

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.3.049.77.002.5

НОВЫЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ МИКРОГЕНЕРАТОРОВ УДАРНОГО ТИПА

И. Л. Багинский, Э. Г. Косцов, А. А. Соколов

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

Описывается новый класс электростатических микрогенераторов энергии, преобразующих энергию механических микроколебаний в электрическую форму. Принцип преобразования состоит в том, что внешние микровибрации передаются на корпус прибора, на поверхности которого расположены тонкие слои электретов, между ними на слабой подвеске помещается подвижный электрод, попеременно соударяющийся с корпусом. Проведён численный анализ работы генератора и получены аналитические оценки вырабатываемой мощности. Показано, что энергия, производимая таким генератором, значительно превышает энергию, получаемую в классической схеме, основанной на возбуждении вынужденных колебаний подвижной пластины.

Ключевые слова: микрогенератор, микровибрации, электростатика, электрет, удары.

Введение. В настоящее время наблюдается потребность в создании источников автономного электрического питания для широкого класса микроустройств, таких как удалённые микросенсоры, мобильные телефоны и др., в которых частая замена постоянных источников энергии, например аккумуляторов, трудно осуществима. Для питания этих устройств разрабатываются микрогенераторы энергии мощностью 10–1000 мкВт/см². В качестве источников энергии для таких генераторов рассматриваются световой поток, электромагнитное излучение, колебания воздуха (звук), ветер, градиент температур [1, 2], но все они не постоянно и не повсюду доступны.

Одним из перспективных источников энергии для питания существующих микроустройств является энергия вибраций поверхностей твёрдых тел, которые могут обеспечить генерацию достаточной электрической мощности. Как известно, амплитуды колебаний поверхности стен капитальных строений имеют значения от 0,1 до 10 мкм в диапазоне частот 10–100 Гц [3]. Частоты колебаний, инициируемых при ходьбе человека, находятся в диапазоне от 0,1 до 10 Гц при амплитудах от 10⁻⁴ до 10⁻² м [4]. Для колебаний корпусов различных машин и механизмов характерен диапазон более высоких частот — от 100 до 1000 Гц при амплитудах 10–100 мкм [5]. В [1, 2, 6] достаточно подробно анализировались различные способы преобразования энергии микровибраций в электрическую энергию, описывались электромагнитные, электростатические и пьезоэлектрические генераторы.

В работах [7–13] показано, что в ёмкостных электростатических микрогенераторах обеспечивается наиболее высокая плотность энергии электрического поля и соответственно электрическая мощность по сравнению с другими методами преобразования энергии [5, 11]. В отличие от классических ёмкостных генераторов [6, 14] электретные генераторы [15, 16] не требуют использования внешнего источника напряжения, поэтому они просты в реализации и наиболее перспективны для практического применения.

Известно два типа ёмкостных микрогенераторов, отличающихся методом перемещения подвижных электродов: либо сдвиг осуществляется в плоскости их расположения (далее эта конструкция называется планарной) [17–31], либо имеет место раздвижение пластин с изменением зазора между ними (непланарная конструкция) [21, 32–37]. В то же время в зависимости от метода возбуждения генераторы подразделяются на возбуждаемые путём непосредственного приложения силы к движущейся пластине, например роторный генератор [24], и генераторы, в которых внешняя сила прикладывается к движущейся пластине массой m опосредованно, путём механомеханического преобразования в системе масса—пружина. В [7–13] исследовалась работа непланарных генераторов как ёмкостного, так и электретного с модуляцией межэлектродного зазора от 10–100 нм до нескольких микрон, осуществляемой за счёт внешней механической силы. Показано, что в таких генераторах максимальная генерируемая электрическая мощность ограничена напряжённостью поля пробоя межэлектродного промежутка и в области частот 30–100 Гц достигает значений до 10 мВт/см² и более. Однако в реальных условиях при утилизации энергии микровибраций трудно приложить большую силу от источника колебаний непосредственно к подвижной пластине генератора, поскольку невозможно закрепить вторую пластину на поверхности, неподвижной относительно вибрирующей поверхности. Поэтому необходим двухстадийный процесс, состоящий из механомеханического преобразования, в котором часть энергии от внешнего источника вибраций переводится в механический колебательный контур, включающий в себя массу m и пружину (с коэффициентом упругости k), и последующего механоэлектрического преобразования, в котором эта часть энергии преобразуется в электрическую. Один конец пружины закреплён на корпусе генератора, зафиксированном на поверхности — источнике вибраций, а к её другому концу прикрепляется масса m (рис. 1). Генерация энергии происходит при увеличении расстояния $x(t)$ между корпусом (он смещается по закону $y(t)$) и массой m (движущейся по закону $z(t)$): $x(t) = z(t) - y(t)$, когда пластины заряженного конденсатора раздвигаются с преодолением сил электрического поля. В такой конструкции микрогенератора силы инерции подвижной массы ma (где a — ускорение подвижной пластины массой m) и силы упругости пружины kx направлены против сил поля.

Основной недостаток данного способа преобразования энергии заключается в том, что от источника колебаний, который можно рассматривать как неограниченный резерв энергии, в механический колебательный контур закачивается лишь её небольшая часть, так как величина m ограничена конструкцией устройства. Это накладывает существенное ограничение на максимальную генерируемую мощность, поскольку передаваемая на массу m через пружину сила инерции при определённых смещениях подвижной пластины в сторону притягивающего электрода становится меньше силы электрического поля и имеет место необратимое притяжение пластины к поверхности электрета — залипание подвиж-

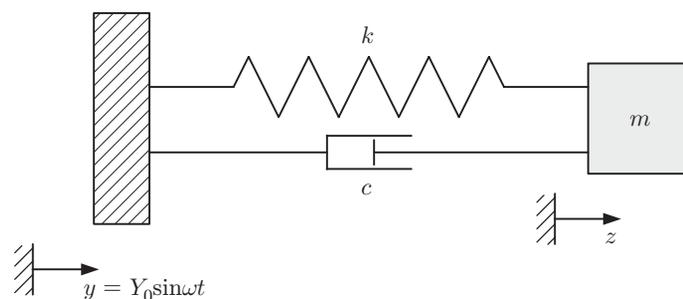


Рис. 1. Механическая схема, иллюстрирующая принцип утилизации энергии вибраций.
Корпус (заштрихован) закреплён на источнике вибраций

ного электрода, приводящее к остановке генератора. Для устранения эффекта залипания необходимо уменьшать притягивающую силу электрического поля, что, в свою очередь, ограничивает мощность генератора.

В планарных конструкциях генераторов эта проблема решается путём постепенного уменьшения площади перекрытия поверхностей электродов, что существенно снижает величину противодействующей электрической силы, которую необходимо преодолеть, в отличие от непланарной конструкции (где модулируется межэлектродный зазор при постоянной площади перекрытия электродов). Однако в планарных генераторах практически невозможно использование микронных и субмикронных межэлектродных зазоров, так как нельзя обеспечить плоскопараллельность поверхностей подвижной подложки (ПП) и электрета при достаточно больших величинах площади ($S > 10\text{--}100 \text{ мм}^2$), что и определяет их низкую удельную мощность, порядка 10 мкВт/см^2 (см., например, [22, 31]), в сравнении с теоретически предельно возможной (в [30] экспериментально показано, что мощность генератора в планарных структурах при непосредственном воздействии силы на ПП может достигать 200 мкВт/см^2).

В последнее время в ряде работ [38–42] анализировался новый тип микрогенератора, принцип действия которого основан на преобразовании кинетической энергии упругого удара в электрическую. Такую конструкцию назовём ударным генератором. В нём уменьшается влияние эффекта залипания, поскольку в момент упругого удара возникает дополнительная (к силе упругости натянутой пружины) большая сила инерции, превышающая силу электрического поля, и, как следствие, значительно увеличивается по сравнению с классическим генератором напряжение залипания, что приводит к росту генерируемой мощности. Из вышеизложенного следует, что максимальной величины мощности можно достигнуть в непланарной конструкции. Однако анализ таких конструкций носит фрагментарный характер, и их практическая реализация в настоящее время отсутствует [41, 42].

Очевидно также, что в непланарной схеме необходимо ограничение холостого (не приводящего к выработке электроэнергии) движения подвижной пластины, возникающего после удара. Ограничителем может быть поверхность электрета второго генерирующего конденсатора в конструкции устройства.

Целью данной работы являются моделирование и детальный анализ особенностей функционирования двухконденсаторного электретного непланарного ударного генератора.

Моделирование двухконденсаторного электретного непланарного ударного генератора. Механическая и электрическая схемы генератора приведены на рис. 2. Передача энергии вибраций корпуса на массу m осуществляется как через пружину k , так и

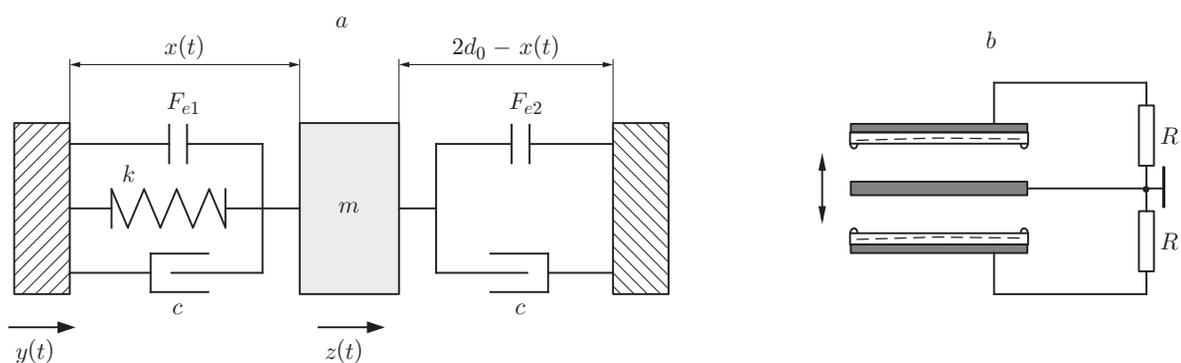


Рис. 2. Схемы двухконденсаторного электретного непланарного ударного генератора: a — механическая, b — электрическая

при соударении массы с ограничителями, закреплёнными на корпусе. Сила инерции, действующая на массу m в соответствии с обозначениями рис. 1, определяется следующим образом:

$$F_I = m \frac{d^2 z}{dt^2} = m \left(\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{d^2 y}{dt^2} \right). \quad (1)$$

Тогда в случае отсутствия ударов данная структура описывается уравнением

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx - F_{e1} + F_{e2} = -m \frac{d^2 y}{dt^2}, \quad (2)$$

где c — коэффициент механического сопротивления; F_{ei} — сила притяжения электрического поля (индексы $i = 1, 2$ обозначают притяжение к пластинам первого и второго конденсаторов):

$$F_{ei} = Q_{si}^2 S / 2\epsilon_0. \quad (3)$$

Здесь

$$Q_{Si}(t) = -C_i(t)(V_i(t) + V_P) \quad (4)$$

— заряд, индуцированный на подвижном электроде, где $C_i(t)$ — удельная ёмкость структуры металл—электрет—зазор—подвижный электрод; $V_i(t)$ — напряжение на структуре (или на нагрузке);

$$V_P = Q_P / C_F \quad (5)$$

— характеристический потенциал электрета, Q_P — плотность поверхностного заряда электрета, $C_F = \epsilon\epsilon_0/d$ — удельная ёмкость слоя диэлектрика (электрета), $\epsilon\epsilon_0$ — его диэлектрическая проницаемость, d — толщина слоя.

Уравнение, описывающее изменение во времени ёмкости и заряда устройства для каждого из двух конденсаторов структуры, имеет вид [9, 11, 13]

$$\frac{d}{dt} [C_i(t)(V_i(t) + V_P)] = -\frac{V_i(t)}{R}, \quad (6)$$

где R — сопротивление нагрузки.

При наличии ограничителей, схематически указанных на рис. 2, b , величина воздушного зазора в двухконденсаторной структуре находится в пределах от d_{\min} до $2d_0 - d_{\min}$, где $2d_0$ — зазор между поверхностями двух электретов, d_{\min} — высота ограничителей.

Учитывая законы сохранения импульса и энергии, нетрудно показать, что при соударении подвижного электрода с ограничителями скорость вылета подвижной пластины после удара v_1 связана со скоростью движения корпуса v и скоростью ПП до удара v'_1 следующим образом:

$$v_1 = 2v - v'_1 = \frac{dy}{dt} + \frac{dx}{dt}, \quad (7)$$

и приращение кинетической энергии ПП при соударении с корпусом примет вид

$$\Delta W = 2mv(v - v'_1) = 2m \frac{dy}{dt} \frac{dx}{dt}. \quad (8)$$

Кинетическая энергия ПП до и после удара выражается как

$$W_- = \frac{m}{2}(v'_1)^2 = \frac{m}{2} \left(\frac{dy}{dt} - \frac{dx}{dt} \right)^2, \quad (9)$$

$$W_+ = \frac{m}{2}(2v - v'_1)^2 = \frac{m}{2} \left(\frac{dy}{dt} + \frac{dx}{dt} \right)^2. \quad (10)$$

Особенности движения подвижной пластины с учётом соударений. Проанализируем вначале особенности движения подвижной пластины генератора в условиях отсутствия сил притяжения электрического поля и сил упругости пружины.

На рис. 3 показана траектория движения ПП в зазоре между ограничителями размером 1,8 мкм при синусоидальных колебаниях корпуса амплитудой 0,5 мм. В этих условиях ПП отскакивает при ударах либо о нижний, либо о верхний ограничитель в зависимости от направления ускорения корпуса. После соударения ПП движется с постоянной скоростью v_1 относительно неподвижного наблюдателя, а корпус устройства перемещается с ускорением

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d^2y(t)}{dt^2}. \quad (11)$$

Поэтому корпус всегда «догоняет» ПП, происходит последующее их соударение, и ПП совершает ударные колебания с частотой, намного превышающей частоту колебаний корпуса.

Как отмечалось выше, генератор описывается классическими уравнениями движения с диссипацией. Однако численное решение этих уравнений разностными методами показывает, что поведение системы аperiodично, смещение ПП также аperiodично относительно корпуса даже при отсутствии влияния сил притяжения электрического поля и система ведёт себя стохастическим образом, т. е. решение имеет ненулевую энтропию. Такого рода движения, называемые «странным аттрактором», характерны для многих механических

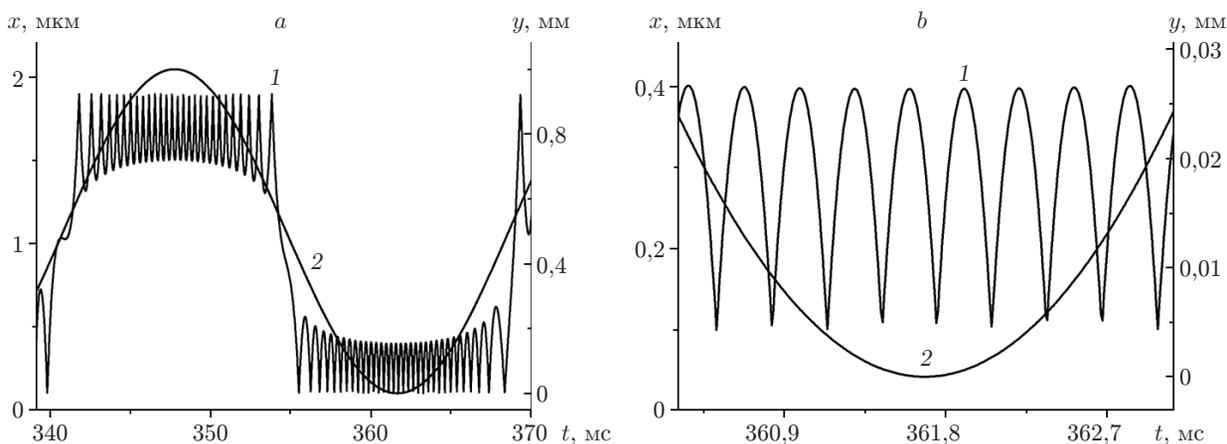


Рис. 3. Траектория смещения подвижной подложки относительно корпуса $x(t)$ (кривые 1) при синусоидальном воздействии источника вибраций $y(t)$ (кривые 2) в двухконденсаторном ударном генераторе при отсутствии генерации ($V_P = 0$): один период колебаний (а) и увеличенный фрагмент траектории (б). Параметры: $f = 36$ Гц, $m = 0,1$ г, максимальное ускорение корпуса $a_{\max} = 2,5g$, $S = 1$ мм², $d_0 = 1$ мкм, $d_{\min} = 0,1$ мкм

систем с периодическим возбуждением (см., например, [43]). Поэтому величины электрической мощности P определялись усреднением за несколько периодов колебаний внешнего источника (5–10 и более).

Опишем движение ПП. Принимая, что два соседних соударения происходят в моменты времени t_1 и t_0 , получаем выражения для движения корпуса, ПП и смещения ПП относительно корпуса соответственно:

$$y(t) = y(t_0) + \int_{t_0}^t v(t) dt, \quad (12)$$

$$z(t) = z(t_0) + v_1(t - t_0), \quad (13)$$

$$x(t) = v_1(t - t_0) - \int_{t_0}^t v(t) dt. \quad (14)$$

Полагая, что в интервале времени между двумя соударениями скорость корпуса постоянна (это справедливо при достаточно большой частоте соударений), получаем

$$v_1 - v = a\Delta t/2, \quad (15)$$

где $\Delta t = t_1 - t_0$ и в соответствии с (7) приращение скорости ПП при ударе будет иметь вид

$$\Delta v_1 = v_1 - v'_1 = a\Delta t. \quad (16)$$

Рассмотренные выше закономерности проиллюстрированы на рис. 4, из которого следует, что использованное нами приближение с хорошей точностью описывает задачу соударений ПП с корпусом при движении корпуса с ускорением независимо от конкретного вида функции $a(t)$.

Характер движения ПП определяется ударами об ограничители, которые возникают только при смещении корпуса, превышающем расстояние между ограничителями. При этом ПП вовлекается в движение только при соударении поверхностей и частота ударов значительно превышает частоту вибраций корпуса. Если расстояние между ограничителями много меньше амплитуды колебаний корпуса, то смещение ПП относительно корпуса $x(t)$ повторяет движение корпуса $y(t)$ (см. рис. 4, кривые 1 и 2).

Оценим вырабатываемую вибратором механическую мощность, определяющую предел максимальной электрической мощности микрогенератора. Поскольку колебания корпуса переходят при соударениях в кинетическую энергию движения ПП, механическая мощность P_{imp} будет равна средней кинетической энергии, получаемой за период колебаний корпуса \bar{W}_{imp} , умноженной на частоту колебаний f :

$$\bar{W}_{\text{imp}} = \frac{m}{2} \bar{v}^2 = \frac{m}{4} Y_0^2 \omega^2, \quad (17)$$

$y(t) = Y_0 \sin(\omega t)$ — закон колебаний корпуса, Y_0 — амплитуда этих колебаний, $\omega = 2\pi f$ — угловая частота. Тогда

$$P_{\text{imp}} = \frac{m}{8\pi} Y_0^2 \omega^3. \quad (18)$$

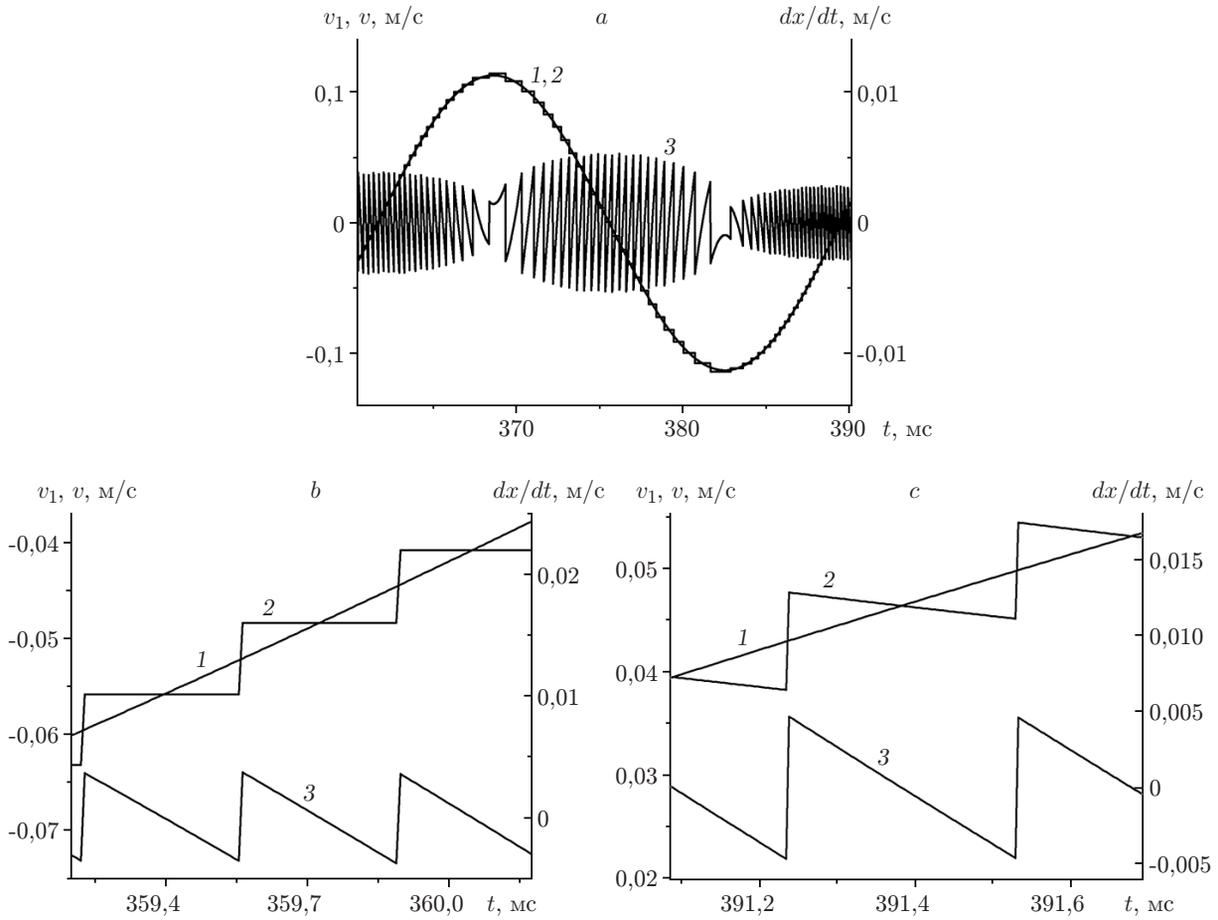


Рис. 4. Скорости движения корпуса (кривые 1), подвижной пластины (кривые 2) генератора и dx/dt (кривые 3): при $V_P = 0$ (a, b) и $V_P = 7,9$ В (c); остальные параметры, как на рис. 3

Для вибратора на основе системы масса—пружина, работающего в общем случае в режиме вынужденных колебаний и используемого при создании микрогенераторов, механическая энергия, генерируемая за период, оценивается как [44]

$$W_v = ma_{\max}\Delta x_{\max} = mY_0\omega^2\Delta x_{\max}, \quad (19)$$

где Δx_{\max} — максимальная величина смещения ПП относительно корпуса. Отношение величин механических мощностей ударного и вибрационного микрогенераторов запишем в виде

$$P_{\text{imp}}/P_v = Y_0/4\Delta x_{\max}. \quad (20)$$

Полагая, что электрические мощности генераторов пропорциональны механическим, нетрудно сделать вывод, что при достаточно больших амплитудах вибросмещений мощность ударного генератора значительно превосходит мощность классического вибрационного генератора.

В режиме генерации электрической энергии при наличии электрического поля электрета и сопротивления нагрузки скорость $v_1(t)$ уменьшается во времени в промежутке между двумя ударами, соответственно модифицируется и кривая dx/dt (рис. 4, c).

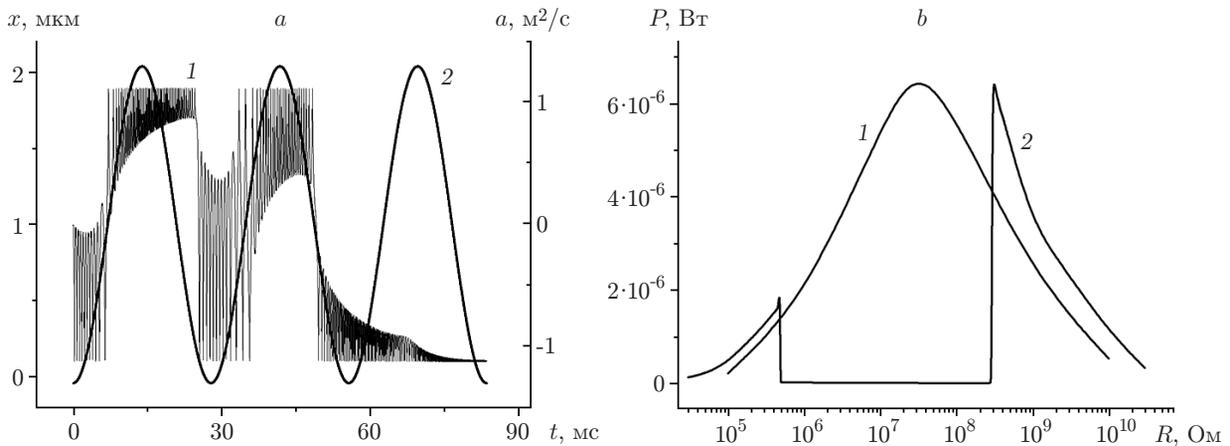


Рис. 5. Иллюстрация эффекта залипания подвижной пластины генератора ($f = 36$ Гц): a — процесс залипания (кривая 1 — $x(t)$, кривая 2 — ускорение корпуса $a(t)$) при $m = 0,1$ г, $a_{\max} = 2,5g$, $S = 1$ мм², $d_{\min} = 0,1$ мкм, $d_0 = 1$ мкм, $V_P = 11,3$ В, $R = 3 \cdot 10^4$ Ом; b — нагрузочные характеристики генератора при отсутствии (кривая 1, $V_P = 101$ В) и при наличии (кривая 2, $V_P = 135$ В) области залипания при $m = 1$ г, $d_{\min} = 1$ мкм, $d_0 = 10$ мкм, $S = 1$ мм²

Характеристики электретного непланарного генератора и их оптимизация. Из элементарных соображений следует, что при уменьшении расстояния между пластинами генератора частота ударов возрастает. Так как при каждом ударе осуществляется преобразование энергии, то следует ожидать и соответствующего увеличения генерируемой мощности. Однако при уменьшении межэлектродного зазора резко возрастают электростатические силы притяжения подвижного электрода, и он может необратимо притянуться к поверхности ограничителей электрическим полем электрета. В начальном состоянии этому притяжению (залипанию) препятствует только сила упругости пружины подвески. Так как в рассматриваемом нами случае пружина слаба, то за исключением положения неустойчивого равновесия ПП посередине между поверхностями электретов эта ПП в начальном состоянии практически всегда лежит на ограничителях одного из электродов. Разделение таких поверхностей происходит при условии, если механическая сила инерции ПП $F_I = ma$ превышает силу притяжения поля, определяемую из выражения (3) с учётом (4) в условиях $V = 0$.

Начало вибраций корпуса приводит к ударам ПП об ограничители, и при каждом ударе генерируется порция электрической энергии. Так как генерация электрической энергии идёт за счёт преобразования кинетической энергии движения ПП, то скорость её соударений с ограничителями постепенно (с каждым ударом) уменьшается, что может привести к залипанию.

Данный эффект проиллюстрирован на рис. 5, a . Чем больше потери механической энергии, расходуемой на генерацию электрической энергии в нагрузке R , тем выше вероятность залипания — этим и объясняется появление области срыва генерации при оптимальных величинах нагрузок (рис. 5, b , кривая 2). При уменьшении величины электретного заряда указанный срыв генерации не проявляется (кривая 1), а величина максимальной генерируемой мощности изменяется незначительно.

С увеличением коэффициента k в ударном генераторе возможен рост вырабатываемой мощности за счёт повышения электретного заряда, поскольку сила натяжения пружины противодействует залипанию (рис. 6, a). В частности, при некоторых достаточно больших значениях электретного заряда генерация при слабой упругости подвески отсутствует, появляясь с увеличением k , но при дальнейшем его повышении генерация практически

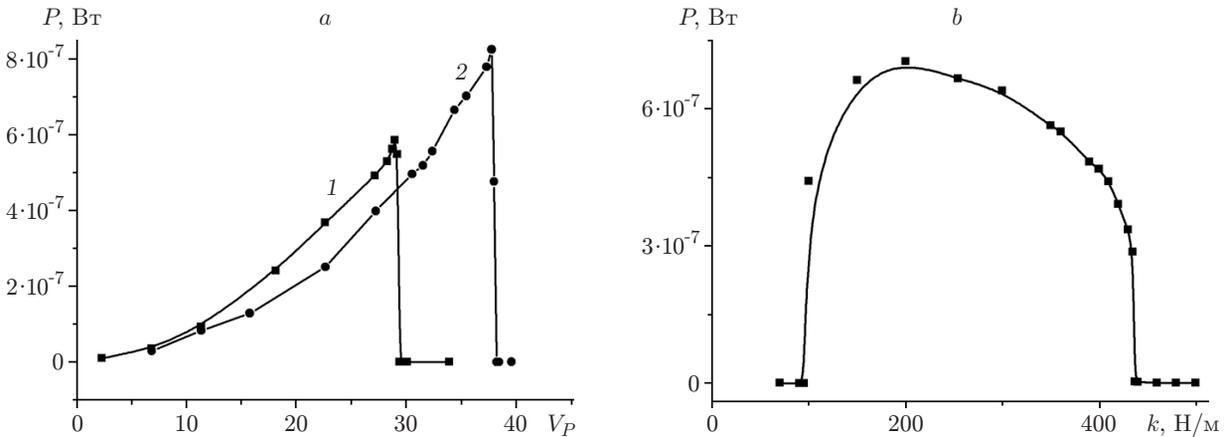


Рис. 6. Иллюстрация влияния коэффициента k на мощность генератора (при $m = 0,1$ г, $a_{\max} = 2,5g$, $S = 1$ мм², $d_{\min} = 1$ мкм, $d_0 = 10$ мкм): a — зависимость мощности от встроенного заряда (кривая 1 — $k = 0$, кривая 2 — $k = 200$ Н/м); b — зависимость мощности от жёсткости пружины ($V_P = 33,9$ В)

вновь исчезает, поскольку в этой области ПП совершает вынужденные колебания малой амплитуды и удары отсутствуют (рис. 6, b). Область возможных для генерации энергии значений k соответствует выражению

$$f_{\text{imp}} < f_R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \tag{21}$$

где f_{imp} — частота соударений ПП с ограничителями, f_R — резонансная частота.

Зависимость мощности ударного генератора от нагрузки имеет типичный вид с максимумом мощности $P = P_{\max}$ при оптимальных величинах R (рис. 7, a). Зависимость мощности генерируемой энергии от расстояния между неподвижными пластинами также имеет максимальное значение (рис. 7, b). Можно отметить, что увеличение k даёт относи-

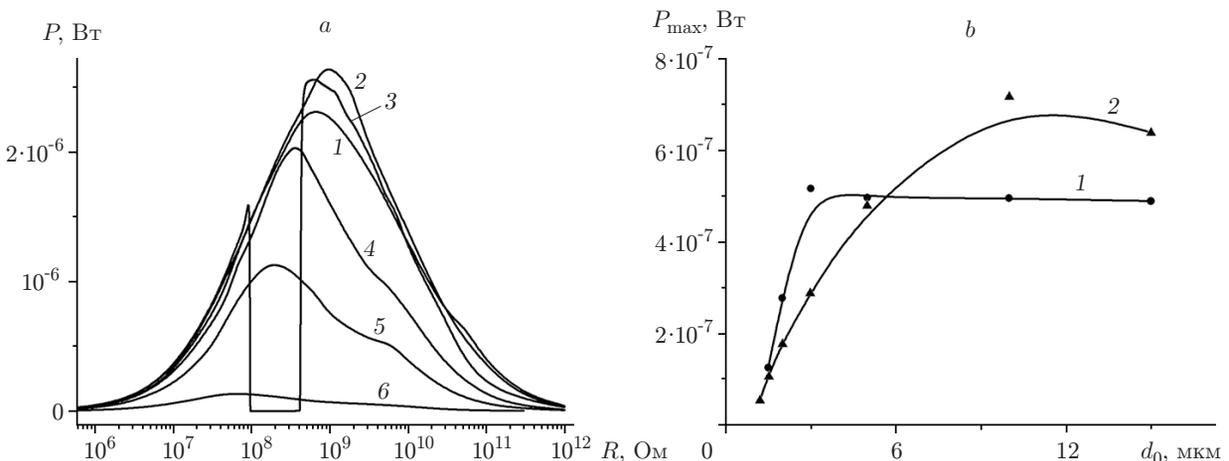


Рис. 7. Мощности, развиваемые ударным генератором (при $m = 0,1$ г, $a_{\max} = 2,5g$, $S = 1$ мм²): a — нагрузочные характеристики генератора ($V_P = 271$ В, $d_{\min} = 10$ мкм, $k = 0$, кривая 1 — $d_0 = 100$, 2 — 60, 3 — 40, 4 — 20, 5 — 15, 6 — 11 мкм); b — зависимость максимальной мощности от зазора d_0 (кривая 1 — $k = 0$, $V_P = 27,1$ В; 2 — $k = 2 \cdot 10^2$ Н/м, $V_P = 36,1$ В)

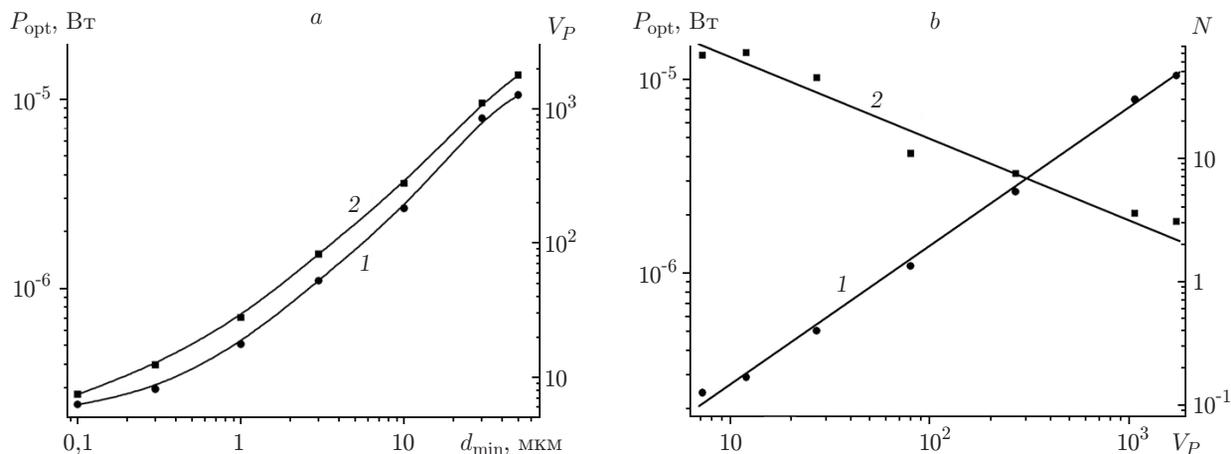


Рис. 8. Оптимизация мощности генератора (при $m = 0,1$ г, $a_{max} = 2,5g$, $S = 1$ мм², $f = 36$ Гц, $k = 0$): *a* — зависимость оптимальной мощности генератора (кривая 1) от величины минимального зазора при соответствующем увеличении V_P (кривая 2); *b* — соответствующее поведение P_{opt} (кривая 1) и количества ударов за период возбуждения N (кривая 2) в зависимости от V_P

тельно небольшой прирост максимальной мощности генератора, поскольку с повышением жёсткости пружины происходит прекращение ударов ПП об ограничитель.

Анализ зависимости величины оптимизированной мощности P_{opt} , определяемой по максимумам зависимостей P_{max} от d_0 , подобных представленным на рис. 7, *b*, от величины минимального зазора между ПП и поверхностью электрета (рис. 8, *a*) показывает, что для достижения высоких величин удельных генерируемых мощностей в ударном генераторе необходимо увеличивать d_{min} (кривая 1). Рост минимального зазора даёт возможность увеличить электретный заряд V_P (кривая 2), при этом величина P_{opt} повышается с ростом V_P , но не квадратично, так как величина ёмкости структуры уменьшается обратно пропорционально увеличению d_{min} . Одновременно снижается частота соударений и соответственно количество ударов N за время внешнего воздействия (рис. 8, *b*). Однако потери мощности за счёт снижения частоты преобразований энергии при уменьшении частоты ударов f_{imp} компенсируются увеличением доли кинетической энергии, преобразуемой в электрическую при каждом ударе.

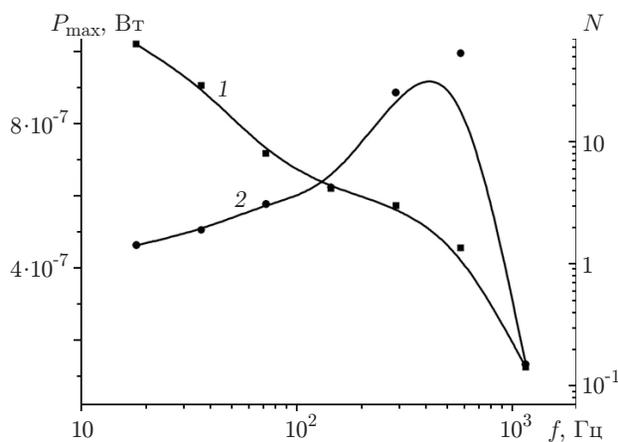


Рис. 9. Зависимость максимальной мощности (кривая 1) и числа ударов (кривая 2) за период возбуждения от частоты внешних вибраций при $m = 0,1$ г, $a_{max} = 2,5g$, $S = 1$ мм², $d_{min} = 1$ мкм, $d_0 = 10$ мкм, $V_P = 27,1$ В

Для частотной зависимости генерируемой мощности при фиксированном ускорении a_{\max} (рис. 9) характерен максимум в области критической частоты, при которой частота ударов $f_{\text{имп}}$ становится приблизительно равной удвоенной частоте возбуждения f . Механизм возникновения этого максимума связан с увеличением доли кинетической энергии, передаваемой ПП при уменьшении N . Для $N = 2$ эта энергия максимальна, так как она определяется не среднеквадратичным значением скорости $v(t)$, как в оценке (18), а её максимальным значением v_{\max} , что и даёт двукратное увеличение мощности.

Заключение. Проведённый анализ непланарных ударных генераторов показал, что наиболее существенным их преимуществом в сравнении с классическими конструкциями микрогенераторов, работа которых основана на механическом резонансе, является возможность утилизации энергии механических колебаний в широком диапазоне частот.

Отметим, что для работы такого генератора существенно наличие двух ограничителей (условно верхнего и нижнего (см. рис. 2, *b*)), так как при отсутствии одного из них и при слабой пружине подвижный электрод может смещаться на расстояние, значительно превышающее высоту начального положения d_0 , что приведёт к снижению генерируемой мощности. Чтобы механическая мощность при ударах о второй ограничитель более эффективно использовалась для генерации энергии, на его поверхности необходимо также разместить заряженный электрет, но подключённый к другой нагрузке (см. рис. 2, *b*).

Показано, что по сравнению с другими непланарными генераторами, работающими, как правило, в режиме вынужденных колебаний и при отсутствии ударов подвижной подложки об ограничители (или поверхность электрета), предложенная конструкция даёт существенный выигрыш в величине генерируемой удельной мощности. Действительно полагая, что электрическая мощность пропорциональна механической, получаем достаточно точное описание соотношения указанных мощностей формулой (20), из которой следует, что рассмотренный ударный генератор всегда обеспечивает выигрыш по генерируемой мощности. Например, при $d_0 = 1$ мкм и $Y_0 = 0,5$ мм, считая $\Delta x_{\max} \approx d_0$, имеем $P_{\text{имп}}/P_v \approx 125$.

Установлено, что величина удельной электрической мощности описанного генератора в области виброускорений порядка 1–5*g* превышает максимальную мощность известных конструкций планарных генераторов (порядка 10 мВт/см²), достигая 1 мВт/см² при величине максимальной утилизируемой механической мощности порядка 2,5 мВт/см².

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Harb A.** Energy harvesting: State-of-the-art // *Renewable Energy*. 2011. **36**, N 10. P. 2641–2654.
2. **Zhou G., Huang L., Li W., Zhu Zh.** Harvesting ambient environmental energy for wireless sensor networks: a survey // *Journ. Sensors*. 2014. **2014**. 815467.
3. **Roundy S., Wright P. K., Rabaey J.** A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes // *Comput. Commun.* 2003. **26**, N 11. P. 1131–1144.
4. **Mitcheson P. D., Miao P., Stark B. H. et al.** MEMS electrostatic micropower generator for low frequency operation // *Sensors Actuators*. 2004. **115**, N 2–3. P. 523–529.
5. **Cook-Chennault K. A., Thambi N., Sastry A. M.** Powering MEMS portable devices — a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems // *Smart Mater. Struct.* 2008. **17**, N 5. 043001.
6. **Lueke J., Moussa W. A.** MEMS-based power generation techniques for implantable biosensing applications // *Sensors*. 2011. **11**, N 2. P. 1433–1460.
7. **Багинский И. Л., Косцов Э. Г.** Анализ возможности создания микроэлектронного электростатического генератора энергии // *Автоматрия*. 2002. № 1. С. 107–122.

8. **Багинский И. Л., Косцов Э. Г.** Микроэлектронные высокоэнергоемкие генераторы энергии // Микросистемная техника. 2002. № 6. С. 24–28.
9. **Багинский И. Л., Косцов Э. Г., Соколов А. А.** Электростатические микрогенераторы энергии с высокой удельной мощностью // Автометрия. 2010. **46**, № 6. С. 90–105.
10. **Багинский И. Л., Камышлов В. Ф., Косцов Э. Г.** Исследование особенностей функционирования двухконденсаторного электростатического генератора // Автометрия. 2011. **47**, № 6. С. 100–120.
11. **Baginsky I. L., Kostsov E. G.** Modelling and simulation of MEMS electret vibration-driven energy harvester // Intern. Rev. Modelling Simulations (IREMOS). 2013. **В6**, N 1. P. 203–213.
12. **Baginsky I. L., Kostsov E. G., Kamishlov V. F.** Two-capacitor electrostatic microgenerators // Engineering. 2013. **5**, N 11a. P. 9–18.
13. **Baginsky I. L., Kostsov E. G.** High energy density capacitance microgenerators // Small-scale Energy Harvesting /Ed. M. Lallart. France: InTech, 2012. Ch. 4 P. 35–59.
14. **Тэнэеску Ф., Крамарюк Р.** Электростатика в технике. М.: Энергия, 1980. 296 с.
15. **Губкин А. Н.** Электреты. М.: Наука, 1978. 192 с.
16. **Электреты** /Под ред. Г. Сесслера. М.: Мир, 1983. 487 с.
17. **Chiu Y., Kuo C. T., Chu Y. S.** Design and fabrication of a micro electrostatic vibration-to-electricity energy converter // Microsyst. Techn. 2007. **13**, N 11–12. P. 1663–1669.
18. **Basset P., Galayko D., Mahmood Paracha A. et al.** A bath fabricated and electret-free silicon electrostatic vibration energy harvester // Journ. Micromech. Microeng. 2009. **19**, N 11. 115025.
19. **Hoffmann D., Folkmer B., Manoli Y.** Fabrication, characterization and modelling of electrostatic micro-generators // Journ. Micromech. Microeng. 2009. **19**, N 9. 094001.
20. **Kiziroglou M. E., He C., Yeatman E. M.** Rolling rod electrostatic microgenerator // IEEE Trans. Industrial Electron. 2009. **56**, N 4. P. 1101–1108.
21. **Roundy S., Wright P. K., Pister K. S. J.** Micro-electrostatic vibration-to-electricity converters // Proc. IMECE. New Orleans, USA, November 17–22, 2002. P. 1–10.
22. **Naruse Y., Matsubara N., Mabuchi K. et al.** Electrostatic micro power generation from low-frequency vibration such as human motion // Journ. Micromech. Microeng. 2009. **19**, N 9. 094002.
23. **Okamoto H., Suzuki T., Mori K. et al.** The advantages and potential of electret-based vibration-driven micro energy harvesters // Intern. Journ. Energy Res. 2009. **33**, N 13. P. 1180–1190.
24. **Boland J., Chao Y. H., Suzuki Y. et al.** Micro electret power generator // Proc. MEMS'03. Kyoto, Japan, Jan. 19–23, 2003. P. 538–541.
25. **Masaki T., Sakurai K., Yokoyama T. et al.** Power output enhancement of a vibration-driven electret generator for wireless sensor applications // Journ. Micromech. Microeng. 2011. **21**, N 10. 104004.
26. **Ma W., Zhu R., Rufer L. et al.** An integrated floating-electrode electric microgenerator // Journ. Microelectromech. System. 2007. **16**, N 1. P. 29–37.
27. **Mahmoud M. A., El-Saadany E. F., Mansour R. R.** Planar electret based electrostatic micro-generator // The Sixth International Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications. Berkeley, USA, Nov. 29–Dec. 1, 2006. P. 223–226.
28. **Lo H., Tai Y.-Ch.** Parylene-based electret power generators // Journ. Micromech. Microeng. 2008. **18**, N 10. 104006.
29. **Suzuki Y.** Recent progress in MEMS electret generator for energy harvesting // IEEJ Trans. Electr. Electron Eng. 2011. **6**, N 2. P. 101–111.

30. **Sakane Y., Suzuki Y., Kasagi N.** The development of a high-performance perfluorinated polymer electret and its application to micro power generation // Journ. Micromech. Microeng. 2008. **18**, N 10. 104011.
31. **Suzuki Y., Miki D., Edamoto M., Honzumi M.** A MEMS electret generator with electrostatic levitation for vibration-driven energy-harvesting applications // Journ. Micromech. Microeng. 2010. **20**, N 10. 104002.
32. **Grachevski S. M., Funkenbush P. D., Jia Z. et al.** Design and modeling of a micro-energy harvester using embedded charge layer // Journ. Micromech. Microeng. 2006. **16**, N 2. P. 235–241.
33. **Mizuno M., Chetwynd P. G.** Investigation of resonance microgenerator // Journ. Micromech. Microeng. 2003. **13**, N 2. P. 209–216
34. **Guillemet R., Basset P., Galayko D. et al.** Design optimization of an out-of-plane gap-closing electrostatic vibration energy harvester (VEH) with a limitation on the output voltage // Analog Integr. Circ. Sig. Process. 2012. **71**, N 1. P. 39–47.
35. **Miao P., Holmes A. S., Yeatman E. M. et al.** Micro-machined variable capacitors for power generation // Electrostatics 2003. N. Y.: Taylor & Francis Group, 2004. N 178. P. 53–58
36. **Wang F., Hansen O.** Electrostatic energy harvesting device with out-of-the-plane gap closing scheme // Proc. of the Transducers 2013. Barcelona, Spain, 16–20 June, 2013. P. 2237–2240.
37. **Miao P., Mitcheson P. D., Holmes A. S. et al.** MEMS inertial power generators for biomedical applications // Microsystem Technol. 2006. **12**, N 10–11. P. 1079–1083.
38. **Tvedt L. G. W., Blystad L.-C. J., Halvorsen E.** Simulation of an electrostatic energy harvester at large amplitude narrow and wide band vibrations // Proc. DTIP-2008. Nice, France, 9–11 April, 2008. P. 296–301.
39. **Le C. P., Halvorsen E.** Microscale energy harvesters with nonlinearities due to internal impacts // Small-Scale Energy Harvesting /Ed. M. Lallart. France: InTech, 2012. Ch. 11. P. 265–282.
40. **Basset P., Galayko D., Cottone F. et al.** Electrostatic vibration energy harvester with combined effect of electrical nonlinearities and mechanical impact // Journ. Micromech. Microeng. 2014. **24**, N 3. 035001.
41. **Yukse N. S., Zhu J., Feng Z. C. et al.** MEMS capacitors with dual cavity for power harvesting // Proc. SPIE. 2012. **8377**. 83770P.
42. **Lin J., Zhu J., Feng Z. et al.** Two-cavity MEMS capacitive power scavenger // Proc. SPIE. 2012. **8377**. 83770O.
43. **Karami M. A., Inman D. J.** Hybrid rotary-translational energy harvester for multi-axis ambient vibrations // Proc. of the ASME Conf. on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems (SMASIS-2012). Georgia, USA, 19–21 September, 2012. P. 739–745.
44. **Yeatman E. M., Mitcheson P. D., Holmes A. S.** Micro-engineered devices for motion energy harvesting // Proc. IEEE IEDM. 2007. P. 375–378.

Поступила в редакцию 23 июня 2014 г.
