

УДК 621.319.34

**МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ
НА ОСНОВЕ ДУПЛИКАТОРА БЕННЕТА С ОДНИМ
ПЕРЕМЕННЫМ КОНДЕНСАТОРОМ****В.П. Драгунов¹, Д.Ю. Галайко², В.Ю. Доржиев¹, Ф. Бассэ³**¹*Новосибирский государственный технический университет*²*Университет UPMC-Сорбонна, Париж, Франция*³*ESIEE-Paris, Париж, Франция*

В связи с развитием беспроводных технологий и тенденцией к миниатюризации обостряется проблема ограниченного ресурса применяемых в настоящее время автономных источников питания для микроэлектронных устройств – батарей и аккумуляторов. Одним из перспективных решений данной проблемы представляется подзаряд компактного аккумулятора с помощью электростатического микроэлектромеханического преобразователя энергии механических колебаний, присутствующих в окружающей среде. Основным недостатком большинства описанных в литературе преобразователей, ограничивающих их применение, является наличие в их составе переключателей со схемами управления, потребляющими значительную энергию, и труднореализуемых в рамках интегральной технологии индуктивных элементов. В данной статье проводится анализ работы микроэлектромеханического преобразователя, лишенного данного недостатка. Определены параметры, необходимые для передачи преобразованной энергии механических колебаний в источник питания. Получены аналитические выражения, позволяющие оценить энергию, передаваемую в источник питания за один цикл преобразования. Передаваемую энергию можно увеличить путем увеличения напряжения источника питания, однако увеличение напряжения может привести к схлопыванию электродов переменного конденсатора. Проведен анализ условий, при которых проявляется эффект схлопывания электродов переменного конденсатора со встречно-штыревой конструкцией электродов с учетом начального смещения и скорости подвижного электрода. Представлены результаты экспериментальных исследований, в которых средний ток подзаряда источника питания составил 0,134 мкА.

Ключевые слова: МЭМС, эффект схлопывания, преобразование энергии, равновесное состояние, микромеханический конденсатор, начальные условия.

Введение

В настоящее время, в период активного развития беспроводных технологий и повсеместной тенденции к миниатюризации, обострилась проблема ограниченного ресурса применяемых автономных источников питания – батарей и аккумуляторов. Одним из перспективных решений данной проблемы, как показывает анализ, является подзаряд компактного аккумулятора с помощью микроэлектромеханического преобразователя энергии механических колебаний, присутствующих в окружающей среде, в электрическую энергию.

Существует несколько типов микроэлектромеханических преобразователей, основными из которых являются пьезоэлектрические, электромагнитные и электростатические. Причем наиболее совместимыми с интегральной технологией являются электростатические преобразователи, что делает возможным их изготовление в одном технологическом цикле с устройством-потребителем и улучшает технико-экономические показатели системы.

Преобразование энергии электростатическими преобразователями осуществляется за счет совершения работы внешней механической силой, действующей против силы притяжения электродов заряженного переменного конденсатора. Для

последующей передачи преобразованной энергии в источник питания требуется соответствующая электрическая схема.

В литературе описано множество электрических схем электростатических преобразователей, предназначенных для передачи преобразованной энергии в источник питания [1–4]. Однако большинство из них содержит в своем составе переключатели со схемами управления, которые потребляют энергию, сравнимую или даже превышающую передаваемую в источник питания, а также трудно реализуемый в рамках интегральной технологии индуктивный элемент.

В работе [5] предложена электрическая схема электростатического преобразователя на основе дубликатора Беннета с двумя переменными конденсаторами с изменяющейся в противофазе емкостью, не содержащая переключателей и индуктивных элементов. В [6, 7] приведены анализ ее работы и результаты экспериментальных исследований с макроконденсаторами.

Анализ литературы показал, что исследования работы преобразователя на основе дубликатора Беннета с микроэлектромеханическими конденсаторами не проводились. В то же время известно, что в работе микроэлектромеханических систем (МЭМС) наблюдаются специфические особенности. Так, например, в МЭМС особое значение приобретают эффекты, связанные с электромеханическими взаимодействиями. Более того, как правило, именно электромеханические взаимодействия ограничивают предельно допустимые параметры и предельно достижимые характеристики системы. Анализ литературы также показывает, что в большинстве случаев два переменных конденсатора с изменяющейся в противофазе емкостью в рамках интегральной технологии изготовить не удастся. В то же время остается неясным, будет ли данная МЭМС нормально функционировать с одним переменным конденсатором.

В данной статье проводится анализ работы микроэлектромеханического преобразователя на основе дубликатора Беннета с одним переменным конденсатором. Проводится оценка допустимого напряжения источника питания. Приводятся результаты экспериментальных исследований преобразователя с кремниевым микроэлектромеханическим конденсатором, изготовленным по интегральной технологии.

1. Анализ работы преобразователя

Электрическая схема преобразователя на основе дубликатора Беннета с одним переменным конденсатором представлена на рис. 1. Она содержит источник питания (V_0), три диода ($D_1 - D_3$), один постоянный (C_S) и один переменный (C_V) конденсатор. Нагрузка (R) подключается параллельно источнику питания, в данной работе ее учитывать не будем.

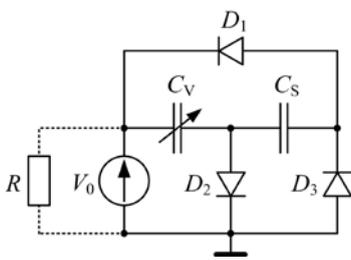


Рис. 1 – Электрическая схема преобразователя на основе дубликатора Беннета с одним переменным конденсатором

Fig. 1 – Electrical circuit of energy harvester based on a Bennet's doubler with single variable capacitor

Проведем анализ работы преобразователя, считая, что диоды идеальные (обратные токи и прямые падения напряжения равны нулю), а емкость переменного конденсатора изменяется в пределах от минимального (C_{\min}) до максимального (C_{\max}) значения с постоянной частотой f .

Предположим, что в начальный момент времени все конденсаторы разряжены, емкость конденсатора C_V максимальна, а источник питания отключен от схемы. Тогда при подключении

источника питания конденсатор C_V по цепи $V_0 \rightarrow C_V \rightarrow D_2$ зарядится до напряжения V_0 . Затем при уменьшении емкости C_V начнет разряжаться в источник питания, создавая ток, текущий по цепи $C_V \rightarrow V_0 \rightarrow D_3 \rightarrow C_S$ и заряжающий конденсатор C_S , а при увеличении емкости C_V по цепи $C_S \rightarrow D_1 \rightarrow C_V$ зарядится от конденсатора C_S . После нескольких таких циклов преобразования схема перейдет в установившийся режим работы, в котором суммарный заряд конденсаторов ($V_0(C_S + C_{\max})$) не изменяется, а источник питания периодически подзаряжается.

На рис. 2 представлена qV -диаграмма цикла преобразования в установившемся режиме, отражающая зависимость заряда q на переменном конденсаторе от напряжения на нем. Точка A соответствует моменту, когда емкость C_V максимальна, точка C – моменту, когда емкость C_V минимальна, а точки B и D соответствуют моментам открывания диодов D_3 и D_1 , соответственно. Напряжения на конденсаторе C_V , при которых открываются диоды, могут быть оценены с помощью выражений:

$$V_1 = V_0 \frac{C_S - C_{\min} + C_{\max}}{C_S + C_{\min}},$$

$$V_2 = V_0 \frac{2C_S + C_{\max}}{C_S + C_{\min}}.$$

Площадь параллелограмма $ABCD$ соответствует энергии, передаваемой в источник питания за один цикл преобразования. Эта энергия может быть оценена с помощью выражения

$$E = V_0^2 C_S \frac{1 - 2/\eta}{C_S/C_{\max} + 1/\eta}, \tag{1}$$

где $\eta = C_{\max}/C_{\min}$ – глубина модуляции емкости переменного конденсатора. Отметим, что выражение (1) справедливо, только если выполняется условие $\eta > 2$, при $\eta \leq 2$ энергия в источник питания передаваться не будет.

При $C_S \gg C_{\max}$ напряжение на переменном конденсаторе изменяется в пределах от V_0 до $2V_0$, а энергия, передаваемая в источник питания за один цикл преобразования, соответствует площади прямоугольника $ABEF$ (рис. 2). Сравнивая площади фигур $ABEF$ и $ABCD$, видим, что при увеличении емкости C_S передаваемая энергия увеличивается.

На рис. 3 представлена зависимость нормированной энергии $E^* = E/(V_0^2 C_{\max})$ от отношения C_S/C_{\max} . Из рисунка видно, что увеличение отношения C_S/C_{\max} более чем в 10 раз нецелесообразно.

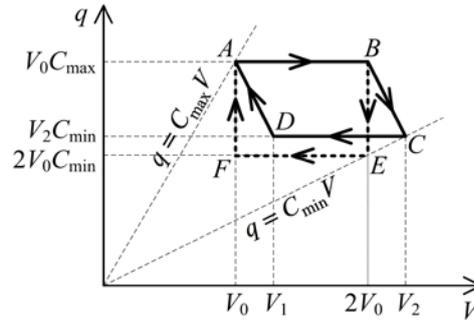


Рис. 2 – qV -диаграмма цикла преобразования
Fig. 2 – qV -diagram of energy harvesting cycle

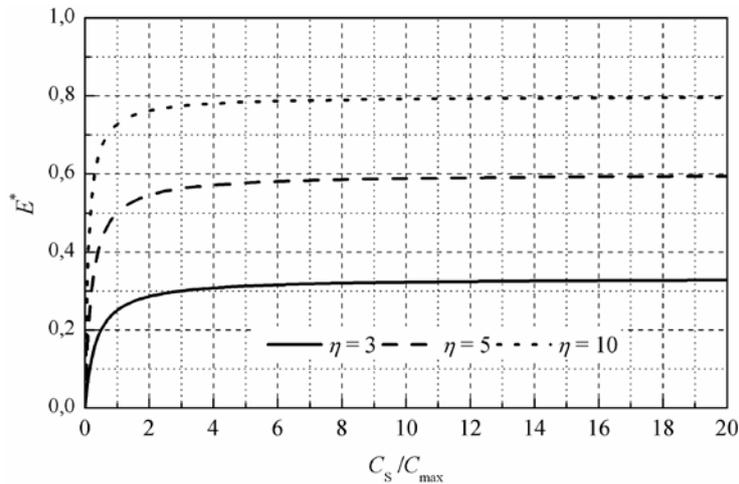


Рис. 3 – Зависимость нормированной энергии от отношения C_S/C_{\max}

Fig. 3 – Normalized energy dependence on ratio C_S/C_{\max}

Мощность преобразователя при $C_S \gg C_{\max}$ может быть оценена с помощью выражения

$$P = V_0^2 C_{\max} f (1 - 2/\eta). \quad (2)$$

Из (2) видно, что мощность преобразователя может быть увеличена путем увеличения V_0 , C_{\max} , f и η . Анализ литературы показывает, что максимальная емкость микроэлектромеханических конденсаторов, как правило, не превышает 200 пФ, а величина $\eta < 5$. Согласно (2) при напряжении источника питания $V_0 = 10$ В и $f = 100$ Гц получаем, что мощность преобразователя составит 1,2 мкВт.

Из (2) следует, что мощность преобразователя может быть увеличена путем увеличения напряжения источника питания, что и используется в работе [6]. Однако при этом возрастает влияние электромеханических взаимодействий, что может привести к проявлению эффекта схлопывания [8–12]. Оценим допустимое напряжение источника питания.

2. Оценка допустимого напряжения источника питания

Электромеханические взаимодействия в МЭМС носят сугубо нелинейный характер [8, 9, 13–15]. Поэтому при анализе работы и оценке максимально достижимых характеристик системы, как правило, ограничиваются определением предельно допустимого напряжения источника питания исходя лишь из условия статического равновесия. При этом не учитываются динамические характеристики системы.

Наиболее сильно влияние эффекта схлопывания проявляется на начальном этапе работы – при включении системы (переходной режим), когда поведение колебательных систем во многом определяется начальными условиями (смещением и скоростью подвижного электрода в момент $t_0 = 0$).

Для оценки допустимого напряжения источника питания проведем анализ влияния начальных условий на поведение одноконденсаторных МЭМС с гребен-

чатой или встречно-штыревой конструкцией электродов [16–18]. При такой конструкции подвижный электрод перемещается между двумя неподвижными электродами, электрически соединенными между собой (рис. 4).

Современные МЭМС, как правило, создаются с использованием технологий микроэлектроники. При этом добротность Q механических частей системы может достигать десятков тысяч [19, 20]. В результате вклад диссипативной составляющей становится существенным за времена порядка сотен и даже тысяч периодов колебаний системы.

Анализируя переходной режим, мы можем ограничиться рассмотрением лишь начального момента времени длительностью всего в несколько периодов собственных колебаний системы, когда диссипативные процессы еще вносят малый вклад. Поэтому в дальнейшем будем предполагать, что на начальном этапе на подвижный электрод действуют только две силы: сила упругости пружины и электростатическая сила. В этом случае уравнение равновесия в линейном приближении для силы упругости [21, 22] может быть представлено в виде

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx = 2\varepsilon_0 \varepsilon S d_0 x \left(\frac{V_0}{d_0^2 - x^2} \right)^2, \quad (3)$$

где m – масса подвижного электрода, k – коэффициент квазиупругой силы, x – величина смещения верхнего электрода от начального положения, d_0 – начальное расстояние между электродами, ε_0 – электрическая постоянная, ε – относительная диэлектрическая проницаемость, S – площадь электрода.

Вводя безразмерные переменные $\lambda = C_0 V_0^2 / 2kd_0^2$, $z = x / d_0$ и $\tau = \omega_0 t$ (здесь $C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon S / d_0$, $\omega_0 = \sqrt{k / m}$), выражение (3) можно представить в виде

$$\frac{d^2 z}{d\tau^2} + z = \frac{4\lambda z}{(1 - z^2)^2}. \quad (4)$$

В этих обозначениях поведение системы определяется одним параметром λ , а уравнение, связывающее λ с координатой положения равновесия \bar{z} , принимает вид

$$\Phi(\bar{z}, \lambda) = \bar{z}(1 - \bar{z}^2)^2 - 4\lambda \bar{z} = 0. \quad (5)$$

Выражение (5) при $\lambda = 1/4$ имеет кратный корень, следовательно, $\lambda = 1/4$ есть бифуркационное значение параметра. Таким образом, если значение λ будет больше $1/4$, то при любых начальных условиях подвижный электрод в конце концов приблизится к неподвижному и произойдет соприкосновение электродов (эффект схлопывания).

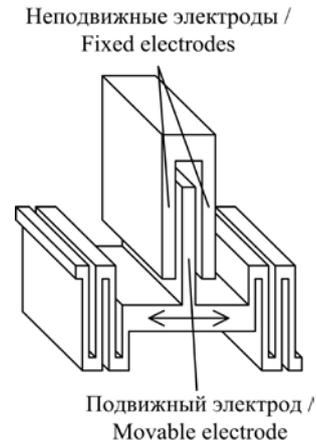


Рис. 4 – Схематическое изображение встречно-штыревой конструкции электродов
Fig. 4 – Schematic view of interdigitated electrode structure

Остается не ясным, будет ли система устойчивой при произвольных начальных условиях, если значение λ меньше $1/4$.

Так как электромеханические взаимодействия в МЭМС носят сугубо нелинейный характер, анализ поведения электромеханической системы, описываемой уравнением (4), при $\lambda \leq 1/4$ проведем с помощью исследования фазовых траекторий [23]. Для этого введем фазовые координаты $v = dz/d\tau$ и $dv/d\tau = 4\lambda \cdot z / (1 - z^2)^2 - z$.

В этих обозначениях уравнение для интегральных кривых принимает вид

$$v^2 = \frac{4\lambda}{1 - z^2} - z^2 + C, \quad (6)$$

здесь C – константа интегрирования.

Уравнение сепаратрисы получим из (6) при условии, что сепаратриса проходит через особую точку типа «седло». При этом уравнение сепаратрисы принимает вид

$$v^2 = \frac{4\lambda}{1 - z^2} - z^2 + 1 - 4\sqrt{\lambda}. \quad (7)$$

Согласно (7) эффект схлопывания может иметь место и при $\lambda \leq 1/4$, если координаты представляющей точки, соответствующие начальным условиям ($z_{\text{нач}}$, $v_{\text{нач}}$), будут находиться вне области, ограниченной соответствующей сепаратрисой.

На рис. 5 приведены интегральные кривые – сепаратрисы, рассчитанные с использованием (7) для нескольких значений λ . Видно, что при увеличении λ особые точки (центр (a) и седло (b) с координатами $(0,0)$ и $(\pm\sqrt{1-2\sqrt{\lambda}},0)$ соответственно) сближаются, область начальных условий, соответствующая периодическим колебаниям, сокращается, и при $\lambda = 1/4$ остается одна особая точка (седло). Такая особая точка соответствует неустойчивому состоянию равновесия. В этом случае при любых начальных условиях подвижный электрод будет двигаться со все возрастающей скоростью по направлению к неподвижному до соприкосновения электродов.

Используя (7), при заданном λ можно установить, какие начальные условия попадают в область, ограниченную соответствующей сепаратрисой, и, следовательно, гарантируют отсутствие эффекта схлопывания. Например, согласно (7) при $v = 0$ эффект схлопывания будет отсутствовать, если начальное смещение $|z| < z_{\text{max}} = \sqrt{1-2\sqrt{\lambda}}$.

На рис. 6 приведены зависимости смещения подвижного электрода от нормированного времени, рассчитанные с использованием (4) при $\lambda = 0,15$, нулевой начальной скорости, но не нулевом начальном смещении.

Видно, что колебательный режим системы наблюдается лишь тогда, когда координата изображающей точки, соответствующая начальным условиям ($z_{\text{нач}}, 0$), находится в области, ограниченной сепаратрисой, соответствующей $\lambda_{sp} = 0,15$ (кривые 2 и 3).

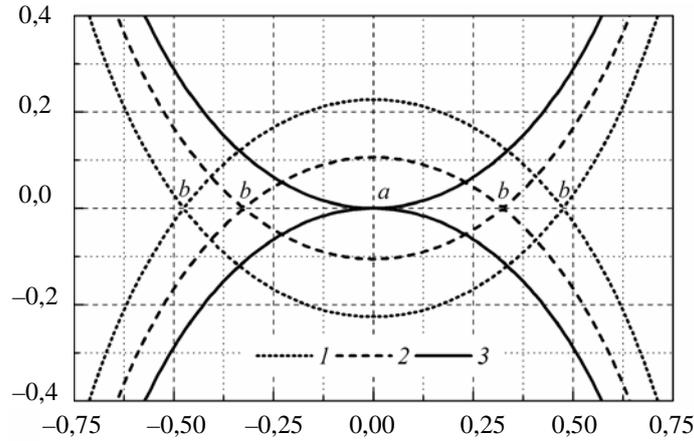


Рис. 5 – Интегральные кривые – сепаратрисы двухэлектродной МЭМС с гребенчатой конструкцией электродов, рассчитанные с использованием (7) для λ : 1 – 0,15; 2 – 0,2; 3 – 0,25

Fig. 5 – Integral curves – separatrix of two-electrode MEMS with interdigitated electrode structure, calculated using (7) for λ : 1 – 0,15; 2 – 0,2; 3 – 0,25

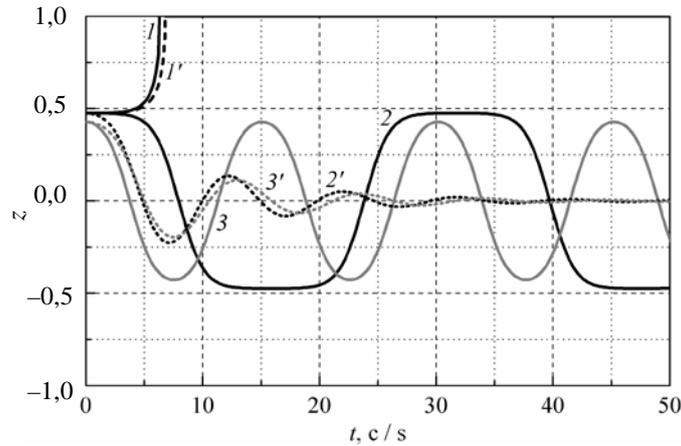


Рис. 6 – Зависимости смещения подвижного электрода от времени, рассчитанные при $\lambda = 0,15$ и начальных условиях: 1 – $(1,05z_{\max}, 0)$; 2 – $(0,999z_{\max}, 0)$; 3 – $(0,9z_{\max}, 0)$. Здесь $z_{\max} = 0,4747666$ – максимально допустимое значение начального смещения z , соответствующее $\lambda = 0,15$

Fig. 6 – Movable electrode displacement dependence on time, calculated at $\lambda = 0,15$ and initial conditions: 1 – $(1,05z_{\max}, 0)$; 2 – $(0,999z_{\max}, 0)$; 3 – $(0,9z_{\max}, 0)$. Here $z_{\max} = 0,4747666$ – the maximum allowable value of initial displacement z , corresponding to $\lambda = 0,15$

При проведении анализа мы не учитывали возможные потери энергии. Для оценки влияния диссипативной составляющей введем в уравнение (3) слагаемое, учитывающее потери энергии механической системы. Предположив, что в первом приближении затухание пропорционально первой степени скорости смещения подвижного электрода (вязкое трение) выражение (4) можно представить в виде

$$\frac{d^2 z}{d\tau^2} + \frac{1}{Q} \frac{dz}{d\tau} + z = \frac{4\lambda \cdot z}{(1-z^2)^2}, \quad (8)$$

где Q – добротность механической системы.

На рис. 6 (точками) приведены зависимости смещения подвижного электрода от времени, рассчитанные с использованием (8) при $Q = 5$, $\lambda = 0,15$, $v_{\text{нач}} = 0$, но не нулевом начальном смещении. Видно, что на начальном этапе даже при такой низкой добротности системы учет потерь энергии в первую очередь проявляется на зависимостях смещения подвижного электрода от времени, рассчитанных для z , меньших $z_{\text{max}} = 0,4747666$. В то же время зависимость, рассчитанная для $z = 1,05z_{\text{max}}$ (т. е. превышающего критическое значение всего на 5 %), практически не изменилась. Таким образом, можно предположить, что для $Q > 5$ выражения, полученные ранее без учета потерь, будут достаточно адекватно учитывать влияние начальных условий на эффект схлопывания.

3. Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования преобразователя на основе дубликатора Беннета с одним переменным конденсатором проводились с использованием микромеханического конденсатора, имеющего встречно-штыревую структуру с изменением межэлектродного зазора и изготовленным по технологии глубокого реактивного ионного травления. Характеристики данного конденсатора и технология его изготовления описаны в работе [16]. В эксперименте применяли диоды PAD5, а в качестве C_S использовали конденсатор емкостью 1,5 нФ. Напряжение источника питания составляло 20 В и выбиралось с учетом результатов предыдущего раздела согласно которым $V_{0,\text{кр}} = \sqrt{2kd_0^2\lambda / C_0}$. Для нашего случая (с учетом того, что согласно [14] у применяемого переменного конденсатора $Q > 5$) получим, что $V_{0,\text{кр}} = 49,24$ В.

В ходе экспериментальных исследований измерялось падение напряжения на резисторе сопротивлением 500 кОм, подключенном последовательно с источником питания, при протекании через него тока подзаряда.

На рис. 7 представлена зависимость тока подзаряда источника питания от времени при частоте механических колебаний 170 Гц, амплитуде ускорения $2g$ и напряжении источника питания 20 В, рассчитанная по экспериментальным данным. Положительные значения тока соответствуют подзаряду источника питания, а отрицательные – его разряду.

В данном эксперименте средний ток подзаряда источника питания составил 0,134 мкА, а мощность, вырабатываемая преобразователем, 2,68 мкВт.

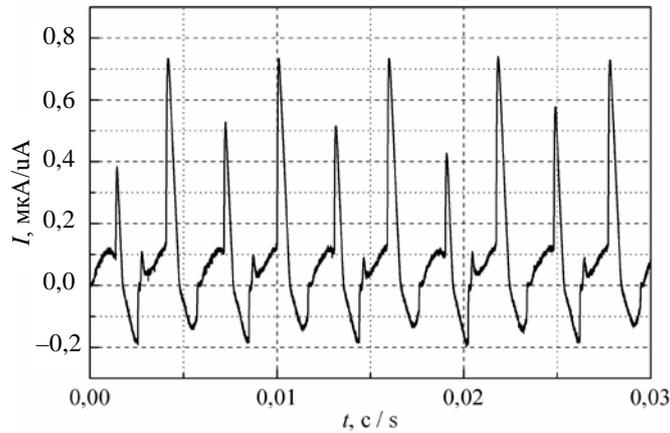


Рис. 7 – Зависимость тока подзаряда источника питания от времени

Fig. 7 – Charging current dependence on time

4. Математическая модель

Система уравнений, описывающих поведение рассматриваемого генератора, может быть представлена в виде

$$\begin{cases} \frac{dq_1}{dt} = I_{D2} + I_{D1} - I_{D3}; \\ \frac{dq_2}{dt} = I_{D3} - I_{D1}; \\ \frac{d^2z}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{dz}{dt} + \omega_0^2 z - \frac{4q_1^2 \cdot z}{2mC_0d_0^2} = -\frac{a_0}{d_0} \sin(\omega t), \end{cases} \quad (9)$$

где q_1 и q_2 – заряды на обкладках конденсаторов C_1 и C_2 , а I_{D1} , I_{D2} и I_{D3} – токи диодов D_1 , D_2 и D_3 соответственно, ω – угловая частота внешних механических колебаний.

При анализе токи диодов рассчитывались с использованием выражения

$$I_D = I_S \left(\exp\left(\frac{U_D}{\bar{m}\phi_T}\right) - 1 \right),$$

где I_S – обратный ток насыщения, U_D – напряжение на диоде, \bar{m} – коэффициент неидеальности, ϕ_T – температурный потенциал. В расчетах полагали, что $I_S = 10^{-11}$ А, а $\bar{m} = 1,82$. Данные значения были получены из экспериментальных данных – ВАХ кремниевых диодов с малыми токами утечки.

Анализ показал, что в целом система (9) достаточно хорошо описывает результаты эксперимента. Наибольшие отличия расчета и эксперимента наблюдаются для токов разряда источника питания, которые определяются плохо контролируемыми параметрами системы. К ним в первую очередь относятся обратные токи диодов и токи утечки на уровне $10^{-9} \div 10^{-8}$ А. Таким образом, для адекватного учета всех составляющих токов требуются дальнейшие исследования.

Заключение

В статье проведен анализ работы преобразователя на основе дубликатора Беннета с одним переменным конденсатором. Получены аналитические выражения, позволяющие оценить мощность, вырабатываемую преобразователем.

– Установлено, что для подзаряда источника питания глубина модуляции емкости конденсатора должна быть более 2.

– Показано, что с увеличением емкости постоянного конденсатора мощность, вырабатываемая преобразователем, увеличивается, однако увеличение $C_S/C_{\max} > 10$ нецелесообразно.

– Получены аналитические выражения позволяющие при произвольных начальных условиях оценить допустимое напряжение источника питания, при котором эффект схлопывания электродов еще не проявляется. Таким образом, возможность увеличения мощности за счет увеличения напряжения источника питания оказывается ограниченной.

– Проведены экспериментальные исследования преобразователя на основе дубликатора Беннета с кремниевым микроэлектромеханическим конденсатором, изготовленным по интегральной технологии. Показана работоспособность преобразователя с одним переменным конденсатором.

– При частоте механических колебаний 170 Гц, напряжении источника питания 20 В и амплитуде ускорения 2g была достигнута мощность, вырабатываемая преобразователем, 2,68 мВт.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Yen B.C., Lang J.H.** A variable-capacitance vibration-to-electric energy harvester // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers.* – 2006. – Vol. 53, iss. 2. – P. 288–295.
2. A batch-fabricated and electret-free silicon electrostatic vibration energy harvester / P. Basset, D. Galayko, A.M. Paracha, F. Marty, A. Dudka, T. Bourouina // *Journal of Micromechanics and Microengineering.* – 2009. – Vol. 19, № 11 (115025). – P. 1–12.
3. **Драгунов В.П., Остергак Д.И.** Архитектура и анализ схем МЭМ рекуператоров электрической энергии // *Нано- и микросистемная техника.* – 2011. – № 4. – С. 49–54.
4. **Драгунов В.П., Доржиев В.Ю.** МЭМ рекуператоры без разрыва цепи, содержащей индуктивный элемент // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации.* – 2011. – № 2 (17). – С. 92–101.
5. **de Queiroz A.C.M.** Electrostatic vibrational energy harvesting using a variation of Bennet's doubler // *53rd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), WA, Seattle, 1-4 Aug. 2010.* – P. 404–407.
6. **de Queiroz A.C.M., Domingues M.** The doubler of electricity used as battery charger // *IEEE Transactions on Circuits and Systems – II: Express Briefs.* – 2011. – Vol. 58, iss. 12. – P. 797–801.
7. **Драгунов В.П., Доржиев В.Ю.** Микроэлектромеханический генератор на основе дубликатора Беннета // *Нано- и микросистемная техника.* – 2012. – № 11. – С. 39–42.
8. Combined optimization of electrical and mechanical parameters of an out-of-plane gap-closing electrostatic Vibration Energy Harvester (VEH) / R. Guillemet, P. Basset, D. Galayko, T. Bourouina // *Symposium on Design Test Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), Seville, Spain, 5–7 May 2010.* – P. 73–78.
9. **Драгунов В.П., Доржиев В.Ю.** Анализ влияния pull-in эффекта на параметры трехэлектродных МЭМС // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации.* – 2013. – № 2 (21). – С. 87–97.
10. Pull-in voltage analysis of electrostatically actuated beam structures with fixed–fixed and fixed–free end conditions / S. Pamidighantam R. Puers, K. Baert, H.A.C. Tilmans // *Journal of Micromechanics and Microengineering.* – 2002. – Vol. 12, № 4. – P. 458–464.
11. Electrical stability of a MEMS-based AC voltage reference / A. Karkkainen, N. Nisnek, A. Manninen, N. Pesonen // *Sensors and Actuators A: Physical.* – 2007. – Vol. 137, iss. 1. – P. 169–174.

12. Characterization of carbon nanotube nanoswitches with gigahertz resonance frequency and low pull-in voltages using electrostatic force microscopy / M. Lu, X. Lu, M-W. Jang, S. Campbell, T. Cui // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. – 2010. – Vol. 20, № 10. – P. 105016–105023.
13. Драгунов В.П. Нелинейная модель упругого элемента микроэлектромеханических систем // *Нано- и микросистемная техника*. – 2004. – № 6. – С. 19–24.
14. Драгунов В.П., Остертак Д.И. Расчет латеральной составляющей электростатической силы в МЭМС // *Научный вестник Новосибирского государственного технического университета*. – 2009. – № 1 (34). – С. 229–233.
15. Драгунов В.П., Остертак Д.И. Электростатические взаимодействия в МЭМС с плоскопараллельными электродами. Ч. II. Расчет электростатических сил // *Нано- и микросистемная техника*. – 2010. – № 8. – С. 40–47.
16. Electrostatic vibration energy harvester with combined effect of electrical nonlinearities and mechanical impact / P. Basset, D. Galayko, F. Cottone, R. Guillemet, E. Blokhina, F. Marty, T. Bourouina // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. – 2014. – Vol. 24, № 3. – P. 1–14.
17. Electrostatic force coupling of MEMS oscillators for spectral vibration measurements / R. Forke, D. Scheibner, J.E. Mehner, T. Gessner, W. Dotzel // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2008. – Vol. 142, iss. 1. – P. 276–283.
18. Драгунов В.П., Остертак Д.И. Предельные характеристики микроэлектромеханических преобразователей энергии // *Научный вестник Новосибирского государственного технического университета*. – 2009. – № 1 (34). – С. 129–142.
19. Dynamics of damped cantilevers / S. Rast, C. Wattering, U. Gysin, E. Meyr // *Review of Scientific Instruments*. – 2000. – Vol. 71, iss. 7. – P. 2772–2775.
20. Quality factors in micron- and submicron-thick cantilevers / K.Y. Yasumara, T.D. Stowe, E.M. Chow, T. Pfafman, T.W. Kenny, B.C. Stipe, D. Rugar // *Journal of Microelectromechanical Systems*. – 2000. – Vol. 9, iss. 1. – P. 117–125.
21. Драгунов В.П. Нелинейность упругих элементов микроэлектромеханических систем // *Нано- и микросистемная техника*. – 2004. – № 5. – С. 7–13.
22. Драгунов В.П. Нелинейная динамическая модель упругого элемента микроэлектромеханических систем // *Нано- и микросистемная техника*. – 2004. – № 10. – С. 23–29.
23. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. – М.: Наука, 1981. – 568 с.

MICROELECTROMECHANICAL HARVESTER BASED ON BENNET'S DOUBLER WITH ONE VARIABLE CAPACITOR

Dragunov V.P.,¹ Galayko D.Yu.,² Dorzhiev V.Yu.,¹ Basset P.³

¹*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

²*UPMC-Sorbonne, Paris, France*

³*ESIEE-Paris, Paris, France*

The problem of a limited lifetime of currently used self-contained power supply sources for microelectronic devices is becoming more important due to the development of wireless technologies and the trend towards miniaturization. One promising solution to this problem is the charging of a compact battery by using the electrostatic MEMS energy converter of mechanical vibrations available in the environment. Switches and inductive elements in the circuit are the main disadvantage of the electrostatic converters available now, which limits their application field. This article analyzes the operation of the microelectromechanical converter without switches and inductive elements. Parameters required for the transmission of the converted energy of mechanical vibrations to the power supply are identified. Analytical expressions to estimate the energy which is transmitted directly to the power supply in a single conversion cycle are derived. The transmitted energy can be increased by increasing the power supply voltage, but a voltage increase can lead to a collapse of the variable capacitor electrodes (pull-in effect). The conditions

under which the pull-in effect occurs in a variable capacitor with an interdigital electrode structure are revealed with regard to the initial displacement and velocity of the movable electrode. The results of experimental studies in which the average charging current was 0.134 μA are presented.

Keywords: MEMS, pull-in effect, energy conversion, equilibrium state, microelectromechanical capacitor, initial conditions.

REFERENCES

1. Yen B.C., Lang J.H. A variable-capacitance vibration-to-electric energy harvester. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2006, vol. 53, iss. 2, pp. 288-295. doi:10.1109/tcsi.2005.856043.
2. Basset P., Galayko D., Paracha A.M., Marty F., Dudka A., Bourouina T. A batch-fabricated and electret-free silicon electrostatic vibration energy harvester. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, vol. 19, no. 11 (115025), pp. 1-12. doi: 10.1088/0960-1317/19/11/115025.
3. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Arkhitektura i analiz skhem MEM rekuperatorov elektricheskoi energii [Architecture and analysis of circuits of microelectromechanical electrical energy recuperators]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Nano and Microsystem Technique*, 2011, no. 4, pp. 49-54.
4. Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu. MEM rekuperatory bez razryva tsepi, sodержashchei induktivnyi element [MEM recuperators without break of a circuit with inductor]. *Doklady Akademii Nauk Vysshei Shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2011, no. 2, pp. 92-101.
5. de Queiroz A.C.M. Electrostatic vibrational energy harvesting using a variation of Bennet's doubler. *53rd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, WA, Seattle, 1-4 Aug. 2010, pp. 404-407. doi: 10.1109/MWSCAS.2010.5548752
6. de Queiroz A. C. M., Domingues M. The doubler of electricity used as battery charger. *IEEE Transactions on Circuits and Systems – II: Express Briefs*, 2011, vol. 58, iss. 12, pp. 797-801. doi: 10.1109/TCSII.2011.2173963.
7. Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu. Mikroelektromekhanicheskii generator na osnove duplikatora Benneta [Microelectromechanical generator based on Bennet's doubler]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Nano and Microsystem Technique*, 2012, no. 11, pp. 39-42.
8. Guillemet R., Basset P., Galayko D., Bourouina T. Combined optimization of electrical and mechanical parameters of an out-of-plane gap-closing electrostatic Vibration Energy Harvester (VEH). *Symposium on Design Test Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP)*, Seville, Spain, 5-7 May 2010, pp. 73-78.
9. Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu. Analiz vliyaniya pull-in effekta na parametry trekh-elektroodnykh MEMS [Analysis of pull-in effect influence on three-electrode MEMS parameters] *Doklady Akademii Nauk Vysshei Shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2013, no. 2 (21), pp. 87-97.
10. Pamidighantam S., Puers R., Baert K., Tilmans H.A.C. Pull-in voltage analysis of electrostatically actuated beam structures with fixed–fixed and fixed–free end conditions. *Journal of micromechanics and microengineering*, 2002, vol. 12, no. 4, pp. 458-464. doi: 10.1088/0960-1317/12/4/319.
11. Karkkainen A., Nisnek N., Manninen A., Pesonen N. Electrical stability of a MEMS-based AC voltage reference. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, vol. 137, iss. 1, pp. 169-174. doi: 10.1016/j.sna.2007.02.033.
12. Lu M., Lu X., Jang M-W., Campbell S., Cui T. Characterization of carbon nanotube nanoswitches with gigahertz resonance frequency and low pull-in voltages using electrostatic force microscopy. *Journal of micromechanics and microengineering*, 2010, vol. 20, no. 10, pp. 105016-105023. doi: 10.1088/0960-1317/20/10/105016.
13. Dragunov V.P. Nelineinaya model' uprugogo elementa mikroelektromekhanicheskikh sistem [Nonlinear Model of Elastic Element for MEMS]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Nano and Microsystem Technique*, 2004, no. 6, pp. 19-24.
14. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Raschet lateral'noi sostavlyayushchei elektrostatischekoi sily v MEMS [The calculation of lateral electrostatic force component of MEMS]. *Nauchnyi vest-*

- nik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2009, no. 1 (34), pp. 229-233.
15. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Elektrostaticheskie vzaimodeistviya v MEMS s ploskoparallelnymi elektrodami. Ch. II. Raschet elektrostaticheskikh sil [Electrostatic Interactions in MEMS with Plane-Parallel Electrodes. Pt. II. Estimation of electrostatic forces]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Nano and Microsystem Technique*, 2010, no. 8, pp. 40-47.
 16. Basset P., Galayko D., Cottone F., Guillemet R., Blokhina E., Marty F., Bourouina T. Electrostatic vibration energy harvester with combined effect of electrical nonlinearities and mechanical impact. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2014, vol. 24, no. 3, pp. 1-14. doi:10.1088/0960-1317/24/3/035001.
 17. Forke R., Scheibner D., Mehner J.E., Gessner T., Dotzel W. Electrostatic force coupling of MEMS oscillators for spectral vibration measurements. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, vol. 142, iss. 1, pp. 276-283. doi: 10.1016/j.sna.2007.04.004.
 18. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Predel'nye kharakteristiki mikroelektromekhanicheskikh preobrazovatelei energii [Limit parameters of microelectromechanical energy converters]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2009, no. 1 (34), pp. 129-142.
 19. Rast S., Wattinger C., Gysin U., Meyr E. Dynamics of damped cantilevers. *Review of Scientific Instruments*, 2000, vol. 71, iss. 7, pp. 2772-2775. doi: 10.1063/1.1150690.
 20. Yasumura K.Y., Stowe T.D., Chow E.M., Pfafman T., Kenny T.W., Stipe B.C., Rugar D. Quality factors in micron- and submicron-thick cantilevers. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2000, vol. 9, no. 1, pp. 117-125. doi: 10.1109/84.825786.
 21. Dragunov V.P. Nelineinost' uprugikh elementov mikromekhanicheskikh sistem [Nonlinearity of Elastic Elements of Micromechanical Systems]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Nano and Microsystem Technique*, 2004, no. 5, pp. 7-13.
 22. Dragunov V.P. Nelineinaya dinamicheskaya model' uprugogo elementa mikromekhanicheskikh sistem [Nonlinear Dynamic Model of Elastic Element for MMS]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Nano and Microsystem Technique*, 2004, no. 10, pp. 23-29.
 23. Andronov A.A., Vitt A.A., Khaikin S.E. *Teoriya kolebaniy* [Theory of oscillations]. Moscow, 1981. 568 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Драгунов Валерий Павлович – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры ППИМЭ НГТУ. Область научных интересов: наноэлектроника, физика низкоразмерных структур, нано- и микросистемная техника. Опубликовано более 130 научных работ. Email: drag@adm.nstu.ru.

Dragunov Valery Pavlovich, Doctor of Science, Professor, department of semiconductor devices and microelectronics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nanoelectronics, physics of low-dimensional structures, and nano- and microsystem technology. He is the author of 130 scientific papers. Email: drag@adm.nstu.ru.



Галайко Дмитрий Юрьевич – д-р техн. наук, доцент университета Пьера и Марии Кюри (Париж, Франция). Область научных интересов: изучение, моделирование и разработка нелинейных интегральных схем.

Galayko Dimitri Yuryevich, Ph.D., Associate Professor in Pierre et Marie Curie University (Paris, France). His research interests include study, modeling and design of nonlinear integrated circuits for sensor interface and for mixed-signal applications.



Доржиев Виталий Юрьевич – аспирант кафедры ППИМЭ НГТУ. Область научных интересов: нано- и микросистемная техника. Опубликовано более 15 научных работ. Email: b.dorzhiev@gmail.com.

Dorzhiev Vitaliy Yuryevich, Ph.D. student, department of semiconductor devices and microelectronics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nano- and microsystem technology. He is the author of 15 scientific papers. Email: b.dorzhiev@gmail.com.



Бассэ Филипп – Ph.D., доцент университета Paris-Est (Париж, Франция). Область научных интересов: МЭМС сенсоры и актюаторы, микрометричные источники питания для автономных МЭМС.

Basset Philippe, Ph.D., Associate Professor in University Paris-Est, France. His research interests are in the area of MEMS sensors and actuators, and micropower sources for autonomous MEMS.

*Статья поступила 03 июня 2014 г.
Received June 03, 2014*

To Reference:

Dragunov V.P., Galaiko D.Yu., Dorzhiev V.Yu., Basse F. Mikroelektromekhanicheskii preobrazovatel' na osnove duplikatora Benneta s odnim peremennym kondensatorom [Microelectromechanical harvester based on bennet's doubler with one variable capacitor]. *Doklady Akademii Nauk Vysshei Shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2014, no. 2-3 (23-24), pp. 67-80.