

УДК 621.3.049.77.002.5

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НЕСБАЛАНСИРОВАННЫХ МЭМС

В.П. Драгунов, Д.И. Остертак, Е.В. Драгунова

Новосибирский государственный технический университет

Одним из наиболее существенных факторов, определяющих характеристики микро-электромеханических систем (МЭМС), являются электромеханические взаимодействия. В связи с этим большой интерес представляет поиск аналитических выражений, позволяющих оценивать емкости и силы с достаточной для практических применений точностью. В данной работе представлены результаты исследований влияния непараллельности электродов на электромеханические взаимодействия в несбалансированных МЭМС с гребенчатой конструкцией электродов в режиме с контролируемым напряжением. Получены выражения для расчета потенциальной энергии, электростатической силы, критического напряжения и величины смещения подвижного электрода при различных наклонах электродов, необходимые для проектирования МЭМС с учетом их реальных конструктивных особенностей. Показано, что в несбалансированных МЭМС при увеличении относительного наклона электродов электростатическая сила притяжения между заряженными электродами уменьшается, а величины критического напряжения и смещения возрастают. Установлено, что увеличение числа электродов в несбалансированном конденсаторе будет приводить к уменьшению диапазона контролируемого смещения подвижных электродов и величины критического напряжения.

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

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-4-58-69

Введение

Благодаря развитию элементной базы низкопотребляющей микроэлектроники и беспроводных систем связи область применения микроэлектромеханических систем (МЭМС) существенно расширилась. Сегодня она включает в себя не только отдельные сенсоры и актюаторы, но и целые беспроводные информационно-измерительные системы, состоящие из множества автономных сенсоров и актюаторов, объединенных в общую сеть посредством радиоканала [1]. МЭМС в таких системах могут быть использованы также в качестве микрогенераторов и рекуператоров электрической энергии [2–7] и таким образом служить альтернативой традиционным химическим источникам питания, обеспечивая автономность беспроводных информационно-измерительных систем.

При проектировании и разработке МЭМС необходимо учитывать электромеханические взаимодействия между различными элементами конструкции [8–11]. Эти взаимодействия в первую очередь определяют диапазоны контролируемого перемещения подвижных элементов МЭМС, диапазоны изменений емкости, мак-

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания, шифр проекта 8.6847.2017/БЧ, тема проекта: «Разработка теоретических основ построения измерительного оборудования для телекоммуникационных систем, содержащего мощные СВЧ аттенюаторы, полосовые фильтры с заданными частотами режекции и микрополосковые печатные антенны».

симально достижимые емкости, допустимые напряжения и заряды. Обычно при анализе электромеханических взаимодействий используют модели МЭМС с параллельными электродами. Однако существующие технологии не позволяют гарантировать параллельность электродов. При этом непараллельность электродов может появляться из-за технологических погрешностей при изготовлении и сборке устройства [12, 13], а также в процессе эксплуатации при изменении направления движения системы из-за появления вращающих моментов [2]. Поэтому возникает необходимость в разработке математических моделей, все более адекватно учитывающих особенности этих взаимодействий в реальных устройствах.

В [14, 15] мы рассмотрели влияние непараллельности электродов на электрические емкости и силы в МЭМС со сбалансированной гребенчатой конструкцией электродов в режимах с контролируемым напряжением и зарядом. В данной работе проводится исследование влияния непараллельности электродов на электрические емкости и силы в МЭМС с несбалансированной гребенчатой конструкцией электродов в режиме с контролируемым напряжением.

1. МЭМС с гребенчатой конструкцией электродов

В качестве объекта исследования влияния непараллельности электродов на электрические емкости и силы в несбалансированных МЭМС рассмотрим микроэлектромеханический конденсатор с гребенчатой (встречно-штыревой) конструкцией электродов (рис. 1), содержащий четное число неподвижных 2 и подвижных 1 непараллельных электродов длиной a , шириной b каждый, наименьшим и наибольшим начальными межэлектродными зазорами d_0 и $d_0 + 2\Delta$. В данной конструкции подвижные электроды, закрепленные на упругом подвесе 3, могут перемещаться относительно неподвижных вдоль оси x (рис. 1, а). В расчетах также примем, что при смещении подвижных электродов угол наклона α не изменяется. Анализ проведем в приближении $2\Delta \ll b$.

В случае пренебрежения особенностями распределения электрического поля у краев электродов (краевыми эффектами) зависимость емкости двух- и N -электродного конденсатора с несбалансированной гребенчатой конструкцией электродов и непараллельными электродами от геометрических размеров может быть рассчитана соответственно с помощью выражений

$$C_{2\text{com}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon a b}{2\Delta} \left[\ln \left(\frac{d_0 + 2\Delta - x}{d_0 - x} \right) \right], \quad (1)$$

$$C_{N\text{com}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon a b}{2\Delta} \left[0,5N \ln \left(\frac{d_0 + 2\Delta - x}{d_0 - x} \right) + (0,5N - 1) \ln \left(\frac{d_0 + 2\Delta + x}{d_0 + x} \right) \right], \quad (2)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды между электродами, ε_0 – электрическая постоянная, N – полное число электродов ($N \geq 4$).

При параллельных электродах (1) и (2) приводятся к виду

$$C_{20} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon a b}{d_0 - x},$$

$$C_{N0} = \varepsilon_0 \varepsilon a b \frac{(N-1)d_0 + x}{d_0^2 - x^2}.$$

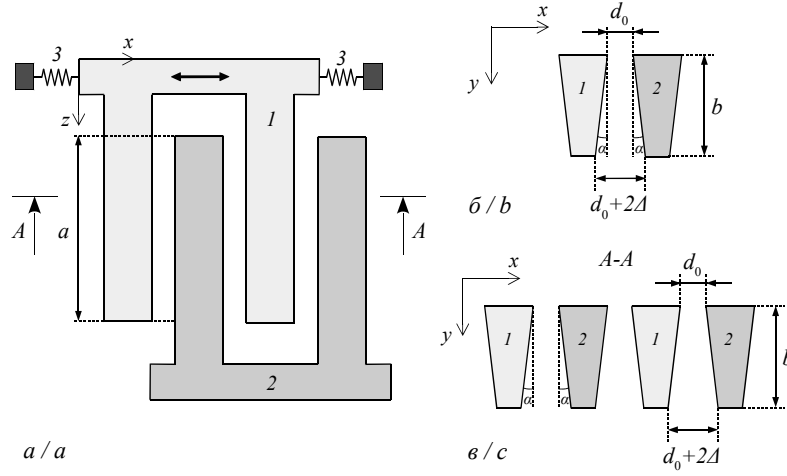


Рис. 1 – Конструкция гребенчатого несбалансированного МЭМ конденсатора с непараллельными электродами:

1 – подвижный электрод, 2 – неподвижный электрод, 3 – упругий подвес. Вид сверху (а) и сечения для двухэлектродного (б) и четырехэлектродного (в) конденсатора. Движение осуществляется вдоль оси x

Fig. 1 – The design of the interdigitated MEM capacitor with non-parallel electrodes: 1 is a movable electrode, 2 is a fixed electrode, 3 is a spring suspension. Top view (a) and cross-section for two-electrode (b) and four-electrode (c) capacitors. The movement is carried out along the x -axis

Будем полагать, что при очень медленном изменении напряжения (квазистатический случай) на электроды действуют только возвращающая сила упругости подвеса и электрическая сила притяжения между разноименно заряженными электродами. В режиме с контролируемым напряжением выражение для потенциальной энергии системы может быть представлено в виде

$$W_V = \frac{1}{2} kx^2 - \frac{C_{\text{com}} V^2}{2}, \quad (3)$$

где k – жесткость упругого подвеса, x – величина смещения подвижного электрода от начального положения, когда минимальный межэлектродный зазор равняется d_0 , V – напряжение между электродами конденсатора и C_{com} – емкость конденсатора.

С учетом (1) и (2) выражение (3) в безразмерных переменных для двух- и N -электродного конденсатора с гребенчатой конструкцией электродов и непараллельными электродами принимает вид

$$\tilde{W}_{2V} = \frac{\tilde{x}^2}{2} - \frac{\lambda_V}{2\tilde{\Delta}} \ln \left(\frac{1 + 2\tilde{\Delta} - \tilde{x}}{1 - \tilde{x}} \right), \quad (4)$$

$$\tilde{W}_{NV} = \frac{\tilde{x}^2}{2} - \frac{\lambda_V}{2\tilde{\Delta}} \left[0,5N \ln \left(\frac{1 + 2\tilde{\Delta} - \tilde{x}}{1 - \tilde{x}} \right) + (0,5N - 1) \ln \left(\frac{1 + 2\tilde{\Delta} + \tilde{x}}{1 + \tilde{x}} \right) \right], \quad (5)$$

где $\tilde{W} = W / (kd_0^2)$, $\tilde{x} = x/d_0$, $\lambda_V = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon a b V^2}{2kd_0^3}$, $\tilde{\Delta} = \Delta/d_0$.

На рис. 2, *а* и *б* приведены зависимости потенциальной энергии $\tilde{W}2_V$ от относительного смещения подвижного электрода \tilde{x} , рассчитанные при нескольких значениях приведенного напряжения λ_V с использованием (4) для двухэлектродного конденсатора с гребенчатой конструкцией электродов (рис. 1, *б*). Рис. 2, *а* – для конденсатора с параллельными электродами $\tilde{\Delta} = 0$, рис. 2, *б* – для конденсатора с непараллельными электродами при $\tilde{\Delta} = 1$.

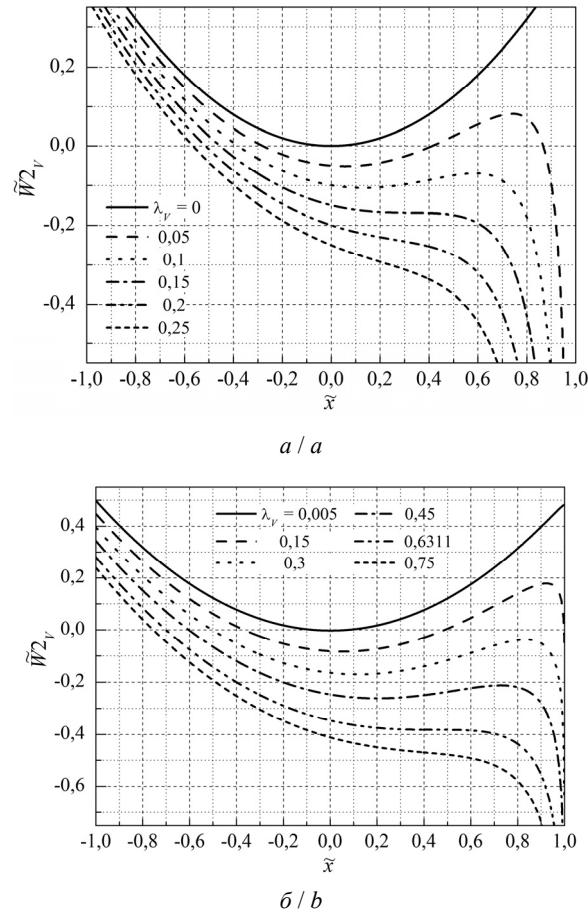


Рис. 2 – Зависимости приведенной потенциальной энергии $\tilde{W}2_V$ для двухэлектродного конденсатора от относительного смещения подвижного электрода \tilde{x} :

а – конденсатор с параллельными электродами $\tilde{\Delta} = 0$ и $\lambda_V = 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ и 0.25 ; *б* – конденсатор с непараллельными электродами $\tilde{\Delta} = 1$ и $\lambda_V = 0.005, 0.15, 0.3, 0.45, 0.6311$ и 0.75

Fig. 2 – Dependences of the normalized potential energy $\tilde{W}2_V$ on the relative displacement of a movable electrode \tilde{x} :

a – the capacitor with parallel electrodes $\tilde{\Delta} = 0$ and $\lambda_V = 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ and 0.25 ; *b* – the capacitor with non-parallel electrodes $\tilde{\Delta} = 1$ and $\lambda_V = 0.005, 0.15, 0.3, 0.45, 0.6311$ and 0.75

Из рис. 2 видно, что в обоих случаях при увеличении приложенного напряжения точка устойчивого равновесия, соответствующая минимуму потенциальной энергии, монотонно смещается от точки $\tilde{x} = 0$ в сторону $\tilde{x} = 1$. При этом диапазон контролируемого смещения подвижного электрода у конденсатора с параллельными электродами (рис. 2, а) простирается от $\tilde{x} = 0$ до $\tilde{x}_{\text{кр}} = 1/3$, что соответствует увеличению приведенного напряжения от $\lambda_V = 0$ до $\lambda_{V\text{кр}} = 0,14815$.

Анализ (4), а также рис. 2, б показывают, что с увеличением взаимного наклона электродов диапазон контролируемого смещения подвижного электрода у двухэлектродного конденсатора увеличивается. При этом точка максимального смещения (критического смещения) при заданном наклоне электродов определяется выражением

$$\tilde{x}_{\text{кр}} = \left(2\tilde{\Delta} - \sqrt{4\tilde{\Delta}^2 + 2\tilde{\Delta} + 1} + 2 \right) / 3. \quad (6)$$

Это критическое смещение будет достигнуто при

$$\lambda_{V\text{кр}} = \tilde{x}_{\text{кр}}(1 - \tilde{x}_{\text{кр}})(1 + 2\tilde{\Delta} - \tilde{x}_{\text{кр}}). \quad (7)$$

Согласно (6) при увеличении относительного наклона $\tilde{\Delta}$ относительное критическое смещение $\tilde{x}_{\text{кр}}$ будет стремиться к 0,5.

Увеличение диапазона контролируемого смещения подвижного электрода и величины $\lambda_{V\text{кр}}$ связано с уменьшением электростатической силы:

$$F_{2V} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon a b V^2}{2d_0^2} \frac{1}{(1 + 2\tilde{\Delta} - \tilde{x})(1 - \tilde{x})} \quad (8)$$

при увеличении взаимного наклона электродов и неизменном приложенном напряжении. На рис. 3 приведена зависимость нормированной электростатической силы от относительного наклона электродов при неизменном напряжении между электродами, рассчитанная с использованием (8) и методом конечных элементов (МКЭ). Видно хорошее совпадение результатов расчетов. Таким образом, есть основание полагать, что приведенные выражения достаточно адекватно моделируют поведение потенциальной энергии, емкости и электростатической силы для несбалансированных МЭМС при изменении параметров системы и их можно использовать на этапе предварительного проектирования несбалансированных МЭМС.

На характеристики несбалансированных МЭМС влияет и изменение количества электродов N .

Анализ показывает, что увеличение числа электродов в несбалансированном конденсаторе будет приводить к уменьшению диапазона контролируемого смещения подвижных электродов и величины $\lambda_{V\text{кр}}$.

На рис. 4, а и б приведены зависимости потенциальной энергии \tilde{W}_V от относительного смещения подвижного электрода \tilde{x} , рассчитанные при нескольких значениях приведенного напряжения λ_V с использованием (5) для несбалансированного четырехэлектродного конденсатора с гребенчатой конструкцией электродов (см. рис. 1, в). Рис. 4, а – для конденсатора с параллельными электродами $\tilde{\Delta} = 0$, рис. 4, б – для конденсатора с непараллельными электродами при $\tilde{\Delta} = 1$.

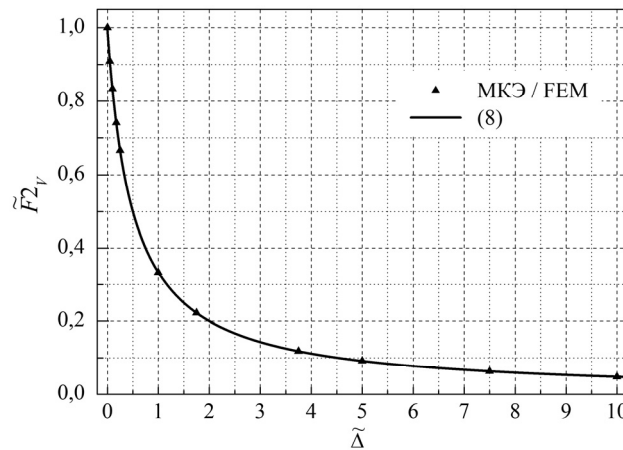


Рис. 3 – Зависимость нормированной электростатической силы притяжения от относительного наклона электродов при неизменном напряжении между электродами:

треугольники – расчет с помощью МКЭ, линия – с помощью (8)

Fig. 3 – The dependence of the normalized electrostatic attractive force on the relative electrodes incline at constant voltage between the electrodes:

triangles are FEM modeling, line is calculation using (8)

Из рис. 4, а видно, что в случае конденсатора с четырьмя параллельными электродами при увеличении приложенного напряжения точка устойчивого равновесия, соответствующая минимуму потенциальной энергии, монотонно смещается от $\tilde{x} = 0$ только до $\tilde{x}_{кр} \cong 0,2783$. Таким образом, в данном случае диапазон контролируемого смещения подвижного электрода уменьшается по сравнению с двухэлектродным конденсатором почти на 17 %. При этом $\lambda_{V,кр}$ уменьшится до 0,08621, т. е. примерно на 42 %.

В общем случае величины $\tilde{x}_{кр}$ и $\lambda_{V,кр}$ при четном числе параллельных электродов N (несбалансированная система) можно определить, используя выражения

$$\tilde{x}_{кр} = \frac{2-2N-Az}{3} + \left(\frac{2}{9} Az^3 - \sqrt[3]{2N-N^2} + \frac{30N+2+16N^3-48N^2}{9Az} \right)^{\frac{1}{2}}$$

и

$$\lambda_{V,кр} = \frac{\tilde{x}_{кр}(1-\tilde{x}_{кр}^2)^2}{2(N-1)\tilde{x}_{кр} + 1 + \tilde{x}_{кр}^2},$$

где

$$Az = \sqrt{4N^2 - 8N + 1 + 3\sqrt[3]{2N - N^2}}.$$

Анализ показывает, что при увеличении числа электродов и $\tilde{x}_{кр}$, и $\lambda_{V,кр}$ стремятся к нулю, а при увеличении наклона электродов критические значения $\tilde{x}_{кр}$ и $\lambda_{V,кр}$ возрастают, что обусловлено особенностями изменения электростатической силы

$$FN_V = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon ab V^2}{2d_0^2} \frac{2\tilde{x}(N-1)(1+\tilde{\Delta})+1+2\tilde{\Delta}+\tilde{x}^2}{[(1+2\tilde{\Delta})^2-\tilde{x}^2](1-\tilde{x}^2)}$$

при изменении числа и наклона электродов в несбалансированных МЭМС.

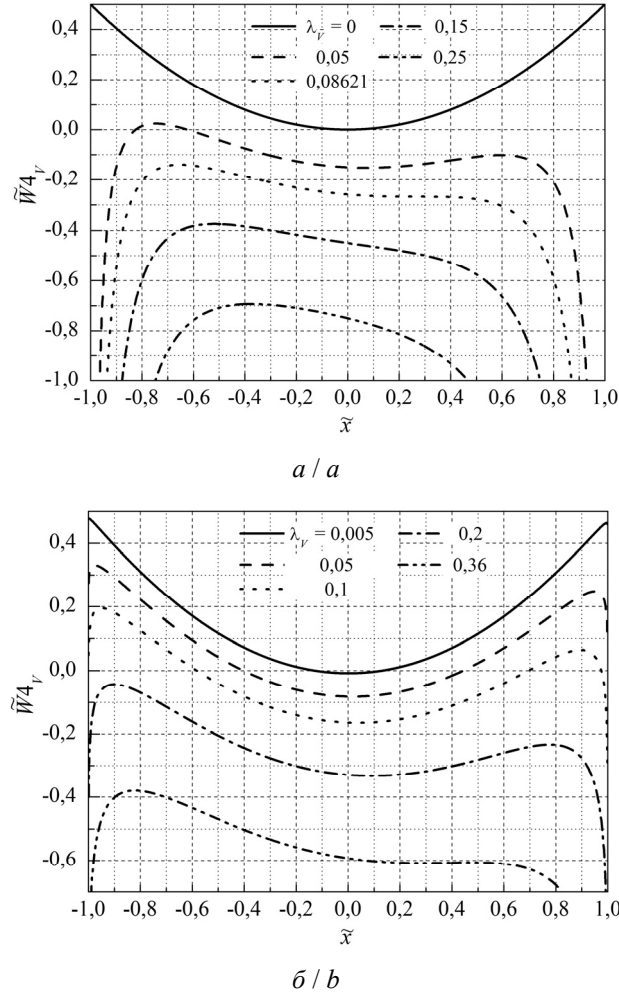


Рис. 4 – Зависимости приведенной потенциальной энергии $\tilde{W}4_V$ от относительного смещения подвижных электродов \tilde{x} :

a – конденсатор с четырьмя параллельными электродами $\tilde{\Delta} = 0$ и $\lambda_V = 0, 0,05, 0,08621, 0,15$ и $0,25$; b – конденсатор с четырьмя непараллельными электродами $\tilde{\Delta} = 1$, а $\lambda_V = 0,005, 0,05, 0,1, 0,2$ и $0,36$

Fig. 4 – Dependences of the normalized potential energy $\tilde{W}4_V$ on the relative displacement of movable electrodes \tilde{x} :

a – the four-electrode capacitor with parallel electrodes $\tilde{\Delta} = 0$ and $\lambda_V = 0, 0,05, 0,08621, 0,15$ and $0,25$; b – the four-electrode capacitor with non-parallel electrodes $\tilde{\Delta} = 1$ and $\lambda_V = 0,005, 0,05, 0,1, 0,2$ and $0,36$

На рис. 5 приведены зависимости критического смещения подвижного электрода от числа электродов МЭМС при нескольких значениях относительного наклона электродов $\tilde{\Delta}$.

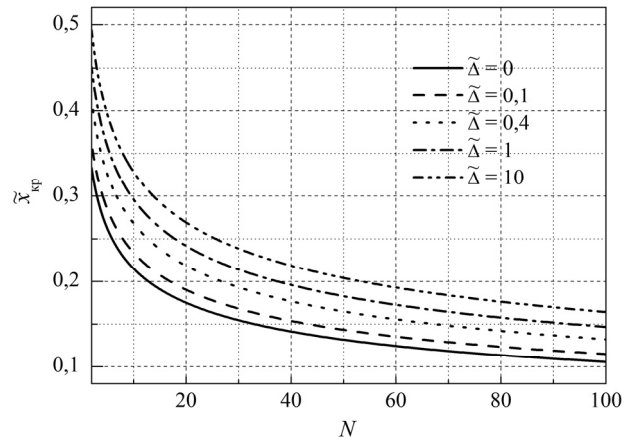


Рис. 5 – Зависимости критического смещения $\tilde{x}_{кр}$ подвижного электрода от числа электродов N при $\tilde{\Delta} = 0, 0,1, 0,4, 1$ и 10

Fig. 5 – Dependences of the critical displacement $\tilde{x}_{кр}$ of the movable electrode on the number of electrodes N at $\tilde{\Delta} = 0, 0,1, 0,4, 1$ and 10

Определив, используя рис. 5, $\tilde{x}_{кр}$, для данного числа электродов N из соотношения

$$\lambda_{V,кр} = \frac{\tilde{x}_{кр}(1 - \tilde{x}_{кр}^2) \left[(1 + 2\tilde{\Delta})^2 - \tilde{x}_{кр}^2 \right]}{2(N-1)\tilde{x}_{кр} + 2(N-1)\tilde{x}_{кр}\tilde{\Delta} + 1 + 2\tilde{\Delta} + \tilde{x}_{кр}^2},$$

можно определить и максимально допустимое (критическое) значение приведенного напряжения $\lambda_{V,кр}$. Отметим, что для несбалансированной системы N (полное число электродов) есть целое четное число.

Заключение

Исследовано влияние непараллельности электродов на электромеханические взаимодействия для МЭМС с несбалансированной гребенчатой конструкцией электродов в режиме с контролируемым напряжением.

Получены выражения для расчета потенциальной энергии, электростатической силы, критического напряжения и величины смещения подвижного электрода при различных числе и наклонах электродов, необходимые для проектирования МЭМС с учетом их реальных конструктивных особенностей.

Показано, что в несбалансированных МЭМС при увеличении относительного наклона электродов электростатическая сила притяжения между заряженными электродами уменьшается, а величины критических напряжения и смещения возрастают.

Установлено, что увеличение числа электродов в несбалансированном конденсаторе будет приводить к уменьшению диапазона контролируемого смещения подвижных электродов и величины критического напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Khan S., Pathan A.-S.K., Alrajeh N.A.** Wireless sensor networks: current status and future trends. – Boca Raton: CRC Press, 2016. – 546 p.
2. **Roundy S., Wright P.K., Rabaey J.** A study of low level vibrations as a power source for wireless sensors nodes // Computer Communications. – 2003. – Vol. 26. – P. 1131–1144. – doi: [https://doi.org/10.1016/S0140-3664\(02\)00248-7](https://doi.org/10.1016/S0140-3664(02)00248-7).
3. **Khan F.U., Qadir M.U.** State-of-the-art in vibration-based electrostatic energy harvesting // Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2015. – Vol. 26, N 10. – Art. 103001. – doi: 10.1088/0960-1317/26/10/103001.
4. MEMS electrostatic vibration energy harvester without switches and inductive elements / V. Dorzhiev, A. Karami, P. Basset, V. Dragunov, D. Galayko // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. – Vol. 557, N 1. – P. 012126/1–012126/5. – doi: 10.1088/1742-6596/557/1/012126.
5. **Драгунов В.П., Остертак Д.И.** Архитектура и анализ схем МЭМ рекуператоров электрической энергии // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 4 (129). – С. 49–54.
6. **Kwon D., Rincon-Mora G.A., Torres E.O.** Harvesting ambient kinetic energy with switched-inductor converters // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2011. – Vol. 58, N 7. – P. 1551–1560. – doi: 10.1109/TCSI.2011.2142731.
7. **Драгунов В.П., Остертак Д.И.** Электростатический микроэлектромеханический преобразователь с последовательной схемой включения компонентов // Нано- и микросистемная техника. – 2010. – № 6 (119). – С. 37–43.
8. **Драгунов В.П., Остертак Д.И.** Анализ электромеханических процессов в МЭМП с изменяющейся площадью перекрытия электродов // Научный вестник НГТУ. – 2009. – № 2 (35). – С. 115–127.
9. Electrostatic pull-in instability in MEMS/NEMS: a review / W.-M. Zhang, H. Yan, Z.-K. Peng, G. Meng // Sensors and Actuators A: Physical. – 2014. – Vol. 214. – P. 187–218. – doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.04.025>.
10. **Остертак Д.И.** Анализ электростатических взаимодействий в плоскопараллельных МЭМС с учетом краевых эффектов в 3D-приближении // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2017. – № 1 (34). – С. 116–132. – doi: 10.17212/1727-2769-2017-1-116-132.
11. **Блум К.Е., Остертак Д.И.** Расчет емкости гребенчатого переменного конденсатора для электростатического вибрационного генератора энергии с учетом краевых эффектов // Нано- и микросистемная техника. – 2016. – Т. 18, № 7. – С. 424–431.
12. 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.
13. **Ardito R., Baldassarre L., Corigliano A.** On the numerical evaluation of capacitance and electrostatic forces in MEMS // 10th International Conference on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems, EuroSimE 2009, Delft, The Netherlands, 26–29 April 2009. – Delft, 2009. – P. 1–8. – doi: <https://doi.org/10.1109/ESIME.2009.4938495>.
14. **Драгунов В.П., Синицкий Р.Е., Киселев Д.Е.** Влияние непараллельных электродов на характеристики МЭМС в режиме с контролируемым зарядом // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2017. – № 1 (34). – С. 58–71. – doi: 10.17212/1727-2769-2017-1-58-71.
15. **Драгунов В.П., Киселев Д.Е., Синицкий Р.Е.** Особенности электромеханических взаимодействий в МЭМС с непараллельными электродами // Нано- и микросистемная техника. – 2017. – № 6. – С. 360–369. – doi: 10.17587/nmst.19.360–369.

PECULIARITIES OF UNBALANCED MEMS OPERATION

Dragunov V.P., Ostertak D.I., Dragunova E.V.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Electromechanical interactions are one of the most important factors which define parameters of microelectromechanical systems (MEMS). In this connection analytical expressions which make it possible to calculate capacitances and forces with a sufficient accuracy are of great interest. This paper describes the results of an investigation into an effect of electrodes nonparallelism on electro-mechanical interactions in unbalanced MEMS having a comb geometry of electrodes in the voltage controlled mode. Expressions for calculating potential energy, electrostatic force, critical voltage and a movable electrode displacement at different electrode angles are derived. Such expressions are necessary to design MEMS taking into account their actual structural features. It is shown that in unbalanced MEMS when a relative electrode angle increases, the electrostatic force of attraction between charged electrodes decreases, while critical voltage and displacement values increase. It is shown that an increase in the number of electrodes in an unbalanced capacitor results in the reduction in the range of movable electrode controlled displacement as well as in the critical voltage range.

Keywords: MEMS, energy conversion, pull-in effect, controlled voltage mode, micromechanical capacitor, electrostatic force, electrode displacement controlled range, critical values.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-4-58-69

REFERENCES

1. Khan S., Pathan A.-S.K., Alrajeh N.A. *Wireless sensor networks: current status and future trends*. Boca Raton, CRC Press, 2016. 546 p.
2. Roundy S., Wright P.K., Rabaey J. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensors nodes. *Computer Communications*, 2003, vol. 26, pp. 1131–1144. doi: [https://doi.org/10.1016/S0140-3664\(02\)00248-7](https://doi.org/10.1016/S0140-3664(02)00248-7).
3. Khan F.U., Qadir M.U. State-of-the-art in vibration-based electrostatic energy harvesting. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2015, vol. 26, no. 10, art. 103001. doi: 10.1088/0960-1317/26/10/103001.
4. Dorzhiev V., Karami A., Basset P., Dragunov V., Galayko D. MEMS electrostatic vibration energy harvester without switches and inductive elements. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 557, no. 1, pp. 012126/1–012126/5. doi: 10.1088/1742-6596/557/1/012126.
5. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Arkhitektura i analiz skhem MEM rekuperatorov elektricheskoi energii [Architecture and analysis of circuits of microelectromechanical electrical energy recuperators]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano- and Microsystem Technique*, 2011, no. 4 (129), pp. 49–54.
6. Kwon D., Rincon-Mora G.A., Torres E.O. Harvesting ambient kinetic energy with switched-inductor converters. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2011, vol. 58, no. 7, pp. 1551–1560. doi: 10.1109/TCSI.2011.2142731.
7. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Elektrostaticheskii mikroelektromekhanicheskii pre-obrazovatel' s posledovatel'noi skhemoi vklyucheniya komponentov [An electrostatic microelectromechanical converter with a series circuit]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano- and Microsystem Technique*, 2010, no. 6 (119), pp. 37–43.
8. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Analiz elektromekhanicheskikh protsessov v MEMS s izmenyayushchiesya ploshchad'yu perekrytiya elektrodov [The analysis of electromechanical operation of in-plane overlap MEMS converter]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2009, no. 2 (35), pp. 115–127.
9. Zhang W.-M., Yan H., Peng Z.-K., Meng G. Electrostatic pull-in instability in MEMS/NEMS: a review. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, vol. 214, pp. 187–218. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.04.025>.
10. Ostertak D.I. Analiz elektrostaticheskikh vzaimodeistvii v ploskoparallel'nykh MEMS s uchetom kraevykh effektiv v 3D-priblizhenii [An analysis of electrostatic interactions in parallel-plate MEMS with regard to fringing field effects within a 3D-approach]. *Doklady Akademii*

- nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2017, no. 1 (34), pp. 116–132. doi: 10.17212/1727-2769-2017-1-116-132.
11. Blum K.E., Ostertak D.I. Raschet emkosti grebenchatogo peremennogo kondensatora dlya elektrostacheskogo vibratsionnogo generatora energii s uchetom kraevykh effektov [Capacitance calculation of the comb variable capacitor for the electrostatic vibration energy harvester in consideration of fringing field effects]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano- and Microsystem Technique*, 2016, vol. 18, no. 7, pp. 424–431.
 12. Guillement 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.
 13. Ardito R., Baldassarre L., Corigliano A. On the numerical evaluation of capacitance and electrostatic forces in MEMS. *10th Int. Conf. on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems, EuroSimE 2009*, Delft, The Netherlands, 26–29 April 2009, pp. 1–8. doi: <https://doi.org/10.1109/ESIME.2009.4938495>.
 14. Dragunov V.P., Sinitskii R.E., Kiselev D.E. Vliyanie neparallel'nykh 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.
 15. Dragunov V.P., Kiselev D.E., Sinitskii R.E. Osobennosti elektromekhanicheskikh vzaimodeistvii v MEMS s neparallel'nymi elektrodami [Specific features of the electromechanical interactions in MEMS with nonparallel electrodes]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano- and Microsystem Technique*, 2017, no. 6, pp. 360–369. doi: 10.17587/nmst.19.360-369.

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. Карла Маркса, 20. E-mail: drag@adm.nstu.ru).

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



Остертак Дмитрий Иванович – родился в 1983 году, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полупроводниковых приборов и микрорелектроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: нано- и микросистемная техника. Опубликовано 40 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса 20. E-mail: ostertak@ngs.ru, ostertak@corp.nstu.ru).

Ostertak Dmitriy Ivanovich (b. 1983) – PhD (Eng.), associate professor, associate professor at the Department of Semiconductor Devices and Microelectronics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nano- and microsystem engineering. He is the author of 40 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: ostertak@ngs.ru, ostertak@corp.nstu.ru).



Драгунова Евгения Валерьевна – родилась в 1978 году, канд. экон. наук, доцент, доцент кафедры экономической информатики Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов – информационные технологии, изучение типологий роста высокотехнологичных компаний. Опубликовано более 80 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса 20. E-mail: EVDragunova@ngs.ru, Dragunova@corp.nstu.ru).

Dragunova Evgeniya Valer'evna (b. 1978) – PhD, associate professor, associate professor at the Department of Computer Science in Economics, Novosibirsk State Technical University. The area of her scientific interests is information technology, growth typologies of high-tech enterprises. She is the author of more than 80 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: EVDragunova@ngs.ru, Dragunova@corp.nstu.ru).

*Статья поступила 15 декабря 2017 г.
Received December 15, 2017*

To Reference:

Dragunov V.P., Ostertak D.I., Dragunova E.V. Osobennosti funktsionirovaniya nesbalansirovannykh MEMS [Peculiarities of unbalanced MEMS operation]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2017, no. 4 (37), pp. 58–69. doi: 10.17212/1727-2769-2017-4-58-69