

УДК 621.3.049.77

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ УСКОРИТЕЛЬ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Э. Г. Косцов

*Институт автоматизи и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: kostsov@iae.nsk.su*

Рассматривается возможность использования энергии электрического поля для разгона твердотельных объектов до значительных скоростей (1–10 км/с). В качестве линейного ёмкостного двигателя применяется микроэлектромеханический электростатический преобразователь энергии, в котором это преобразование осуществляется в нанометровых зазорах, что позволяет достигать в элементарном акте преобразования энергии её удельной плотности $\sim(3-10)$ Дж/м² и более при тактовых частотах 1 МГц и более. Такие параметры позволяют при площади преобразователя энергии 1 м² осуществлять накачку энергии электрического поля до 10–30 МДж с последующим преобразованием её в кинетическую энергию движения объекта. Рассматриваются особенности конструкции высокоэнергетического электростатического преобразователя энергии и его функционирование на высоких тактовых частотах в режиме ускорения движения слайдера массой до 10 кг.

Ключевые слова: MEMS, линейный двигатель, микроэлектромеханика, электростатика, ёмкостный преобразователь энергии, сегнетоэлектрическая плёнка.

Введение. Электромеханические преобразователи (ЭП) энергии и электрические машины, преобразующие электрическую энергию в механическую и обратно, — основа современной техники. Наиболее распространённые электрические машины разделяются, как известно, на два класса: индуктивные, в которых рабочим является магнитное поле, и ёмкостные, в которых преобразование энергии осуществляется электрическим полем. В индуктивных ЭП энергия концентрируется в магнитном поле и основной параметр, характеризующий их энергоёмкость, — величина тока, протекающего в обмотках электромагнита, которая и определяет напряжённость магнитного поля в воздушном зазоре машины. Электромеханическое преобразование энергии в таких машинах происходит за счёт изменения индуктивностей, токов. В ёмкостных ЭП энергоёмкость — это основной параметр, она определяется напряжённостью поля в зазоре между подвижной и неподвижной пластинами. Ёмкостные ЭП — машины напряжения, в которых электромеханическое преобразование энергии происходит за счёт изменения ёмкостей и напряжений.

В последнее время рассматривается возможность применения энергии электромагнитного поля для обеспечения высокой скорости твёрдого тела, создания электромагнитной «пушки». Фактически речь идёт об использовании для этой цели одной из конструкций линейного электромагнитного двигателя.

В конце 2010 года в США успешно прошли испытания устройства, с помощью которого удалось передать массе 10 кг кинетическую энергию 33 МДж с развитием скорости более 1,7 км/с.

Основной задачей при создании подобных устройств является эффективное преобразование энергии электромагнитного поля в кинетическую энергию движения массы.

Недостаточно высокая плотность энергии магнитного поля, которая даже при магнитной индукции в 1 Тл (характерной для современных крупных генераторов энергии) не превышает $(4-5) \cdot 10^5$ Дж/м³, определяет и относительно небольшие механические силы F_M в магнитном поле. Сила $F_M = (1/2)I^2(\partial L(x)/\partial x)$ зависит от градиента индуктивности L устройства (соленоида), который из-за специфики формирования магнитного поля в

контуре не может быть высоким. Поэтому для увеличения F_M приходится повышать ток в контуре до максимально возможных для современной техники значений (до миллиона ампер) при соответствующем росте площади сечения проводников для обеспечения мгновенной мощности (до миллиона киловатт). Именно этим, а также наличием массивного магнитопровода определяется большой вес указанных устройств.

В литературе отсутствуют сведения о возможности использования для решения данной задачи энергии электрического поля, несмотря на аналогичность проявления сил магнитных и электрических полей. Действительно, электростатическая сила $F = (1/2)V^2(\partial C(x)/\partial x)$ (V — амплитуда импульсов напряжения) при современном уровне технологии создания межэлектродных зазоров незначительна, а плотность энергии электрического поля в рабочих зазорах классических ёмкостных машин, даже при рабочих напряжениях 10^5 В, до 10^4 раз меньше плотности энергии магнитного поля в зазорах крупных индуктивных машин. Основной проблемой в данном случае является трудность получения высокой удельной ёмкости $C_{уд}$ или малых значений межэлектродных зазоров, что эквивалентно.

В последние годы в связи с развитием нового направления электронной техники — микроэлектромеханических систем (MEMS) — и использованием технологии глубокого травления кремния произошло значительное снижение протяжённости межэлектродных зазоров и резкое увеличение масштабов производства ёмкостных ЭП — электростатических микроактюаторов [1, 2].

Указанные зазоры имеют величину порядка 2 мкм при рабочем напряжении ~ 30 В. Плотность энергии электрического поля в этих ёмкостных микромашинах стала соизмеримой с плотностью энергии магнитного поля ряда маломощных индуктивных машин.

Поверхностная плотность энергии $A_{уд}$ таких устройств при $C_{уд} = (3-4) \cdot 10^{-6}$ Ф/м² достигает значений 0,01 Дж/м², поэтому для создания достаточной силы необходима большая площадь подвижных электродов. Известные MEMS-микродвигатели, даже при их параллельном включении, развивают силы до 1 мН, при этом из-за необходимости поддержания постоянства зазора при перемещении подвижного электрода амплитуда перемещений не превышает 10–30 мкм, поэтому они работают практически только в режиме малоамплитудных колебаний. Использование таких ёмкостных преобразователей энергии для задач придания значительной скорости движения твёрдому телу не эффективно.

Цель данной работы — рассмотрение возможностей применения ёмкостных преобразователей энергии для обеспечения разгона твердотельных объектов до значительных скоростей.

Электромеханические преобразователи энергии на основе нанометровых зазоров. В работах [3–9] создан новый класс высокоэнергетических ёмкостных преобразователей энергии как элементов микро- и наноэлектромеханики, основанный на электро-механическом преобразовании энергии в нанометровых зазорах d_3 протяжённостью до 5–200 нм. Принцип их работы заключается в трансформации в механическое движение электрической энергии, накапливаемой в процессе обратимого электростатического прижатия свободной металлической плёнки как подвижного электрода к поверхности плёнки диэлектрика с большим значением диэлектрической проницаемости ϵ через воздушный нанометровый зазор d_3 . В качестве диэлектрика используется сегнетоэлектрическая плёнка (СП) толщиной $d = 0,3-3$ мкм и ϵ до 3000 и более.

В структуре «электрод — тонкий слой сегнетоэлектрика — воздушный нанозазор — подвижный электрод» напряжённость электрического поля на границе раздела двух сред имеет резкий скачок, определяемый высоким значением ϵ/d . Распределение напряжённости электрического поля в структуре таково, что на завершающей стадии процесса преобразования энергии основная часть поданного напряжения прикладывается к воздушному зазору и электростатическая сила действует практически только на подвижный электрод.

В таких структурах плотность энергии электрического поля в нанозазорах при напряжениях 10–100 В и величине $\varepsilon = 1000\text{--}3000$ может достигать значений $\sim(10^7\text{--}10^8)$ Дж/м³, они также обладают высокими значениями $C_{уд}$ ($\sim 10^{-3}$ Ф/м²) и $A_{уд}$ ($\sim(1\text{--}10)$ Дж/м²).

Анализ распределения силы прижатия подвижного электрода $F = 0,5V^2(dC_3/dd_3)$ к поверхности сегнетоэлектрической плёнки через воздушный зазор с ёмкостью C_3 для заданных значений V и ε/d показывает, что только при ε/d , большем чем 10^9 , можно получить высокие значения сил, действующих на подвижный электрод ($\sim(10^5\text{--}10^6)$ Н/м²) [3].

Основным фактором, определяющим высокую энергоёмкость таких преобразователей энергии, является возможность приложения к нанометровому зазору указанной структуры больших напряжений (до 100 В и более) без его пробоя, поскольку электрическая прочность СП, в частности используемых нами плёнок ниобата бария стронция (НБС), достаточно высока — свыше 10^8 В/м. Другие важные факторы — слабое накопление заряда в СП при действии поля и быстрая его релаксация после выключения импульса напряжения — определяются высоким качеством кристаллической структуры СП.

Особенностью таких ЭП является также возможность использования большой площади подвижных электродов. Она обеспечивает высокую абсолютную мощность преобразователя, фактически задаваемую только размерами свободной металлической плёнки, в отличие от современных MEMS-микродвигателей, площадь ЭП которых ограничивается толщиной кремниевой пластины.

Принцип работы ёмкостного микродвигателя и его характеристики. На основе вышеуказанного принципа электромеханического преобразования энергии был разработан и создан ряд микроэлектромеханических устройств [7–10], в том числе линейный шаговый реверсивный микродвигатель.

Для передачи действия больших механических сил, развиваемых силами электростатики в нанометровых зазорах, во внешнюю среду (в 3D-измерение) на значительные расстояния использовалась трёхмерная конструкция подвижного электрода — свободная и упругая металлическая плёнка (лепесток), жёстко закреплённая одним концом на поверхности подвижной пластины (ПП).

Схематически принцип работы линейного микродвигателя показан на рис. 1. Микродвигатель состоит из неподвижной пластины (НП) 1 — кремниевой или сапфировой подложки 7, на поверхность которой последовательно нанесены электрод 6 и сегнетоэлек-

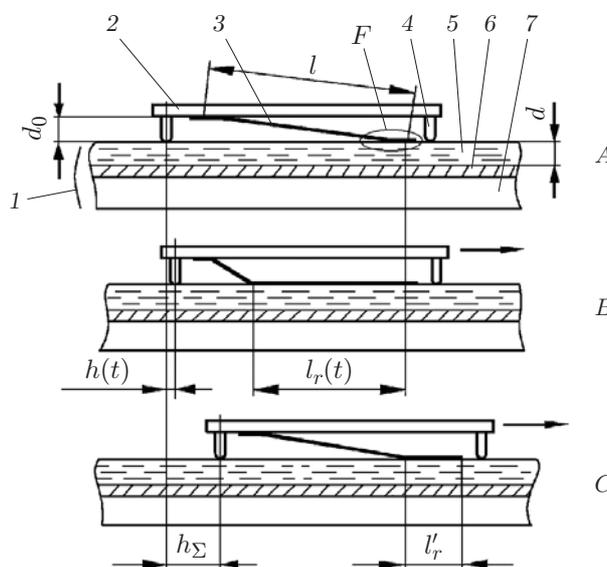


Рис. 1

трическая плёнка 5, и подвижной пластины (слайдера) 2 с синтезированными на её поверхность свободными и упругими металлическими плёнками 3, перемещающейся относительно НП по направляющим 4. Зазор d_0 между ПП и НП имеет протяжённость от 10 до 300 мкм.

Движение ПП складывается из нескольких стадий. При первоначальной подаче импульса напряжения между лепестком 3, находящимся в исходном состоянии A , и электродом 6 происходит электростатическое прижатие (стадия захвата — включение «электронного клея») конца лепестка 3 к поверхности сегнетоэлектрика 5 и начинается движение пластины 2 за счёт последующего электростатического наката всё большей части поверхности лепестка на поверхность сегнетоэлектрика, его изгиба и механического натяжения (положение B). Так осуществляется электромеханическое преобразование энергии. Длина наката $l_r(t)$ возрастает во время действия импульса напряжения, соответственно увеличивается и шаг $h(t)$ смещения слайдера. Величина $h(t)$ и скорость перемещения участка лепестка, накатывающегося на поверхность сегнетоэлектрика, определяются массой слайдера M , длительностью импульсов напряжения $t_{\text{имп}}$, их амплитудой V и коэффициентом трения k , а накапливаемая энергия (преобразуемая в механическую) — площадью прижатия лепестка S , величинами d и d_3 , значениями V и ε .

После выключения импульса напряжения лепесток под действием сил упругости, возникающих при его изгибе и натяжении, приходит либо в исходное положение A (см. рис. 1) (при одиночном импульсе напряжения), либо в новое положение C , характерное для непрерывного движения ПП (при подаче на образец серии импульсов). Подвижная пластина в этот момент продвигается по инерции на расстояние h_{Σ} и при высоком значении k через некоторое время останавливается. Время до её остановки определяется величиной k и скоростью ПП в момент окончания импульса напряжения. Далее, при поступлении последующих импульсов напряжения процесс повторяется. Таким образом, осуществляется непрерывное пошаговое движение ПП. Длина наката на каждом последующем импульсе напряжения в установившемся режиме составляет $l_r(t) - l_r^1$, где l_r^1 — часть длины лепестка, которая остаётся прижатой к поверхности сегнетоэлектрика к моменту воздействия очередного импульса напряжения. В соответствии с длиной наката формируется и величина шага ПП.

Для анализа основных закономерностей функционирования линейных шаговых микродвигателей разработана математическая модель электростатического наката [4–6], основанная на методе энергетического баланса — перераспределении энергии электростатического поля между кинетической энергией движения ПП, энергией сил нагрузки двигателя F (сил трения и сопротивления среды — воздуха) и энергией деформации подвижного электрода A_m . При создании модели и проведении численного анализа особенностей функционирования микродвигателей использовались все основные параметры подвижных электродов (b — их ширина, L — длина, h — толщина, E — модуль Юнга), сегнетоэлектрика (ε , d , проводимость), конструкции микродвигателя (d_0 , k , M) и параметры источника напряжения ($t_{\text{имп}}$, V). Математическая модель даёт возможность априори определять характеристики и режимы работы конкретных конструкций микродвигателей, при этом отмечается хорошее соответствие экспериментально наблюдаемых закономерностей движения ПП и модельного его описания.

Исходя из модельных представлений первоначальная сила $F(0)$, прикладываемая к ПП, задаётся в первом приближении следующим выражением:

$$F(0) \approx 2A_{\text{уд}}b((L - l_{\text{н}})/d_0)^2,$$

где $l_{\text{н}}$ — прижатая под действием электростатических сил часть лепестка. Можно допустить, что $l_{\text{н}} = L/2$, тогда $F(0) \approx A_{\text{уд}}b((L/d_0)^2)/2$, в реальных конструкциях значение L/d_0 близко к 10. Оценим величину этой силы, развиваемой преобразователем энергии с

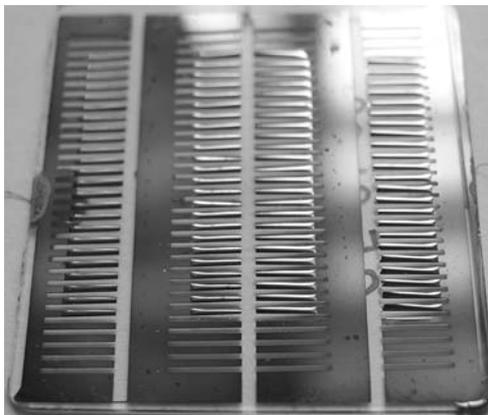


Рис. 2

площадью $1 \text{ м}^2 = bL$ ($b = 1000 \text{ м}$, $L = 10^{-3} \text{ м}$) и $d_0 = 10^{-4} \text{ м}$. Для $A_{\text{уд}} = 1 \text{ Дж/м}^2$ в этом случае $F(t) \approx 10^5 \text{ Н/м}^2$. Экспериментальные исследования сил, развиваемых указанными микродвигателями с $S = (2-4) \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$, подтверждают справедливость вышеприведённой оценки $F(0)$.

Высокие удельная энергоёмкость и скорость электромеханического преобразования энергии в рассматриваемых микродвигателях дают основания рассчитывать на достижение мощности, достаточной для обеспечения большой кинетической энергии ПП.

Экспериментальные образцы электростатических микродвигателей состояли из двух подложек с зазором между ними $d_0 = 10-300 \text{ мкм}$. Нижняя (кремниевая) подложка неподвижна. На неё методом ВЧ-напыления наносились электрод ИТО ($\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2$) и сегнетоэлектрическая плёнка НБС ($\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5}\text{Nb}_2\text{O}_6 + 1\% \text{ La}_2\text{O}_3$) с величиной ε , равной 2000–4000. Толщины плёнок ИТО и НБС составляли 0,5–1,0 мкм и 0,3–3,0 мкм соответственно. В качестве подвижного электрода использовались свободные плёнки бериллиевой бронзы толщиной 1,5–3,0 мкм. На поверхности ПП создавались две группы таких плёнок, они определяли движение ПП в противоположных направлениях.

На рис. 2 представлена фотография слайдера, на поверхности которого расположены две группы лепестков (по 40 в каждой): $b = 500 \text{ мкм}$, $L = 3 \text{ мм}$, площадь $bl_{\text{л}}$ составляла $(1-4) \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$.

Реверсивный микродвигатель с указанным слайдером, на поверхности которого размещён груз в 20 г, представлен на рис. 3. Подложкой является кремний, её длина 100 мм,

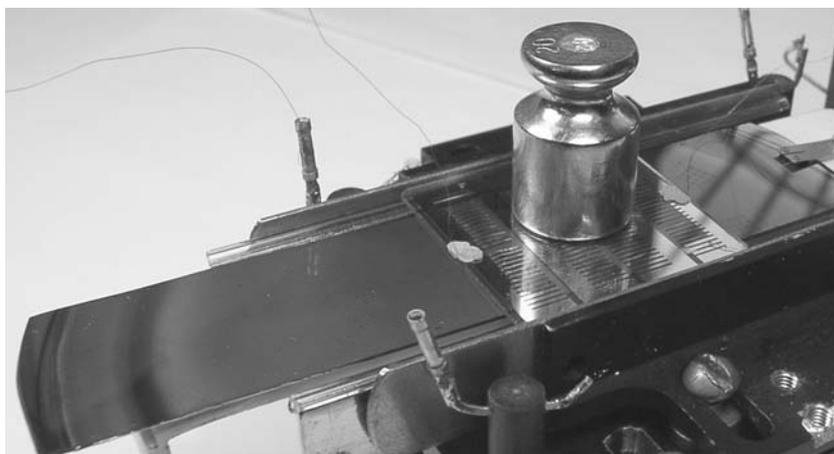


Рис. 3

диапазон реверсивного перемещения ПП 8 см.

Некоторые параметры таких микродвигателей: $A_{уд} = 0,1-3$ Дж/м², $t_{имп} = 20-500$ мкс, их частота $\sim 2 \cdot 10^4$ Гц, на каждом такте шаг перемещения ПП массой $10^{-3}-100$ г равен $0,01-30$ мкм, $V = 10-100$ В, сила тяги 10^4-10^5 Н/м² и более начиная с первых микросекунд действия импульсов напряжения. Исследования показывают, что в механическую энергию движения ПП, в том числе кинетическую, преобразуется до 50 % энергии электрического поля

Особенности функционирования электромеханических преобразователей энергии. Рассмотрим особенности функционирования описанных ЭП применительно к поставленной задаче — достижению высокой скорости движения ПП.

1. На каждом такте движению ПП должен предшествовать короткий процесс электростатического прижатия конца лепестка к поверхности сегнетоэлектрика — процесс захвата. Сила первоначального сцепления двух поверхностей должна быть такой, чтобы при подаче импульса напряжения при данной массе ПП не происходило проскальзывания подвижного электрода по поверхности диэлектрика, — это определяет быстрое возникновение силы тяги. Сцепление поверхностей, начиная с минимальной длины наката l_n , происходит при выполнении следующего соотношения:

$$K_1 A_{уд} b l_n > k M g,$$

где K_1 — удельная сила сдвига подвижного электрода, прижатого силами электростатики к поверхности сегнетоэлектрика. Таким образом, начальная длина прижатия лепестка к поверхности сегнетоэлектрика должна быть

$$l_n > k M g / K_1 A_{уд} b.$$

Выше был описан эффект быстродействующего и обратимого электронного клея, когда сила сцепления двух указанных поверхностей зависит от накопленной электростатической энергии в момент их прижатия. Эта сила для плёнок НБС составляет, как показывают экспериментальные исследования, до $(3-5) \cdot 10^5$ Н/Дж [11]. Высокие значения коэффициента K_1 позволяют исключить сдвиг поверхностей даже при больших механических нагрузках и начать движение ПП уже при малых значениях l_n . Например, для обеспечения начала движения массы 10 кг при $b l_n = 1$ м², $k = 1$, $A_{уд} = 10$ Дж/м² и $K_1 = 5 \cdot 10^5$ Н/Дж достаточно, чтобы первоначальная величина l_n была порядка 3–5 мкм.

2. Анализ распределения электрической энергии в первые моменты времени после воздействия импульса напряжения показывает, что в микросекундном диапазоне времён доминирующим фактором является кинетическая энергия движения ПП, энергии сил трения и упругого сгибания металлической плёнки незначительны. Поэтому одно из основных условий получения более высокой кинетической энергии, наряду с повышением тактовой частоты, сокращением длительности $t_{имп}$, — увеличение отношения $b l_n / M$.

3. Для указанных устройств характерны высокие стартовые силы тяги, развиваемые в первые моменты действия импульса напряжения, они достигают значений 10–50 Н на 1 м ширины лепестка. Сила тяги со временем уменьшается, так как с ростом скорости движения ПП снижается натяжение лепестка, а угол приложения силы к ПП увеличивается. В момент развития максимальной тяги на металлическую плёнку действуют практически только растягивающие напряжения, поэтому при нагрузке, не превышающей пределов усталости материала, контактные элементы таких микродвигателей являются в механическом отношении очень надёжными и способны выдержать свыше 10^{11} циклов переключения. Анализ показывает, что чем больше нагрузка на двигатель, тем более эффективно используется энергия электростатического поля. Таким образом, величина $t_{имп}$ должна быть оптимально согласована с массой ПП при заданном значении $A_{уд}$.

4. Минимальное время, с которого после подачи импульса напряжения начинается движение ПП, определяется двумя факторами.

Первый фактор — время электростатического прижатия и последующего наката металлической плёнки на поверхность сегнетоэлектрика. Этот процесс может быть достаточно коротким, как показали экспериментальные исследования [7], даже при относительно небольших напряжениях 50 В и массе ПП 1–5 г — в пределах 1–3 мкс. При увеличении амплитуды импульсов напряжения это время уменьшается.

Второй — время непосредственной передачи импульса силы от места электростатического прижатия точке крепления металлической плёнки на поверхности ПП. Минимальное время такого процесса определяется скоростью звука в металлической плёнке, её длиной и может быть в пределах 1–5 мкс. Для снижения этого времени до значений меньше 0,1 мкс необходимо уменьшение $l_r(t)$ до значений 100–300 мкм и меньше.

Экспериментальное исследование движения ПП после выключения импульса напряжения показывает, что время до остановки ПП значительно меньше, чем следует из характера движения ПП по инерции при наличии трения ($k = 0,3$), и поведение движения ПП задаётся двумя параметрами. Во-первых, протяжённостью заднего фронта импульса напряжения. Если она значительна, то имеет место торможение ПП за счёт того, что с первых же моментов снижения амплитуды импульса напряжения натяжение металлической плёнки, определяющее силу тяги, ослабевает, в то время как сила электростатического сцепления двух поверхностей остаётся ещё высокой. В итоге она тормозит инерционное движение ПП. Именно этим объясняется резкое снижение скорости ПП после выключения импульса напряжения, т. е. происходит увеличение эффективного коэффициента трения $k_{\text{эфф}}$, который может превосходить чисто механический коэффициент трения в несколько раз ($\sim(10-30)$).

Во-вторых, эффект торможения ПП даёт и объёмный заряд, накапливаемый в СП за время действия импульса. Несмотря на то что заряд в СП в отличие от плёнок линейных диэлектриков относительно небольшой, его вклад в инерционное движение ПП может быть заметным. Проявление заряда наблюдается в том, что после полного снятия импульса напряжения ёмкость структуры не снижается до исходного значения, а продолжает оставаться ещё заметной. При этом чем больше площадь прижатого после снятия импульса лепестка, тем больше сила торможения и выше коэффициент эффективного трения.

Для снижения влияния указанных эффектов необходимо обеспечить такие режим работы преобразователя и длину лепестка, чтобы длительность стадии процесса преобразования энергии, на которой уже отсутствует сила натяжения лепестка (сила тяги), была максимально короткой, а постоянно прижатая его часть $l_{\text{п}}$ — минимальной, но достаточной только для обеспечения захвата.

Снижение влияния этих двух параметров на движение ПП может быть устранено за счёт экспериментально обнаруженного [3, 10] эффекта аномально быстрого разрыва контакта поверхностей (рис. 4), который проявляется при наносекундной протяжённости заднего фронта импульса напряжения менее 10 нс (кривая 1). Уменьшение ёмкости структуры за время менее 0,2 мкс показано кривой 2, а изменение во времени величины воздушного зазора сегнетоэлектрик — подвижный электрод — кривой 3.

Столь короткое время разрыва контакта поверхностей объясняется тем, что электростатическое прижатие при высоком давлении тонкой металлической плёнки к микровыступам поверхности СП с силой 10^7 Н/м² и более сопровождается обратимой деформацией локальных участков поверхности этой плёнки, которые под действием больших сил электростатики оказываются в механически-напряжённом упругодеформированном состоянии (имеет место эффект «металлической резины»).

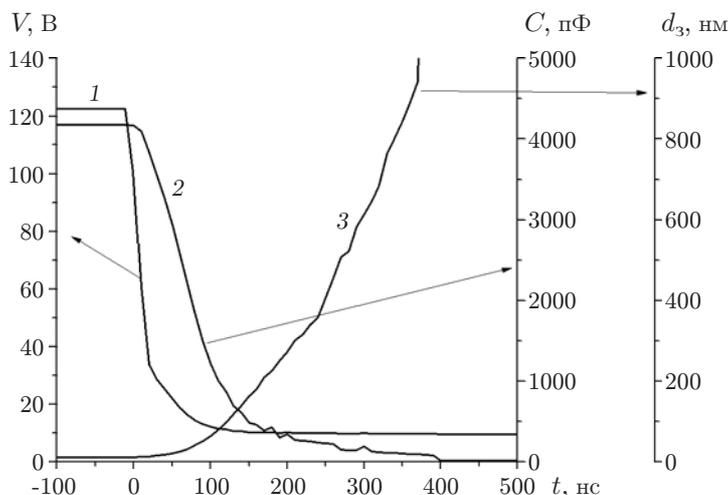


Рис. 4

При выключении импульса напряжения с задним фронтом менее 10 нс накопленная упругая энергия высвобождается, возникают вертикальные силы упругости, обеспечивающие быстрый отрыв металлической плёнки от поверхности сегнетоэлектрика, это находит отражение в резком уменьшении $C(t)$ за время, меньшее 0,2 мкс.

Высокая скорость разрыва контакта поверхностей открывает возможность значительного увеличения тактовой частоты работы ЭП, его мощности, которая фактически ограничивается только скоростью электростатического прижатия поверхностей.

Следствиями указанного эффекта применительно к поставленной задаче являются: возможность увеличения тактовой частоты до 1 МГц и более, практическое устранение влияния объёмного заряда на движение ПП, значительное уменьшение эффективного коэффициента трения и увеличение скорости движения ПП.

Особенности работы электростатического преобразователя энергии на высоких тактовых частотах в режиме ускорения движения слайдера. При высоких тактовых частотах (10–100 кГц) и непрерывном движении ПП часть лепестка с длиной $l_{\text{д}}$ остаётся постоянно прижатой к поверхности сегнетоэлектрика и, как нож бульдозера, «скользит» с небольшим коэффициентом трения по поверхности сегнетоэлектрика с сохранением величины зазора порядка 200–600 нм (см. рис. 4, кривая 3). В этих условиях наличие в СП небольшого остаточного заряда уже не оказывает заметного влияния на скорость движения ПП.

Высокая удельная энергоёмкость и тактовые частоты, определяющие высокую удельную мощность рассматриваемого ёмкостного преобразователя энергии, дают основания рассчитывать на создание на его основе ускорителя массы с более высокими параметрами, чем в электромагнитных ускорителях (в «электромагнитной пушке»).

Рассмотрим особенности работы ёмкостных ЭП на высоких тактовых частотах в режимах, когда потери энергии на каждом такте при движении ПП меньше, чем поступление энергии при воздействии очередного импульса. В этом случае осуществляется постоянное ускорение ПП.

Применяя математическую модель электростатического двигателя, опишем процесс разгона массы, используя для численного анализа параметры преобразователя энергии, близкие к полученным экспериментально: $A_{\text{уд}} = 10 \text{ Дж/м}^2$ ($C_{\text{уд}} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ Ф/м}^2$ при напряжении 180 В), $t_{\text{имп}} = 10 \text{ мкс}$, время между импульсами 1 мкс, разгоняемая масса 10 кг, $d_0 = 100 \text{ мкм}$, активная площадь преобразователя энергии $S = 1 \text{ м}^2$. При данных

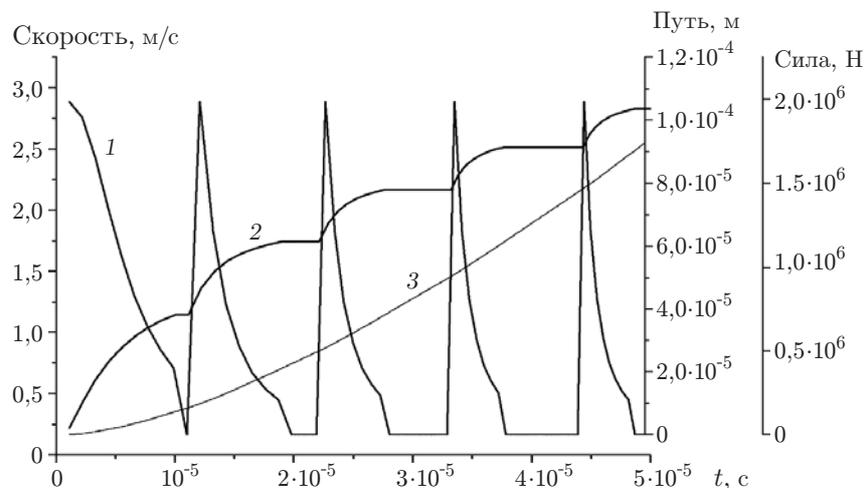


Рис. 5

параметрах за один такт используется заряд в $5,4 \cdot 10^{-1}$ Кл и средний ток в процессе воздействия импульса напряжения имеет значение 10^4 А.

Рис. 5 характеризует начальную стадию процесса разгона ПП, первые пять тактов (кривая 1 — поведение во времени импульсов силы тяги, 2 — скорости, 3 — пройденного слайдером пути). Как видно, первоначально на каждом такте имеет место установление всё более равновесного состояния лепестка, сокращение времени его натяжения. Видно также, что при соотношении S/M сила за время такта используется не достаточно эффективно, необходимо или увеличивать M , или сокращать длительность $t_{имп}$.

Рис. 6 описывает изменение скорости ПП и протяжённости пути её разгона при вышеуказанных параметрах и при числе импульсов напряжения 10^4 . Для выполнения условия максимального натяжения лепестка длительность импульсов при каждом последующем такте уменьшалась. Как только натяжение за время такта снижалось в 4–6 раз, импульс выключался и величина $t_{имп}$ сокращалась в конце процесса с 10 до 2 мкс.

Исходя из энергетических оценок, высокая удельная мощность рассматриваемых ЭП указывает на принципиальную возможность достижения высоких скоростей ПП. Выбирая значения $A_{уд}$, M и S и задавая кинетическую энергию ПП и КПД процесса преобразова-

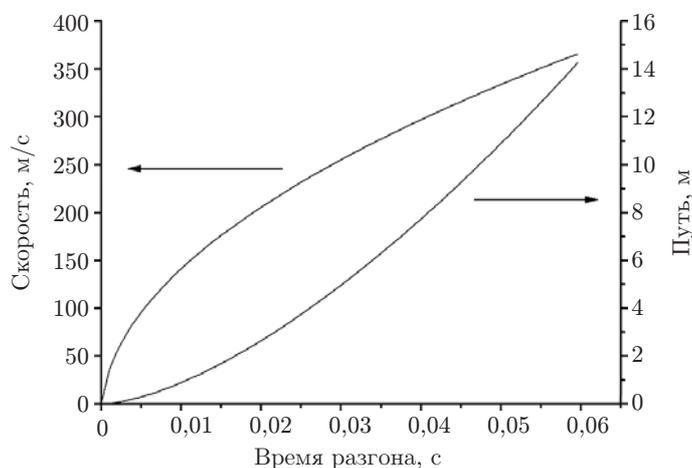


Рис. 6

ния энергии, можно найти число тактов, необходимых для преобразования энергии электрического поля в кинетическую энергию с заданным значением. Вопрос о достижении высоких скоростей движения ПП является самостоятельным, он будет позже рассмотрен более детально, но очевидно, что время достижения заданной скорости t_v определяется длительностью такта и площадью преобразователя, т. е. суммарной его мощностью. Используя вышеприведённую оценку силы тяги, развиваемую преобразователем энергии в начальные моменты времени, можно грубо оценить время t_v достижения заданной скорости v и протяжённость пути разгона S_p до этой скорости: $t_v = 2mvd_0^2/A_{уд}bL^2$. Например, применяя преобразователь энергии площадью 10 м^2 при $A_{уд} = 10 \text{ Дж/м}^2$, $d_0 = 10^{-4} \text{ м}$, $L = 10^{-3} \text{ м}$, можно разогнать массу 10 кг до скорости 8 км/с за $1,6 \cdot 10^{-2} \text{ с}$ на пути 64 м с ускорением $5 \cdot 10^5 \text{ м/с}^2$.

Однако достижение высокой скорости является непростой технической задачей, необходимо принимать во внимание ряд специфических проблем. В частности, из сказанного следует, что для работы на высоких тактовых частотах требуется использовать лепестки с минимальной длиной, чтобы на каждом такте обеспечивать полное восстановление их предшествующей формы, создание условий для эффективного резонансного режима части длины лепестка, принимающей участие в преобразовании энергии. Оценки показывают, что при микросекундных импульсах длина лепестка не должна превышать 1 мм , в этом случае воспроизводимая при каждом такте длина наката, определяющая преобразования энергии, будет находиться в диапазоне $50\text{--}300 \text{ мкм}$.

Возможность эффективного использования коротких импульсов при высокоскоростном разгоне объекта определяется большими значениями момента импульса силы $F(t)t_{\text{имп}} = M\Delta v$, когда достигается заметное приращение скорости Δv на каждом такте, например при $F(t) = 10^6 \text{ Н}$ и $t_{\text{имп}} = 10^{-6} \text{ с}$ масса в 10 кг будет получать за один такт приращение скорости $0,1 \text{ м/с}$.

Заключение. Оставляя в стороне детали конструкции устройства для разгона заданной массы, отметим, что принцип функционирования рассмотренных преобразователей допускает технологическую возможность значительного увеличения их площади до $10\text{--}100 \text{ м}^2$ при перемещениях ПП на расстояния до 100 м и более. Изготовление таких устройств будет сопряжено с требованием поддержания расстояния между ПП и НП в пределах $10\text{--}200 \text{ мкм}$ на протяжении $1\text{--}100 \text{ м}$ и более. Необходимы также создание генератора тока микро- и наносекундных импульсов с амплитудой до 10^6 А и слайдеров с минимальной массой, способных выдержать ускорение до $10^5 g$, разработка системы быстрого отрыва разгоняемого объекта от поверхности слайдера за время порядка нескольких микросекунд, энергетического блока с быстродействующим электронным управлением, а также микроэлектронной технологии изготовления подвижных электродов заданной конфигурации на поверхности ПП большой площади.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tilleman M. Analysis of electrostatic comb-driven actuators in linear and nonlinear regions // Intern. Journ. Solids and Struct. 2004. **41**, Is. 18–19. P. 4889–4898.
2. Косцов Э. Г. Микро- и нанoeлектромеханика. Состояние и перспективы. Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 84 с.
3. Kostsov E. G. Ferroelectric-based electrostatic micromotors with nanometer gaps // IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. 2006. **53**, N 12. P. 2294–2299.
4. Dyatlov V. L., Kostsov E. G. Electromechanical energy converters of micromechanic devices on the basis of ferroelectric films // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Research A. 1998. **405**, Is. 2–3. P. 511–513.

-
5. **Dyatlov V. L., Kostsov E. G.** Planar electrostatic micromotors on the basis of the ferroelectric films // Integrated Ferroelectrics. 1999. **23**, N 1–4. P. 149–160.
 6. **Kostsov E. G.** High-energy capacitive step micromotors // Proc. SPIE. 2002. **4900**. P. 952–956.
 7. **Baginsky I. L., Kostsov E. G.** High-energy capacitive electrostatic micromotors // Journ. Micromech. Microeng. 2003. **13**, Is. 2. P. 190–200.
 8. **Baginsky I. L., Kostsov E. G.** High energy output MEMS based on thin layers of ferroelectric materials // Ferroelectrics. 2007. **351**, Is. 1. P. 69–78.
 9. **Baginsky I. L., Kostsov E. G.** MEMS based on thin ferroelectric layers // Ferroelectrics — Applications /Ed. M. Lallart. Croatia: InTech, 2011. Ch. 2. P. 35–59.
 10. **Baginsky I. L., Kostsov E. G.** Reversible high-speed electrostatic "contact" // Semiconductors. 2010. **44**, N 13. P. 1654–1657.
 11. **Baginsky I. L., Kostsov E. G.** Electrostatic micromotor based on ferroelectric ceramics // Journ. Micromech. Microeng. 2004. **14**, Is. 11. P. 1569–1575.

Поступила в редакцию 5 октября 2011 г.
