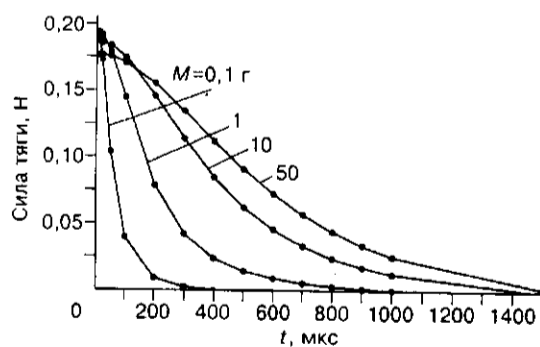


Рис. 3

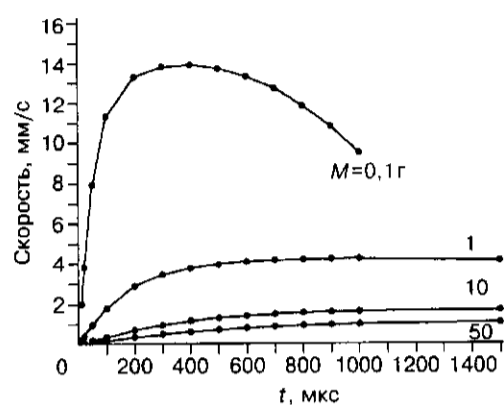


Рис. 4

Рис. 4 характеризует типичное изменение во времени скорости движения ротора для четырех значений нагрузки при параметрах, указанных на рис. 3. С учетом изложенного относительно поведения силы с течением времени такое изменение скорости при малых нагрузках не является удивительным.

После выключения напряжения ротор продолжает двигаться по инерции и через некоторое время останавливается (рис. 5). Время до его остановки определяется силой трения и скоростью ротора в момент окончания импульса напряжения. Можно отметить, что для большинства практически интересных случаев путь, проходимый ротором по инерции, значительно больше расстояния, на котором происходит разгон ротора за время $t_{имп}$. Таким образом, мы практически имеем дело с электростатической «пушкой», которая выстреливает ротором за время $t_{имп}$. При этом ускорение, приобретаемое ротором, зависящее от его массы, может быть очень высоким и достигать несколько десятков g , в пределе – до $10000g$ (когда масса ротора равна массе лепестка и без учета сопротивления воздушной подушки).

Преобразование энергии электростатического наката в каждый момент движения ротора в различные формы энергии: кинетического движения, сил



Рис. 5

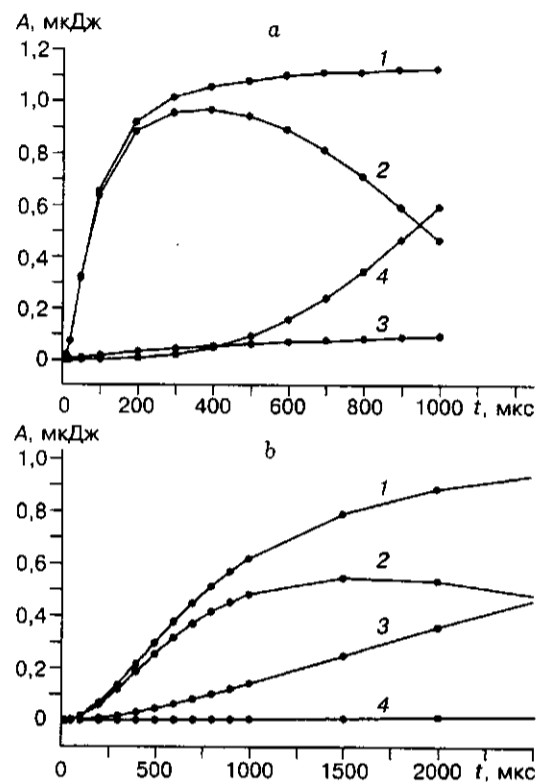


Рис. 6

трения и энергию упругого изгиба лепестка – для двух различных нагрузок (0,1 и 10 г соответственно) характеризуют рис. 6, *a* и *b*.

Здесь кривая 1 описывает изменение общего энергопотребления образца в процессе электростатического наката из внешней цепи, кривая 2 характеризует долю этой энергии, расходуемую на приобретение ротором с массой M кинетической энергии $Mv^2/2$, кривая 3 – долю энергии, затрачиваемой во время одного цикла на преодоление трения (это фактически полезная внешняя нагрузка), кривая 4 – энергию изгиба лепестков (работу против сил упругости). Как видно, с ростом $t_{\text{имп}}$ происходит перераспределение различных форм энергий во времени, характер этого перераспределения зависит от параметров и режимов работы микродвигателя. Можно отметить, что при изменении совокупности параметров микродвигателя изменяется и характер перераспределения указанных энергий, и можно выбрать такие параметры, когда большая часть электрической энергии преобразуется в механическую энергию – в движение ротора с коэффициентом преобразования энергии 80–90 %.

Рис. 7 описывает изменение величины шага H во время разгона при различных нагрузках без учета движения по инерции (здесь $A_R = 0,3 \text{ Дж/м}^2$).

Рис. 8 характеризует специфику отдачи мощности W микродвигателя на внешнюю нагрузку, под которой понимается движение массы ротора M со скоростью v с преодолением сил трения, с коэффициентом трения k . Как видно, увеличение сил трения ведет к увеличению полезной мощности дви-

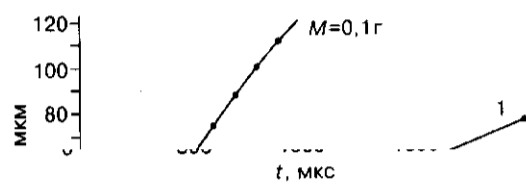


Рис. 7

гателя. Можно отметить, что реальная мощность, развиваемая двигателем в момент разгона ротора (в момент наката) до скорости v , в $v/2kgt_{\text{imp}}$ раз больше.

Экспериментальные результаты по исследованию электростатического наката на поверхность пленки сегнетоэлектрика. Ниже приведены некоторые экспериментальные данные, подтверждающие корректность использования указанной модели микродвигателя и характеризующие некоторые свойства рассматриваемых планарных микродвигателей.

Для исследования основных принципов электростатического наката металлических лепестков на поверхность сегнетоэлектрика были созданы экспериментальные образцы многолепестковых микродвигателей. В качестве материала сегнетоэлектрика использовались пленки ниобата бария-стронция $\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5}\text{Nb}_2\text{O}_6$ с величиной диэлектрической проницаемости 1500–3000. Толщина пленок составляла 1–2 мкм. Они синтезировались методом ВЧ-распыления на поверхности кремниевой подложки, на которую предварительно наносился электрод ($\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2$) [13–16]. Сопротивление электрода составляло 10–200 Ом. Число лепестков в каждой из двух групп было 13, длина каждого лепестка 4 мм, ширина 0,5 мм. Наличие двух групп лепестков обеспечивало реверсивное движение ротора.

Рис. 9 характеризует изменение скорости движения ротора в непрерывном пошаговом режиме движения с нагрузкой 0,5 г при изменении ампли-

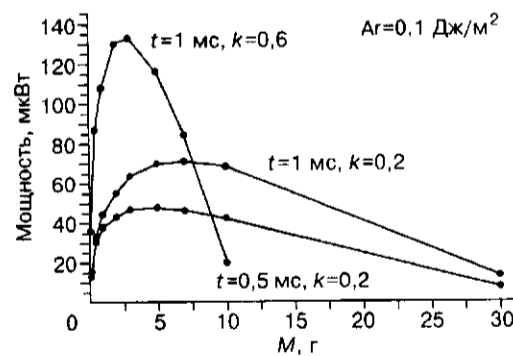


Рис. 8

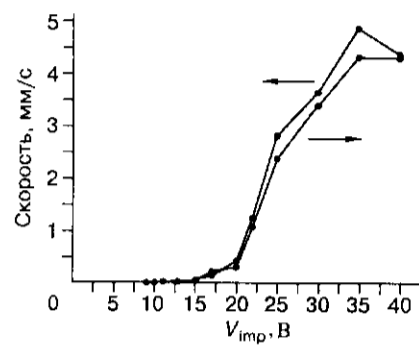


Рис. 9

туды импульсов напряжения и периоде следования $T = 3$ мс. Стрелки обозначают изменение направления движения.

Рис. 10 иллюстрирует необходимость оптимизации нагрузки микродвигателя при заданных значениях t_{imp} и V для обеспечения максимальной его мощности.

При фиксированной нагрузке существует оптимальная длительность импульса, при которой двигатель имеет наибольшую мощность. Указанное на рис. 10 значение мощности в пошаговом режиме движения определялось исходя из формулы $P = kMgv$, где v – скорость непрерывного движения ротора. Поскольку в непрерывном пошаговом движении не учитывался разгон и последующее торможение ротора, то можно полагать, что в данном случае мощность, развиваемая при накате, значительно больше.

В процессе эксперимента измерялись масса ротора M , длительность импульса напряжения t_{imp} , коэффициент трения k , амплитуда импульса V , полный пролет ротора H . Наблюдалось уверенное движение ротора при напряжениях 30 В и менее.

В движении ротора можно выделить две стадии. На первой ротор набирает ускорение под влиянием электростатических сил при накате во время действия импульса напряжения. На второй после снятия напряжения происходит движение ротора по инерции и последующая его остановка из-за действия сил трения.

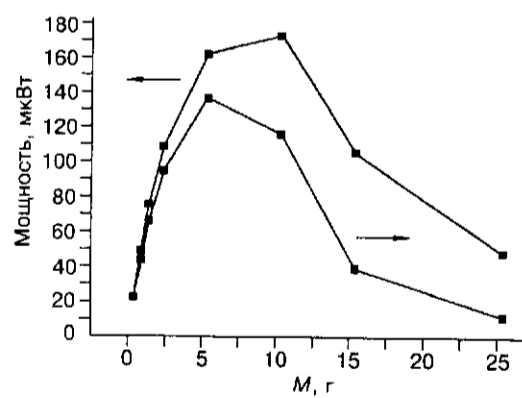


Рис. 10

Экспериментально подтверждено, что в процессе электростатического разгона ротор проходит значительно меньший путь, чем во время движения по инерции. Это соотношение зависит от времени между импульсами, коэффициента трения и массы.

Заключение. В данной работе рассмотрены принцип работы нового электростатического микродвигателя, отличающегося исключительно высокой энергоемкостью, его конструкция и характеристики. Математическое моделирование основных закономерностей движения ротора микродвигателя за счет электромеханического преобразования энергии при электростатическом накате металлических пленок на поверхность сегнетоэлектрика показало возможность достижения высокой эффективности такого преобразования энергии до 80–90 %.

Экспериментальные результаты данной работы свидетельствуют о возможности создания методами технологии микроэлектроники шаговых энергоемких реверсивных микродвигателей и подтверждают основные закономерности в кинетике преобразования энергии, полученные в модельных представлениях. Применение технологии микроэлектроники в механике позволит резко снизить стоимость двигателей, увеличить их прецизионность, перейти к идее их массовой «штамповки». Напряжение электропитания таких двигателей соизмеримо с напряжениями устройств микроэлектроники, и можно говорить о создании микромеханических микросхем. Отметим, что при изготовлении групп металлических лепестков не потребуются субмикронная технология, достаточно использования аппаратуры с 1–2 мкм проектными нормами.

Авторы выражают благодарность С. И. Фадееву за помощь в математическом моделировании, И. Л. Багинскому, И. С. Солдатенкову, Э. Л. Кашееву за экспериментальные измерения параметров образцов микродвигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Esashi M.** Packaged sensors, microactuators and three-dimensional microfabrication // Journ. Robotics and Mechatronics. 1995. 7, N 3. P. 200.
2. **Fedder G. K., Chang J. C., Home R. T.** Thermal assembly of polysilicon microstructures with narrow – gap electrostatic comb drive // Technical Digest IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop Hilton Head. Island: SC, 1992. P. 63.
3. **Gretillat M. A., Thiebaut P., Linder C., de Rooil N. F.** Integrated circuit compatible electrostatic polysilicon microrelays // Journ. Micromech. Microeng. 1965. 5. P. 156.
4. **Yao J. J., McDonald N. C.** A micromachined, single-crystal silicon, tunable resonator // Journ. Micromech. Microeng. 1996. 6. P. 257.
5. **Polla D. L.** Microelectromechanical systems based on ferroelectric thin films // Microelectronic Eng. 1995. 29. P. 51.
6. **Matoda H., Ishikawa, Kim C.-J., Muller R. S.** A bistable snapping microactuator // Proc. IEEE Microelectromechanical Systems Workshop. 1994. P. 45.
7. **Teegarden D., Lorenz G., Neul R.** How to model and simulate microgyroscope systems // IEEE Spectrum. 1998. P. 66.
8. **Wakabayashi S., Sakata M., Goto H. et al.** Static characteristics of piezoelectric thin film buckling actuator // Jap. Journ. Appl. Phys. 1996. 35. P. 5012.
9. **Jenkins D. F. L., Cunningham M. J., Clegg W. W.** The use of composite piezoelectric thick films for actuation and control of miniature cantilevers // Microelectronic Eng. 1995. 29. P. 71.

10. Yang Y.-J., Kim C.-J., Matoba H., Muller R. S. Thermal analysis of a bistable micro-actuator // ASME, Symp. on Micro-Mechanical Systems, Dynamic System and Control. 1994. 2. P. 687.
11. Дятлов В. Л., Коняшкин В. В., Потапов Б. С., Пьянков Ю. А. Планарные электростатические микромоторы // Электричество. 1996. № 1. С. 8.
12. Дятлов В. Л., Коняшкин В. В., Потапов Б. С., Фадеев С. И. Пленочная электромеханика. Новосибирск: Наука, 1991.
13. Kostsov E. G., Dyatlov V. L. Electrostatic microactuators on the basis of ferroelectric films // Journ. of the Korean Physical Society. 1998. 32. P. S1755.
14. Dyatlov V. L., Kostsov E. G. Electromechanical energy converters of micromechanic devices on the basis of ferroelectric films // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research. 1998. A405. P. 511.
15. Antsign V. D., Egorov V. M., Kostsov E. G., Sterelychina L. N. Ferroelectrics properties of thin strontium barium niobate films // Ferroelectrics. 1985. 63. P. 235.
16. Kostsov E. G., Malinovskii V. K. Large-scale use of ferroelectricity in microelectronics is reality // Ferroelectrics. 1989. 94. P. 457.
17. Baginsky I. L., Kostsov E. G. Information writing mechanisms in thin-films MFIS-structures // Ferroelectrics. 1993. 143. P. 239.
18. Kostsov E. G. Ferroelectric films: Peculiarities their application in construction of new generation memory devices // Ferroelectrics. 1995. 167. P. 169.

Поступила в редакцию 5 октября 1998 г.

Реклама продукции в нашем журнале – залог Вашего успеха!