

УДК 621.3.049.77.002.5

## ПРЕДЕЛЬНАЯ УДЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ ЁМКОСТНЫХ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ СО СТРУКТУРОЙ МЕТАЛЛ—ТОНКОПЛЁНОЧНЫЙ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИК

© И. Л. Багинский

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

Определена величина предельной удельной мощности ёмкостных электростатических двигателей со структурой металл—тонкоплёночный сегнетоэлектрик с большой величиной удельной ёмкости—нанозазор—подвижный электрод. Была проведена оценка предельно возможной частоты преобразования энергии для таких двигателей. Используя определённую ранее величину предельной плотности энергии для преобразователей энергии на основе таких структур, было показано, что предельная мощность достигает  $5 \cdot 10^8$  Вт/кг и превышает мощность индуктивных моторов на 5 порядков величины.

*Ключевые слова:* электростатика, нанозазор, двигатель, сегнетоэлектрик, свободная металлическая плёнка, предельная удельная мощность.

DOI: 10.15372/AUT20210310

**Введение.** В настоящее время возникла необходимость в значительном увеличении удельной мощности электрических двигателей как при создании макроконструкций (например, для создания электрических двигателей самолётов), так и для микромеханических устройств (например, при разработке микролетательных аппаратов).

Для решения этой задачи наиболее широко применяются три класса электромеханических преобразователей энергии (двигатели и генераторы): индуктивные, пьезоэлектрические, электростатические электрические машины, в которых осуществляется прямое и обратное преобразование энергии магнитного или электрического поля в механическую энергию. Удельная и абсолютная мощности преобразователей энергии определяются плотностью энергии поля в рабочем зазоре и частотой преобразования.

В лучших индуктивных преобразователях плотность энергии магнитного поля в зазоре при максимально возможных значениях магнитной индукции  $B = 1 - 1,5$  Т для магнитопроводов, созданных на основе ферромагнетиков, достигает  $W_V = B^2/(2\mu_0) = 4 \cdot 10^5 - 10^6$  Дж/м<sup>3</sup> ( $\mu_0$  — магнитная постоянная) при минимальных величинах зазоров между ротором и статором, определяемых технологией производства, порядка долей миллиметра (не менее 100–300 мкм) [1]. Для увеличения мощности таких двигателей применяют многосекционные сердечники ротора и повышают частоту оборотов, благодаря чему достигается максимальная удельная мощность электродвигателей ( $10^4$  Вт/кг) [2]. Предельная частота индуктивных преобразователей ограничивается силами Кориолиса, которые могут превысить предел механической прочности материала ротора.

Пьезоэлектрические преобразователи энергии по плотности энергии поля сопоставимы с электромагнитными, например устройствами на основе керамики PZT5Н [3]. В таких преобразователях рабочим зазором является сам материал пьезоэлектрика. Плотность энергии в нём может быть высокой за счёт большой величины диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , а также больших значений коэффициента электромеханической связи (порядка 0,5–0,8). Однако для таких преобразователей величиной, ограничивающей максимальную

плотность преобразуемой энергии, является не максимальное поле, которое можно сформировать в диэлектрике без нарушения его электрической прочности, а предельное значение механического напряжения материала, при превышении которого происходит необратимая деформация пьезоэлектрика:  $\sigma = F_e/S$  ( $F_e$  — сила упругости,  $S$  — площадь преобразователя);  $W_V = \sigma^2/(2E_Y)$  ( $E_Y$  — модуль Юнга материала) [4]. Для пьезоэлектрических преобразователей предельная рабочая частота ограничена скоростью звука в пьезоэлектрике и может достигать десятков мегагерц.

В ёмкостных электростатических преобразователях удельная объёмная плотность энергии  $W_V$ , как и в индуктивных, определяется напряжённостью электрического поля в рабочем зазоре  $E_e$ :

$$W_V = \frac{\varepsilon_0 E_e^2}{2} = \frac{\varepsilon_0 V_e^2}{2d_e^2} = \frac{C_e V_e^2}{2d_e}, \quad (1)$$

где  $V_e$  — напряжение, прикладываемое к зазору,  $d_e$  — ширина зазора,  $C_e = \varepsilon\varepsilon_0/d_e$  — удельная (на единицу площади) ёмкость зазора,  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума. Энергия на единицу площади структуры составляет

$$W_S = \frac{C_e V_e^2}{2} = \frac{\varepsilon_0 V_e^2}{2d_e}. \quad (2)$$

Работа ёмкостных электростатических преобразователей энергии основана на сдвиге подвижного электрода (ПЭ) электрического конденсатора либо под действием сил электрического поля (для двигателя [5, 6]), либо под действием механической силы против сил электрического поля (для генератора [7]).

Новый принцип электромеханического преобразования энергии, основанный на применении тонкой плёнки сегнетоэлектрика в структурах металл—тонкая плёнка сегнетоэлектрика—нанозазор—подвижная плёнка металла (МСЗМ), был разработан в [8, 9]. Нанозазор образуется при прижатии ПЭ к поверхности сегнетоэлектрика. Ширина нанозазора, определяемая из измерений ёмкости структуры, находится в пределах 5–50 нм [10] и ограничена шероховатостью поверхности сегнетоэлектрика. Было показано как теоретически, так и экспериментально [10], что при использовании в указанных структурах тонкого сегнетоэлектрика с величиной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$ , превышающей 1000–5000, практически всё напряжение, подаваемое на МСЗМ-структуру, прикладывается к нанометровому зазору.

В работах [11, 12] проведена оценка величины максимального напряжения, которое можно подать на МСЗМ-структуру как без нарушения её электрической прочности, так и без накопления заряда в слое сегнетоэлектрика. Показано [12], что при атмосферном давлении и при изменении зазора от величин, превышающих длину ударной ионизации, равную 3–7 мкм, до нанометровых значений это напряжение не должно превышать определённое критическое значение  $V_{cr} = 330$  В. С учётом минимальной величины зазора между поверхностями сегнетоэлектрика и подвижного электрода было определено максимальное значение поля, которое можно достичь в зазоре  $E_{cr} = 6 \cdot 10^{10}$  В/м, и соответственно значение максимальной плотности энергии в рабочем зазоре  $W_{V,max} = 1,6 \cdot 10^9$  Дж/м<sup>3</sup>. Эта величина значительно превышает плотность энергии, достигаемую в мощных электромагнитных двигателях, до  $10^5$  раз. Оценки  $W_{V,max}$  для вакуумного режима работы электромеханических преобразователей на основе МСЗМ-структур [12], при котором механизмом, ограничивающим величину максимального поля в зазоре, является уже не ударная ионизация воздушного промежутка, как в предыдущем случае, а эффект полевого срыва атомов с поверхности подвижного электрода, дают близкие по порядку величины значения критического поля и соответственно максимальной плотности энергии.

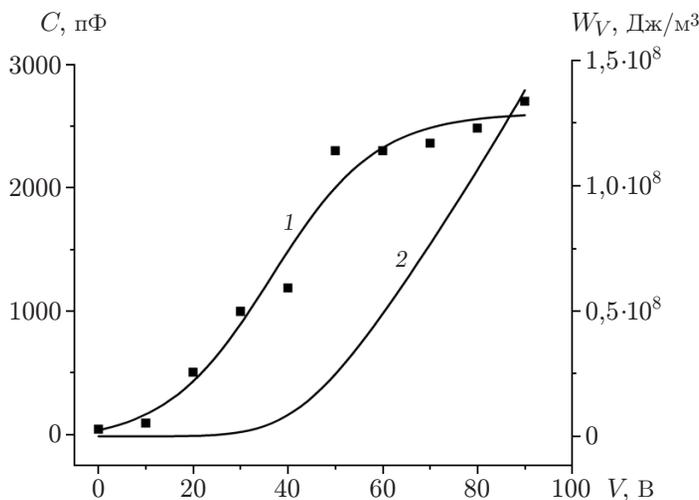


Рис. 1. Ёмкость структуры МСЗМ (1) и плотность энергии в зазоре (2), измеренные для тонкоплёночного ёмкостного двигателя

На основе МСЗМ-структур был создан макет плёночного ёмкостного двигателя, исследованный и описанный в [13]. Зависимость ёмкости наката от амплитуды приложенных импульсов напряжения для этого двигателя приведена на рис. 1 (кривая 1). Поскольку в исследованиях [13] было установлено, что коэффициент преобразования электрической энергии, накапливаемой в ёмкости структуры, в механическую превышает 80 %, то в первом приближении можно полагать, что преобразуемая энергия равна энергии, накопленной в ёмкости структуры. Значение  $W_V$  при напряжении  $V = 90$  В, приложенном к МСЗМ-структуре, составляет  $1,3 \cdot 10^8$  Дж/м<sup>3</sup> (рис. 1, кривая 2). Экстраполируя значение  $W_V$  по закону  $W_V \sim V^2$  до величины максимального напряжения  $V_{cr} = 330$  В, получаем максимальное значение плотности энергии, примерно равное теоретической оценке, проведённой в [12].

Таким образом, разработанные электростатические преобразователи энергии на основе МСЗМ-структур как с плёнками сегнетоэлектрика [13], так и со слоем антисегнетоэлектрической керамики [14] перспективны для создания двигателей с высокой удельной мощностью. Однако остаётся неясным вопрос о возможной предельной частоте работы таких устройств.

Целью представленной работы является определение этой предельной частоты и оценка величины максимальной удельной мощности, которая может быть достигнута в ёмкостном электростатическом двигателе.

**Оценка максимальной удельной мощности ёмкостного двигателя.** Поскольку определение максимальной плотности энергии в рабочем зазоре рассматриваемых двигателей было проведено в [12], то для установления максимальной удельной мощности  $P_{V, \max}$  таких устройств достаточно найти предельную частоту  $f_{\max}$  тактов электромеханического преобразования энергии:

$$P_{V, \max} = W_{V, \max} f_{\max}. \quad (3)$$

Частота работы двигателя обратно пропорциональна длительности такта преобразования  $\tau$ , который состоит из четырёх стадий: электростатического захвата ПЭ, электростатического прижатия ПЭ, разделения поверхностей ПЭ и сегнетоэлектрика после окончания импульса напряжения, принятия ПЭ формы, необходимой для осуществления последующего наката.

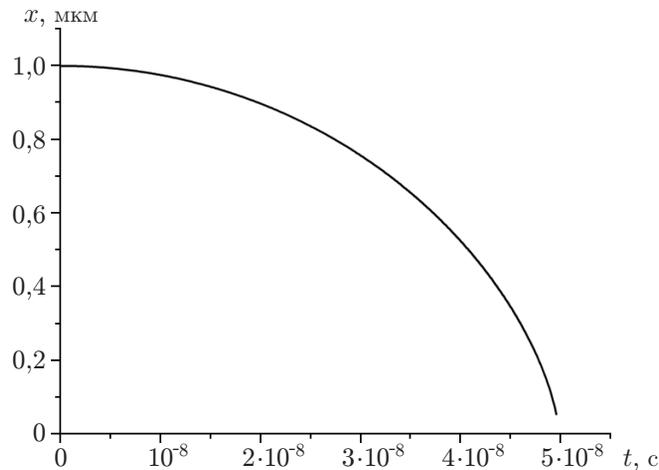


Рис. 2. Процесс прижатия ПЭ массой  $2 \cdot 10^{-13}$  кг ( $V = 300$  В, параметры сегнетоэлектрика:  $\varepsilon = 1000$ ,  $d = 1$  мкм)

Как было показано в работе [15], время электростатического захвата ПЭ и соответственно начала движения подвижной пластины составляет лишь малую часть такта  $\tau$ . При длине ПЭ порядка 1–4 мм, как было экспериментально установлено, длительность такта составляет  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  с, тогда как время захвата равно 1–3 мкс. Время же разделения поверхностей ПЭ и сегнетоэлектрика равно  $(1-3) \cdot 10^{-7}$  с: этот процесс обусловливается действием упругих сил в ПЭ, прижатом к микронеоднородностям на поверхности сегнетоэлектрика [16, 17]. Таким образом, длительность такта определяют два процесса: электростатическое прижатие ПЭ и восстановление формы ПЭ после разделения поверхностей.

Время электростатического прижатия ПЭ составляет малую долю такта преобразования энергии. Для иллюстрации этого утверждения на рис. 2 показан процесс прижатия ПЭ с расстояния 1 мкм, при этом длина ПЭ достигает порядка 10 мкм. Время этого процесса в данном случае равно  $5 \cdot 10^{-8}$  с.

Длительность процесса восстановления формы ПЭ, который представляет собой балку, закреплённую с одного конца, обратно пропорциональна собственной частоте колебаний ПЭ  $f_0$ , что подтверждалось экспериментально [13].

Собственная частота колебаний ПЭ вычисляется по формуле

$$f_0 = 0,162 \frac{d_p}{l^2} \left( \frac{E_Y}{\rho} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

Здесь  $d_p$  — толщина ПЭ,  $l$  — длина ПЭ,  $\rho$  — удельный вес материала ПЭ. При толщинах ПЭ порядка 1,5–2 мкм, его длине  $l = 3$  мм и значении модуля Юнга для бериллиевой бронзы  $E_Y = 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>,  $\rho = 8,25 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и  $f_0 = 40$ –60 Гц.

Собственная частота колебаний ПЭ в зависимости от его длины представлена на рис. 3. Когда длина ПЭ сравнима с его толщиной, проявляется размерный эффект, поэтому в этом случае для оценки собственной частоты введено ограничение  $d_p \leq 0,1l$ . При длине ПЭ  $\sim 10$  мкм время восстановления исходного состояния равно  $10^{-7}$  с (см. рис. 3), тогда как время прижатия с расстояния 1 мкм (см. рис. 2) составляет  $5 \cdot 10^{-8}$  с.

Таким образом, при длине ПЭ 10 мкм собственная частота колебаний ПЭ достигает 10 МГц. В таком случае согласно оценкам [12] предельная энергия ёмкостного преобразователя на единицу площади составляет  $W_{S, \max} = 80$  Дж/м<sup>2</sup>. Тогда развиваемая двига-

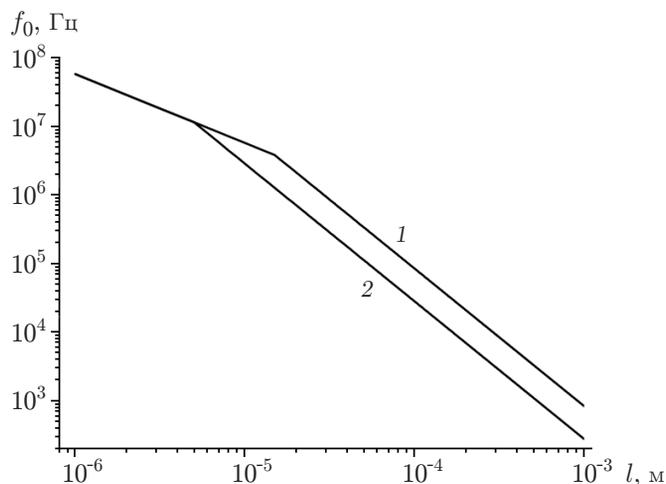


Рис. 3. Зависимость собственной частоты колебаний ПЭ от его длины при толщине ПЭ 1,5 мкм (1), 0,5 мкм (2)

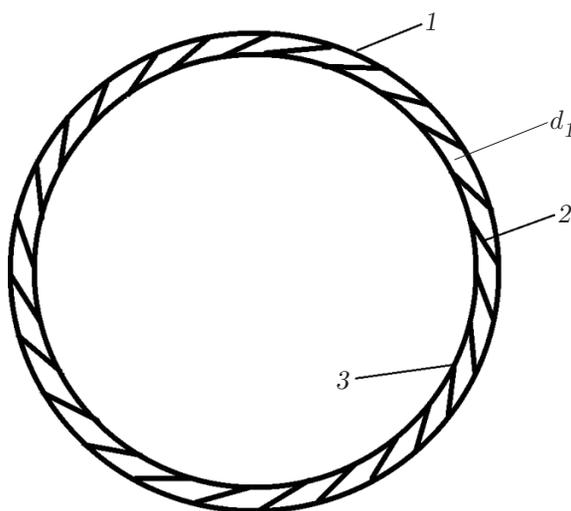


Рис. 4. Схематическое изображение ёмкостного двигателя вращения барабанного типа (1 — статор: структура сегнетоэлектрик—металл на подложке; 2 — свободные плёнки металла (лепестки), закреплённые одним концом на поверхности статора; 3 — ротор)

телем предельная мощность на единицу площади  $P_{S, \max} = W_{S, \max} f_0 = 8 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2$  или  $8 \cdot 10^2 \text{ Вт/мм}^2$ , а максимальная мощность на единицу объёма  $P_{V, \max} = 1,6 \cdot 10^{17} \text{ Вт/м}^3$ .

Последняя оценка определяет удельную мощность в межэлектродном промежутке и не учитывает параметры элементов двигателя, например, толщину и удельный вес статора и слайдера (или ротора), которые зависят от конкретной его конструкции. Естественно, что конструкций двигателя может быть несколько, и конкретное его исполнение зависит от области применения.

На описанном принципе преобразования энергии возможно построение как линейных двигателей, так и ёмкостных двигателей вращения. Пример одной из конструкций ёмкостного двигателя вращения схематически представлен на рис. 4. Она состоит из двух цилиндров, разделённых зазором  $d_1$ : подвижного (вращающегося) и неподвижного. Поверхность первого цилиндра покрыта тонким слоем сегнетоэлектрика, к его поверхности

притягиваются свободные металлические плёнки, закреплённые одним концом на поверхности неподвижного цилиндра.

Удельная мощность такого двигателя значительно превосходит мощность индуктивных двигателей вращения. Пренебрегая весом вспомогательных элементов конструкции (таких как направляющие и токосъёмники), её можно оценить как

$$P_m = W_{S, \max} h k \rho_s f_0, \quad (5)$$

где  $f_0$  определяется по формуле (4),  $\rho_s$  — удельный вес материала стенок цилиндров,  $k$  — коэффициент заполнения поверхности рабочими элементами (металлическими ПЭ). Полагая  $k = 0,8$ ,  $l = 10$  мкм,  $h = 0,1$  мм и учитывая, что ПЭ изготовлены из бериллиевой бронзы, а цилиндры — из стали, получаем  $f_0 \approx 10$  МГц и  $P_m = 5 \cdot 10^8$  Вт/кг. Такая величина удельной мощности превышает аналогичную характеристику индуктивных двигателей более чем на 5 порядков.

**Заключение.** Полученные оценки предельной мощности ёмкостных электростатических двигателей на основе нанозазоров и тонких плёнок сегнетоэлектриков открывают широкие перспективы их применений как для создания высокомоощных электродвигателей, например электромоторов для самолётов, так и для микроустройств, например микроБПЛА и так называемых «механических насекомых». Так, микромотор весом 1 мг может развить пиковую мощность порядка 100 Вт, которой вполне достаточно для взлёта и манёвренности микролетательного аппарата весом в несколько грамм. Перспективно также применение рассматриваемых двигателей и в более крупных конструкциях, вплоть до электросамолётов, для которых существенен вопрос о минимизации веса двигательной установки.

Важно отметить, что для длительной работы ёмкостных плёночных двигателей требуется их эффективное принудительное охлаждение с применением жидкого азота. Естественно, учёт веса систем охлаждения снизит величину удельной мощности (ватт на килограмм). Для решения этого вопроса необходима разработка конкретной конструкции двигателя и её экспериментальное исследование, что невозможно проанализировать из общих физических соображений. Поэтому решение данной задачи выходит за рамки предлагаемой работы и будет предметом дальнейших исследований.

Однако возможны режимы работы двигателя, для которых принудительное охлаждение не потребуется: кратковременные включения форсированного режима с последующим переходом к умеренному потреблению мощности путём уменьшения рабочей частоты, например, для обеспечения взлёта микроБПЛА с последующим переходом к горизонтальному полёту.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Edminister J. A.** Schaum's Outline of Theory and Problems of Ferromagnetics. Second Ed., McGraw-Hill, 1995. 338 p.
2. **High Speed 20000rpm Permanent Magnent Motor for Uav.** 1998–2021 Focus Technology Co., Ltd. URL: <https://mc-motor.en.made-in-china.com/product/mylEZnNOnIhL/China-High-Speed-20000rpm-Permanent-Magnent-Motor-for-Uav.html> (дата обращения: 15.03.2021).
3. **Roundy S., Wright P. K.** A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics // Smart Mater. Struct. 2004. **13**. P. 1131–1142.
4. **Bansal R. K.** A Textbook of Strength of Materials. Forth Ed. Laxmi Publications Ltd., 2009. 1092 p.

5. **Ghalichechian N., Modafe A., Lang J. H., Ghodssi R.** Dynamic characterization of a linear electrostatic micromotor supported on microball bearings // *Sensors Actuators*. 2007. **A 136**. P. 496–503.
6. **Sarajlic E., Yamahata Ch., Cordero M., Fujita H.** An electrostatic 3-phase linear stepper motor fabricated by vertical trench isolation technology // *Journ. Micromech. Microeng.* 2009. **19**, N 7. 074001.
7. **Khan F. U., Qadir M. U.** State-of-the-art in vibration-based electrostatic energy harvesting // *Journ. Micromech. Microeng.* 2016. **26**, N 10. 103001.
8. **Dyatlov V. L., Kostsov E. G.** Electromechanical energy converters of micromechanic devices on the basis of ferroelectric films // *Nuclear Instrum. Meth. Phys. Res.* 1998. **A 405**. P. 511–513.
9. **Dyatlov V. L., Kostsov E. G., Baginsky I. L.** High-effective electromechanical energy conversion on the basis of thin ferroelectric films // *Ferroelectrics*. 2000. **241**, Iss. 1. P. 99–106.
10. **Kostsov E. G.** Ferroelectric-based electrostatic micromotors with nanometer gaps // *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectric Frequency Control. Special Iss. on Nanoscale Ferroelectric*. 2006. **53**, N 12. P. 2294–2299.
11. **Багинский И. Л., Косцов Э. Г.** Ёмкостные двигатели с высокой удельной мощностью // *Автометрия*. 2018. **54**, № 5. С. 79–86. DOI: 10.15372/AUT20180510.
12. **Baginsky I. L., Kostsov E. G.** Nanometer gap in electromechanical converters — a way to achieve an extremely high energy density // *Micromachines (Basel)*. 2019. **10** (11). 746.
13. **Baginsky I. L., Kostsov E. G.** High-energy capacitance electrostatic micromotors // *Journ. Micromech. Microeng.* 2003. **13**, N 2. P. 1–11.
14. **Baginsky I. L., Kostsov E. G.** Electrostatic micromotor based on the ferroelectric ceramics // *Journ. Micromech. Microeng.* 2004. **14**, N 11. P. 1–7.
15. **Kostsov E. G.** Electromechanical energy conversion in the nanometer gaps // *Proc. SPIE*. 2008. **7025**. 70251G.
16. **Багинский И. Л., Косцов Э. Г.** Обратимый быстродействующий электростатический контакт // *Изв. высш. учеб. заведений. Электроника*. 2010. **82**, № 2. С. 18–22.
17. **Baginsky I. L., Kostsov E. G.** MEMS based on thin ferroelectric layers // *Ferroelectrics – Applications* /Ed. M. Lallart. Intech, 2011. P. 35–58.

*Поступила в редакцию 15.03.2021*

*После доработки 23.04.2021*

*Принята к публикации 11.05.2021*