

УДК 621.3.049.77.002.5

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ МИКРОГЕНЕРАТОРОВ ЭНЕРГИИ

В. П. Драгунов¹, Э. Г. Косцов²

¹Новосибирский государственный технический университет
630092, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

²Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: kostsov@iae.nsk.su

Проведен анализ особенностей функционирования и сравнение характеристик одно- и двух-конденсаторных микроэлектромеханических преобразователей (МЭМП) энергии механических микроколебаний в электрическую энергию при модуляции величины межэлектродного зазора с учетом взаимного влияния электрических и упругих сил. Показано, что основными ограничивающими факторами повышения мощности МЭМП являются эффекты «схлопывания» и условие сохранения системой положительной жесткости. Получены выражения для оценки предельных параметров МЭМП. Рассмотрена возможность генерации электрической энергии при наличии «реальных» источников микроколебаний с широким спектром.

Ключевые слова: микроэлектромеханика, электростатика, микрогенератор энергии, микровибрация.

Введение. Одним из важнейших компонентов элементов микросистемной техники является источник энергии. Для большинства микросистем (МС) требуются микромощные источники энергии, изготавливаемые по технологии, совместимой с технологией изготовления МС. В настоящее время наметилось несколько направлений разработки микроэлектромеханических преобразователей (МЭМП) энергии, в том числе на основе традиционных пьезоэлектрических, электромагнитных и электростатических преобразователей. Анализ показывает, что для получения достаточной для практических задач удельной мощности с учетом необходимости создания МЭМП энергии в рамках технологии микроэлектроники наиболее эффективны электростатические микрогенераторы.

Типичные значения амплитуд ускорений a_0 и смещений Y_0 для различных источников механических колебаний лежат в диапазонах 0,01–10 м/с² и 0,1–10 мкм соответственно при частотах 5–500 Гц. При этом удельная мощность энергии колебаний, которая может быть преобразована МЭМП в электрическую энергию, достигнет значений 0,1–100 мВт/кг [1–3].

Принцип действия электростатических преобразователей энергии основан на совершении механическими силами работы против электростатических сил притяжения разноименно заряженных пластин конденсатора.

К наиболее существенным недостаткам одноконденсаторных преобразователей можно отнести: импульсный характер вырабатываемой энергии (низкое качество энергии); необходимость восстановления в каждом цикле преобразования заряда переменного конденсатора и точной синхронизации работы ключей с колебаниями системы; проявление эффекта «схлопывания» электродов.

МЭМП с двумя изменяющимися в противофазе переменными конденсаторами практически лишены указанных недостатков. В данном случае (в отличие от систем с одним переменным конденсатором) заряд в каждом цикле не передается безвозвратно во внешнюю цепь, а перетекает из одного конденсатора в другой, совершая при этом полезную

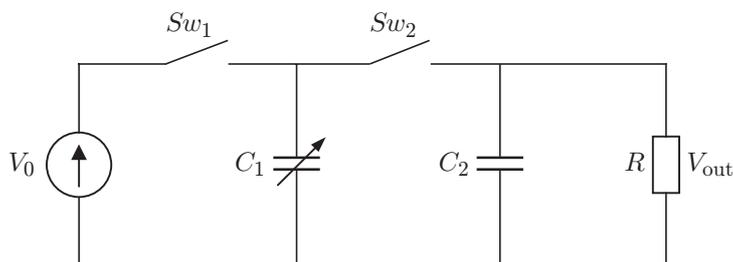


Рис. 1

работу. В отсутствие утечек такая первоначально заряженная система в дальнейшем не требует подзарядки на каждом такте.

При проектировании МЭМП наряду с качественными характеристиками необходимо принимать во внимание и их предельные количественные показатели, к которым в первую очередь относятся: максимальные заряд и напряжение на обкладках переменного конденсатора; максимальная энергия, накопленная в конденсаторе к концу цикла; максимальные заряд, напряжение и энергия, передаваемые конденсатору на этапе подзаряда от внешнего источника. Следует отметить, что особенности МЭМП, связанные с проявлением взаимного влияния электрических и механических сил, приводят к тому, что оценку этих параметров, как правило, проводят либо по экспериментальным характеристикам уже созданной конструкции, либо чисто феноменологически по массогабаритным параметрам системы без учета упомянутого взаимодействия, часто играющего роль основного ограничивающего фактора.

В данной работе проводятся оценка и сравнительный анализ предельно достижимых параметров одно- и двухконденсаторных МЭМП [1–5], преобразующих энергию механических микроколебаний в электрическую энергию при модуляции величины межэлектродных зазоров конденсаторов с учетом взаимного влияния электрических и упругих сил.

Оценка предельных параметров одноконденсаторных МЭМП первого типа. Оценим предельные параметры МЭМП с одним переменным конденсатором. Типичная электрическая схема одноконденсаторного МЭМП приведена на рис. 1. Преобразование механической энергии в электрическую в данном случае имеет место при раздвижении пластин конденсатора замыканием на короткое время ключа Sw_1 . В момент достижения максимального зазора конденсатор C_1 подключается (замыканием ключа Sw_2) к выходной цепи и осуществляется передача запасенной электрической энергии в нагрузку. Затем цикл преобразования повторяется.

Механическую систему одноконденсаторного преобразователя первого типа представим в виде простейшей электромеханической системы (рис. 2), в которой наряду с электростатической силой $F_{эл}$ и силой упругости $F_{уп}$ пружины на подвижный электрод действует дополнительная квазистатическая внешняя сила F_0 . В этом случае уравнение равновесия (баланс сил) может быть представлено в виде

$$F_{уп} + F_{эл} + F_0 = -ky + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{2} \left(\frac{V}{d-y} \right)^2 + F_0 = 0, \quad (1)$$

где k — коэффициент квазиупругой силы пружины; y — величина смещения подвижного электрода относительно положения равновесия; ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума ($8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); d — зазор между электродами; S — площадь электрода; V — величина напряжения между электродами.

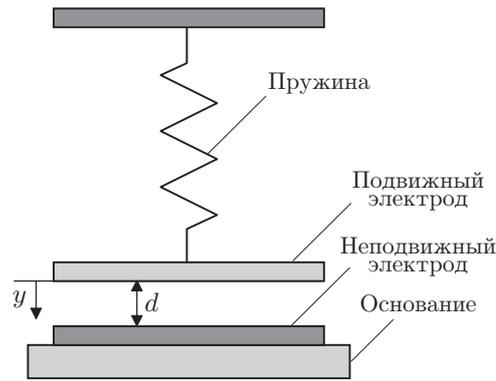


Рис. 2

Из (1) следует, что одним из эффектов, ограничивающих возможности данной электромеханической системы, является эффект схлопывания [6]. В работе [7] показано, что для такой системы критическое смещение $z_{кр}$ и критическое напряжение $V_{кр}$ определяются выражениями

$$z_{кр} = (1 + 2S_p)/3; \quad V_{кр}^* = 4(1 - S_p)^3/27, \quad (2)$$

где $z = y/d$; $V_{кр}^* = 0,5 C_0 V_{кр}^2/kd^2$; $C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon S/d$; $S_p = F_0/kd$.

Согласно (2) эффект схлопывания в этой системе задает и величину максимального заряда $Q_{max} = C_{max}V$, так как величина максимальной емкости ограничивается значением критического смещения, а величина напряжения между подвижным и неподвижным электродами — значением критического напряжения. При этом

$$C_{max} \leq 1,5C_0/(1 - S_p), \quad V_{кр} = V_0 \sqrt{(1 - S_p)^3},$$

где $V_0 = \sqrt{8kd^2/27C_0}$ — критическое напряжение в отсутствие внешней силы. Таким образом, у одноконденсаторного МЭМП первого типа при максимальном сближении электродов

$$Q_{max} = C_{max}V_{min} = d \sqrt{\frac{2}{3}} C_0 k (1 - S_p);$$

$$Q_{max}^* = C_{max}^* V_{min}^* = \frac{C_{max}}{C_0} \frac{V_{min}}{V_0} = \frac{3}{2} \sqrt{(1 - S_p)}. \quad (3)$$

Так как при неизменном заряде $C_{max}V_{min} = C_{min}V_{max}$, то, полагая, что изменение емкости после отключения ключа Sw_1 (см. рис. 1) вызвано изменением внешней силы от F_0 до $-F_0$ (первый вариант внешнего воздействия — А), получим

$$V_{max} = \frac{1 + 2S_p}{1 - S_p} V_{min} = V_0 (1 + 2S_p) \sqrt{(1 - S_p)};$$

$$V_{max}^* = \frac{V_{max}}{V_0} = (1 + 2S_p) \sqrt{(1 - S_p)}. \quad (4)$$

Из (4) следует, что значение V_{\max} достигает абсолютного максимума при $S_p = 0,5$. При этом $V_{\max} = \sqrt{2}V_0$. Из (4) также следует, что отношение V_{\max} к V_{\min} , как и отношение $\Delta V^*/V_{\max}^* = (V_{\max}^* - V_{\min}^*)/V_{\max}^*$ (рис. 3), возрастает с увеличением внешней силы. Однако этот рост вызван не столько увеличением V_{\max} , сколько уменьшением V_{\min} (т. е. уменьшением допустимого напряжения, до которого можно заряжать конденсатор C_1 при максимальном сближении электродов).

Аналогично можно показать, что для данной системы

$$C_{\min}^* V_{\max}^{*2} = \frac{C_{\min}}{C_0} \frac{V_{\max}^2}{V_0^2} = \frac{3}{2} (1 + 2S_p)(1 - S_p). \tag{5}$$

Эта зависимость также имеет максимум, но при $S_p = 1/4$ (см. рис. 3). При этом

$$C_{\min} V_{\max}^2 = kd^2/2, \quad V_{\max} = 2V_{\min} = 3\sqrt{3}V_0/4, \quad C_{\min}^* V_{\max}^{*2} = 1,688.$$

Из вышеизложенного следует, что к концу цикла максимальная энергия, накопленная в конденсаторе C_1 (см. рис. 1), когда электроды максимально раздвинуты механической силой, не превысит значения $0,25kd^2$.

Приведенные выражения позволяют найти и допустимое отношение энергии, накопленной в конденсаторе к концу цикла (когда ключ Sw_1 разомкнут и электроды максимально раздвинуты), к энергии, переданной конденсатору от внешнего источника в начале цикла (когда ключ Sw_1 замкнут). С учетом (5) и (3) имеем

$$\frac{C_{\min} V_{\max}^2}{C_{\max} V_{\min}^2} = \frac{1 + 2S_p}{1 - S_p}.$$

Это отношение растет с увеличением S_p , а при $S_p = 1/4$ отношение $C_{\min} V_{\max}^2 / C_{\max} V_{\min}^2 = 2$. Однако следует отметить, что и в этом случае рост отношения вызван не столько увеличением энергии, накопленной в конденсаторе к концу цикла, сколько уменьшением допустимой энергии, передаваемой конденсатору в начале цикла от внешнего источника (см. рис. 3).

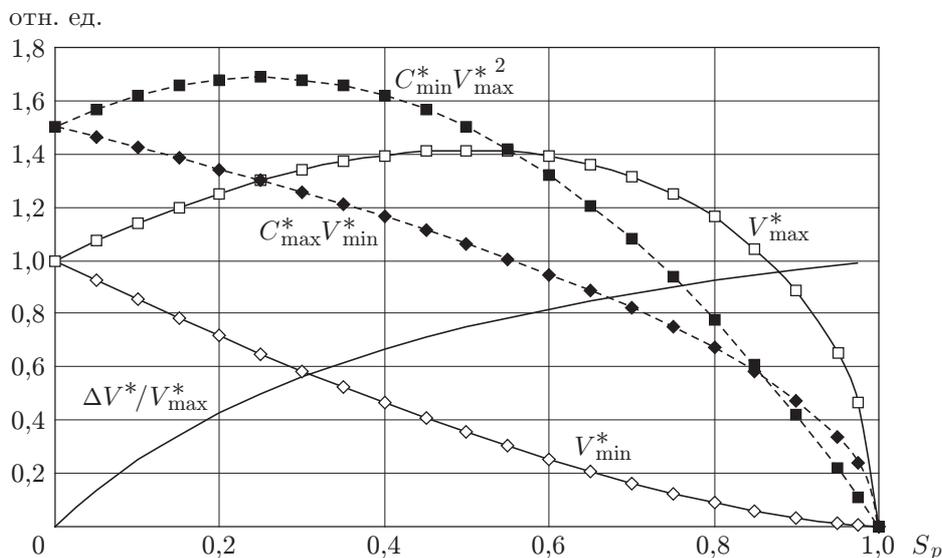


Рис. 3

Максимальное напряжение и энергию, накопленную в конденсаторе к концу цикла, можно увеличить, если использовать внешнюю силу лишь для увеличения межэлектродного зазора. При этом сила должна изменяться только от 0 до $-F_0$ (второй вариант внешнего воздействия — B).

Согласно (2) при $F_0 = 0$ $C_{\max} \leq 1,5C_0$, а $V_{\min} \leq V_0$. В этом случае при максимальном сближении электродов заряд не превысит значения

$$Q_{\max} = C_{\max}V_{\min} = \sqrt{2C_0kd^2/3}, \quad (6)$$

а $C_{\max}^*V_{\min}^* = C_{\max}V_{\min}/C_0V_0 = 1,5$. Тогда электростатическая сила достигнет значения

$$F_{\text{эл}} = Q_{\max}^2/(2\varepsilon_0\varepsilon S) = kd/3$$

и после выключения ключа Sw_1 при увеличении зазора между электродами дополнительной внешней силой будет оставаться неизменной. В результате получим

$$V_{\max} = V_0(1 - 1,5S_p), \quad (7)$$

$$C_{\min}^*V_{\max}^2 = \frac{C_{\min}}{C_0} \frac{V_{\max}^2}{V_0^2} = \frac{C_{\min}V_{\max}^2}{C_{\max}V_{\min}^2} = \frac{3}{2}(1 - 1,5S_p), \quad (8)$$

а энергия, накопленная в конденсаторе к концу цикла преобразования, когда ключ Sw_2 еще разомкнут, но электроды уже максимально раздвинуты, не превысит значения

$$U_{\max} \leq 0,5C_{\min}V_{\max}^2 = 2kd^2(1 - 1,5S_p)/9. \quad (9)$$

Отметим, что в отличие от выражений (2)–(5), где $S_p > 0$, в выражениях (7)–(9) $S_p < 0$.

Оценки показывают, что в данном случае V_{\max} превышает значение максимально достижимого напряжения в случае A (т. е. $\sqrt{2}V_0$) при $S_p \leq -0,276$. Соответственно энергия U_{\max} , накопленная в конденсаторе к концу цикла в случае B (согласно (9)), превысит максимально накопленную энергию в случае A (т. е. $0,25kd^2$) при $S_p \leq -1/12$.

Если в случае B максимальный зазор между электродами (в конце цикла) ограничить значением $z = -1$, то согласно (9) U_{\max} достигнет величины $2kd^2/3$, что в 2,6 раза превысит максимальную энергию, которая может быть накоплена в конденсаторе в случае A . При этом V_{\max} достигнет значения $3V_0$ и станет в 2,1 раза больше максимально возможного напряжения в случае A . Для этого потребуется приложить внешнюю силу $F_0 = -4kd/3$.

Оценка предельных параметров одноконденсаторных МЭМП второго типа. В МЭМП с одним переменным конденсатором наряду с конструкцией, в которой используются параллельные электроды, можно использовать и другую конструкцию — со встречно-штыревым или гребенчатым расположением электродов (второй тип конструкции). Элемент такой конструкции преобразователя показан на рис. 4. Она содержит две зеркально-симметричные гребенки неподвижных электродов 1, электрически соединенные между собой (правая половина на рисунке не показана).

В этом преобразователе под действием внешней силы F_0 происходит смещение подвижного электрода 2 вдоль оси y . При этом зазоры d_1 и d_2 изменяются, определяя изменение полной емкости между электродами. В данном случае

$$C = 2C_0/(1 - z^2), \quad (10)$$

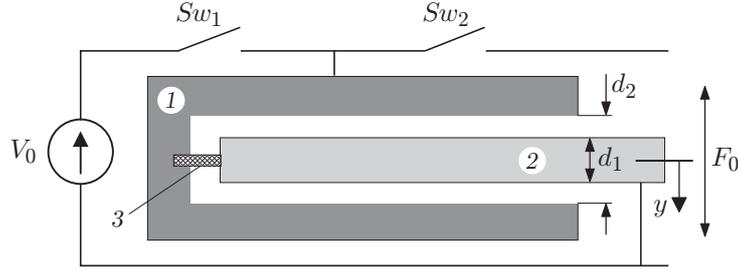


Рис. 4

где $C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon S/d$; d — межэлектродный зазор в равновесии, когда $d_1 = d_2 = d$; S — площадь перекрытия электродов. В результате уравнение равновесия приобретает вид

$$F_{y\text{п}} + F_{\text{эл}} + F_0 = -Gdz + 0,5Q^2z/(\varepsilon_0\varepsilon S) + F_0 = 0. \quad (11)$$

Здесь G — коэффициент квазиупругой силы упругого подвеса 3, а Q — величина заряда на обкладках конденсатора. Из (11) следует, что в рассматриваемой электромеханической системе электрическое поле влияет на смещение подвижного электрода через изменение эффективной жесткости

$$G_{\text{эфф}} = G - Q^2/(2\varepsilon_0\varepsilon Sd) = (1 - \delta^2)G, \quad (12)$$

где $\delta < 1$ — коэффициент запаса жесткости. Для систем с положительной жесткостью ($G_{\text{эфф}} > 0$) максимальный заряд Q_{max} согласно (12) не должен быть больше

$$Q_{\text{кр}} = Q_{\text{max}} = \delta d \sqrt{2GC_0} = \delta \sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon GSd}. \quad (13)$$

Таким образом, в подобных конструкциях МЭМП максимальное напряжение между электродами не должно превышать значения

$$V_{\text{max}} = Q_{\text{кр}}/C_{\text{min}} = \delta d \sqrt{0,5G/C_0}, \quad (14)$$

где $C_{\text{min}} = 2C_0$ — емкость системы в равновесии, когда $z = 0$ и $d_1 = d_2 = d$.

Так как в процессе изменения межэлектродного зазора полный заряд сохраняется, то с учетом (13) и (10) получим, что напряжение между подвижным и неподвижным электродами при их максимальном сближении в этой конструкции ограничено значением

$$V_{\text{min}} = Q_{\text{кр}}/C_{\text{max}} = \delta d \sqrt{0,5G/C_0} (1 - z_{\text{max}}^2), \quad (15)$$

где $|z_{\text{max}}| < 1$ — величина максимально допустимого относительного смещения электродов от положения равновесия.

В результате в МЭМП с одним переменным конденсатором гребенчатой конструкции энергия, которую можно передать системе на этапе заряда (при максимальном сближении электродов), не превысит значения

$$U_{\text{min}} = 0,5C_{\text{max}}V_{\text{min}}^2 = 0,5\delta^2Gd^2(1 - z_{\text{max}}^2), \quad (16)$$

а энергия, накопленная к этапу разряда, — значения

$$U_{\text{max}} = 0,5C_{\text{min}}V_{\text{max}}^2 = 0,5\delta^2Gd^2. \quad (17)$$

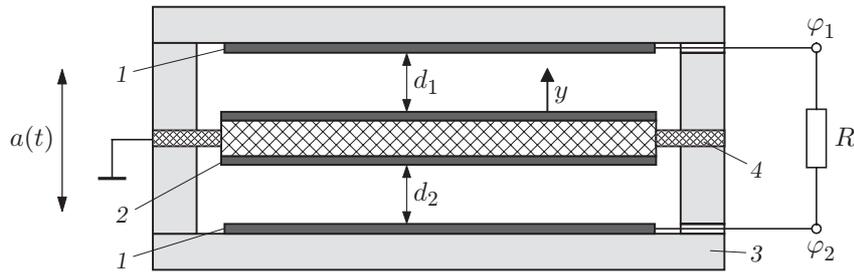


Рис. 5

Таким образом, допустимое отношение энергии, накопленной в конденсаторе к концу цикла, когда электроды максимально раздвинуты, к энергии, переданной конденсатору в начале цикла от внешнего источника, в данном случае будет

$$\frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{1}{(1 - z_{\max}^2)} = \left[1 - \left(\frac{S_{p\max}}{1 - \delta^2} \right)^2 \right]^{-1}. \quad (18)$$

Здесь $S_{p\max} = F_{0,\max}/Gd$, а $F_{0,\max} < G_{\text{эфф}}d$.

Сопоставляя (14) и (17) с выражениями для соответствующих предельных параметров МЭМП первого типа, можно сделать вывод, что максимальное напряжение между электродами при использовании гребенчатой конструкции конденсатора в лучшем случае составит $0,92\delta$ от значения максимального напряжения между электродами при сравнении со случаем *A* и $0,43\delta$ — при сравнении со случаем *B*. В то же время значение максимальной энергии, накопленной к моменту разряда при использовании гребенчатой конструкции конденсатора, может в $1,5\delta^2$ раза превысить значение $2kd^2/3$, соответствующее максимальной энергии, накопленной в переменном конденсаторе в случае *B*.

Оценка предельных параметров двухконденсаторного МЭМП. Конструкция такого преобразователя (рис. 5) содержит тонкую проводящую пластинку, колеблющуюся под механическим воздействием между двумя неподвижными изолированными между собой электродами (1 — неподвижные электроды, 2 — подвижный электрод, 3 — корпус, 4 — балочки упругого подвеса, *R* — сопротивление нагрузки).

Электрическая схема двухконденсаторного преобразователя приведена на рис. 6. При колебаниях корпуса преобразователя происходит смещение подвижного электрода относительно неподвижных, изменяются емкости C_1 и C_2 (предварительно заряженные), а также потенциал неподвижных электродов, что используется для совершения полезной работы при протекании тока через сопротивление нагрузки *R*.

Анализ работы такой системы показал [5], что если в установившемся режиме механическая сила изменяется по гармоническому закону с частотой ω (т. е. $ma(t) = ma_0 \cos(\omega t) =$

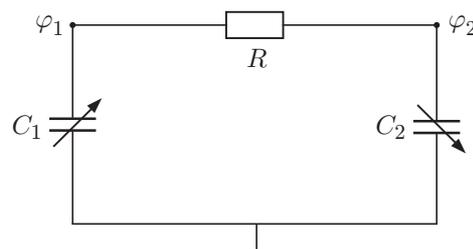


Рис. 6

$= -mY_0\omega^2 \cos(\omega t)$, здесь $a(t)$ — ускорение корпуса преобразователя, определяемое внешним воздействием), то для симметричной конструкции, когда $d_i = d$, $S_i = S$, а величины зазоров d_i значительно меньше любого из линейных размеров подвижного электрода, система уравнений, описывающих поведение преобразователя, может быть представлена в виде

$$\frac{d\Delta\varphi}{dt} = -2\frac{\Delta\varphi}{RC_0} + 2\frac{V_{\text{нач}}}{d}\frac{dy}{dt},$$

$$m\frac{d^2y}{dt^2} + B\frac{dy}{dt} + Gy - C_0\frac{V_{\text{нач}}}{d}\left(2\frac{V_{\text{нач}}}{d}y - \Delta\varphi\right) = -ma(t),$$

где $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ — дифференциальное напряжение на резисторе R ; $C_0 = \varepsilon_0\varepsilon S/d$; $V_{\text{нач}}$ — начальное напряжение, приложенное к конденсаторам в момент их заряда; y — величина смещения подвижного электрода от положения равновесия; m — его масса; G — коэффициент квазиупругой силы подвеса; B — коэффициент силы вязкого трения воздушно-газовой среды в межэлектродном зазоре. В этом случае выражение для активной мощности, выделяемой в резисторе R , принимает вид

$$P = \left(\frac{a_0 V_{\text{нач}}}{d}\right)^2 \frac{2 \sin^2(\phi)}{R\omega_0^4 \left\{ \left[1 - (\omega/\omega_0^*)^2 \right]^2 + 4\xi^2(\omega/\omega_0^*)^2 \right\}}, \quad (19)$$

где $\phi = \arctg(\omega/\omega_c)$, $\omega_c = 2/RC_0$; $\omega_0^* = \sqrt{G_{\text{эфф}}/m}$ — частота собственных колебаний двухконденсаторного преобразователя с учетом взаимного влияния электрических и упругих сил; $\xi = 0,5B_{\text{эфф}}/\sqrt{G_{\text{эфф}}m}$ — коэффициент затухания;

$$G_{\text{эфф}} = G - 2(V_{\text{нач}}/d)^2 C_0 \cos^2 \phi = (1 - \delta^2) G;$$

$$B_{\text{эфф}} = B + (V_{\text{нач}}/d)^2 RC_0^2 \cos^2 \phi, \quad (20)$$

здесь δ — коэффициент запаса жесткости.

Из (20) следует, что в рассматриваемой двухконденсаторной электромеханической системе электрическое поле влияет на смещение подвижного электрода через изменения коэффициента силы вязкого трения $B_{\text{эфф}}$ и эффективной жесткости $G_{\text{эфф}}$. При этом для систем с положительной жесткостью электрическое напряжение не должно быть больше

$$V_{\text{нач}} \leq V_{\text{кр}} = \delta d \sqrt{0,5G[1 + (\omega/\omega_c)^2]}/C_0. \quad (21)$$

Из (21) следует ограничение на значение максимальной энергии, передаваемой от внешнего источника конденсаторам C_1 и C_2 до начала колебаний. С учетом (21) имеем

$$C_0 V_{\text{нач}}^2 \leq 0,5\delta^2 G d^2 (1 + (\omega/\omega_c)^2).$$

Если напряжение $V_{\text{нач}}$ выбирать в соответствии с (21) равным $V_{\text{кр}}$, то выражение (19) для активной мощности, выделяемой в резисторе, примет вид

$$P_1 = (\delta a_0)^2 \frac{G}{2} \frac{\omega^2}{\omega_c \omega_0^{*4} \left\{ \left[1 - (\omega/\omega_0^*)^2 \right]^2 + 4 \xi^2 (\omega/\omega_0^*)^2 \right\}}.$$

Полагая при этом, что в системе имеет место только «электрическая составляющая» диссипации энергии ($B = 0$) и $\omega = \omega_0^*$, из (19) получим

$$P_1 = \left(\frac{a_0 m}{\delta}\right)^2 \frac{\omega_c}{2G} = \left(\frac{Y_0(1 - \delta^2)}{\delta}\right)^2 \frac{G\omega_c}{2},$$

когда амплитуда колебаний подвижного электрода определяется соответственно амплитудой ускорения a_0 или амплитудой смещения Y_0 корпуса преобразователя. Если же амплитуда колебаний подвижного электрода ограничена величиной $y_{0, \max}$, то

$$P_1 = (\delta G y_{0, \max})^2 \frac{1 - \delta^2}{2\omega_c m}.$$

Отметим, что поскольку всегда $y_{0, \max} \leq d$, то при $\omega = \omega_0$ ограничение амплитуды колебаний подвижного электрода происходит при

$$Y_{0, \max} = \frac{a_{0, \max}}{\omega_0^{*2}} \geq d \frac{\delta^2}{1 - \delta^2} \frac{\omega_0^*}{\omega_c} = \frac{\delta^2}{2\sqrt{1 - \delta^2}} \sqrt{\frac{G}{m}} \varepsilon_0 \varepsilon S R. \quad (22)$$

Из (22) следует, что у данной конструкции преобразователя мощность, выделяемая в резисторе R , не превысит значения

$$P_1 = 0,5 Y_0 \omega_0^{*3} m d = 0,5 a_0 \omega_0^* m d, \quad (23)$$

а амплитуда дифференциального напряжения ($\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$) на резисторе R — значения

$$\Delta\varphi_1 = \sqrt{Y_0 \omega_0^{*3} m d R}. \quad (24)$$

При этом параметры системы необходимо выбирать так, чтобы выполнялись соотношения

$$\frac{\delta^2}{1 - \delta^2} \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S R}{2} \geq \frac{Y_0}{\omega} = \frac{a_0}{\omega^3}; \quad (25)$$

$$\sqrt{(1 - \delta^2) G/m} = \omega_0^* = \omega; \quad \frac{\delta^2}{\sqrt{1 - \delta^2}} \frac{\omega}{\omega_c} \gg \frac{1}{Q},$$

где Q — добротность механической системы в отсутствие заряда на конденсаторах.

Из (20) следует, что при $Q = (\sqrt{1 - \delta^2} \omega_c) / (\delta^2 \omega) = Q^*$ собственные (не электрические) потери в механической системе преобразователя сравняются с потерями из-за торможения электрическим полем. Для трансформации большей части механической энергии в электрическую необходимо, чтобы добротность механической системы Q без учета воздействия электрического поля была не менее $(100-200)Q^*$. Оценки показывают, что для этого может потребоваться уменьшение давления воздушно-газовой среды, окружающей подвижный электрод, до 20–40 Па и менее.

Выражения (23)–(25) дают возможность рассчитать оптимальные параметры двухконденсаторного МЭМП при заданных параметрах внешних колебаний Y_0 , a_0 и ω .

Согласно (20) основным ограничивающим фактором является условие сохранения системой положительной жесткости. При этом с учетом (21) и (23) выражение для оценки

отношения энергии, отдаваемой в нагрузку за период колебаний, к энергии, запасенной в двух конденсаторах от внешнего источника до начала колебаний, принимает вид

$$\frac{P_1 T_0}{C_0 E^2} = \frac{2\pi}{\delta^2} S_p,$$

где $S_p = a_0 m / Gd$. Если учесть, что максимальная допустимая амплитуда ускорения a_0 ограничена соотношением (22), то получим для данной конструкции МЭМП

$$\frac{P_1 T_0}{C_0 E^2} \leq 2\pi \frac{\omega_0^*}{\omega_c}.$$

Поскольку за один цикл работы генератора в нагрузку передается энергия, соответствующая лишь 10–20 % энергии, передающейся системе от внешнего источника, то требуется совершить 10–20 циклов, чтобы эта энергия превысила энергию, запасенную от внешнего источника, в 2 раза. При частоте колебаний порядка 250 Гц для этого потребуется около 0,1 с.

Многочастотный режим. Реальные источники микромеханических колебаний имеют достаточно широкий частотный спектр (практически от 10 до 1000 Гц). Поэтому представляет интерес рассмотреть возможность использования МЭМП для сбора энергии колебаний не только с одной фиксированной частотой, но и в более широкой спектральной области.

Как уже было отмечено, в МЭМП с одним конденсатором необходимо синхронизовать работу ключей Sw_1 и Sw_2 с колебаниями системы, что затрудняет их использование в многочастотном режиме. В преобразователях с двумя переменными конденсаторами никакой синхронизации не требуется, поэтому их можно использовать и в многочастотном режиме.

Анализ показывает, что в этом случае для симметричной конструкции преобразователя в установившемся режиме, когда частота наивысшей гармоники механических колебаний системы много меньше ω_c ($\omega_i / \omega_c \ll 1$), эффективные коэффициенты упругости и затухания при переходе от одночастотного возбуждения к многочастотному практически не изменяются. Не изменяется и величина критического напряжения $V_{кр} = \delta d \sqrt{0,5G/C_0}$. В результате каждая мода колебаний преобразуется в электрический сигнал независимо, а взаимное влияние мод проявляется в том, что все они аддитивно изменяют результирующую амплитуду колебаний подвижного электрода, которая ограничена величиной межэлектродного зазора. Однако при малых амплитудах ускорений и колебаний системы это не имеет практического значения.

При сделанных выше допущениях мгновенная мощность, выделяемая в резисторе R , теперь будет иметь вид

$$P_{\text{МГН}} = 4 \frac{V_{\text{нач}}^2}{R} \left\{ \sum z_i^0 \frac{\omega_i}{\omega_c} \sin(\omega_i t + \gamma_i + \psi_i - \phi_i) \right\}^2.$$

Таким образом, средняя активная мощность, выделяемая за период, будет зависеть еще и от перекрестных членов, вклад которых в результирующую мощность определится значениями частот и фазовых углов сомножителей. На величину результирующей активной мощности существенное влияние оказывает также и выбор частоты собственных колебаний преобразователя ω_0^* .

Заключение. В предлагаемой работе проведено сравнение характеристик одно- и двухконденсаторных МЭМП с учетом взаимного влияния электрических и упругих сил. Найдены условия, ограничивающие возможность повышения их полезной выходной мощности.

Показано, что основными ограничивающими факторами повышения мощности одноконденсаторного МЭМП в зависимости от конструкции являются эффект схлопывания и условие сохранения системой положительной жесткости.

При этом, если внешняя сила изменяется от F_0 до $-F_0$, то:

1) максимальный заряд на обкладках переменного конденсатора не должен превышать значения

$$Q_{\max} = \sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon Sdk(1 - S_p)/3};$$

2) максимальная энергия, накопленная в конденсаторе к концу цикла, не превысит значения $0,25kd^2$, а максимальное напряжение — значения $\sqrt{16kd^2/27C_0}$.

Если внешняя сила изменяется от 0 до $-F_0$, то:

1) максимальный заряд не должен превышать значения

$$Q_{\max} = \sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon Sdk/3};$$

2) максимальная энергия, накопленная в конденсаторе к концу цикла, не превысит значения $2kd^2(1 - 1,5S_p)/9$, а максимальное напряжение — значения $V_0(1 - 1,5S_p)$.

В одноконденсаторном МЭМП с гребенчатым расположением электродов:

1) максимальный заряд не должен превышать значения

$$Q_{\max} = \delta\sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon SGd};$$

2) максимальная энергия, накопленная в конденсаторе к концу цикла, не превысит значения $\delta^2Gd^2/2$, а максимальное напряжение — значения $\delta\sqrt{Gd^2/2C_0}$.

Анализ особенностей функционирования двухконденсаторного МЭМП показал, что, если внешняя сила изменяется по гармоническому закону с частотой ω , то:

1) основным ограничивающим фактором повышения его мощности является условие сохранения системой положительной жесткости, для обеспечения которой максимальное напряжение на обкладках конденсаторов перед началом работы не должно превышать значения

$$V_{\text{кр}} = \delta d \sqrt{0,5G[1 + (\omega/\omega_c)^2]/C_0};$$

2) максимальная энергия, отдаваемая в нагрузку за период колебаний (один цикл работы), не превысит значения

$$P_1T_0 \leq \pi\delta^2Gd^2(\omega_0^*/\omega_c)(1 + (\omega_0^*/\omega_c)^2);$$

3) для увеличения максимальной энергии, отдаваемой в нагрузку, в случае двухконденсаторного МЭМП можно использовать многочастотный режим.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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.

2. **Sterken T., Fiorini P., Puers R.** Motion-based generators for industrial applications // Symp. on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS & MOEMS. Stresa, Italy, 26–28 April 2006.
3. **Chiu Y., Kuo C.-T., Chu Yu-S.** Design and fabrication of a micro electrostatic vibration-to-electricity energy converter // Ibid.
4. **Багинский И. Л., Косцов Э. Г.** Анализ возможности создания микроэлектронного электростатического генератора энергии // Автометрия. 2002. № 1. С. 107–122.
5. **Драгунов В. П., Косцов Э. Г.** МЭМ электростатический генератор энергии // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 11. С. 47–53.
6. **Драгунов В. П.** Влияние формы упругого элемента на характеристики микроэлектромеханических систем // Микросистемная техника. 2004. № 1. С. 20–26.
7. **Драгунов В. П.** Нелинейная модель упругого элемента МЭМС // Микросистемная техника. 2004. № 6. С. 19–24.

Поступила в редакцию 5 июня 2008 г.
