

УДК 519.63: 621.37:621.3.049.76

**ВЛИЯНИЕ НЕПАРАЛЛЕЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МЭМС В РЕЖИМЕ
С КОНТРОЛИРУЕМЫМ ЗАРЯДОМ****В.П. Драгунов, Р.Е. Синицкий, Д.Е. Киселёв***Новосибирский государственный технический университет*

Одним из наиболее существенных факторов, определяющих характеристики МЭМС, являются электромеханические взаимодействия. Поэтому большой интерес представляет поиск аналитических выражений, позволяющих вычислять емкости и силы с достаточной для практических применений точностью.

В данной работе представлены результаты исследований влияния непараллельности электродов на электромеханические взаимодействия в МЭМС. Анализ проведен для двух наиболее распространенных типов МЭМС – с двухэлектродной и встречно-штыревой (гребенчатой) конструкцией электродов в режиме с контролируемым зарядом. Получены выражения для расчета электростатических сил притяжения, потенциальной энергии, критического заряда и величины смещения подвижного электрода при различных наклонах электродов в режиме с контролируемым зарядом. Обнаружено, что в режиме работы с контролируемым зарядом в двухэлектродных МЭМС с непараллельными электродами возникает pull-in эффект. Рассмотрено влияние силы веса подвижного электрода на электромеханические взаимодействия в двухэлектродных МЭМС. Показано, что в режиме с контролируемым зарядом в МЭМС с гребенчатой конструкцией электродов при увеличении наклона электродов величина критического заряда η_{cr} сначала увеличивается, а затем уменьшается. Установлено, что максимальное значение критического заряда в этом случае достигается при $\tilde{\Delta} \cong 1,354$, а значение η_{cr} в максимуме равно 1,17.

Ключевые слова: МЭМС, преобразование энергии, эффект схлопывания, режим работы с контролируемым зарядом, микромеханический конденсатор, электростатическая сила, диапазон контролируемого смещения электрода, критические значения.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-58-71

Введение

В настоящее время одной из наиболее быстро развивающихся отраслей народного хозяйства остается микросистемная техника (МСТ). Этому способствуют высокая надежность и хорошие технико-экономические показатели устройств, создаваемых в рамках МСТ с использованием технологий микроэлектроники. Потребности в таких изделиях неуклонно возрастают, а области применения стремительно расширяются: микроманипуляторы, микрорезонаторы, микророботы, радиочастотные микропереключатели, геофоны; микротехнологии, биотехнологии, космические исследования, метрология, полупроводниковая промышленность и т. д. [1–9]. Изделия МСТ, благодаря своим малым размерам и низкой стоимости, проникают и на рынок товаров широкого потребления: камеры, смартфоны и другие устройства (гаджеты).

Большую часть изделий МСТ составляют микроэлектромеханические системы (МЭМС), в которых реализуется целая совокупность разнообразных связей и взаимодействий: механических, электрических, оптических и т. д.

В настоящее время идут непрерывный поиск и разработка новых все более совершенных МЭМС. При этом их схемотехника, конструкции и технологии изго-

товления постоянно усложняются и требуют разработки все более совершенных моделей, используемых при проектировании и оптимизации МЭМС.

Одним из наиболее существенных факторов, определяющих характеристики МЭМС, являются электромеханические взаимодействия. Эти взаимодействия в первую очередь определяют диапазоны управляемого перемещения подвижных элементов МЭМС, диапазоны перестройки емкости, максимально достижимые емкости, допустимые напряжения и заряды. Поэтому возникает необходимость в оценке электромеханических взаимодействий, а значит, и в разработке математических моделей, все более адекватно учитывающих особенности этих взаимодействий в реальных устройствах.

Согласно литературным данным при анализе электромеханических взаимодействий в большинстве случаев используют модели МЭМС с параллельными электродами. Однако реально существующие технологии не позволяют гарантировать параллельность электродов, тем более в условиях серийного производства. При этом непараллельность электродов может появляться из-за технологических погрешностей при изготовлении и сборке устройства [10, 11], а также в процессе эксплуатации при изменении направления движения системы из-за появления вращающих моментов [12].

В [11] мы рассмотрели влияние непараллельности электродов на электрические емкости и силы в МЭМС с двухэлектродной и гребенчатой конструкцией электродов в режиме с контролируемым напряжением. В данной работе проводится исследование влияния непараллельности электродов на электрические емкости и силы в МЭМС с двухэлектродной и гребенчатой конструкцией электродов в режиме с контролируемым зарядом.

1. Двухэлектродная конструкция

В качестве объекта исследования влияния непараллельности электродов на электрические емкости и силы в МЭМС с двухэлектродной конструкцией электродов использовали двухэлектродную модель переменного конденсатора, включающую два плоских непараллельных электрода (рис. 1) длиной a , шириной b , наименьшим начальным межэлектродным зазором d_0 и наибольшим начальным межэлектродным зазором $d_0 + \Delta$. В данной конструкции подвижный электрод, закрепленный на упругом подвесе, может перемещаться относительно неподвижного вдоль оси y . В расчетах также принимали, что при смещении подвижного электрода угол наклона α не изменяется.

Полагая, что в квазистатическом случае на электроды действуют только возвращающая сила упругости подвеса и электрическая сила притяжения между разноименно заряженными электродами, можно показать, что в случае с непараллельными электродами в режиме с контролируемым зарядом выражение для потенциальной энергии системы может быть представлено в виде

$$W = \frac{1}{2}ky^2 + \frac{Q^2}{2C}, \quad (1)$$

где k – жесткость упругого подвеса; y – величина смещения подвижного электрода от начального положения, когда минимальный межэлектродный зазор равен d_0 ; Q – заряд на электродах конденсатора и C – емкость конденсатора с непараллельными электродами.

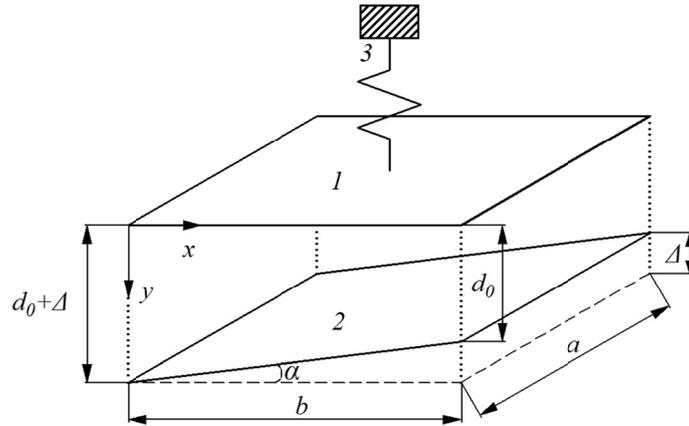


Рис. 1 – Двухэлектродная модель МЭМ конденсатора с непараллельными электродами:

1 – подвижный электрод; 2 – неподвижный электрод; 3 – упругие подвесы конструкции

Fig. 1 – Two-electrode model of the MEM capacitor with non-parallel electrodes:

1 – movable electrode; 2 – fixed electrode; 3 – elastic suspensions of construction

В нашем случае, пренебрегая особенностями распределения электрического поля у краев электродов (краевыми эффектами), зависимость емкости двухэлектродного конденсатора с непараллельными электродами от величины смещения подвижного электрода при малых α может быть представлена в виде

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon a b}{\Delta} \ln \left(\frac{\Delta + d_0 - y}{d_0 - y} \right), \quad (2)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды между электродами; ε_0 – электрическая постоянная.

С учетом (2) выражение (1) в безразмерных переменных принимает вид

$$\tilde{W} = \frac{\tilde{y}^2}{2} + \frac{\lambda \tilde{\Delta}}{\ln \left(1 + \frac{\tilde{\Delta}}{1 - \tilde{y}} \right)}, \quad (3)$$

где $\tilde{W} = W / (k d_0^2)$, $\tilde{y} = y / d_0$, $\lambda = Q_{com}^2 / (2 \varepsilon_0 \varepsilon a b k d_0)$, $\tilde{\Delta} = \Delta / d_0$.

На рис. 2, а и б приведены зависимости потенциальной энергии \tilde{W} от относительного смещения подвижного электрода \tilde{y} , рассчитанные с использованием (3). Рис. 2, а – для конденсатора с параллельными электродами при нескольких значениях приведенного заряда λ , рис. 2, б – для конденсатора с непараллельными электродами при нескольких значениях $\tilde{\Delta}$ и неизменном заряде.

Из рис. 2, а видно, что в случае конденсатора с параллельными электродами при увеличении заряда на электродах конденсатора точка устойчивого равновесия, соответствующая минимуму потенциальной энергии, монотонно смещается от $\tilde{y} = 0$ до $\tilde{y} = 1$. Таким образом, в данном случае диапазон контролируемого смещения подвижного электрода простирается от 0 до d_0 .

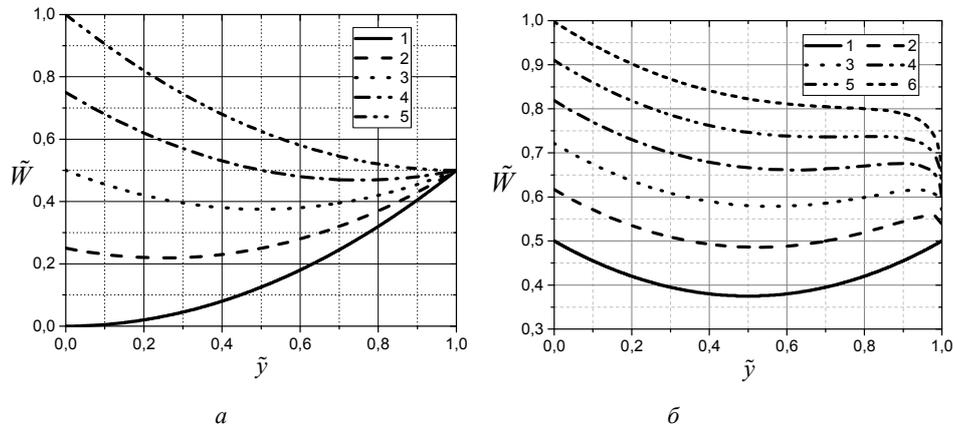


Рис. 2 – Зависимости приведенной потенциальной энергии \tilde{W} от относительного смещения подвижного электрода \tilde{y} :

a – конденсатор с параллельными электродами $\tilde{\Delta} = 0$ и $\lambda = 0-1, 0,25-2, 0,5-3, 1-4, 1,5-5$; *б* – конденсатор с непараллельными электродами $\lambda = 0,5$ и $\tilde{\Delta} = 0-1, \tilde{\Delta} = 1-2, \tilde{\Delta} = 1,5-3, \tilde{\Delta} = 2-4, \tilde{\Delta} = 2,5-5$

Fig. 2 – Dependences of the normalized potential energy \tilde{W} on the relative offset of a movable electrode \tilde{y} :

a – the capacitor with parallel electrodes $\tilde{\Delta} = 0$ and $\lambda = 0-1, 0,25-2, 0,5-3, 1-4, 1,5-5$; *b* – the capacitor with non-parallel electrodes $\lambda = 0,5$ and $\tilde{\Delta} = 0-1, \tilde{\Delta} = 1-2, \tilde{\Delta} = 1,5-3, \tilde{\Delta} = 2-4, \tilde{\Delta} = 2,5-5$

В случае же конденсатора с непараллельными электродами (рис. 2, б) при увеличении наклона электродов точка устойчивого равновесия (минимума энергии) сначала тоже смещается в область больших \tilde{y} , а затем вообще исчезает. Это связано с тем, что при непараллельных электродах электростатическая сила

$$F_Q = F_{0,Q} \frac{\tilde{\Delta}^2}{(1-\tilde{y})(1-\tilde{y}+\tilde{\Delta}) \left[\ln \left(1 + \frac{\tilde{\Delta}}{1-\tilde{y}} \right) \right]^2}, \quad (4)$$

здесь $F_{0,Q} = Q^2 / (2\epsilon_0 \epsilon a b)$ – электростатическая сила притяжения, действующая в конденсаторе с двумя параллельными электродами и межэлектродным зазором d_0 , при увеличении угла наклона электродов и неизменном заряде увеличивается. В результате для данного заряда при некотором угле наклона электродов возвращающая сила упругого подвеса уже не может компенсировать электростатическую силу притяжения, и подвижный электрод начинает неконтролируемо смещаться к неподвижному до их соприкосновения (pull-in эффект).

На рис. 3 приведены зависимости нормированного смещения подвижного электрода \tilde{y} от величины приведенного заряда λ , рассчитанные для различных наклонов электродов. При этом полагали, что в квазистатическом случае на электроды действуют только возвращающая сила упругости подвеса и электрическая сила притяжения.

Видно, что при увеличении заряда смещение подвижного электрода сначала монотонно увеличивается, пока не достигнет критической точки (на рис. 3 отме-

чено жирными точками), характеризующейся значениями критического смещения \tilde{y}_{cr} и критического приведенного заряда λ_{cr} . При дальнейшем увеличении заряда подвижный электрод начнет неуправляемо смещаться к неподвижному до их соприкосновения, что и следовало из предыдущего анализа. Таким образом, в случае непараллельных электродов в режиме с контролируемым зарядом имеет место pull-in эффект в отличие от случая с параллельными электродами, где pull-in эффект не имеет места.

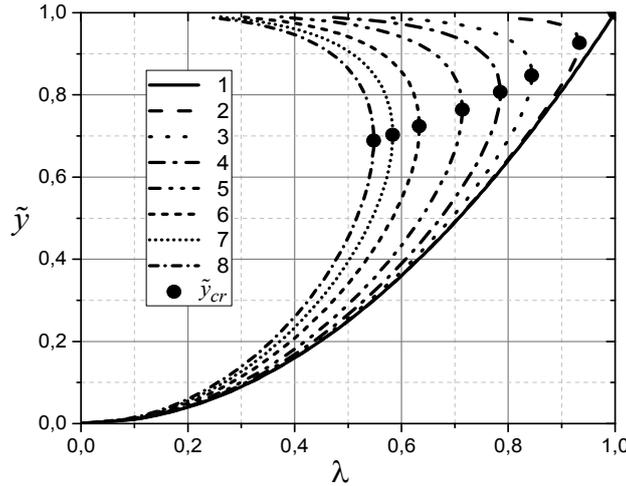


Рис. 3 – Зависимость нормированного смещения подвижного электрода \tilde{y} от величины приведенного заряда λ для различных наклонов электродов:

$$1 - \tilde{\Delta} = 0; 2 - \tilde{\Delta} = 0,1; 3 - \tilde{\Delta} = 0,5; 4 - \tilde{\Delta} = 1; 5 - \tilde{\Delta} = 2; 6 - \tilde{\Delta} = 4; \\ 7 - \tilde{\Delta} = 6; 8 - \tilde{\Delta} = 8$$

Fig. 3 – Dependence of the normalized offset of a movable electrode \tilde{y} on value of the normalized charge λ for different inclinations of electrodes:

$$1 - \tilde{\Delta} = 0; 2 - \tilde{\Delta} = 0,1; 3 - \tilde{\Delta} = 0,5; 4 - \tilde{\Delta} = 1; 5 - \tilde{\Delta} = 2; 6 - \tilde{\Delta} = 4; \\ 7 - \tilde{\Delta} = 6; 8 - \tilde{\Delta} = 8$$

Анализ показывает, что при очень медленном увеличении заряда зависимость значения критического смещения \tilde{y}_{cr} подвижного электрода относительно неподвижного от наклона электродов определяется выражением

$$\left(1 + \tilde{\Delta} - 2\tilde{\Delta}\tilde{y}_{cr} - 4\tilde{y}_{cr} + 3\tilde{y}_{cr}^2\right) \ln\left(1 + \frac{\tilde{\Delta}}{1 - \tilde{y}_{cr}}\right) + 2\tilde{\Delta}\tilde{y}_{cr} = 0. \quad (5)$$

Используя (5), можно найти значение \tilde{y}_{cr} для заданного $\tilde{\Delta}$ лишь численно. Для оценки значения критического смещения подвижного электрода относительно неподвижного от наклона электродов можно предложить следующее выражение:

$$\tilde{y}_{cr,Q} = 1 + 0,0637\tilde{\Delta} - \sqrt{0,0637\tilde{\Delta}(1 + 0,036\tilde{\Delta})}, \quad (6)$$

аппроксимирующее зависимость критического смещения от $\tilde{\Delta}$ для $0 < \tilde{\Delta} \leq 7$ с погрешностью, не превышающей 1 %.

В свою очередь выражение для оценки критического заряда, при превышении которого электроды начнут неуправляемо сближаться до соприкосновения (pull-in эффект), принимает вид

$$Q_{pi} = \pm \frac{1}{\tilde{\Delta}} \ln \left(1 + \frac{\tilde{\Delta}}{1 - \tilde{y}_{cr}} \right) \sqrt{2\varepsilon_0 \varepsilon a b d_0 k \tilde{y}_{cr} (1 - \tilde{y}_{cr}) (1 + \tilde{\Delta} - \tilde{y}_{cr})}. \quad (7)$$

Выражения (5)–(7) определяют диапазоны управляемого смещения подвижного электрода и допустимых зарядов на электродах конденсатора.

В ряде случаев при разработке МЭМС возникает необходимость учета силы веса F_0 движущихся частей системы [13, 14].

Полагая, что в квазистатическом случае на электроды действуют возвращающая сила упругости подвеса, электрическая сила притяжения между разноименно заряженными электродами и сила веса F_0 , можно показать, что в случае с непараллельными электродами в режиме с контролируемым зарядом уравнение равновесия (баланса сил) может быть представлено в виде

$$ky - F_{0,Q} \frac{\Delta^2}{(d_0 - y)(\Delta + d_0 - y) \left[\ln \left(\frac{\Delta + d_0 - y}{d_0 - y} \right) \right]^2} + F_0 = 0. \quad (8)$$

В (8) F_0 принимается положительной, если эта сила стремится увеличить межэлектродный зазор, и отрицательной, если стремится уменьшить межэлектродный зазор.

Анализ показывает, что заменой переменных d_0 на $d^* = d_0 + F_0/k$ и y на $y^* = y + F_0/k$ уравнение (8) сводится к соответствующему уравнению для аналогичной системы, но с невесомым подвижным электродом:

$$ky^* - F_{0,Q} \frac{\Delta^2}{(d^* - y^*)(\Delta + d^* - y^*) \left[\ln \left(\frac{\Delta + d^* - y^*}{d^* - y^*} \right) \right]^2} = 0.$$

На рис. 4 приведены зависимости нормированного смещения подвижного электрода \tilde{y} от величины приведенного заряда λ , рассчитанные с использованием (8) для $\tilde{F} = F_0/kd_0 = 0, 0,2$ и $-0,2$ при $\tilde{\Delta} = 0$ и $0,5$.

Видно, что у двухэлектродной электромеханической системы с изменяющимся межэлектродным зазором учет силы веса сводится лишь к смещению начала отсчета.

В свою очередь выражения для оценки величин критического смещения и заряда с учетом веса подвижного электрода, при превышении которых электроды начнут неуправляемо сближаться до соприкосновения (pull-in эффект), в новых переменных y^* и d^* принимают вид (5) и (7) соответственно.

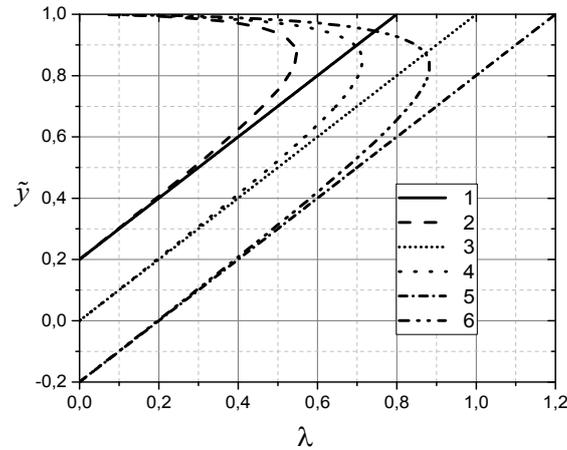


Рис. 4 – Зависимость нормированного смещения подвижного электрода \tilde{y} от величины приведенного заряда λ для различных наклонов электродов $\tilde{F} = -0,2$, $\tilde{\Delta} = 0 - 1$, $\tilde{\Delta} = 0,5 - 2$; $\tilde{F} = 0$, $\tilde{\Delta} = 0 - 3$, $\tilde{\Delta} = 0,5 - 4$; $\tilde{F} = 0,2$, $\tilde{\Delta} = 0 - 5$, $\tilde{\Delta} = 0,5 - 6$

Fig. 4 – Dependence of the normalized offset of a movable electrode \tilde{y} on value of the normalized charge λ for different inclinations of electrodes $\tilde{F} = -0,2$, $\tilde{\Delta} = 0 - 1$, $\tilde{\Delta} = 0,5 - 2$; $\tilde{F} = 0$, $\tilde{\Delta} = 0 - 3$, $\tilde{\Delta} = 0,5 - 4$; $\tilde{F} = 0,2$, $\tilde{\Delta} = 0 - 5$, $\tilde{\Delta} = 0,5 - 6$

2. Гребенчатая конструкция электродов

Помимо двухэлектродной конструкции электродов в МЭМС применяются переменные конденсаторы с гребенчатой (встречно-штыревой) конструкцией электродов (рис. 5). В процессе изготовления такого конденсатора электроды могут приобретать непараллельную форму в результате особенностей технологического процесса травления кремния [10]. Как правило, для этих целей используется глупо боковое реактивное ионное травление – «Bosh process» (DRIE).

В качестве объекта исследования применялась гребенчатая конструкция переменного МЭМ конденсатора, состоящая из двух плоских непараллельных неподвижных и одного подвижного электродов длиной a , высотой b , наименьшим и наибольшим начальным межэлектродным зазором в отсутствие заряда на электродах, соответственно d_0 и $d_0 + 2\Delta$. Подвижный электрод может перемещаться относительно неподвижных. Для дальнейших расчетов примем неизменность угла наклона электродов α при их смещении.

В случае пренебрежения особенностями распределения электрического поля у краев электродов (краевыми эффектами) зависимость полной емкости конденсатора с гребенчатой конструкцией электродов и непараллельными электродами от геометрических размеров может быть рассчитана с помощью выражения [15]

$$C_{com} = \varepsilon_0 \varepsilon ab \frac{1}{2\Delta} \left[\ln \left(\frac{d_0 + 2\Delta - x}{d_0 - x} \right) + \ln \left(\frac{d_0 + 2\Delta + x}{d_0 + x} \right) \right]. \quad (9)$$

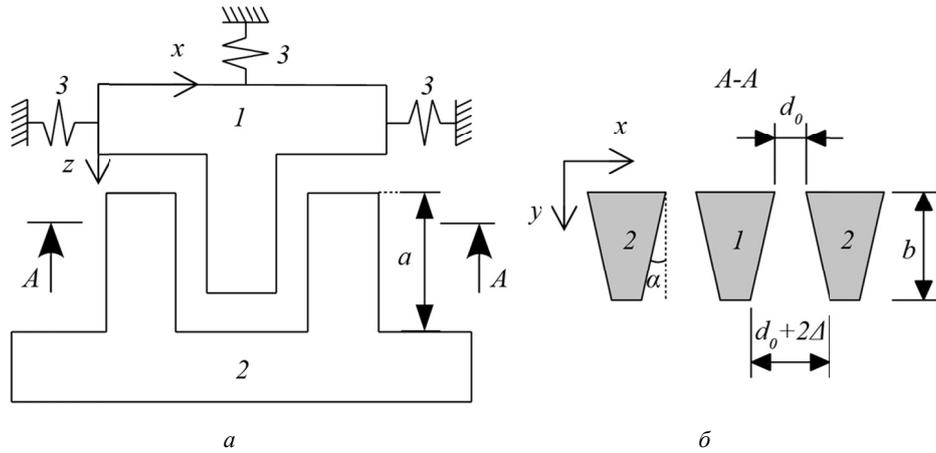


Рис. 5 – Конструкция гребенчатого МЭМ конденсатора с непараллельными электродами:
 1 – подвижный электрод; 2 – неподвижный электрод. Вид сверху (а) и сечение (б). Движение осуществляется вдоль оси x

Fig. 5 – The design of the interdigitated MEM capacitor with non-parallel electrodes:
 1 – movable electrode; 2 – fixed electrode. Top view (a) and section (b). The movement is carried out along the x – axis

При отсутствии наклона электродов (9) сводится к известному соотношению

$$C_0 = 2\varepsilon_0\varepsilon ab \frac{d_0}{d_0^2 - x^2}.$$

В данном случае выражение для потенциальной энергии конденсатора с гребенчатой конструкцией электродов имеет вид

$$W = \frac{1}{2} kx^2 + \frac{Q_{com}^2}{2C_{com}}, \tag{10}$$

где Q_{com} – полный заряд на электродах конденсатора.

С учетом (9) выражение (10) в безразмерных переменных принимает вид

$$\tilde{W} = \frac{\tilde{x}^2}{2} + \frac{2\lambda\tilde{\Delta}}{\ln\left(\frac{(1+2\tilde{\Delta})^2 - \tilde{x}^2}{1-\tilde{x}^2}\right)}, \tag{11}$$

где $\tilde{W} = W/(kd_0^2)$, $\tilde{x} = x/d_0$, $\lambda = Q_{com}^2/(2\varepsilon_0\varepsilon abkd_0)$, $\tilde{\Delta} = \Delta/d_0$.

На рис. 6, а и б приведены зависимости потенциальной энергии \tilde{W} от относительного смещения подвижного электрода \tilde{x} , рассчитанные с использованием (11) для конденсатора с гребенчатой конструкцией электродов. Рис. 6, а – для конденсатора с параллельными электродами при нескольких значениях приведенного заряда λ , рис. 6, б – для конденсатора с непараллельными электродами при нескольких значениях λ и $\tilde{\Delta} = 1$.

Из рис. 6, а видно, что в случае конденсатора с параллельными электродами при увеличении заряда на электродах экстремум на зависимости потенциальной

энергии от относительного смещения подвижного электрода все время остается в точке $\tilde{x} = 0$, а значение потенциальной энергии в точке экстремума растет. Отметим также, что при увеличении заряда от $\lambda = 0$ до $\lambda = 1$ эта точка является точкой устойчивого равновесия, а при $\lambda > 1$ она становится точкой неустойчивого равновесия. В результате при $\lambda > 1$ в такой системе появляется pull-in эффект. Таким образом, в данном случае диапазон допустимых зарядов на электродах конденсатора простирается от 0 до $\lambda = 1$.

В случае конденсатора с непараллельными электродами (рис. 6, б) при увеличении заряда на электродах конденсатора точка устойчивого равновесия (минимума энергии) тоже все время остается в точке $\tilde{x} = 0$, а значение потенциальной энергии в точке экстремума монотонно растет. Кроме того, при $\tilde{x} \neq 0$ появляются дополнительные экстремумы, соответствующие точкам неустойчивого равновесия. По мере увеличения заряда на электродах конденсатора все три экстремума сближаются и при некотором критическом значении приведенного заряда λ_{cr} сливаются. При дальнейшем увеличении заряда на электродах конденсатора остается только одна точка неустойчивого равновесия при $\tilde{x} = 0$. Таким образом, в данном случае диапазон допустимых зарядов на электродах конденсатора простирается от 0 до λ_{cr} .

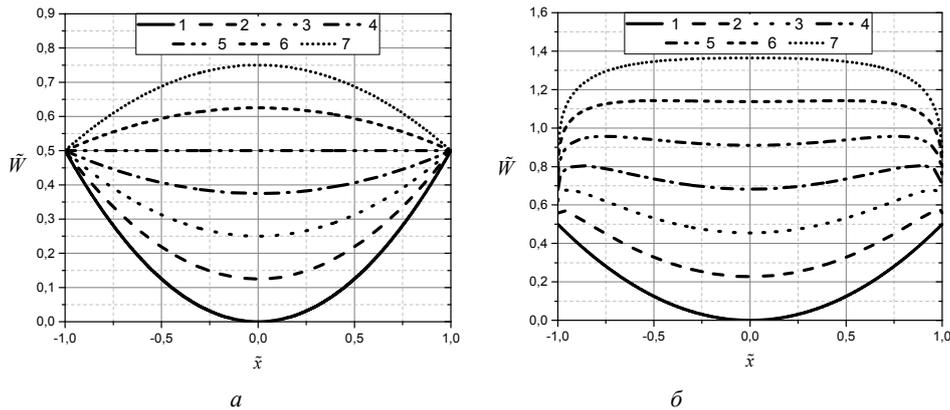


Рис. 6 – Зависимости приведенной потенциальной энергии \tilde{W} от относительного смещения подвижного электрода \tilde{x} :

a – конденсатор с параллельными электродами $\tilde{\Delta} = 0$ и $\lambda = 0 - 1, 0,25 - 2, 0,5 - 3, 0,75 - 4, 1 - 5, 1,25 - 6; 1,5 - 7$; *б* – конденсатор с непараллельными электродами $\lambda = 0, \tilde{\Delta} = 0 - 1; \tilde{\Delta} = 1,$ и $\lambda = 0,25 - 2, 0,5 - 3, 0,75 - 4, 1 - 5, 1,25 - 6, 1,5 - 7$

Fig. 6 – Dependences of the normalized potential energy \tilde{W} on the relative offset of a movable electrode \tilde{x} :

a – the capacitor with parallel electrodes $\tilde{\Delta} = 0$ and $\lambda = 0 - 1, 0,25 - 2, 0,5 - 3, 0,75 - 4, 1 - 5, 1,25 - 6; 1,5 - 7$; *b* – the capacitor with non-parallel electrodes $\lambda = 0, \tilde{\Delta} = 0 - 1; \tilde{\Delta} = 1,$ and $\lambda = 0,25 - 2, 0,5 - 3, 0,75 - 4, 1 - 5, 1,25 - 6, 1,5 - 7$

Для анализа зависимости величины критического заряда от относительного наклона электродов $\tilde{\Delta}$ воспользуемся уравнением равновесия (баланса сил). При учете только возвращающей силы упругого подвеса и электростатической силы для конденсатора с гребенчатой конструкцией электродов и непараллельными электродами в квазистатическом случае уравнение равновесия принимает вид

$$-kx + \varepsilon_0 \varepsilon ab \frac{Q_{com}^2}{2\Delta C_{com}^2} \left[\frac{x}{d_0^2 - x^2} - \frac{x}{(d_0 + 2\Delta)^2 - x^2} \right] = 0. \quad (12)$$

Исходя из симметрии задачи: при величине заряда на электродах, равном критическому Q_{pi} , подвижный электрод будет иметь только одну точку равновесия при $x = 0$. В результате из (12) имеем

$$Q_{pi} = \pm \frac{1}{\tilde{\Delta}} (1 + 2\tilde{\Delta}) \ln(1 + 2\tilde{\Delta}) \times \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon ab k d_0}{2(1 + \tilde{\Delta})}}. \quad (13)$$

При отсутствии наклона (13) преобразуется к виду

$$Q_{pi,0} = \pm \sqrt{2\varepsilon_0 \varepsilon ab k d_0}. \quad (14)$$

На рис. 7 приведена зависимость безразмерного критического заряда $\eta_{cr} = Q_{pi}/Q_{pi,0}$ от величины $\tilde{\Delta}$. Согласно (13) и (14), данная зависимость имеет максимум при $\tilde{\Delta} \cong 1,354$, а значение η_{cr} в максимуме равно 1,17.

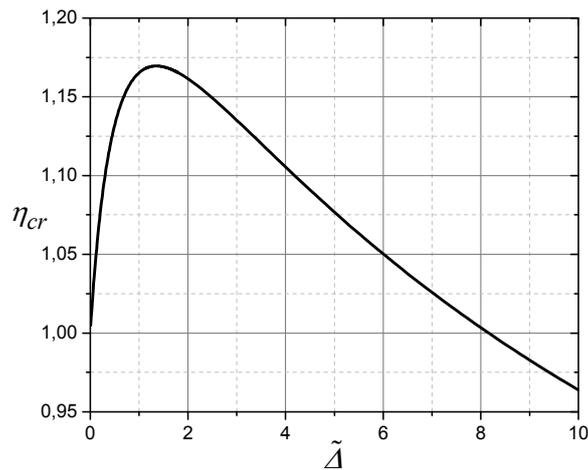


Рис. 7 – Зависимость безразмерного критического заряда η_{cr} от величины $\tilde{\Delta}$

Fig. 7 – Dependence of the dimensionless critical charge η_{cr} on value $\tilde{\Delta}$

Таким образом, зависимость Q_{pi} от относительного наклона электродов носит немонотонный характер. Отметим также: несмотря на то что общий заряд на электродах в данном случае сохраняется, по площади электродов он распределяется неравномерно. Увеличение угла наклона электродов приводит к увеличению градиента заряда и изменяет электростатическое воздействие. Отметим также, что поверхностная плотность заряда будет прямо пропорциональна напряжению, до которого в начальный момент времени была заряжена система.

Заключение

Исследовано влияние непараллельности электродов на электромеханические взаимодействия для МЭМС с двухэлектродной и гребенчатой конструкцией электродов в режиме с контролируемым зарядом.

Получены выражения для расчета электростатических сил, критического заряда и величины смещения подвижного электрода при различных наклонах электродов.

Показано, что в режиме с контролируемым зарядом в двухэлектродных МЭМС при увеличении относительного наклона электродов электростатическая сила увеличивается. Обнаружено, что в двухэлектродных МЭМС с непараллельными электродами возникает pull-in эффект. Установлено, что в этом случае при увеличении наклона электродов величина критического заряда уменьшается.

Показано, что в МЭМС с гребенчатой конструкцией электродов в режиме с контролируемым зарядом зависимость величины критического заряда от относительного наклона электродов имеет немонотонный характер. Найдено, что максимальное значение критического заряда в этом случае достигается при $\tilde{\Delta} \cong 1,354$, а значение η_{cr} в максимуме равно 1,17.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Oudenhoven J.F.M., Vullers R.J.M., Schaijk R.** A review of the present situation and future developments of micro-batteries for wireless autonomous sensor systems // *International Journal of Energy Research*. – 2012. – Vol. 36, N 12. – P. 1139–1150. – doi: 10.1002/er.2949.
2. Self-powered autonomous wireless sensor node using vibration energy harvesting / R. Torah, P. Glynn-Jones, M. Tudor, T. O'Donnell, S. Roy, S. Beeby // *Measurement Science and Technology*. – 2008. – Vol. 19, N 12. – P. 125202. – doi: 10.1088/0957-0233/19/12/125202.
3. **Elvin N.G., Lajnef N., Elvin A.A.** Feasibility of structural monitoring with vibration powered sensors // *Smart Materials and Structures*. – 2006. – Vol. 15, N 4. – P. 977–986. – doi: 10.1088/0964-1726/15/4/011.
4. A MEMS self-powered sensor and RF transmission platform for WSN nodes / C. He, M.E. Kiziroglou, D.C. Yates, E.M. Yeatman // *IEEE Sensors Journal*. – 2011. – Vol. 11, N 12. – P. 3437–3445. – doi: 10.1109/JSEN.2011.2160535.
5. **Westby E.R., Halvorsen E.** Design and modeling of a patterned-electret-based energy harvester for tire pressure monitoring systems // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. – 2012. – Vol. 17, N 5. – P. 995–1005. – doi: 10.1109/TMECH.2011.2151203.
6. Fabrication and performance of silicon-embedded permanent-magnet microgenerators / F. Herrault, B.C. Yen, C.H. Ji, Z.S. Spakovszky, J.H. Lang, M.G. Allen // *Journal of Microelectromechanical Systems*. – 2010. – Vol. 19, N 1. – P. 4–13. – doi: 10.1109/JMEMS.2009.2036583.
7. **Jovanov E., Milenkovic A.** Body area networks for ubiquitous healthcare applications: opportunities and challenges // *Journal of Medical Systems*. – 2011. – Vol. 35, N 5. – P. 1245–1254. – doi: 10.1007/s10916-011-9661-x.
8. Wireless dosimeter: system-on-chip versus system-in-package for biomedical and space applications / A. Shamim, M. Arsalan, L. Roy, M. Shams, G. Tarr // *IEEE Transactions on Circuits and Systems II*. – 2008. – Vol. 55, N 7. – P. 643–647. – doi: 10.1109/TCSII.2008.921573.
9. MEMS electret generator with electrostatic levitation for vibration-driven energy harvesting applications / Y. Suzuki, D. Miki, M. Edamoto, M.A. Honzumi // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. – 2010. – Vol. 20, N 10. – P. 104002-1–104002-8. – doi: 10.1088/0960-1317/20/10/104002.
10. Wideband MEMS electrostatic vibration energy harvesters based on gap-closing interdigitated combs with a trapezoidal section / R. Guillemet, P. Basset, D. Galayko, F. Cottone,

- F. Marty, T. Bourouina // *Proceedings IEEE 26th International Conference on MEMS*. – Taipei, 2013. – P. 817–820. – doi: 10.1109/MEMSYS.2013.6474368.
11. Драгунов В.П., Доржиев В.Ю., Лойко Д.И. Влияние непараллельности электродов на характеристики микромеханических конденсаторов // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 3 (32). – С. 54–64. – doi: 10.17212/1727-2769-2016-3-54-64.
 12. Surface micromachined MEMS capacitors with dual cavity for energy harvesting / J. Lin, J. Zhu, Y. Chang, Z. Feng, M. Almasri // *Journal of Microelectromechanical Systems*. – 2013. – Vol. 22, N 6. – P. 1458–1469. – doi: 10.1109/JMEMS.2013.2262588.
 13. Драгунов В.П., Драгунова Е.В. Особенности функционирования МЭМ систем // Нано- и микросистемная техника. – 2015. – № 6 (179). – С. 43–52.
 14. Драгунов В.П., Драгунова Л.С. Влияние массы подвижного электрода на функционирование МЭМ систем // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 3 (28). – С. 50–60. – doi: 10.17212/1727-2769-2015-3-50-60.
 15. Non-linear MEMS electrostatic kinetic energy harvester with a tunable multistable potential for stochastic vibrations / F. Cottone, P. Basset, R. Guillemet, D. Galayko, F. Marty, T. Bourouina // *Proceedings IEEE 17th International Conference on Solid State Sensors and Actuators*. – Barcelona, Spain, 2013. – P. 1336–1339. – doi: 10.1109/Transducers.2013.6627024.

INFLUENCE OF ELECTRODE NONPARALLELISM ON MEMS CHARACTERISTICS IN A CONTROLLED CHARGE MODE

Dragunov V.P., Sinitskiy R.E., Kiselev D.E.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

One of the most essential factors defining characteristics of MEMS is electromechanical interactions. Therefore, of great interest is the search for analytical expressions which allow calculating capacitances and forces with a sufficient accuracy for practical applications.

This paper presents the results of studies of an electrode nonparallelism effect on electromechanical interactions and forces in MEMS. As an example, the paper considers the microelectromechanical systems with a two-electrode and interdigitated electrode structure in the controlled charge mode. The analytic forms obtained give a possibility to evaluate the values of electrostatic attracting forces, potential energy, a critical charge and an offset of a movable electrode in case of different inclinations of electrodes in the controlled charge mode. It was found that in the controlled charge mode there is a pull-in effect in two-electrode MEMS. The paper considers an influence of the weight of a movable electrode on electromechanical interactions in two-electrode MEMS. It is shown that in the controlled charge mode in two-electrode MEMS with the interdigitated electrode structure when the electrode inclination increases, the value of the critical charge η_{cr} first increases, and then decreases. It was ascertained that the maximum value of a critical charge is reached in the case of $\tilde{\Delta} \cong 1.354$ and the maximum value of η_{cr} is equal to 1.17.

Keywords: MEMS, energy conversion, microelectromechanical capacitor, electrostatic force, controlled charge mode, pull-in effect, relative range of the controlled offset of an electrode, critical values.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-58-71

REFERENCES

1. Oudenhoven J.F.M., Vullers R.J.M., Schaijk R. A review of the present situation and future developments of micro-batteries for wireless autonomous sensor systems. *International Journal of Energy Research*, 2012, vol. 36, no. 12, pp. 1139–1150. doi: 10.1002/er.2949.
2. Torah R., Glynn-Jones P., Tudor M., O'Donnell T., Roy S., Beeby S. Self-powered autonomous wireless sensor node using vibration energy harvesting. *Measurement Science and Technology*, 2008, vol. 19, no. 12, p. 125202. doi: 10.1088/0957-0233/19/12/125202.

3. Elvin N.G., Lajnef N., Elvin A.A. Feasibility of structural monitoring with vibration powered sensors. *Smart Materials and Structures*, 2006, vol. 15, no. 4, pp. 977–986. doi: 10.1088/0964-1726/15/4/011.
4. He C., Kiziroglou M.E., Yates D.C., Yeatman E.M. A MEMS self-powered sensor and RF transmission platform for WSN nodes. *IEEE Sensors Journal*, 2011, vol. 11, no. 12, pp. 3437–3445. doi: 10.1109/JSEN.2011.2160535.
5. Westby E.R., Halvorsen E. Design and modeling of a patterned-electret-based energy harvester for tire pressure monitoring systems. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, vol. 17, no. 5, pp. 995–1005. doi: 10.1109/TMECH.2011.2151203.
6. Herrault F., Yen B.C., Ji C.H., Spakovszky Z.S., Lang J.H., Allen M.G. Fabrication and performance of silicon-embedded permanent-magnet microgenerators. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2010, vol. 19, no. 1, pp. 4–13. doi: 10.1109/JMEMS.2009.2036583.
7. Jovanov E., Milenkovic A. Body area networks for ubiquitous healthcare applications: opportunities and challenges. *Journal of Medical Systems*, 2011, vol. 35, no. 5, pp. 1245–1254. doi: 10.1007/s10916-011-9661-x.
8. Shamim A., Arsalan M., Roy L., Shams M., Tarr G. Wireless dosimeter: system-on-chip versus system-in-package for biomedical and space applications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II*, 2008, vol. 55, no. 7, pp. 643–647. doi: 10.1109/TCSII.2008.921573.
9. Suzuki Y., Miki D., Edamoto M., Honzumi M.A. MEMS electret generator with electrostatic levitation for vibration-driven energy harvesting applications. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2010, vol. 20, no. 10, pp. 104002-1–104002-8. doi: 10.1088/0960-1317/20/10/104002.
10. Guillemet R., Basset P., Galayko D., Cottone F., Marty F., Bourouina T. Wideband MEMS electrostatic vibration energy harvesters based on gap-closing interdigitated combs with a trapezoidal section. *Proceedings IEEE 26th International Conference on MEMS*, Taipei, 2013, pp. 817–820. doi: 10.1109/MEMSYS.2013.6474368.
11. Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu., Loiko D.I. Vliyanie neparallel'nosti elektrodov na kharakteristiki mikromekhanicheskikh kondensatorov [Influence of electrodes nonparallelism on micromechanical capacitor characteristics]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 3 (32), pp. 54–64. doi: 10.17212/1727-2769-2016-3-54-64.
12. Lin J., Zhu J., Chang Y., Feng Z., Almasri M. Surface micromachined MEMS capacitors with dual cavity for energy harvesting. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2013, vol. 22, no. 6, pp. 1458–1469. doi: 10.1109/JMEMS.2013.2262588.
13. 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.
14. Dragunov V.P., Dragunova L.S. Vliyanie massy podvizhnogo elektroda na funktsionirovanie MEM sistem [An influence of the mobile electrode weight on functioning MEMS]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 3 (28), pp. 50–60. doi: 10.17212/1727-2769-2015-3-50-60.
15. Cottone F., Basset P., Guillemet R., Galayko D., Marty F., Bourouina T. Non-linear MEMS electrostatic kinetic energy harvester with a tunable multistable potential for stochastic vibrations. *Proceedings IEEE 17th International Conference on Solid State Sensors and Actuators*. Barcelona, Spain, 2013, pp. 1336–1339. doi: 10.1109/Transducers.2013.6627024.

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.), associate professor, Professor of 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, Russia. E-mail: drag@adm.nstu.ru).



Синицкий Родион Евгеньевич – родился в 1994 году, студент кафедры ППИМЭ Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: нано- и микросистемная техника. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: sinitsky.rodion@yandex.ru).

Sinitskiy Rodion Evgenevich (b. 1994) – a 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. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: sinitsky.rodion@yandex.ru).



Киселев Дмитрий Евгеньевич – родился в 1995 году, студент кафедры ППИМЭ Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: нано- и микросистемная техника. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: heroes-00@mail.ru).

Kiselev Dmitry Evgenevich (b. 1995) – a 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. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: heroes-00@mail.ru).

*Статья поступила 28 февраля 2017 г.
Received February 28, 2017*

To Reference:

Dragunov V.P., Sinitskiy R.E., Kiselev D.E. Vliyanie neparallelnosti elektrodov na kharakteristiki MEMS v rezhime s kontroliruемым zaryadom [Influence of electrode nonparallelism on MEMS characteristics in a controlled charge mode]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2017, no. 1 (34), pp. 58–71. doi: 10.17212/1727-2769-2017-1-58-71