

УДК 62-26;621.319.35

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОКОНДЕНСАТОРНОГО  
МЭМС-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ  
ЭЛЕКТРОДАМИ****В.П. Драгунов, В.Н. Васюков, В.Ю. Доржиев***Новосибирский государственный технический университет*

В данной статье развита математическая модель и проведено моделирование работы одноконденсаторного электростатического микроэлектромеханического преобразователя энергии механических колебаний в электрическую. Анализировался преобразователь с последовательным включением компонентов. В качестве переменного конденсатора рассматривалась МЭМС с плоскостными электродами и с изменением межэлектродного зазора вне плоскости устройства. При создании модели преобразователя задача о перемещении подвижного электрода была сведена к задаче о колебаниях балочки с заделанными концами и сосредоточенной массой. Получены выражения, позволяющие по экспериментальным данным рассчитать зависимости от времени изменения заряда на обкладках переменного конденсатора и смещения его подвижного электрода. Для проверки адекватности созданной модели и корректности сделанных допущений проведено сопоставление результатов моделирования с результатами эксперимента, в котором использовался микроэлектромеханический конденсатор, изготовленный с использованием технологий микроэлектроники из (100) Si. Представлены результаты исследования эффективности работы преобразователя на разных частотах и при воздействии случайной вибрации, имеющей характер шума, белого в полосе частот 0...100 Гц. Сопоставление показало, что результаты моделирования отражают основные особенности эксперимента как при детерминированных, так и при случайных колебаниях и могут быть использованы на этапе предварительного проектирования.

*Ключевые слова:* МЭМС, механические колебания, широкополосная случайная вибрация, преобразование энергии, периодограмма.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-4-59-70

**Введение**

На сегодняшний день микросистемная техника является одним из наиболее динамично развивающихся междисциплинарных научно-технических направлений, а устройства микросистемной техники – микроэлектромеханические системы (МЭМС), изготавливаемые с использованием технологий микроэлектроники, за последние годы показали свой огромный потенциал.

МЭМС, содержащие кремниевые исполнительные элементы, имеют ряд значительных преимуществ по сравнению с приборами того же функционального назначения, выполненными без использования технологий микроэлектроники: высокое быстродействие, значительно меньшую стоимость, меньшие габаритные размеры, высокую ударо- и вибропрочность, невысокое энергопотребление. Все это обуславливается использованием материаловедческой и технологической баз современной твердотельной электроники.

Среди большого разнообразия МЭМС в особый класс можно выделить электростатические МЭМС-преобразователи механической энергии в электрическую энергию, такие как акселерометры, гироскопы и генераторы. Конструктивно они могут быть разделены на два типа: с гребенчатыми и с плоскостными электродами. В настоящее время наиболее распространенными являются преобра-

зователи с гребенчатой конструкцией электродов [1, 2], однако для их изготовления необходима дорогостоящая технология глубокого травления кремния с высоким аспектным соотношением, часто недоступная на отечественных предприятиях электронной промышленности. В свою очередь преобразователи с плоскопараллельными электродами [1, 3] могут быть изготовлены путем изотропного травления кремния и в ряде случаев их параметры даже превосходят параметры преобразователей с гребенчатой конструкцией электродов.

В данной работе представлены результаты моделирования и экспериментального исследования характеристик микроэлектромеханического преобразователя с плоскопараллельными электродами и с изменением межэлектродного зазора вне плоскости устройства, изготовленного с использованием технологий микроэлектроники.

## 1. Модель

На рис. 1 приведена электрическая схема одноконденсаторного электростатического МЭМС-преобразователя с последовательным включением компонентов, где  $V_0$  – источник постоянного напряжения,  $R$  – сопротивление нагрузки,  $C$  – переменный конденсатор.

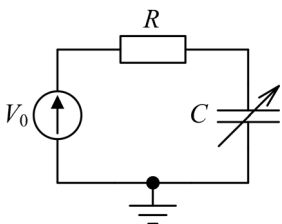


Рис. 1 – Электрическая схема одноконденсаторного электростатического МЭМС-преобразователя с последовательным включением компонентов

Fig. 1 – Electrical circuit of single-capacitor electrostatic MEMS-converter with series connection of components

В работе данного преобразователя можно выделить два этапа. На первом этапе при увеличении емкости переменного конденсатора за счет внешних механических сил он заряжается током, протекающим от источника постоянного напряжения  $V_0$  через нагрузку. На втором, при уменьшении емкости конденсатора внешними силами, происходит его разряд током, протекающим от конденсатора в  $V_0$  через нагрузку  $R$ . В результате за счет работы внешних механических сил на сопротивлении нагрузки создается переменное напряжение и выделяется энергия.

Основным элементом электростатических МЭМС-преобразователей энергии механических колебаний в электрическую энергию является переменный конденсатор, изготавливаемый с использованием технологий микроэлектроники. Изменение емкости в нем может достигаться за счет изменения межэлектродного зазора, площади перекрытия электродов и эффективной диэлектрической проницаемости среды между электродами. В любом случае желательно получить максимальное значение глубины модуляции емкости  $\eta = C_{\max}/C_{\min}$  (где  $C_{\max}$  и  $C_{\min}$  – максимальная и минимальная емкости переменного конденсатора соответственно).

При малых амплитудах внешних механических колебаний наибольшие значения  $\eta$  могут быть достигнуты при использовании конденсатора с плоскопараллельными электродами и изменяющимся межэлектродным зазором. Работу именно такого МЭМС-преобразователя мы и будем исследовать в дальнейшем.

В литературе предложено несколько конструкций переменных конденсаторов с плоскопараллельными электродами: с крестообразным подвесом, с z-образным кососимметричным и симметричным подвесами, с параллельным подвесом и т. п.

В первом приближении все эти конструкции можно представить в виде базовой схемы, показанной на рис. 2, в которой подвижный электрод представляется недеформируемой платформой.

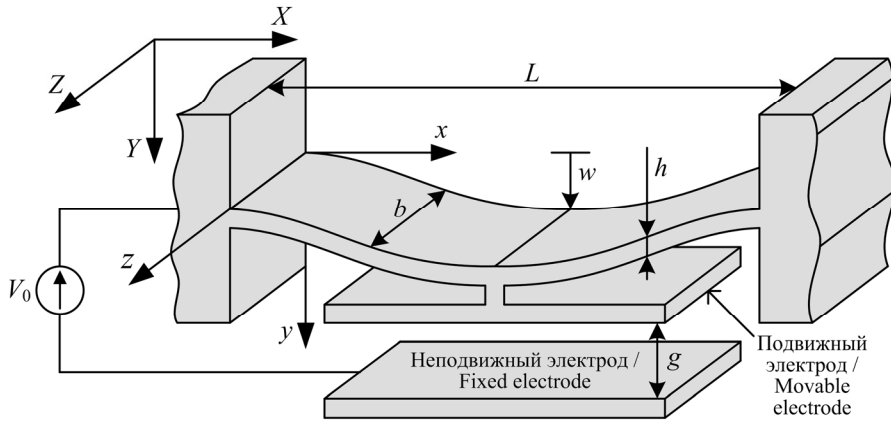


Рис. 2 – Базовая схема переменного конденсатора с плоскопараллельными электродами

Fig. 2 – The basic layout of the variable capacitor with parallel-plate electrodes

Данная схема позволяет свести задачу о перемещении подвижного электрода к задаче о колебаниях балочки с заделанными концами и сосредоточенной массой  $M$ , связанной с балочкой в точке  $x = L/2$  (здесь  $M$  – масса подвижного электрода).

Рассмотрим изгибные колебания балочки с заделанными концами, возникающие под действием возмущающего перемещения опоры.

Пусть опора балочки относительно неподвижной системы координат  $XYZ$  (рис. 2) движется по закону  $Y(t) = F(t)$ .

Абсолютное движение точек балочки можно рассматривать как результат сложения относительного движения и переносного движения опоры. Тогда дифференциальное уравнение колебательного движения балочки, в котором  $y(x, t)$  принимаем за относительное движение, в нашем случае принимает вид

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \chi \frac{\partial y}{\partial t} + \rho s \left( \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 y_0}{\partial t^2} \right) = F(x, t),$$

где  $E$  – модуль Юнга материала балочки,  $J$  – момент инерции,  $\rho$  – масса единицы объема материала балочки,  $s = bh$  – площадь поперечного сечения балочки,  $\chi$  – коэффициент, характеризующий затухание. При этом для заделанных концов  $y(t, 0) = y(t, L) = 0$  и  $\partial y(t, 0) / \partial x = \partial y(t, L) / \partial x = 0$ . Полагая, что сосредоточенная масса  $M$  и сила  $Q$ , приложенные в точке  $x = L/2$ , распределены равномерно в интервале от  $(L - \delta) / 2$  до  $(L + \delta) / 2$  интенсивностью  $m$  и  $q$  на единицу длины, в предположении, что  $q\delta \rightarrow Q$  и  $m\delta \rightarrow M$ , когда  $\delta \rightarrow 0$ , получим, что

$$F(x, t) = -m \left( \frac{\partial y_0}{\partial t} + \frac{\partial y}{\partial t} \Big|_{x=L/2} \right) + q \Big|_{x=L/2}, \quad (1)$$

причем  $m$  и  $q$  равны нулю везде за исключением интервала  $(L - \delta) / 2 \leq x \leq (L + \delta) / 2$ .

Принимая во внимание, что возвращающая упругая сила балочки и электрическая сила притяжения действуют на подвижный электрод как на материальную точку массы  $M$ , в случае, когда масса балочек упругого подвеса много меньше массы подвижного электрода, используя подход, развитый в [4–6], можно представить дифференциальное уравнение, определяющее закон движения подвижного электрода, в виде

$$M \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + B \frac{\partial W}{\partial t} + GW - \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S V^2}{2(d_0 - W)^2} = -M \left( \frac{\partial^2 y_0}{\partial t^2} \right) + Mg,$$

здесь  $W = y(t, L/2)$ ,  $G$  – коэффициент жесткости упругого подвеса,  $B$  – коэффициент затухания,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды между электродами,  $S$  – площадь электрода.

В случае, когда массой упругого подвеса можно пренебречь,

$$G = 24n \frac{EJ}{(L/2)^3},$$

где  $n$  – количество балочек упругого подвеса.

Принимая во внимание связь коэффициента жесткости с частотой собственных колебаний  $\omega_0$ , значение  $G$  можно уточнить, если учесть, что для весомой балочки с заделанными концами и массой  $M$ , приложенной в точке  $x = L/2$ , уравнение для симметричных мод собственных колебаний имеет вид [7]

$$[\operatorname{ch}(0, 5r) \sin(0, 5r) + \operatorname{sh}(0, 5r) \cos(0, 5r) + 0,5\alpha r (\operatorname{ch}(0, 5r) \cos(0, 5r) - 1)] = 0,$$

где  $\alpha = M / (\rho s L)$  – отношение приложенной массы к массе балочки, а  $r = \rho s \omega_0^2 L^4 / (EJ)$ . Таким образом,

$$\bar{G} = M \omega_0^2 = Mr^4 EJ / (\rho s L^4).$$

Расчеты показывают, что при  $\alpha > 38$  величина  $G$  будет превышать  $\bar{G}$  менее чем на 1 %. В свою очередь, если  $\alpha$  будет меньше 3,35, то различие между  $G$  и  $\bar{G}$  превысит 10 %.

С учетом (1) и рис. 1 полная математическая модель одноконденсаторного преобразователя принимает вид:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{q(1 - W / d_0)}{RC_0} = \frac{V_0}{R}, \quad (2)$$

$$M \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + B \frac{\partial W}{\partial t} + GW - \frac{q^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon S} - Mg = -M \frac{\partial^2 y_0}{\partial t^2}, \quad (3)$$

здесь  $q$  – заряд конденсатора, а  $C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon S / d_0$ .

В общем случае система (2), (3) при заданных начальных условиях может быть решена только численно. Если же в уравнении (3) можно пренебречь слагаемым, пропорциональным  $q^2$  (пренебречь влиянием электростатической силы [8]), то

решение уравнения (3) может быть легко найдено. Так, при гармоническом законе колебания опоры, когда  $\partial^2 y_0 / \partial t^2 = a_0 \sin(\omega t)$ , в установившемся режиме

$$W(t) = \frac{a_0}{\omega_0^2} \frac{\sin(\omega t + \varphi)}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} + \Delta = W_0 \sin(\omega t + \varphi) + \Delta,$$

$$q(t) = \frac{V_0}{R} \int_{t_0}^t \exp\left[\frac{\tau - t}{RC} + \frac{Z_0}{RC_0\omega} (\cos(\omega\tau + \varphi) - \cos(\omega t + \varphi))\right] d\tau + q_0,$$

а напряжение, выделяемое на сопротивлении нагрузки,

$$U_n(t) = \frac{1}{RC_0} q(t) \left[1 - \frac{W(t)}{d_0}\right],$$

где  $q_0$  – заряд на конденсаторе к моменту  $t_0$ ,  $a_0$  – амплитуда ускорения, с которым движется опора;  $\Delta = Mg/G$  – начальное смещение подвижного электрода под собственным весом;  $Z_0 = W_0/d_0$ ;  $C = C_0/(1 - Z_0)$ ;  $t_0$  – момент времени, когда источник напряжения  $V_0$  подключается к схеме и

$$\varphi = -\arctg \left[ \frac{2\zeta(\omega/\omega_0)}{\left[1 - (\omega/\omega_0)^2\right]} \right].$$

Для проверки адекватности модели и корректности сделанных допущений проведем сопоставление результатов моделирования с результатами эксперимента.

## 2. Результаты эксперимента и их анализ

При проведении экспериментальных исследований использовался переменный конденсатор, изготовленный с использованием технологий микроэлектроники из (100) Si, конструкция которого показана на рис. 3. Его основными элементами являются: неподвижный и подвижный электроды, вибрационный элемент и дополнительная масса. Неподвижный электрод и рамка вибрационного элемента жестко закрепляются на основании корпуса.

Конструкция вибрационного элемента, к подвижной части которого присоединялся подвижный электрод, показана на рис. 4. Вибрационный элемент представлял собой (100) пластину кремния с вытравленными на ней балочками упругого подвеса. Длинные оси балочек формировались вдоль направления [110]. Так как балочки изготавливались с использованием анизотропного травления кремния, их поперечное сечение имело вид трапеции. Дополнительная масса присоединялась к подвижному электроду. Данная конструкция вибрационного элемента соответствует переменному конденсатору с плоскопараллельными электродами и z-образным кососимметричным подвесом.

Для уменьшения демпфирования колебаний в подвижном электроде формировались дренажные отверстия (рис. 5).

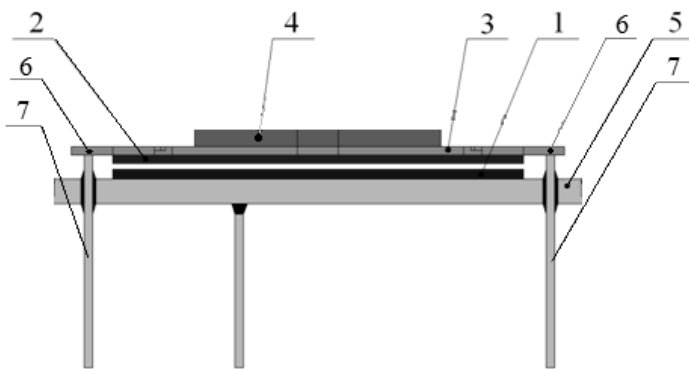


Рис. 3 – Конструкция преобразователя:

1 – неподвижный электрод; 2 – подвижный электрод; 3 – вибрационный элемент; 4 – дополнительная масса; 5 – основание корпуса (опора); 6 – места крепления вибрационного элемента к ножкам корпуса; 7 – ножки корпуса

Fig. 3 – The harvester design:

1 – fixed electrode; 2 – movable electrode; 3 – vibration element; 4 – additional mass; 5 – package base (support); 6 – attachment points of the vibration element to the headers of the package; 7 – headers of the package

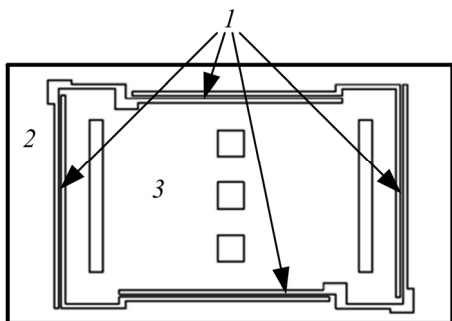


Рис. 4 – Вибрационный элемент:

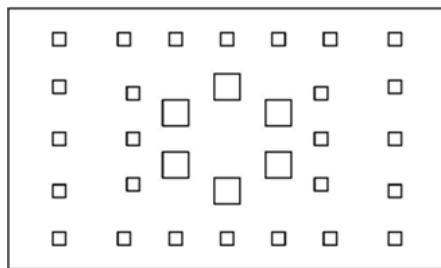
1 – балочки упругого подвеса, 2 – рамка, 3 – подвижная часть

Fig. 4 – Vibration element:

1 – beams of elastic suspension, 2 – frame, 3 – movable part

Рис. 5 – Подвижный электрод

Fig. 5 – Movable electrode



Основные параметры конденсатора приведены в таблице.

При проведении эксперимента измерялись зависимости падения напряжения  $V(t)$  на сопротивлении нагрузки (рис. 1) от времени. При этом варьировались

напряжение источника  $V_0$ , а также частота и амплитуда ускорения основания корпуса. На рис. 6 приведены зависимости напряжения на резисторе нагрузки от времени, измеренные при гармонических колебаниях основания корпуса с частотами 40 и 45 Гц, амплитудой ускорения  $a_0 = 0,1g$  и напряжении  $V_0 = 80$  В. Видно, что результаты расчета (с использованием выражений (2), (3)) и эксперимента достаточно хорошо согласуются между собой.

Основные параметры конденсатора  
Main parameters of capacitor

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Инерционная масса	$M$	г	7,35
Жесткость упругого подвеса	$G$	Н/м	482
Площадь подвижного электрода	$S$	$\text{м}^2$	$6,52 \cdot 10^{-4}$
Максимальный межэлектродный зазор	$d_0$	мкм	230
Длина балочки	$l$	см	1,6
Толщина балочки	$h$	мкм	200
Момент инерции балочки	$J$	$\text{м}^4$	$2,14 \cdot 10^{-16}$
Модуль Юнга для балочки	$E$	$\text{Н/м}^2$	$1,69 \cdot 10^{11}$
Минимальная емкость	$C_0$	пФ	25
Добротность механической системы	$Q$		2,5–4
Частота собственных колебаний (расчет)	$f_0$	Гц	40,7

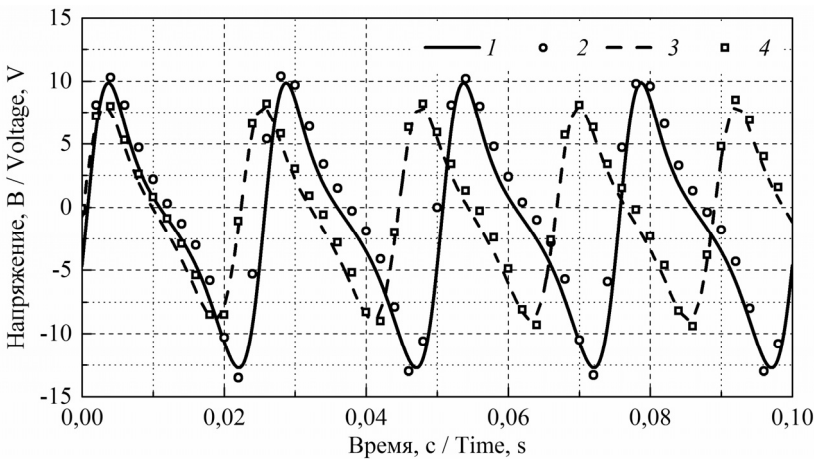


Рис. 6 – Зависимости напряжения на резисторе нагрузки от времени:  
1, 2 –  $f = 40$  Гц; 3, 4 – 45 Гц. Сплошная и штриховая линии – расчет,  
точки – эксперимент

Fig. 6 – Dependences of the load resistor’s voltage on the time:  
1, 2 –  $f = 40$  Hz; 3, 4 – 45 Hz. Solid and dashed lines – calculated data, dotted line –  
experiment

Отметим, что на рис. 6 положительная полуволна (этап разряда конденсатора) отличается по форме и площади от отрицательной полуволны (этап заряда конденсатора). Таким образом, заряд, забираемый из источника постоянного напряжения, в данном случае превышал заряд, возвращаемый в источник. Это могло быть, например, следствием возможных утечек конденсатора, что и учитывалось в расчетах введением дополнительного слагаемого  $U_C / R_d$  в (2) (здесь  $U_C$  –

напряжение между обкладками конденсатора). При этом оказалось, что сопротивление утечек  $R_d$  имеет порядок десяти гигаом.

Измеренные зависимости падения напряжения на резисторе нагрузки от времени позволяют рассчитать временные зависимости изменения заряда на обкладках конденсатора, а также смещения подвижного электрода.

Согласно (2) при учете сопротивления утечки конденсатора

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{V_0}{R} - \frac{U_C}{R} - \frac{U_C}{R_d}.$$

В эксперименте мы измеряем падение напряжения на резисторе нагрузки:

$$V(t) = R \frac{\partial q}{\partial t} + U_C \frac{R}{R_d} = V_0 - U_C.$$

Отсюда

$$q(t) = \int_{t_0}^t \left( \frac{V(t)}{R} + \frac{V(t)}{R_d} - \frac{V_0}{R_d} \right) dt + q_0,$$

Аналогично можно показать, что

$$z(t) = 1 - C_0 \frac{V_0 - V(t)}{\int_{t_0}^t \left( \frac{V(t)}{R} + \frac{V(t)}{R_d} - \frac{V_0}{R_d} \right) dt + q_0}, \quad (4)$$

здесь  $z(t) = W(t) / d_0$  – относительное смещение подвижного электрода.

На рис. 7 точками показана частотная зависимость амплитуды относительного смещения подвижного электрода от положения статического равновесия, рассчитанная по экспериментальным данным с использованием (4). Измерения проводились при гармонических колебаниях основания корпуса с амплитудой ускорения  $a_0 = 0,1g$  и напряжением  $V_0 = 80$  В. На этом же рисунке сплошной линией показаны результаты соответствующего моделирования с использованием системы уравнений (2), (3).

Видно, что результаты расчета и эксперимента несколько различаются, особенно в области низких частот. Это несоответствие говорит о том, что при моделировании с использованием системы (2), (3) не учитываются какие-то процессы. Это могут быть более сложный, чем принят в (3), механизм демпфирования, а также дополнительные колебательные процессы, связанные с возможным поворотом подвижного электрода из-за неточной установки дополнительной массы. Тем не менее сопоставления результатов расчета с экспериментом, выполненные для различных внешних условий, показали, что моделирование с использованием системы (2), (3) позволяет определять основные параметры преобразователя с достаточной для этапа предварительного проектирования точностью.

Так как преобразователь предназначен для преобразования энергии механических колебаний в электрическую энергию, были проведены исследования по эффективности такого преобразования на разных частотах. На рис. 8 приведены зависимости электрической мощности, выделяемой в резисторе нагрузки, от частоты механических колебаний при использовании постоянного напряжения  $V_0 = 80$  В.

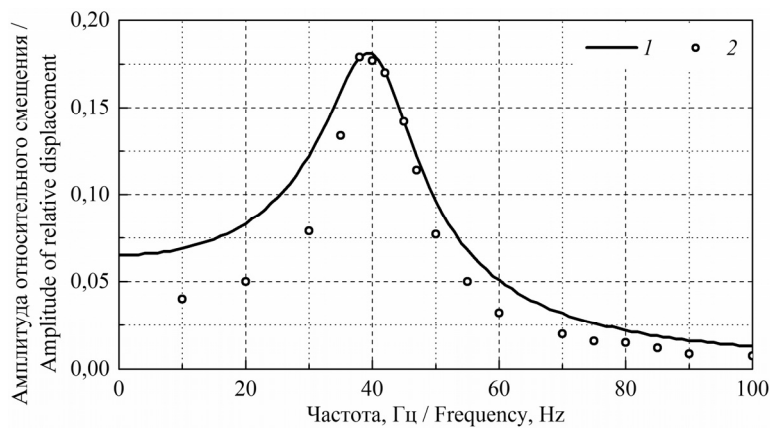


Рис. 7 – Зависимости амплитуды относительного смещения подвижного электрода от частоты:  
1 – результаты моделирования с использованием (2), (3); 2 – расчет по экспериментальным данным с использованием (4)

Fig. 7 – Dependences of amplitude of movable electrode relative displacement on the frequency:  
1 – simulation results using (2), (3); 2 – calculation on experimental data using (4)

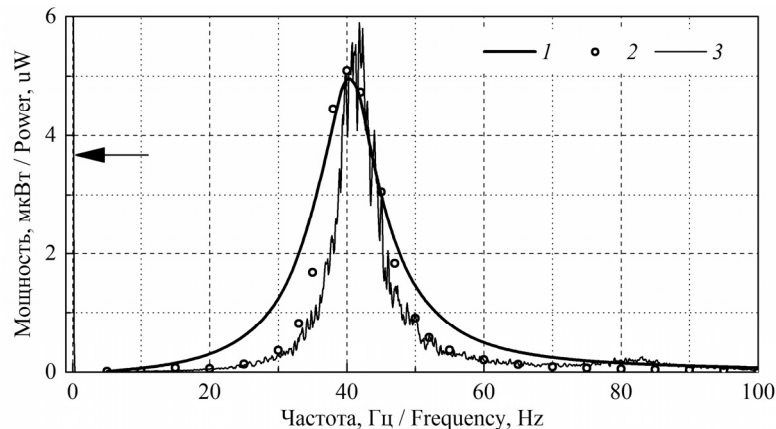


Рис. 8 – Зависимости мощности, выделяемой в резисторе нагрузки, от частоты механических колебаний:  
1 – результаты моделирования с использованием системы (2), (3); 2 – расчет на основе экспериментальных данных при гармонических колебаниях основания с амплитудой ускорения  $a_0 = 0,1g$ ; 3 – периодограммная оценка спектральной плотности мощности, полученная на основе результатов измерений напряжения на нагрузке при воздействии случайных механических колебаний

Fig. 8 – Dependences of power produced at the load on the frequency of mechanical vibrations:

1 – simulation results using (2), (3); 2 – calculation based on experimental data at harmonic oscillations with amplitude of the acceleration  $a_0 = 0,1g$ ; 3 – periodogram estimation of spectral power density on the basis of measurements of the load voltage under random vibrations

Сплошная гладкая линия 1 – результаты моделирования с использованием системы (2), (3) при гармонических колебаниях основания с амплитудой ускорения  $a_0 = 0,1g$ . Точки 2 соответствуют результатам расчета на основе эксперимен-

тальных данных при гармонических колебаниях основания с амплитудой ускорения  $a_0 = 0,1g$ . Сплошная ломаная линия 3 отображает периодограммную оценку спектральной плотности мощности, полученную на основе результатов измерений напряжения на нагрузке при воздействии случайных механических колебаний, имеющих характер шума, белого в данной полосе частот.

Видно, что результаты моделирования на основе системы (2), (3) в целом отражают основные особенности эксперимента как при случайных, так и при детерминированных воздействиях. Оценки, выполненные на основе экспериментальных данных, полученных при воздействии случайных колебаний, лучше отражают детали преобразования энергии механических колебаний в электрическую. Так, например, данные оценки показывают наличие постоянной составляющей (указана стрелкой на рис. 8), что мы отмечали ранее, а также указывают на наличие второго (слабого) резонанса на удвоенной частоте. Отметим, что некоторое возрастание эффективности колебаний в районе 80 Гц можно обнаружить и по результатам расчета с использованием (4), показанным на рис. 7 точками. В то же время на зависимости мощности от частоты, рассчитанной на основе экспериментальных данных при гармонических колебаниях основания, это не проявляется.

### Заключение

В результате проведенных исследований:

- предложена математическая модель для расчета основных характеристик МЭМС-преобразователей механической энергии в электрическую с одним переменным конденсатором с плоскопараллельными электродами и z-образным косо-симметричным подвесом при кинематическом возбуждении;
- получены выражения, позволяющие на основе экспериментальных данных по зависимости изменения напряжения на резисторе нагрузки от времени, рассчитать зависимость от времени изменения смещения подвижного электрода и заряда на обкладках переменного конденсатора;
- показано, что результаты моделирования отражают основные особенности эксперимента как при детерминированных, так и при случайных колебаниях и могут быть использованы на этапе предварительного проектирования;
- обнаружено, что оценки, выполненные на основе экспериментальных данных, полученных при случайных колебаниях, лучше отражают детали преобразования энергии механических колебаний в электрическую;
- установлено, что у исследованных преобразователей наблюдается разряд источника постоянного напряжения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Roundy S., Wright P.K., Rabaey J. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes // Computer Communications. – 2003. – Vol. 26, iss. 11. – P. 1131–1144. – doi: 10.1016/S0140-3664(02)00248-7.
2. Electret-free micromachined silicon electrostatic vibration energy harvester with the Bennet's doubler as conditioning circuit / V. Dorzhiev, A. Karami, P. Basset, F. Marty, V. Dragunov, D. Galayko // IEEE Electron Device Letters. – 2015. – Vol. 36, iss. 2. – P. 183–185. – doi: 10.1109/LED.2014.2387213.
3. Chiu Y., Lee Y.-C. Flat and robust out-of-plane vibrational electret energy harvester // Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2013. – Vol. 23, no. 1. – P. 015012/1–015012/8. – doi: 10.1088/0960-1317/23/1/015012.
4. Фадеев С.И., Косцов Э.Г., Пиманов Д.О. Численное исследование математических моделей микроэлектромеханических резонаторов разного типа // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2014. – Т. 17, № 4. – С. 120–135.
5. Драгунов В.П., Драгунова Е.В. Особенности функционирования МЭМ систем // Нано-и микросистемная техника. – 2015. – № 6 (179). – С. 43–52.

6. Драгунов В.П., Доржиев В.Ю. Трехэлектродная двухконденсаторная МЭМС со встроенным зарядом // Нано- и микросистемная техника. – 2014. – № 2. – С. 33–38.
7. Филиппов А.П. Колебания деформируемых систем. – М.: Машиностроение, 1970. – 736 с.
8. Драгунов В.П., Остертак Д.И. Электростатические взаимодействия в МЭМС с плоскопараллельными электродами. Ч. 2. Расчет электростатических сил // Нано- и микросистемная техника. – 2010. – № 8. – С. 40–47.

## SIMULATION OF CHARACTERISTICS OF A SINGLE-CAPACITOR MEMS CONVERTER WITH PLANE-PARALLEL ELECTRODES

**Dragunov V.P., Vasyukov V.N., Dorzhiev V.Yu.**

*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation*

The paper reports on a mathematical model and the simulation of the electrostatic single-capacitor MEMS vibrational energy converter operation. A converter with a series connection of components was analyzed. A gap closing out-of-plane MEMS with parallel-plate electrodes was considered as a variable capacitor. While creating a converter model the vibration of a clamped beam with a lumped mass was studied to determine the displacement of a movable electrode. Based on the experimental data obtained, analytical expressions that allow defining the dependence of an electrode charge and the displacement of a movable electrode on time were obtained. To test the adequacy of the model and the correctness of the assumptions, the simulation results were compared with experimental ones. In the experiment (100) the Si batch-fabricated MEMS variable capacitor was used. The paper presents the results of investigating the effectiveness of converter operation at different frequencies and under random vibrations having the character of a noise, which is white in the frequency band of 0-100 Hz. The comparison showed that the simulation results reflected the main features of the experiment both with deterministic and random vibrations and could be used at a preliminary design stage.

*Keywords:* MEMS; mechanical vibrations; broadband random vibration; energy conversion; periodogram.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-4-59-70

### REFERENCES

1. Roundy S., Wright P.K., Rabaey J. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. *Computer Communications*, 2003, vol. 26, iss. 11, pp. 1131–1144. doi: 10.1016/S0140-3664(02)00248-7
2. Dorzhiev V., Karami A., Basset P., Marty F., Dragunov V., Galayko D. Electret-free micro-machined silicon electrostatic vibration energy harvester with the Bennet's doubler as conditioning circuit. *IEEE Electron Device Letters*, 2015, vol. 36, iss. 2, pp. 183–185. doi: 10.1109/LED.2014.2387213
3. Chiu Y., Lee Y.-C. Flat and robust out-of-plane vibrational electret energy harvester. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2013, vol. 23, no. 1, pp. 015012/1–015012/8. doi: 10.1088/0960-1317/23/1/015012
4. Fadeev S.I., Kostov E.G., Pimanov D.O. Chislennoe issledovanie matematicheskikh modelei mikroelektromekhanicheskikh rezonatorov raznogo tipa [Numerical study of mathematical models of MEMS resonators different types]. *Sibirskii zhurnal industrial'noi matematiki – Siberian Journal of Industrial Mathematics*, 2014, vol. 17, no. 4, pp. 120–135.
5. Dragunov V.P., Dragunova E.V. Osobennosti funktsionirovaniya MEM sistem [Specific features of MEM systems" functioning]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano and Microsystem Technique*, 2015, no. 6 (179), pp. 43–52.
6. Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu. Trekhelektrodnaya dvukhkondensatornaya MEMS so vstroennym zaryadom [Three-electrode two-capacitor MEMS with built-in charge]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano and Microsystem Technique*, 2014, no. 2, pp. 33–38.
7. Filippov A.P. *Kolebaniya deformiruemyykh sistem* [Fluctuations of strained systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 736 p.
8. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Elektrostaticheskie vzaimodeystviya v MEMS s ploskoparallelnymi elektrodami. Ch. 2. Raschet elektrostaticheskikh sil [Electrostatic interactions in MEMS with plane-parallel electrodes. Pt. 2. Estimation of electrostatic forces]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano and Microsystem Technique*, 2010, no. 8, pp. 40–47.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**Драгунов Валерий Павлович** – родился в 1947 году, д-р. техн. наук, доцент, профессор кафедры ППИМЭ Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: наноэлектроника, физика низкоразмерных структур, нано- и микросистемная техника. Опубликовано более 140 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: drag@adm.nstu.ru).

**Dragunov Valery Pavlovich** (b. 1947) – Doctor of Science (Eng.), Assistant Professor, Professor at the Department of Semiconductor Devices and Microelectronics in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nanoelectronics, physics of low-dimensional structures, nano- and microsystem technology. He is the author of more than 140 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. E-mail: drag@adm.nstu.ru).



**Васюков Василий Николаевич** – родился в 1951 году, д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом научных исследований Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: цифровая обработка и статистический анализ сигналов и изображений. Опубликовано 120 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: vasyukov\_vn@ngs.ru, vasyukov@corp.nstu.ru).

**Vasyukov Vasily Nikolaevich** (b. 1951) – Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of the Scientific Research Department in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on digital signal and image processing and analysis. He is the author of 120 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. E-mail: vasyukov\_vn@ngs.ru, vasyukov@corp.nstu.ru).



**Доржиев Виталий Юрьевич** – родился в 1988 году, аспирант кафедры ППИМЭ Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: нано- и микросистемная техника. Опубликовано более 15 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: b.dorzhiev@gmail.com, dorzhiev@corp.nstu.ru).

**Dorzhiev Vitaly Yuryevich** (b. 1988) – PhD student at the Department of Semiconductor Devices and Microelectronics in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nano- and microsystem technology. He is the author of more than 15 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. E-mail: b.dorzhiev@gmail.com, dorzhiev@corp.nstu.ru).

*Статья поступила 20 ноября 2015 г.*

*Received November 20, 2015*

---

To Reference:

Dragunov V.P., Vasyukov V.N., Dorzhiev V.Yu. Modelirovanie kharakteristik odnokondensatornogo mems-preobrazovatelya s ploskoparallel'nymi elektrodami [Simulation of characteristics of a single-capacitor MEMS converter with plane-parallel electrodes]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 4 (29), pp. 59–70. doi: