

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.3.049.77.002.5

ЁМКОСТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ С ВЫСОКОЙ УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТЬЮ*

И. Л. Багинский, Э. Г. Косцов

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

Описывается новый класс ёмкостных двигателей, основанных на нанометровых межэлектродных зазорах и обладающих удельной энергоёмкостью, значительно превышающей удельную энергоёмкость индуктивных двигателей. Проанализированы особенности их функционирования. Показаны величина удельной энергии, вырабатываемой за цикл электромеханического преобразования, развиваемые силы и мощности рассматриваемых двигателей, которые превышают аналогичные параметры индуктивных двигателей на 2–3 порядка, что открывает возможность их широкого практического применения.

Ключевые слова: электростатика, нанозазор, двигатель, сегнетоэлектрик, свободная металлическая плёнка, удельная плотность энергии.

DOI: 10.15372/AUT20180510

Введение. Электромеханические преобразователи (ЭП) энергии, электрические машины, преобразующие электрическую энергию в механическую и обратно, являются основой современной техники. Наиболее распространённые электрические машины разделяются на два класса: индуктивные, в которых рабочим полем является магнитное поле, и ёмкостные, в которых преобразование энергии осуществляется под действием электрического поля. Удельная мощность указанных ЭП определяется плотностью энергии поля в рабочем зазоре.

В индуктивных ЭП энергия концентрируется в магнитном поле. Основным параметром, характеризующим их энергоёмкость, является ток, протекающий в обмотках электромагнита, который и определяет напряжённость магнитного поля в воздушном зазоре машин. В таких машинах электромеханическое преобразование энергии происходит за счёт изменения токов.

В ёмкостных ЭП энергоёмкость определяется напряжённостью электрического поля в зазоре между подвижной и неподвижной пластинами (ПП и НП) — основным параметром таких устройств. Ёмкостные ЭП — это машины напряжения, в которых преобразование энергии происходит за счёт изменения ёмкостей, напряжений.

В наиболее эффективных индуктивных преобразователях плотность энергии магнитного поля в зазоре при максимально высоких значениях магнитной индукции (порядка 1 Т) достигает $W = (4-5) \cdot 10^5$ Дж/м³.

Одним из важных преимуществ ёмкостных машин является малое количество металлических компонентов в конструкции по сравнению с индуктивными машинами (так как

*Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства научных организаций (государственная регистрация № АААА-А17-117060810014-9) и Сибирского отделения РАН (комплексная программа фундаментальных исследований «Междисциплинарные интеграционные исследования» на 2018–2020 гг., проект № 273).

не используются магнитопроводы), поэтому электростатические преобразователи энергии более технологичны, но пока не нашли широкого применения. Основная причина — низкая удельная энергоёмкость W как следствие низкой напряжённости электрического поля E в рабочем зазоре (ширина которого в классических ЭП превышает десятки микрон), ограничиваемая низким значением пробивной напряжённости поля в воздушном зазоре $E_b = 3 \cdot 10^6$ В/м (закон Пашена [1]); $W = \varepsilon_0 E_b^2 / 2 = 40$ Дж/м³ (ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума). Теория ёмкостных двигателей значительно меньше развита в отличие от теории индуктивных двигателей, получивших широкое распространение.

Электростатическая сила F , развиваемая ёмкостными двигателями 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 намного меньше плотности энергии магнитного поля в зазорах больших индуктивных машин. Основной проблемой в данном случае являются трудности получения высокой удельной ёмкости C или малой протяжённости межэлектродных зазоров.

С развитием технологии глубокого травления кремния появилась возможность создания электростатических микродвигателей с рабочим зазором порядка 2 мкм. На основе структур с такой величиной зазора разрабатывается ряд устройств микромеханики, таких как микродвигатели [2], микроакселерометры [3] и микрогенераторы электрической энергии [4]. Для этих устройств плотность энергии электрического поля при напряжении 30 В (максимально возможном для данной ширины зазора) становится соизмеримой с плотностью энергии магнитного поля при магнитной индукции 1 Т. Но поверхностная плотность энергии W_S составляет 0,01 Дж/м², поэтому необходима большая площадь конденсатора с подвижным электродом (ПЭ) для создания достаточной силы. Известные МЭМС-микродвигатели даже при их параллельном включении развивают силы в несколько микроныютонов, при этом из-за необходимости поддержания постоянства зазора при перемещении ПЭ амплитуда перемещений не превышает 10–30 мкм, и они функционируют практически только в режиме малоамплитудных колебаний.

Целью данной работы является определение предельных величин плотности энергии и удельной мощности ёмкостных двигателей, которые достигаются при уменьшении рабочего зазора вплоть до нанометровых значений.

Анализ предельных энергетических характеристик ёмкостных двигателей на основе нанометровых зазоров. В [5–8] был разработан новый класс ёмкостных преобразователей энергии как элементов микроэлектромеханики, основанный на осуществлении электромеханического преобразования энергии в нанометровых зазорах шириной $d_e = 5\text{--}50$ нм. Принцип их функционирования заключается в трансформации в механическое движение электрической энергии, накапливаемой в процессе обратимого электростатического прижатия свободной металлической плёнки (лепестка) как подвижного электрода к поверхности диэлектрика с большим значением диэлектрической проницаемости ε через воздушный нанометровый зазор. В качестве диэлектрика использовалась плёнка сегнетоэлектрика (ПС) толщиной $d = 0,3\text{--}3$ мкм и диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 3000$ и более или тонкий слой сегнетоэлектрической и антисегнетоэлектрической керамик с диэлектрической проницаемостью свыше 10000 [7]. Основное требование, предъявляемое к указанным слоям, — превышение значения ёмкости слоя сегнетоэлектрика $C_F = \varepsilon\varepsilon_0/d$ над величиной ёмкости зазора $C_e = \varepsilon_0/d_e$ [6]. При этом условии большая часть напряжения прикладывается к зазору. Важными факторами в структурах металл—сегнетоэлектрик—зазор—металл (МСЗМ) являются слабое накопление заряда в диэлектрике при действии поля и быстрая его релаксация после выключения импульса напряжения, определяемые высоким качеством кристаллической структуры ПС.

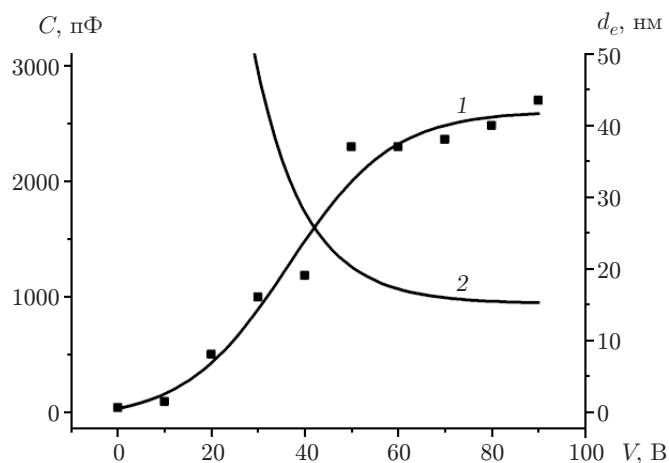


Рис. 1. Изменение ёмкости МСЗМ-структуры площадью $S = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ (кривая 1) и ширины зазора (кривая 2) в зависимости от амплитуды напряжения V . Сегнетоэлектрик — плёнка ниобата бария-стронция толщиной 2,4 мкм

Нанозазор формируется в процессе прижатия свободной металлической плёнки к поверхности сегнетоэлектрика при подаче напряжения на структуру электрод—тонкий слой сегнетоэлектрика—воздушный нанозазор—ПЭ—МСЗМ. Пример формирования нанозазора, определяемого исходя из величины ёмкости структуры, в зависимости от величины напряжения приведён на рис. 1.

В МСЗМ-структуре напряжённость электрического поля на границе раздела двух сред имеет резкий скачок, обусловленный высоким значением ε/d . Такое распределение напряжённости по слоям структуры приводит к тому, что на завершающей стадии процесса преобразования энергии основная часть поданного напряжения прикладывается к воздушному зазору, что, в свою очередь, ведёт к значительному увеличению электростатической силы, действующей на подвижный электрод.

Важным фактором, определяющим высокую энергоёмкость преобразователей энергии на основе МСЗМ-структур, является возможность приложения больших напряжений к нанометровому зазору указанной структуры без её пробоя, поскольку электрическая прочность диэлектрика, в частности плёнок ниобата бария-стронция, достаточно высока — более 10^8 В/м .

Максимальная плотность энергии в воздушном зазоре указанной структуры находится по формуле

$$W_{\max} = \frac{\varepsilon_0 E_{e\max}^2}{2} = \frac{\varepsilon_0}{2} \left(\frac{V_{e\max}}{d_{e\min}} \right)^2, \quad (1)$$

где $E_{e\max}$ — максимальная величина напряжённости электрического поля в воздушном зазоре; $V_{e\max}$ и $d_{e\min}$ — максимальное напряжение на зазоре и его минимальная ширина. Согласно характеристикам пробоя малых зазоров [9, 10] значение $V_{e\max}$ в МСЗМ-структуре превышает 300 В при атмосферном давлении воздуха, а $d_{e\min}$ достигает 5–10 нм, как показано экспериментально [5–8]. Тогда $W_{\max} = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ Дж/м}^3$ и соответствующая плотность энергии на единицу площади равна $W_{S\max} = 40 \text{ Дж/м}^2$ при значении максимальной напряжённости поля в зазоре $6 \cdot 10^{10} \text{ В/м}$. Такие высокие поля возможны при положительной полярности напряжения на подвижном электроде (при этих условиях исключается туннельная эмиссия электронов с его поверхности), они близки к предельным значениям напряжённости поля, начиная с которых проявляются эффекты срыва атомов металла с

поверхности ПЭ и туннелирования электронов из валентной зоны на поверхности сегнетоэлектрика [11, 12].

Анализ распределения силы прижатия подвижного электрода

$$F = \frac{V^2}{2} \frac{dC}{d(d_e)} = -\frac{(CV)^2 S}{2\varepsilon_0} \quad (2)$$

к поверхности диэлектрика через воздушный зазор шириной $d_{e_{\min}}$ для заданных значений V , ε и d показывает, что только при ε/d , превышающем 10^9 , можно получить высокие значения сил, действующих на подвижный электрод, до 10^8 – 10^{10} Н/м². Это определяет возможность создания на основе указанных МСЗМ-структур быстродействующих микроэлектромеханических устройств, таких как динамические дифракционные решётки [13–15], электростатические микрогенераторы тактовой частоты с частотами функционирования более 1 ГГц, в которых базовым элементом является тонкая микробалка (подвижный электрод), перемещающаяся под действием сил электростатики.

Важным свойством указанных ЭП является также возможность использования подвижных электродов большой площади, обеспечивающей высокую абсолютную мощность преобразователя энергии в отличие от известных преобразователей энергии на основе малых зазоров, для которых необходимо поддерживать плоскопараллельность поверхностей НП (статора) и ПЭ с высокой точностью (менее 1/10 от ширины зазора).

Схематически принцип работы нового ёмкостного линейного двигателя иллюстрирует рис. 2. Двигатель состоит из неподвижной пластины 4, на которой расположена кремниевая или сапфировая подложка с последовательно нанесёнными на её поверхность электродом и плёнкой диэлектрика (сегнетоэлектрика), и подвижной пластины 1 с синтезированными на её поверхность свободными упругими металлическими плёнками (лепестками) 3, закреплёнными одним концом на её поверхности (перемещающейся относительно НП по направляющим 2). Зазор d_1 между ПП и НП имеет ширину порядка $0,1l$, где l — длина лепестка.

Движение ПП складывается из нескольких стадий. При первоначальной подаче импульса напряжения между лепестком, находящимся в исходном состоянии (рис. 2, *a*), и электродом происходит электростатическое прижатие (стадия «захвата» — включение

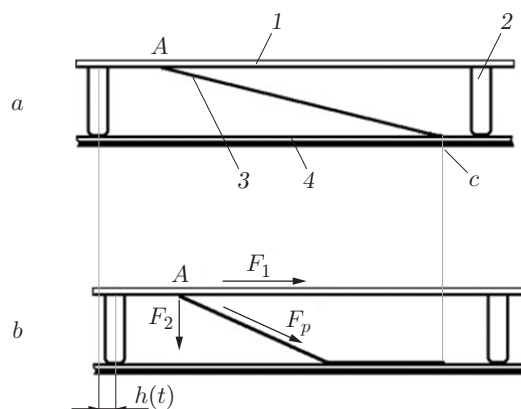


Рис. 2. Схематическое изображение принципа электромеханического преобразования энергии при электростатическом накате свободной металлической плёнки: *a* — начальное состояние ПП, *b* — позиция ПП и форма лепестка при действии импульса напряжения (*A* — точка закрепления лепестка на поверхности ПЭ, *c* — точка прижатия лепестка к поверхности НП, F_1 — сила тяги, F_2 — сила притяжения ПП и НП, F_p — сила натяжения лепестка)

«электронного клея») конца лепестка к поверхности сегнетоэлектрика, и начинается движение пластины за счёт последующего электростатического наката ещё большей части поверхности лепестка на поверхность сегнетоэлектрика, его изгиба и механического натяжения. Так происходит электромеханическое преобразование энергии. Длина наката $l_r(t)$ возрастает во время действия импульса напряжения t , соответственно увеличивается и шаг $h(t)$ смещения ПП. Величина $h(t)$ и скорость перемещения участка лепестка, накатывающегося на поверхность диэлектрика, определяются массой ПП m , длительностью импульсов напряжения t_p , их амплитудой V и коэффициентом трения, а накапливаемая энергия (преобразуемая в механическую) — площадью прижатия лепестка S , величинами d и d_e , значениями V и ε .

После выключения импульса напряжения лепесток под действием сил упругости, возникающих при его изгибе и натяжении, приходит либо в исходное положение (см. рис. 2, *a*) (при одиночном импульсе напряжения), либо в новое положение, 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 коэффициента трения через некоторое время останавливается. Время до его остановки определяется силой трения и скоростью ПП в момент окончания импульса напряжения. Далее, при поступлении последующих импульсов напряжения с частотой f процесс повторяется. Таким образом, осуществляется непрерывное пошаговое движение ПП.

Для определения реальной высокой энергоёмкости описываемых двигателей было проведено их макетирование, создан ряд работоспособных макетов. Один из таких макетов двигателя представлен на рис. 3. Установлено, что при величинах $W_S = 0,3$ Дж/м² ($V = 50$ В), $f = 1$ кГц, $S = 3 \cdot 10^{-5}$ м² скорость непрерывного движения ПП достигает 1 см/с.

Рассматриваемый ёмкостный двигатель при передаче энергии от внешнего источника подвижному элементу имеет ряд принципиальных отличий от индуктивных двигателей.

1. В индуктивных двигателях коммутация подвижных элементов ротора осуществляется за счёт постоянного скольжения контактов (щёток), искрящих и пропускающих

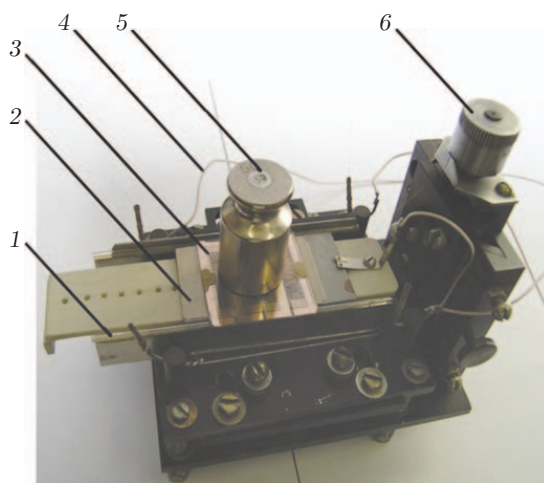


Рис. 3. Макет ёмкостного линейного двигателя: 1 — направляющие, 2 — НП (анти-сегнетоэлектрическая керамика с нижним металлическим электродом), 3 — ПП (стеклянная пластина с закреплёнными на её поверхности металлическими лепестками), 4 — электрический ввод, 5 — нагрузка, 6 — микровинт для регулировки зазора между НП и ПП. Материал диэлектрика — антисегнетоэлектрическая керамика толщиной 100 мкм, диэлектрическая проницаемость 10000, вес ПП (нагрузки) 50 г

большие токи. В описанных ёмкостных двигателях нет скользящих контактов, происходит только однократное прижатие свободной металлической плёнки к поверхности диэлектрика, которое после окончания импульса напряжения завершается. Далее процесс повторяется. Коммутация управляющих импульсов электронная. В момент передачи энергии (основной стадии преобразования энергии) отсутствует скольжение одной поверхности по другой: только в момент выключения импульса напряжения и при движении ПП по инерции имеет место перемещение поверхности подвижного электрода над поверхностью диэлектрика при поддержании ширины зазора в пределах 1–3 мкм.

2. После выключения импульса напряжения происходит уменьшение ёмкости преобразователя энергии, сопровождаемое импульсом тока противоположной полярности (разряд ёмкости), что даёт возможность осуществлять эффективную рекуперацию поступающего от источника напряжения заряда и соответственно энергии, что, в свою очередь, способствует повышению эффективности преобразования энергии и КПД ёмкостного двигателя.

3. Длительность цикла преобразования энергии τ значительно меньше, чем в индуктивных двигателях, это определяется очень малой массой подвижного элемента, она имеет значение 10^{-10} – 10^{-12} кг и менее, в то время как масса подвижного элемента индуктивных машин — якоря вращающегося вала — значительно больше (на 5–7 порядков). Величина τ определяется собственной частотой колебаний балки — лепестка $\tau \sim 1/f_0$, где

$$f_0 \approx 0,162(d_P/l^2) \sqrt{E/\rho} \quad (3)$$

(E и ρ — модуль Юнга и удельный вес материала лепестка, d_P — толщина лепестка), и может лежать в микросекундном диапазоне. В индуктивных коммутаторах время находится в миллисекундном диапазоне. В соответствии с этим удельная мощность рассматриваемого преобразователя значительно выше, так как выше частота преобразования энергии.

4. В отличие от индуктивных двигателей возможно управление мощностью ёмкостного двигателя в широких пределах (до 100 раз и более) как за счёт вариации частоты управляющих импульсов напряжения, так и их амплитуды.

Пример реализации мощных ёмкостных двигателей. Большинство практически используемых индуктивных двигателей являются двигателями вращения. Рассмотрим особенности функционирования описанных ёмкостных преобразователей энергии в режиме вращения ПП.

Пример одной из конструкций ёмкостного двигателя вращения представлен схематически на рис. 4. Она состоит из двух цилиндров, разделённых зазором d_1 : подвижного

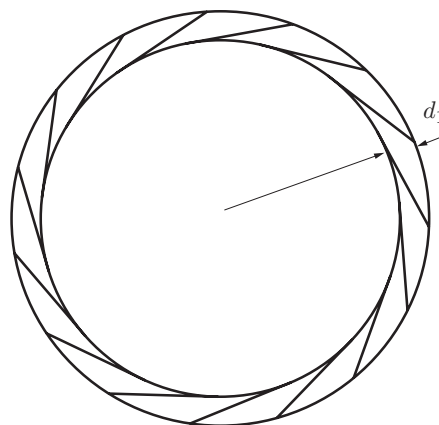


Рис. 4. Схематическое изображение ёмкостного двигателя вращения барабанного типа

(вращающегося) и неподвижного. Поверхность первого цилиндра покрыта тонким слоем диэлектрика, к которому притягиваются свободные металлические плёнки, закреплённые одним концом на поверхности неподвижного цилиндра.

Удельная мощность такого двигателя значительно превосходит мощность индуктивных двигателей, которую можно оценить как

$$P_m = W_{S_{\max}} h k \rho_1 f_0, \quad (4)$$

где ρ_1 — удельный вес материала стенок цилиндров, k — коэффициент заполнения поверхности рабочими элементами (металлическими лепестками). Полагая $k = 0,8$, $d_P \sim 1,5$ мкм, $l = 100$ мкм, $h = 1$ мм и учитывая, что лепестки изготовлены из бериллиевой бронзы, а цилиндры — из стали, получаем $f_0 \approx 100$ КГц и $P_m = 8 \cdot 10^5$ Вт/кг. Такая величина удельной мощности превышает аналогичную характеристику индуктивных двигателей более чем на три порядка: максимальная достигнутая величина удельной мощности для высокооборотных индуктивных двигателей составляет на данный момент до $5 \cdot 10^3$ Вт/кг [16].

В качестве примера оценим мощность электродвигателя с диаметром и шириной цилиндра 1 см. Нетрудно показать, что даже при частоте преобразования 10 кГц его мощность достигает порядка 100 Вт, что более чем в 10 раз превышает мощность классических индуктивных двигателей такого же размера.

Заключение. Проведённый анализ предельных параметров ёмкостных двигателей показывает возможность создания как новых микродвигателей с высокой удельной мощностью P_m (например, для применения в микролетательных аппаратах), так и мощных макроскопических двигателей, способных заменить в широком спектре практических задач классические индуктивные аналоги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяков А. Ф., Бобров Ю. К., Сорокин А. В., Юргеленас Ю. В. Физические основы электрического пробоя газов. М.: МЭИ, 1999. 400 с.
2. 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**. 074001.
3. Багинский И. Л., Косцов Э. Г. Ёмкостные МЭМС-акселерометры сверхвысоких ускорений // Автометрия. 2017. **53**, № 3. С. 107–116.
4. Багинский И. Л., Косцов Э. Г., Соколов А. А. Новый подход к созданию электростатических микрогенераторов ударного типа // Автометрия. 2015. **51**, № 3. С. 113–125.
5. Baginsky I. L., Kostsov E. G. High-energy capacitive electrostatic micromotors // Journ. Micromech. Microeng. 2003. **13**, Is. 3. P. 190–200.
6. Kostsov E. G. Ferroelectric-based electrostatic micromotors with nanometer gaps // IEEE Trans. Ultrason. Ferr. 2006. **53**, N 12. P. 2294–2299.
7. Baginsky I. L., Kostsov E. G. Electrostatic micromotor based on the ferroelectric ceramics // Journ. Micromech. Microeng. 2004. **14**, Is. 11. P. 1569–1575.
8. Baginsky I. L., Kostsov E. G. MEMS based on thin ferroelectric layers // Ferroelectrics — Applications /Ed. M. Lallart. Croatia: InTech, 2011. Ch. 2. P. 35–58.
9. Babrauskas V. Arc breakdown in air over very small gap distances // Fire & Arson Investigator. 2015. **65**, N 3. P. 40–46.
10. Levit W. L. Electrical breakdown and ESD phenomena for devices with nanometer-to-micron gaps // Proc. SPIE. 2003. **4980**. P. 87–96.

11. **Muller E. W.** Field ionization and field ion microscopy // Adv. Electron. and Electron Phys. 1960. **13**. P. 83–179.
12. **Karahka M. L.** Physics in high electric fields: Doctoral dissertation. Nova Scotia, Canada, Dallhouse University, 2016. 162 p.
13. **Syms R. R. A.** Principles of free-space optical microelectromechanical systems // Journ. Mech. Eng. Sci. 2008. Spec. Is. Paper. P. 1–17.
14. **Косцов Э. Г., Соболев В. С.** Низковольтный элемент программируемой полем динамической дифракционной решётки // Автометрия. 2010. **46**, № 3. С. 101–109.
15. **Verheggen J. P., Khan-Raja W., Castracane J.** Optimization of diffractive MEMS for optical switching // Journ. Exp. Nanosci. 2007. **2**, N 1–2. P. 87–100.
16. **Калий В. А.** Электромагнитный расчёт магнитоэлектрического двигателя с удельной мощностью не менее 5 кВт/кг // Электромеханические комплексы и системы. 2017. **13**, № 2. С. 5–10.

Поступила в редакцию 15 мая 2018 г.
