

УДК 621.3.049.779

**ВЛИЯНИЕ НЕПАРАЛЛЕЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ  
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ****В.П. Драгунов, В.Ю. Доржиев, Д.И. Лойко***Новосибирский государственный технический университет*

При разработке и создании электростатических МЭМС возникает необходимость в определении электрической емкости и электростатических сил, действующих между различными частями конструкции. Эти параметры могут быть рассчитаны с использованием различных подходов. Наиболее точные оценки позволяют получить различные САПР, основанные на методах конечных или граничных элементов, однако такой подход требует большого количества времени, а также затрудняет дальнейшие процессы оптимизации и проектирования. Поэтому большой интерес представляет поиск аналитических выражений, позволяющих вычислять емкости и силы с достаточной для практических применений точностью. В данной работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований влияния непараллельности электродов на электрические емкости и силы в МЭМС с двухэлектродной и гребенчатой конструкцией электродов. Для МЭМС с двухэлектродной конструкцией электродов приведены зависимости емкости от величины межэлектродного зазора, полученные экспериментально при разных углах наклона электродов, а также аппроксимационные формулы для расчета емкости с учетом краевых эффектов. Рассчитаны зависимости емкости от величины межэлектродного зазора при различных углах наклона электродов. Проведено сравнение экспериментальных и теоретических результатов и показано их хорошее совпадение. Получено выражение для расчета электростатической силы, приходящейся на единицу длины электрода, двухэлектродного конденсатора с непараллельными электродами. Найдено выражение для электростатической силы, приходящейся на единицу длины электрода у конденсатора с гребенчатой конструкцией электродов, при постоянном напряжении между электродами и малых углах наклонов электродов.

*Ключевые слова:* конденсатор, электрическая емкость, непараллельные электроды, краевые эффекты, МЭМС, аппроксимационные формулы.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-54-64

**Введение**

В настоящее время микросистемная техника стала одним из наиболее динамично развивающихся направлений мировой индустрии. Основой для столь стремительного скачка послужили разработки различных миниатюрных инерциальных систем, микродвигателей и преобразователей. Технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) позволили значительно уменьшить массогабаритные показатели, энергопотребление и стоимость изделий, благодаря чему МЭМС завоевывают все новые и новые сферы применения [1–4].

Проблема разработки и производства новых МЭМС-устройств может быть решена с помощью применения новых технических решений и методик проектирования на основе все более точных математических моделей функционирования. Необходимость достижения высоких технико-экономических показателей МЭМС-изделий ставит перед разработчиками комплекс новых актуальных задач, таких как учет физических свойств новых конструкционных материалов, изучение влияния технологических погрешностей и условий функционирования на характеристики МЭМС.

Анализируя внутреннюю структуру изделий микросистемной техники, следует отметить, что в них, как правило, реализуется целая совокупность разнообразных связей и взаимодействий: механических, электрических, оптических и т. д. Особенно ярко это проявляется в случае микроэлектромеханических систем, где именно электромеханические взаимодействия чаще всего ограничивают предельно допустимые параметры и предельно достижимые характеристики системы [5–10].

Основным элементом МЭМС, как правило, является переменный конденсатор, изготавливаемый с использованием интегральных технологий. Именно его характеристики в наибольшей степени и определяют характеристики всей МЭМС. В результате при разработке электростатических МЭМС возникает необходимость в оценке электрической емкости и электростатических сил, действующих между различными частями конструкции.

Данные параметры могут быть рассчитаны с использованием различных подходов. При этом на начальных этапах проектирования МЭМС требуются быстрые и наглядные методы расчета электростатических взаимодействий. Поэтому большой интерес представляет поиск аналитических выражений, позволяющих вычислять емкости и силы с достаточной для практических применений точностью. По мере уточнения моделей, используемых для анализа МЭМС, уточняются и модели, используемые для учета электростатических взаимодействий [11–21].

В данной работе проводится экспериментальное и теоретическое исследование влияния непараллельности электродов на электрические емкости и силы в МЭМС с двухэлектродной и гребенчатой конструкцией электродов.

Непараллельность электродов может появляться из-за технологических погрешностей при изготовлении и сборке устройства, а также в процессе эксплуатации при изменении направления движения системы из-за появления вращающих моментов.

### 1. Двухэлектродная конструкция

В качестве объекта исследования использовалась двухэлектродная модель МЭМС конденсатора, представляющая собой два плоских непараллельных проводящих электрода (рис. 1). В расчетах принималось, что электроды имеют длину  $a$ , ширину  $b$  и межэлектродный зазор при параллельных электродах  $d_0$ . В эксперименте использовались квадратные алюминиевые электроды площадью  $25 \times 25 \text{ см}^2$ . Электроды закреплялись на диэлектрических подложках, которые в свою очередь монтировались на штативе с микрометрической головкой, что позволяло задавать смещение подвижного электрода с шагом 10 мкм.

Для измерения емкости использовался цифровой RLC измеритель E7-22, позволяющий измерять емкости от 0,5 пФ до 20 мФ с погрешностью 0,7 %. Паразитная емкость составляла от 2,5 до 4,2 пФ и в дальнейшем вычиталась из экспериментальных зависимостей. Эксперимент включал семь серий опытов, в которых изменялись максимальный ( $d + \Delta$ ) и минимальный ( $d$ ) межэлектродные зазоры.

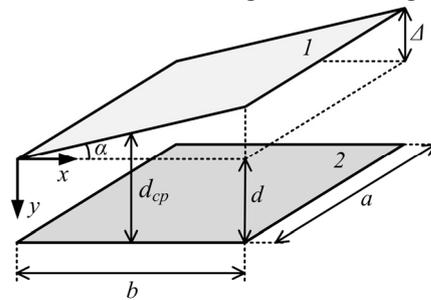


Рис. 1 – Модель двухэлектродной МЭМС с непараллельными электродами:

1 – подвижный электрод; 2 – неподвижный электрод

Fig. 1 – Two-electrode MEMS model with nonparallel electrodes:

1 – movable electrode; 2 – fixed electrode

На рис. 2 приведены зависимости изменения нормированной емкости  $C_n$  двухэлектродного конденсатора с непараллельными электродами от величины межэлектродного зазора  $d_{cp}$ , соответствующего центрам электродов, полученные экспериментально (точки).  $C_n = C_n/C_{n,0}$ , где  $n$  – номер серии,  $C_n$  – емкость конденсатора в  $n$ -й серии при  $\alpha \neq 0$ ,  $C_{n,0}$  – емкость конденсатора в  $n$ -й серии при  $\alpha = 0$  (параллельные электроды). В первых четырех сериях минимальное значение  $d_{cp}$  соответствовало параллельным электродам. В пятой серии параллельными электродами становились при максимальном  $d_{cp}$ .

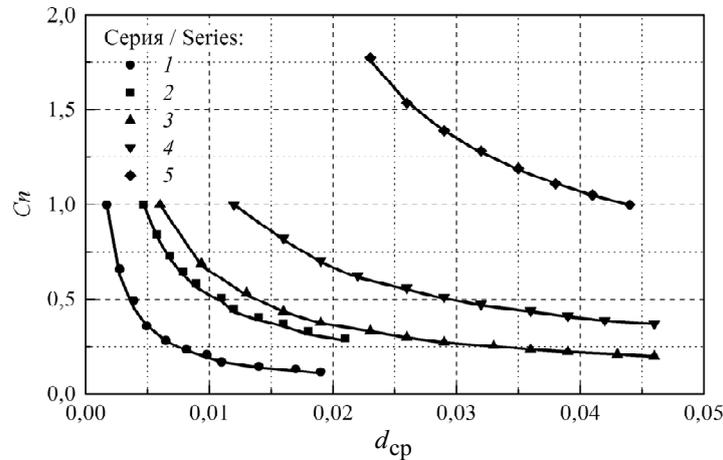


Рис. 2 – Зависимости нормированной емкости двухэлектродного конденсатора от величины межэлектродного зазора, соответствующего центрам электродов:

точки – эксперимент; сплошные линии – расчет с использованием (2)

Fig. 2 – Dependences of two-electrode capacitor normalized capacitance on the corresponding to center of electrodes interelectrode gap:

dots – experiment; solid lines – calculations using (2)

В пренебрежении особенностями распределения электрического поля у краев электродов (краевыми эффектами) зависимость емкости двухэлектродного конденсатора с непараллельными электродами от геометрических размеров при малых  $\alpha$  может быть рассчитана с использованием выражения

$$C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon a \int_0^b \frac{1}{\operatorname{tg}(\alpha)x + d} dx = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon a}{\operatorname{tg}(\alpha)} \ln \left( \frac{\Delta + d}{d} \right) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon ab}{\Delta} \ln \left( \frac{\Delta + d}{d} \right), \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная,  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды между электродами,  $\operatorname{tg}(\alpha) = \Delta/b$ .

Расчеты показали, что в нашем случае экспериментальные зависимости, представленные на рис. 2, адекватно описать с использованием (1) не удастся. На наш взгляд, это связано с тем, что при отношении длины (или ширины) электрода к величине межэлектродного зазора меньше 20 нельзя пренебрегать краевыми эффектами [14, 19, 21]. В то же время в эксперименте при изменении угла наклона подвижного электрода отношение ширины электрода  $b$  к величине минимального

межэлектродного зазора  $d$  в первой серии опытов изменялось от 147 до 23, во второй – от 53 до 19, в третьей – от 41,5 до 9, в четвертой – от 20,5 до 8,5 и в пятой – от 20,6 до 5,6, а к величине максимального межэлектродного зазора  $d + \Delta$ , соответственно, в первой серии опытов изменялось от 147 до 9, во второй – от 53 до 8,7, в третьей – от 41,5 до 3,8, в четвертой – от 20,5 до 4 и в пятой – от 7,2 до 5,6. То есть во многих случаях отношение ширины электрода к величине межэлектродного зазора было существенно меньше 20.

Для расчета зависимости емкости двухэлектродного конденсатора с непараллельными квадратными электродами от величины межэлектродного зазора с достаточной для практических применений точностью можно предложить следующее выражение, учитывающее краевые эффекты:

$$C = C_0 \left\{ 1 + 2 \frac{d_{cp}}{\pi b} \left[ 1 + \ln \left( 2\pi \left( \frac{b}{d_{cp}} + 1,5 \right) \right) \right] \right\}. \quad (2)$$

Зависимости относительного изменения емкости двухэлектродного конденсатора с непараллельными электродами от величины межэлектродного зазора  $d_{cp}$ , рассчитанные по (2) с параметрами образцов, используемых в эксперименте, приведены на рис. 2 (сплошные линии). Видно, что выражение (2) достаточно хорошо описывает результаты эксперимента.

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости емкости от величины межэлектродного зазора  $d_{cp}$ , нормированные на  $\epsilon_0 \epsilon_{ab}$ , построенные в двойном логарифмическом масштабе (точки). Отметим, что все точки хорошо ложатся на кривую, описываемую выражением

$$C = \frac{1}{d_{cp}} \left\{ 1 + 2 \frac{1,4 d_{cp}}{\pi b} \left[ 1 + \ln \left( 2\pi \left( \frac{b}{1,4 d_{cp}} + 1,5 \right) \right) \right] \right\}. \quad (3)$$

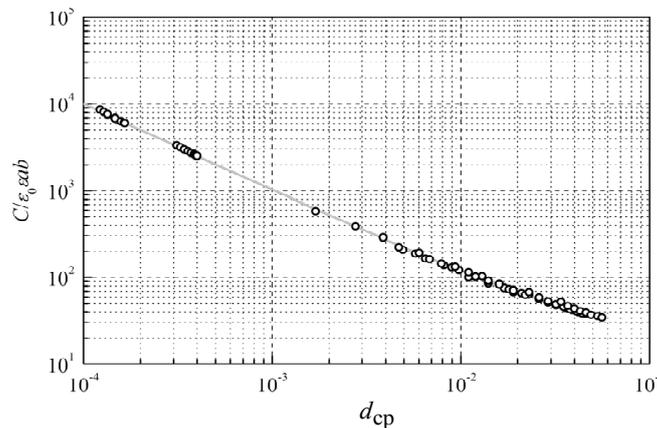


Рис. 3 – Зависимости нормированной емкости от величины межэлектродного  $d_{cp}$ :

точки – эксперимент; сплошная линия – расчет с использованием (3)

Fig. 3 – Dependences of normalized capacitance on the interelectrode gap  $d_{cp}$ :

dots – experiment; solid line – calculations using (3)

Это говорит о том, что в ряде случаев при учете непараллельности электродов вместо логарифмической зависимости (1) можно использовать формулу идеального плоского конденсатора, в которой в качестве межэлектродного зазора надо использовать  $d_{\text{ср}}$ , а появляющееся различие корректировать коэффициентом при  $d_{\text{ср}}$  в множителе, учитывающем краевые эффекты. В нашем случае этот коэффициент оказался равным 1,4.

Достоинство (3) состоит в том, что в отличие от (2) при оценке емкости конденсатора с непараллельными электродами можно использовать значение лишь одного межэлектродного зазора  $d_{\text{ср}}$ , а не двух  $d$  и  $d + \Delta$ .

Непараллельность электродов сказывается не только на оценках величины емкости, но и на оценках электростатической силы. Без учета краевых эффектов используя (1) выражение для электростатической силы, приходящейся на единицу длины электрода, при постоянном напряжении  $V$  и малых  $\alpha$  принимает вид

$$F_0 = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 \varepsilon a V^2}{(\operatorname{tg}(\alpha)x + d)^2}, \quad (4)$$

где  $V$  – напряжение между электродами,  $x$  – координата точки приложения силы. Таким образом, в конденсаторе с непараллельными электродами электростатическая сила изменяется по ширине электрода, что необходимо учитывать при проектировании упругих подвесов электродов.

Для предварительного анализа поведения подвижных элементов МЭМС с непараллельными электродами можно использовать эффективное значение электростатической силы.

Без учета краевых эффектов, используя (4), выражение для эффективной электростатической силы, действующей на непараллельные электроды, при постоянном напряжении и неизменном угле наклона электродов  $\alpha$  принимает вид

$$F_{\text{эфф}} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon a V^2 \int_0^b \frac{dx}{(\operatorname{tg}(\alpha)x + d)^2} = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 \varepsilon a b V^2}{d(\Delta + d)} = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 \varepsilon a b V^2}{d^2 (\bar{\Delta} + 1)}, \quad (5)$$

где  $\bar{\Delta} = \Delta/d$ . Таким образом, в конденсаторе с непараллельными электродами эффективная электростатическая сила только в  $1 + \bar{\Delta}$  раз (а не в  $(1 + \bar{\Delta})^2$  раз) меньше, чем в конденсаторе с параллельными электродами. С увеличением угла наклона подвижного электрода, а следовательно, и среднего расстояния между электродами  $d_{\text{ср}}$  электростатическая сила уменьшается. Отметим, что зависимости, соответствующие (5), нельзя аппроксимировать выражением для электростатической силы конденсатора с параллельными электродами путем подбора значения эффективного межэлектродного зазора.

## 2. Гребенчатая конструкция

Наряду с двухэлектродными конденсаторами в МЭМС широко применяются конденсаторы с гребенчатой или встречно-штыревой конструкцией электродов. Упрощенная схема конструкции такого конденсатора приведена на рис. 4. При создании такого конденсатора необходимо глубокое травление с большим аспектным отношением. Для этих целей, как правило, используется «Bosh process»

(DRIE). Данный процесс требует очень точной настройки аппаратуры и строгого выдерживания параметров технологического процесса, что не всегда возможно. В результате электроды часто получаются непараллельными, а межэлектродный зазор – непостоянным (рис. 5).

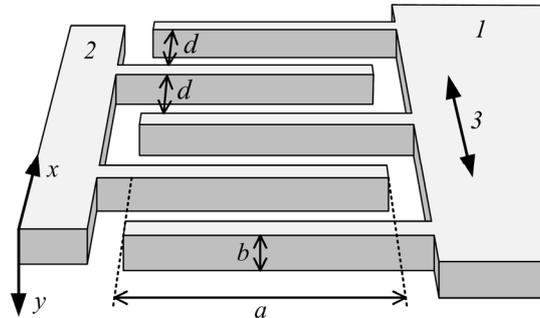


Рис. 4 – Упрощенная схема конструкции гребенчатого МЭМС конденсатора в несмещенном состоянии:

1 – подвижный электрод; 2 – неподвижный электрод; 3 – направление перемещения

Fig. 4 – A simplified diagram of the interdigitated MEMS capacitor structure at a rest position:

1 – movable electrode; 2 – fixed electrode; 3 – direction of motion

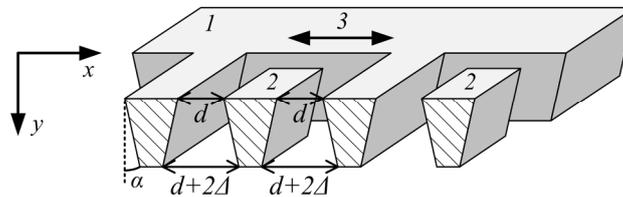


Рис. 5 – Модель двухэлектродной МЭМС с непараллельными электродами:

1 – подвижный электрод; 2 – неподвижный электрод; 3 – направление перемещения

Fig. 5 – Two-electrode MEMS with non-parallel electrodes model:

1 – movable electrode; 2 – fixed electrode; 3 – direction of motion

Как и в предыдущем случае, при анализе полагали, что электроды имеют длину  $a$ , ширину  $b$ , минимальное и максимальное значения межэлектродного зазора при симметричном расположении электродов равно, соответственно,  $d$  и  $d + 2\Delta$ , при смещении подвижного электрода происходит изменение величины  $d$ , а угол наклона электродов не изменяется. В результате при смещении подвижного электрода от симметричного положения на величину  $x$  минимальный межэлектродный зазор между подвижным электродом и правым неподвижным (рис. 5) становится равным  $d - x$ , а между подвижным электродом и левым неподвижным, равным  $d + x$ .

Пренебрегая краевыми эффектами, зависимость емкости конденсатора с гребенчатой конструкцией электродов от геометрических размеров и величины сме-

печения подвижного электрода от положения равновесия при малых  $\alpha$  может быть рассчитана с использованием выражения

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon ab}{2\Delta} \ln \left( \frac{(2\Delta + d)^2 - x^2}{d^2 - x^2} \right). \quad (6)$$

В этом же приближении, используя (6), выражение для электростатической силы, приходящейся на единицу длины электрода вдоль координаты  $y$ , при постоянном напряжении  $V$  и малых  $\alpha$  принимает вид

$$F_0 = \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon a V^2 [2 \operatorname{tg}(\alpha)y + d]x}{[(2 \operatorname{tg}(\alpha)y + d)^2 - x^2]^2}, \quad (7)$$

где  $y$  – координата точки приложения силы. Таким образом, и в конденсаторе со встречно-штыревыми непараллельными электродами электростатическая сила изменяется по ширине электрода, что необходимо учитывать при проектировании упругих подвесов электродов.

В свою очередь без учета краевых эффектов выражение для эффективной электростатической силы, действующей на электроды в конденсаторе со встречно-штыревыми непараллельными электродами, при постоянном напряжении и неизменном угле наклона электродов  $\alpha$  принимает вид

$$F_{\text{эфф}} = \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon ab V^2 x(\Delta + d)}{(d^2 - x^2)((2\Delta + d)^2 - x^2)} = \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon ab V^2 z(\bar{\Delta} + 1)}{d^2(1 - z^2)((2\bar{\Delta} + 1)^2 - z^2)}, \quad (8)$$

где  $z = x/d$  – относительное смещение подвижного электрода, а  $\bar{\Delta} = \Delta/d$ . Таким образом в конденсаторе со встречно-штыревыми непараллельными электродами эффективная электростатическая сила обратно пропорциональна  $((2\bar{\Delta} + 1)^2 - z^2)(1 - z^2)$ , а не  $((2\bar{\Delta} + 1)^2 - z^2)^2$ , как можно было ожидать, проводя аналогию с конденсатором с параллельными электродами. С увеличением угла наклона подвижного электрода, а следовательно, и среднего расстояния между электродами  $d_{\text{ср}}$  электростатическая сила (8) уменьшается.

### Заключение

В работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований влияния непараллельности электродов на электрические емкости и электростатические силы в МЭМС с двухэлектродной и гребенчатой конструкцией электродов.

Для МЭМС с двухэлектродной конструкцией электродов приведены зависимости емкости от величины межэлектродного зазора, полученные экспериментально при разных углах наклона электродов.

Найдены аппроксимационные формулы для расчета емкости двухэлектродного конденсатора с непараллельными электродами с учетом краевых эффектов. Проведено сравнение экспериментальных и теоретических результатов и показано их хорошее совпадение.

Получено выражение для расчета электростатической силы, приходящейся на единицу длины электрода, двухэлектродного конденсатора с непараллельными электродами.

Найдено выражение для электростатической силы, приходящейся на единицу длины электрода у конденсатора с гребенчатой конструкцией электродов, при постоянном напряжении и малых углах наклонов электродов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Современные тенденции развития микросистемной техники / В.Д. Вернер, П.П. Мальцев, А.А. Резнев, А.Н. Сауров, Ю.А. Чаплыгин // *Нано- и микросистемная техника*. – 2008. – № 8. – С. 2–6.
2. Energy scavenging for long-term deployable wireless sensor networks / С. Ó Mathúna, Т. O'Donnell, R.V. Martinez-Catala, J. Rohan, В. O'Flynn // *Talanta*. – 2008. – Vol. 75, iss. 3. – P. 613–623.
3. **Алексенко А.Г.** Микро- и наносистемы беспроводной электроники // *Нано- и микросистемная техника*. – 2009. – № 9. – С. 33–36.
4. **Каајакари V.** Practical MEMS: design of microsystems, accelerometers, gyroscopes, RF MEMS, optical MEMS, and microfluidic systems. – Las Vegas, NV: Small Gear Publ., 2009. – 484 p.
5. **Nemirovsky Y., Vochobza-Degani O.** A methodology and model for the pull-in parameters of electrostatic actuators // *Journal of Microelectromechanical Systems*. – 2001. – Vol. 10, iss. 4. – P. 601–615. – doi: 10.1109/84.967384.
6. 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.
7. **Драгунов В.П.** Микромеханический электростатический преобразователь // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2007. – № 1. – С. 56–66.
8. **Драгунов В.П., Доржиев В.Ю.** Начальные условия и динамический pull-in эффект в МЭМС с изменяющимся межэлектродным зазором // *Нано- и микросистемная техника*. – 2015. – № 10. – С. 31–37.
9. **Dragunov V.P., Ostertak D.I.** Microelectromechanical converters // *Russian Microelectronics*. – 2012. – Vol. 41, N 2. – P. 107–121.
10. **Драгунов В.П., Доржиев В.Ю.** Трехэлектродная двухконденсаторная МЭМС со встроеным зарядом // *Нано- и микросистемная техника*. – 2014. – № 2. – С. 33–38.
11. **Osterberg P.M., Senturia S.D.** M-TEST: a test chip for MEMS material property measurement using electrostatically actuated test structures // *Journal of Microelectromechanical Systems*. – 1997. – Vol. 6, iss. 2. – P. 107–118.
12. Mechanical design and optimization of capacitive micromachined switch / J.-M. Huang, K.M. Liew, C.H. Wong, S. Rajendran, M.J. Tan, A.Q. Liu // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2001. – Vol. 93, iss. 3. – P. 273–285. – doi: 10.1016/S0924-4247(01)00662-8.
13. **Leus V., Elata D.** Fringing field effect in electrostatic actuators // *Technical Report ETR*. – 2004. – Vol. 2. – P. 2–15.
14. **Драгунов В.П., Колчужин В.А., Остертак Д.И.** Влияние краевых эффектов на электрическую емкость в МЭМС // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2009. – № 2 (13). – С. 97–105.
15. **Драгунов В.П., Драгунова Е.В.** Особенности функционирования МЭМ систем // *Нано- и микросистемная техника*. – 2015. – № 6 (179). – С. 43–52.
16. **Krylov S., Harari I., Cohen Y.** Stabilization of electrostatically actuated microstructures using parametric excitation // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. – 2005. – Vol. 15, N 6. – P. 1188–1204. – doi: 10.1088/0960-1317/15/6/009.
17. **Fargas-Marques A., Casals-Terre J., Shkel A.M.** Resonant pull-in condition in parallel-plate electrostatic actuators // *Journal of Microelectromechanical Systems*. – 2007. – Vol. 16, N 5. – P. 1044–1053. – doi: 10.1109/JMEMS.2007.900893.
18. **Драгунов В.П., Остертак Д.И.** Расчет латеральной составляющей электростатической силы в МЭМС // *Научный вестник НГТУ*. – 2009. – № 1. – С. 229–232.

19. Драгунов В.П., Остертак Д.И. Электростатические взаимодействия в МЭМС с плоскопараллельными электродами. Ч. 1. Расчет емкостей // Нано- и микросистемная техника. – 2010. – № 7. – С. 37–41.
20. Драгунов В.П., Остертак Д.И. Электростатические взаимодействия в МЭМС с плоскопараллельными электродами. Ч. 2. Расчет электростатических сил // Нано- и микросистемная техника. – 2010. – № 8. – С. 40–47.
21. Драгунов В.П., Доржиев В.Ю. Влияние краевых эффектов на функционирование МЭМС // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 1. – С. 48–61.

## INFLUENCE OF ELECTRODE NONPARALLELISM ON MICROMECHANICAL CAPACITOR CHARACTERISTICS

V.P. Dragunov, V.Yu. Dorzhiev, D.I. Loyko

*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

In the development and fabrication of electrostatic MEMS there is a need to define capacitances and electrostatic forces between various parts of the structure. These parameters can be calculated using various approaches. It is possible to obtain the most accurate estimations using a variety of CADs based on finite or boundary elements methods, but this approach requires a lot of time and makes further processes of optimization and design difficult. 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 experimental and theoretical studies of an electrode nonparallelism effect on electrical capacitances and forces in MEMS with two-electrode and interdigitated electrode structures. For MEMS with a two-electrode structure dependences of capacitance on the size of the interelectrode gap obtained experimentally at different angles of electrode inclination as well as approximate formulas for the calculation of capacitance with regard for fringing field effects are given. Dependences of the calculated capacitances on the interelectrode gap at different angles of electrodes inclination are calculated. The comparison of experimental and theoretical results is made and their good agreement is shown. An expression for calculating the electrostatic force per unit length of the electrodes in a two-electrode capacitor with nonparallel electrodes is obtained. An expression for calculating the electrostatic force per unit length of the electrode in the capacitor with an interdigitated electrode structure at a constant voltage between the electrodes and the electrodes with small tilt angles is also obtained.

*Keywords:* capacitor; electrical capacitance; nonparallel electrodes; fringing field effects; MEMS; approximation formulas.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-54-64

### REFERENCES

1. Verner V.D., Mal'tsev P.P., Reznev A.A., Saurov A.N., Chaplygin Yu.A. Sovremennye tendentsii razvitiya mikrosistemnoi tekhniki [Modern tendencies in development of micro system technique]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano and Microsystem Technique*, 2008, no. 8, pp. 2–6.
2. Mathúna C. Ó, O'Donnell T., Martinez-Catala R.V., Rohan J., O'Flynn B. Energy scavenging for long-term deployable wireless sensor networks. *Talanta*, 2008, vol. 75, iss. 3, pp. 613–623.
3. Aleksenko A.G. Mikro- i nanosistemy besprovodnoi elektroniki [Micro- and nanosystems wireless electronics]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano and Microsystem Technique*, 2009, no. 9, pp. 33–36.
4. Kaajakari V. *Practical MEMS: design of microsystems, accelerometers, gyroscopes, RF MEMS, optical MEMS, and microfluidic systems*. Las Vegas, NV, Small Gear Publ., 2009. 484 p.
5. Nemirovsky Y., Bochobza-Degani O. A methodology and model for the pull-in parameters of electrostatic actuators. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2001, vol. 10, iss. 4, pp. 601–615. doi: 10.1109/84.967384

6. 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.
7. Dragunov V.P. Mikromekhanicheskii elektrostatičeskii preobrazovatel' [Micromechanical electrostatic converter]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2007, no. 1, pp. 56–66.
8. Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu. Nachal'nye usloviya i dinamicheskii pull-in effekt v MEMS s izmenyayushchimsya mezhelektrodnym zazorom [The initial conditions and dynamic pull-in effect in gap-closing MEMS]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano and Microsystem Technique*, 2015, no. 10, pp. 31–37.
9. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Microelectromechanical converters. *Russian Microelectronics*, 2012, vol. 41, no. 2, pp. 107–121. Translated from *Mikroelektronika*, 2012, vol. 41, no. 2, p. 120.
10. Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu. Trekhelektrodnaya dvukhkondensatornaya MEMS so vstroennym zaryadom [Three-electrode two-capacitor MEMS with built-in charge]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano and Microsystem Technique*, 2014, no. 2, pp. 33–38.
11. Osterberg P.M., Senturia S.D. M-TEST: a test chip for MEMS material property measurement using electrostatically actuated test structures. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1997, vol. 6, iss. 2, pp. 107–118.
12. Huang J.-M., Liew K.M., Wong C.H., Rajendran S., Tan M.J., Liu A.Q. Mechanical design and optimization of capacitive micromachined switch. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001, vol. 93, iss. 3, pp. 273–285. doi: 10.1016/S0924-4247(01)00662-8
13. Leus V., Elata D. Fringing field effect in electrostatic actuators. *Technical Report ETR*, 2004, vol. 2, pp. 2–15.
14. Dragunov V.P., Kolchuzhin V.A., Ostertak D.I. Vliyanie kraevykh effektov na elektricheskuyu emkost' v MEMS [Fringing field effect on electric capacitance in MEMS]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2009, no. 2 (13), pp. 97–105.
15. 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.
16. Krylov S., Harari I., Cohen Y. Stabilization of electrostatically actuated microstructures using parametric excitation. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, vol. 15, no. 6, pp. 1188–1204. doi: 10.1088/0960-1317/15/6/009
17. Fargas-Marques A., Casals-Terré J., Shkel A.M. Resonant pull-in condition in parallel-plate electrostatic actuators. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2007, vol. 16, no. 5, pp. 1044–1053. doi: 10.1109/JMEMS.2007.900893
18. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Raschet lateral'noi sostavlyayushchei elektrostatičeskoi sily v MEMS [The calculation of lateral electrostatic force component of MEMS]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2009, no. 1, pp. 229–232.
19. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Elektrostatičeskije vzaimodeistviya v MEMS s ploskoparallelnymi elektrodami. Ch. 1. Raschet emkosti [Electrostatic Interactions in MEMS with Plane-Parallel Electrodes. Pt. 1. Estimation of the capacitance]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano and Microsystem Technique*, 2010, no. 7, pp. 37–41.
20. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Elektrostatičeskije vzaimodeistviya v MEMS s ploskoparallelnymi elektrodami. Ch. 2. Raschet elektrostatičeskikh sil [Electrostatic interactions in MEMS with plane-parallel electrodes. Pt. 2. Estimation of electrostatic forces]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano and Microsystem Technique*, 2010, no. 8, pp. 40–47.
21. Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu. Vliyanie kraevykh effektov na funktsionirovanie MEMS [Fringing field effects influence on MEMS functioning]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 1, pp. 48–61.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



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



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

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



**Лойко Данил Иванович** – магистрант кафедры ППИМЭ Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: нано- и микросистемная техника. Опубликовано 2 научные работы. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20).

**Loyko Danil Ivanovich** – a graduate student at the Department of Semiconductor Devices and Microelectronics in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nano- and microsystem technology. He is the author of 2 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia).

*Статья поступила 5 сентября 2016 г.  
Received September 5, 2016*

## To Reference:

Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu., Loyko D.I. Vliyanie neparallelnosti 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