

УДК 621.3.049.77.002.5

**ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ
В МЭМС С ЛАТЕРАЛЬНЫМ СМЕЩЕНИЕМ НЕПАРАЛЛЕЛЬНЫХ
ЭЛЕКТРОДОВ В РЕЖИМЕ С КОНТРОЛИРУЕМЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ****Р.Е. Синицкий, В.П. Драгунов, И.Е. Руденко,
Д.Б. Колосков, Е.В. Драгунова***Новосибирский государственный технический университет*

В работе представлены результаты исследования влияния непараллельности электродов на электромеханические взаимодействия в МЭМС с латеральным смещением электродов в режиме работы с контролируемым напряжением. Анализ проведен для двух случаев движения подвижного электрода: с увеличением и с уменьшением среднего межэлектродного зазора. Получены выражения для оценки емкостей, потенциальных энергий, электростатических сил, критического напряжения и критического смещения подвижного электрода при различных наклонах электродов.

Установлено, что в МЭМС с латеральным смещением непараллельных электродов, при котором увеличивается средний межэлектродный зазор, контролируемое смещение подвижного электрода возможно при любом приложенном напряжении и взаимном наклоне электродов во всем интервале перекрытия электродов.

Обнаружено, что в МЭМС с латеральным смещением электродов, при котором средний межэлектродный зазор уменьшается, возможно нестабильное состояние системы, приводящее к неконтролируемому движению подвижного электрода, направленному в сторону увеличения площади перекрытия электродов, – критический эффект (аналог эффекта “pull-in instability”). Таким образом, движение подвижного электрода с увеличением среднего межэлектродного зазора является неустойчивым, в отличие от движения с уменьшением межэлектродного зазора. После наступления критического состояния система перестает реагировать на изменения управляющего напряжения. Показано, что данный критический эффект возможен при параметрах системы $\tilde{\Delta} \geq 1$ и $\lambda \geq 1$. Установлено, что в данном случае при увеличении взаимного наклона электродов значение критического смещения подвижного электрода уменьшается, а зависимость критического напряжения λ_{cr} от $\tilde{\Delta}$ имеет практически линейную зависимость при $\tilde{\Delta} \geq 2$.

Ключевые слова: МЭМС, латеральное смещение электродов, режим работы с контролируемым напряжением, микромеханический конденсатор, электрическая сила, контролируемое смещение электрода, критические значения, критический эффект.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-4-93-109

Введение

Глобальная тенденция миниатюризации элементной базы электроники и развитие концепции интернета вещей (Internet of Things – IoT) привели к созданию не имеющих аналогов миниатюрных устройств широкого назначения – микроэлектромеханических систем (МЭМС), предназначенных для измерения физических характеристик или воздействия на окружающую среду – сенсоров и актуаторов. Параметры таких устройств напрямую зависят от совокупности различных связей и взаимодействий, реализующихся между различными частями конструкции устройства: механические, электрические, оптические и т. д. Среди наиболее распространенных МЭМС-устройств можно выделить микроакселерометры [1–7],

микрогироскопы [8–11], микрофоны [12–15], кантилеверы [16–18], микрозеркала [19–21], микронасосы [22–24] и др. Основными элементами таких систем являются микроэлектромеханические преобразователи (МЭМП) энергии, основанные на различных принципах действия, среди которых, электростатический является наиболее технологичным [1–3, 6–7, 10, 12–17, 19–20, 22–23, 25]. Наибольший вклад в параметры электростатических преобразователей вносят электромеханические взаимодействия между различными частями конструкции.

При создании электростатических МЭМС возникает необходимость расчета емкостей, сил и относительных смещений электродов с достаточной для практических применений точностью.

Согласно литературным данным [1–24] в большинстве случаев при моделировании и проектировании используются модели электростатических МЭМС с параллельными электродами [1–6, 8–18], что при их серийном производстве труднодостижимо. В то же время непараллельность электродов, возникающая за счет технологических погрешностей при изготовлении, сборке и работе устройств, может приводить к значительным отклонениям значений параметров от расчетных величин, что, в свою очередь, скажется на достижимых параметрах системы и даже на ее работоспособности [26–31].

Ранее нами было рассмотрено влияние непараллельности электродов на электромеханические взаимодействия в МЭМС с двухэлектродной и гребенчатой конструкцией электродов с изменением межэлектродного зазора между заряженными электродами [28]. В данной работе исследуется влияние непараллельности электродов на электромеханические взаимодействия в МЭМС с изменяемой площадью перекрытия электродов МЭМП в режиме работы с контролируемым напряжением.

1. Описание модели

В качестве объекта исследования влияния непараллельности электродов на электромеханические взаимодействия в МЭМС (электрические емкости и силы) при латеральном смещении электродов (в плоскости устройства) использовали модель конденсатора переменной емкости (рис. 1, *a* и *б*), содержащего два плоских непараллельных электрода длиной a , шириной b , наименьшим межэлектродным зазором d_0 и наибольшим межэлектродным зазором $d_0 + \Delta$. В данной конструкции подвижный электрод, закрепленный на упругом подвесе, может перемещаться относительно неподвижного только вдоль оси x . В расчетах принимали, что угол наклона α мал и не изменяется при смещении подвижного электрода.

Изменение электрической емкости такой системы при латеральном смещении подвижного электрода может осуществляться за счет движения подвижного электрода с увеличением (рис. 1, *a*) и с уменьшением среднего межэлектродного зазора (рис. 1, *б*).

Пренебрегая особенностями распределения электрического поля у краев электродов (краевыми эффектами), зависимость емкости двухэлектродного конденсатора с непараллельными электродами от смещения подвижного электрода при малых α для этих двух случаев соответственно может быть представлена в виде

$$C_1 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 a b}{\Delta} \ln \left(\frac{d_0 + \Delta(x/b)}{d_0} \right), \quad (1)$$

$$C_2 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 a b}{\Delta} \ln \left(\frac{d_0 + \Delta}{d_0 + \Delta(1 - x/b)} \right), \quad (2)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды между электродами; ε_0 – электрическая постоянная; x – величина смещения подвижного электрода от начального положения, при котором площадь перекрытия электродов минимальна.

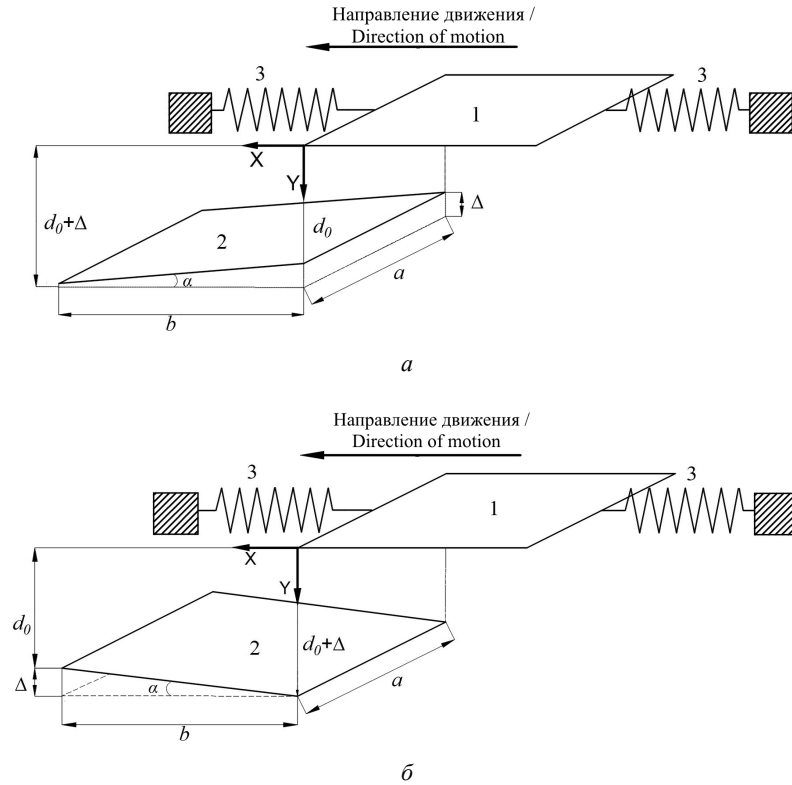


Рис. 1 – Двухэлектродная модель конденсатора переменной емкости с непараллельными электродами:

1 – подвижный электрод; 2 – неподвижный электрод; 3 – упругие подвесы; а – движение подвижного электрода с увеличением среднего межэлектродного зазора; б – движение подвижного электрода с уменьшением среднего межэлектродного зазора

Fig.1 – A two-electrode model of the variable capacitor with non-parallel electrodes:

1 – is a movable electrode; 2 – is a fixed electrode; 3 – is an elastic suspensions; а – is a movable electrode movement with an increase in an average interelectrode gap; б – is a movable electrode movement with a decrease in an average interelectrode gap

Рассмотрим изменение электрической емкости и силы в такой системе при перемещении подвижного электрода за счет контролируемого очень медленного (квазистационарного) изменения напряжения V , приложенного между электродами.

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

$$W = \frac{kx^2}{2} - \frac{CV^2}{2}, \quad (3)$$

где k – коэффициент жесткости упругого подвеса и C – емкость конденсатора с непараллельными электродами.

С учетом (1) и (2) выражение (3) для движения подвижного электрода с увеличением и с уменьшением среднего межэлектродного зазора в безразмерных переменных принимает вид:

$$\tilde{W}_1 = \frac{\tilde{x}^2}{2} - \frac{\lambda}{\tilde{\Delta}} \ln(1 + \tilde{\Delta}\tilde{x}); \quad (4)$$

$$\tilde{W}_2 = \frac{\tilde{x}^2}{2} - \frac{\lambda}{\tilde{\Delta}} \ln\left(\frac{1 + \tilde{\Delta}}{1 + \tilde{\Delta}(1 - \tilde{x})}\right), \quad (5)$$

где $\tilde{W}_1 = W_1/(kb^2)$ – приведенная потенциальная энергия системы при движении с увеличением среднего межэлектродного зазора; $\tilde{W}_2 = W_2/(kb^2)$ – при движении с уменьшением среднего межэлектродного зазора; $\tilde{x} = x/b$ – относительное смещение подвижного электрода; $\tilde{\Delta} = \Delta/d_0$, $\lambda = V^2 \epsilon \epsilon_0 a / (2d_0 kb)$ – приведенное напряжение.

На рис. 2 и 3 представлены зависимости приведенной потенциальной энергии системы \tilde{W}_i от относительного смещения подвижного электрода \tilde{x} , рассчитанные с использованием (4) и (5) для различных приложенных напряжений (рис. 2) и наклонов электродов (рис. 3).

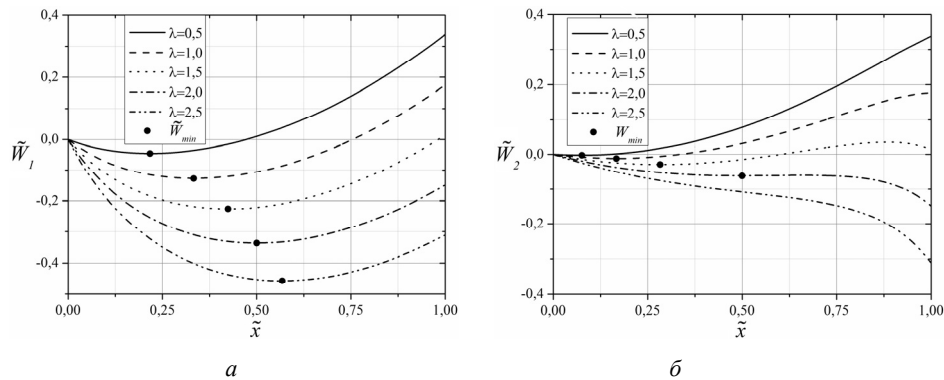


Рис. 2 – Зависимости приведенной потенциальной энергии системы от относительного смещения подвижного электрода для различных λ при $\tilde{\Delta} = 6,0$:

a – движение с увеличением среднего межэлектродного зазора; b – движение с уменьшением среднего межэлектродного зазора

Fig. 2 – Dependences of the system normalized potential energy on the relative movable electrode displacement for different λ at $\tilde{\Delta} = 6,0$:

a – is a movable electrode movement with an increase in an average interelectrode gap; b – is a movable electrode movement with a decrease in an average interelectrode gap

Из анализа (4) и рис. 2, a следует, что при увеличении приложенного напряжения точка устойчивого равновесия \tilde{W}_{\min} монотонно смещается в область больших \tilde{x} и сохраняется в интервале $0 < \tilde{x} < 1$. Таким образом, изменяя приложенное напряжение, в случае смещения подвижного электрода с увеличением среднего межэлектродного зазора, можно установить произвольное контролируемое отно-

сительное расположение электродов во всем интервале $0 < \tilde{x} < 1$. Такое поведение наблюдалось и у системы с параллельными электродами.

В отличие от случая смещения подвижного электрода с увеличением среднего межэлектродного зазора, при движении с уменьшением среднего межэлектродного зазора (рис. 2, б) точка устойчивого равновесия с увеличением приложенного напряжения сначала тоже монотонно смещается в область больших \tilde{x} , но затем вообще исчезает – в системе исчезает устойчивое состояние. При этом подвижный электрод начинает неконтролируемо смещаться в область больших \tilde{x} (критический эффект – аналог эффекта “pull-in instability”).

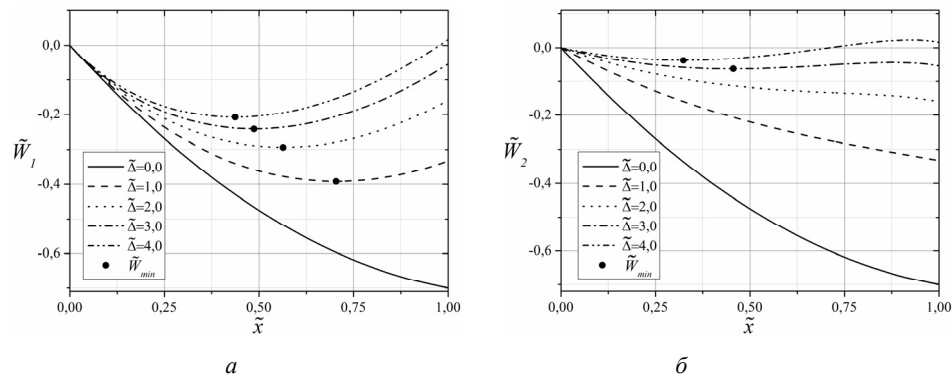


Рис. 3 – Зависимости приведенной потенциальной энергии системы от относительного смещения подвижного электрода для различных $\tilde{\Delta}$ при $\lambda = 1,2$:

a – движение с увеличением среднего межэлектродного зазора; *б* – движение с уменьшением среднего межэлектродного зазора

Fig. 3 – Dependences of the system normalized potential energy on the relative movable electrode displacement for different $\tilde{\Delta}$ at $\lambda = 1,2$:

a – is a movable electrode movement with an increase in average interelectrode gap; *b* – is a movable electrode movement with a decrease in an average interelectrode gap

Из рис. 3 видно, что с увеличением $\tilde{\Delta}$ точка устойчивого равновесия \tilde{W}_{min} для обоих случаев смещается в сторону меньших \tilde{x} , так как при этом электростатическая сила, действующая на электроды, уменьшается из-за увеличения среднего зазора между электродами. Следует отметить, что в конструкции конденсатора с увеличением среднего межэлектродного зазора (см. рис. 1, *a*) устойчивое положение подвижного электрода наблюдается при любых $\tilde{\Delta}$ и при любом действующем напряжении λ в интервале $0 < \tilde{x} < 1$ (рис. 3, *a*), как и для конденсатора с параллельными электродами. В то же время в конструкции с уменьшением среднего межэлектродного зазора (см. рис. 1, *б*) существуют такие значения $\tilde{\Delta}$, при которых устойчивое положение подвижного электрода не наблюдается (рис. 3, *б*).

2. Анализ полученных результатов

Такое поведение системы при изменении приложенного напряжения и наклона электродов можно объяснить, анализируя уравнение равновесия (баланса сил) между возвращающей силой упругости подвеса $F_{уп}$ и электрической силой $F_{эл}$.

В первом случае, когда при увеличении приложенного напряжения и соответствующего смещения подвижного электрода происходит увеличение среднего межэлектродного зазора, уравнение равновесия в безразмерных переменных можно представить в следующем виде:

$$\tilde{F}_{\text{уп}} + \tilde{F}_{\text{эл}} = \tilde{x} - \frac{\lambda}{1 + \tilde{\Delta}\tilde{x}} = 0. \quad (6)$$

На рис. 4 приведены зависимости электрической силы и силы упругости подвеса, действующих на электроды, от смещения электродов \tilde{x} для различных значений λ при $\tilde{\Delta} = 2,0$. Маркерами отмечены положения электродов, соответствующие равенству возвращающей силы упругости подвеса $\tilde{F}_{\text{уп}}$ и электрической силы $\tilde{F}_{\text{эл}}$, а следовательно, и минимуму потенциальной энергии при заданных λ и $\tilde{\Delta}$.

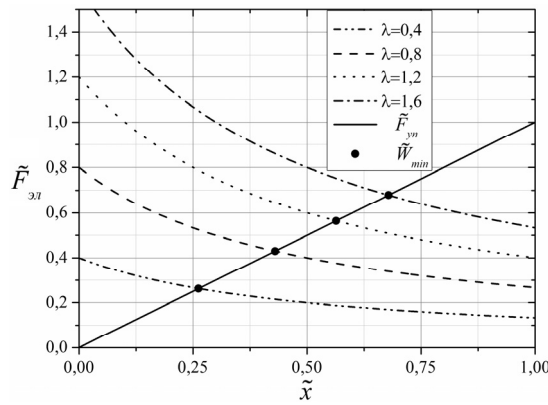


Рис. 4 – Зависимости электрической силы и силы упругости подвеса (сплошная линия) от относительного смещения подвижного электрода для различных значений λ при движении электрода с увеличением среднего межэлектродного зазора и $\tilde{\Delta} = 2,0$

Fig. 4 – Dependences of an electric force and an elastic force (solid line) on the relative displacement of the movable electrode in the case of the movable electrode movement with an increase in an average interelectrode gap for different λ and $\tilde{\Delta} = 2,0$

Анализ (6) в квазистатическом случае позволяет получить зависимость смещения подвижного электрода (положения точки устойчивого равновесия) от действующего напряжения:

$$\tilde{x} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4\tilde{\Delta}\lambda}}{2\tilde{\Delta}}. \quad (7)$$

Зависимости относительного смещения подвижного электрода \tilde{x} при его движении с увеличением среднего межэлектродного зазора от приведенного напряжения λ , рассчитанные с использованием (7) при различных $\tilde{\Delta}$, показаны на рис. 5. Видно, что в отличие от модели с параллельными электродами ($\tilde{\Delta} = 0$)

зависимость положения точки устойчивого равновесия от приведенного напряжения при наличии наклона нелинейна. Также видно, что устойчивое положение подвижного электрода в данном случае наблюдается при любых $\tilde{\Delta}$ и при любом приложенном напряжении, как и для конденсатора с параллельными электродами.

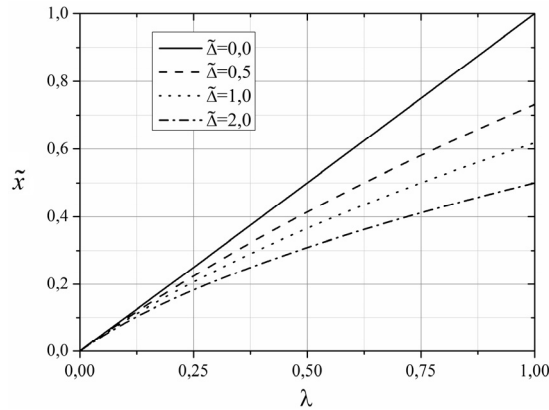


Рис. 5 – Зависимости относительного смещения подвижного электрода при движении с увеличением межэлектродного зазора от приведенного напряжения λ для различных $\tilde{\Delta}$

Fig. 5 – Dependences of a relative displacement of the movable electrode in the case of the movable electrode movement with an increase in an average interelectrode gap on the normalized voltage λ for different $\tilde{\Delta}$

Отметим, что после того как будет достигнуто максимальное перекрытие электродов, в данном случае дальнейшее увеличение приложенного напряжения не будет приводить к изменению взаимного расположения электродов.

Во втором случае, когда при увеличении приложенного напряжения и соответствующего смещения подвижного электрода происходит уменьшение среднего межэлектродного зазора, уравнение равновесия в безразмерных переменных можно представить в следующем виде:

$$\tilde{F}_{\text{уп}} + \tilde{F}_{\text{эл}} = \tilde{x} - \frac{\lambda}{1 + \tilde{\Delta}(1 - \tilde{x})} = 0. \quad (8)$$

На рис. 6 приведены зависимости электрической силы и силы упругости подвеса (сплошная линия), действующих на электроды, от смещения электродов \tilde{x} для различных λ и $\tilde{\Delta} = 2,0$ для данного случая. Маркерами отмечены положения электродов, соответствующие равенству силы упругости подвеса $\tilde{F}_{\text{уп}}$ и электрической силы $\tilde{F}_{\text{эл}}$ (минимуму потенциальной энергии) при заданных λ и $\tilde{\Delta}$.

Видно, что в случае смещения с уменьшением среднего межэлектродного зазора равенство сил будет наблюдаться не всегда, а только до тех пор, пока не будет достигнута критическая точка \tilde{x}_{cr} (пустой маркер). При дальнейшем увеличении приложенного напряжения подвижный электрод начнет неконтролируемо смещаться к точке $\tilde{x} = 1$, стремясь занять положение с максимальным перекрытием электродов (критический эффект).

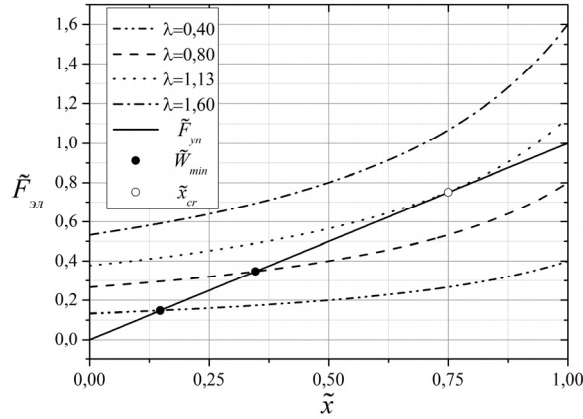


Рис. 6 – Зависимости электрической силы и силы упругости подвеса (сплошная линия) от относительного смещения подвижного электрода для различных λ и $\tilde{\Delta} = 2,0$ при движении электрода с уменьшением среднего межэлектродного зазора

Fig. 6 – Dependences of an electric force and an elastic force (solid line) on a relative displacement of the movable electrode in the case of the movable electrode movement with a decrease in an average interelectrode gap for different λ and $\tilde{\Delta} = 2,0$

В этом случае в квазистатическом режиме зависимость положения точки устойчивого равновесия подвижного электрода от действующего напряжения принимает вид

$$\tilde{x} = \frac{(1 + \tilde{\Delta}) - \sqrt{(1 + \tilde{\Delta})^2 - 4\tilde{\Delta}\lambda}}{2\tilde{\Delta}}. \quad (9)$$

На рис. 7 приведены зависимости относительного смещения подвижного электрода от приложенного напряжения в случае его движения с уменьшением межэлектродного зазора для различных $\tilde{\Delta}$. Эти зависимости отражают характерные особенности поведения данной электромеханической системы при изменении управляющего напряжения. Видно, что в интервале $1 < \lambda \leq \lambda_{cr}$ каждому значению управляющего напряжения соответствуют два состояния системы. При этом нижняя ветвь с $0 < \tilde{x} \leq \tilde{x}_{cr}$ соответствует устойчивому состоянию системы, а верхняя с $\tilde{x} \geq \tilde{x}_{cr}$ – неустойчивому.

Данный критический эффект характеризуется значениями критического смещения \tilde{x}_{cr} и критического напряжения λ_{cr} .

Анализируя поведение относительного изменения приращения силы упругости F_1 и электрической силы F_2 :

$$F_1 = \frac{1}{\tilde{F}_{уп}} \frac{\partial \tilde{F}_{уп}}{\partial \tilde{x}} = \frac{1}{\tilde{x}}, \quad F_2 = \frac{1}{\tilde{F}_{эл}} \frac{\partial \tilde{F}_{эл}}{\partial \tilde{x}}$$

от относительного смещения \tilde{x} (рис. 8), видно, что в случае, когда при увеличении приложенного напряжения и соответствующего смещения подвижного элект-

трода происходит увеличение среднего межэлектродного зазора, относительное изменение приращения силы упругости F_1 всегда больше относительного изменения приращения электрической силы F_2 (рис. 8, а). В результате на участке $0 < \tilde{x} < 1$ силе упругости удастся скомпенсировать возрастание электрической силы при случайных флуктуациях системы, приводящих к увеличению смещения электрода. В то же время в случае, когда при увеличении приложенного напряжения и соответствующего смещения подвижного электрода происходит уменьшение среднего межэлектродного зазора (рис. 8, б), при изменении смещения от нуля до \tilde{x}_{cr} превалирует F_1 , а при $\tilde{x} > \tilde{x}_{cr} - F_2$.

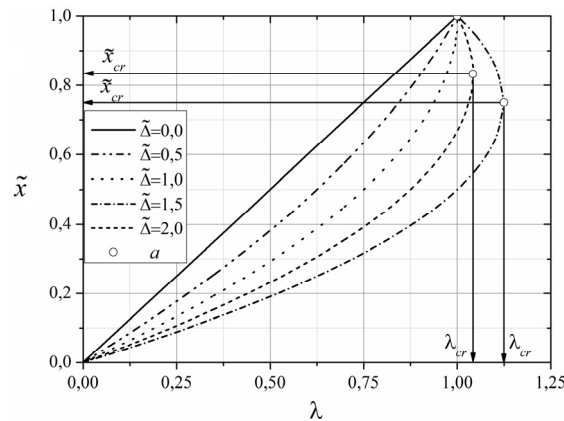


Рис. 7 – Зависимости относительного смещения подвижного электрода при движении с уменьшением межэлектродного зазора от приведенного напряжения λ для различных $\tilde{\Delta}$

Fig. 7 – Dependences of a relative displacement of the movable electrode in the case of the movable electrode movement with a decrease in an average interelectrode gap on the normalized voltage λ for different $\tilde{\Delta}$

В критической точке (точка «а» на рис. 7 и 8, б) $F_1 = F_2$. В результате на участке $0 < \tilde{x} < \tilde{x}_{cr}$ силе упругости удастся скомпенсировать возрастание электрической силы при случайных флуктуациях системы, приводящих к увеличению смещения электрода. Однако на участке с $\tilde{x} \geq \tilde{x}_{cr}$ малейшие флуктуации в сторону увеличения смещения приведут к дальнейшему увеличению смещения электрода (критический эффект – аналог эффекта “pull-in instability”) вплоть до $\tilde{x} = 1$, так как в этом случае сила упругости уже не сможет скомпенсировать приращение электрической силы. Анализ показывает, что зависимость критического смещения подвижного электрода \tilde{x}_{cr} от $\tilde{\Delta}$ может быть представлена в виде

$$\tilde{x}_{cr} = \frac{\tilde{\Delta} + 1}{2\tilde{\Delta}}. \quad (10)$$

Из (10) следует, что критический эффект проявляется лишь при $\tilde{\Delta} \geq 1$. Причем при увеличении $\tilde{\Delta}$ значение критического смещения \tilde{x}_{cr} уменьшается и стремится к 0,5.

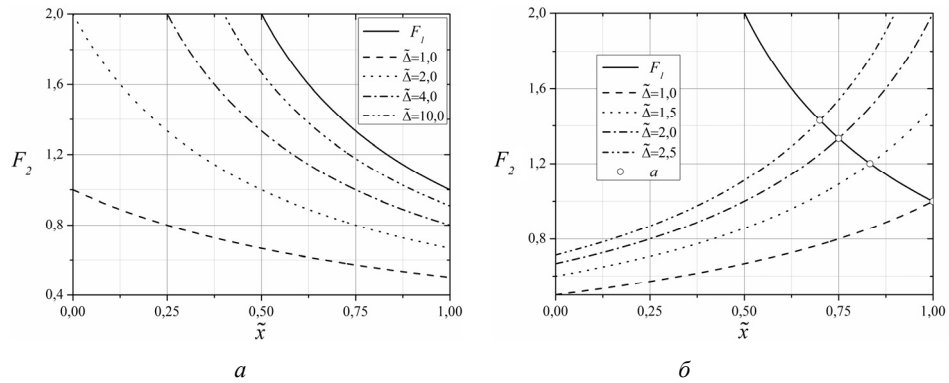


Рис. 8 – Зависимости относительного изменения приращения силы упругости F_1 и электрической силы F_2 от относительного смещения \tilde{x} :

a – движение с увеличением среднего межэлектродного зазора; b – движение с уменьшением среднего межэлектродного зазора

Fig. 8 – Dependences of a relative change in the elastic force F_1 and the electric force F_2 increments on the relative displacement \tilde{x} :

a – is a movable electrode movement with an increase in an average interelectrode gap; b – is a movable electrode movement with a decrease in an average interelectrode gap

При подстановке (10) в (9) зависимость критического напряжения от относительного наклона электродов принимает вид

$$\lambda_{cr} = \frac{(\tilde{\Delta} + 1)^2}{4\tilde{\Delta}}. \quad (11)$$

Зависимость критического напряжения от $\tilde{\Delta}$, рассчитанная с использованием (11), приведена на рис. 9.

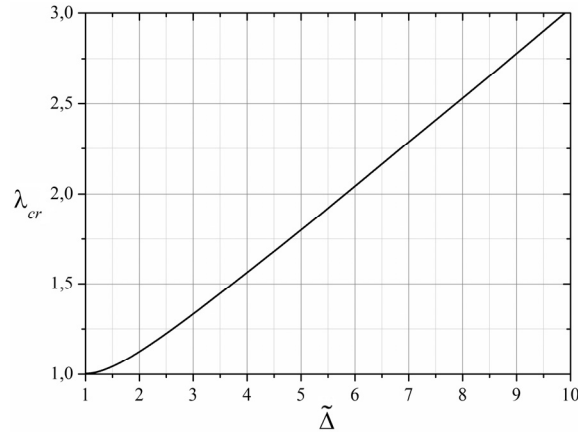


Рис. 9 – Зависимость критического напряжения от $\tilde{\Delta}$

Fig. 9. Dependence of a critical voltage on $\tilde{\Delta}$

Согласно рис. 9 λ_{cr} при $\tilde{\Delta} \geq 2$ начинает практически линейно зависеть от $\tilde{\Delta}$:

$$\lambda_{cr} \approx 0,6475 + 0,2325\tilde{\Delta}.$$

После наступления критического состояния система перестает реагировать на изменения управляющего напряжения. Таким образом, можно сказать, что движение подвижного электрода с увеличением среднего зазора является неустойчивым, в отличие от движения с уменьшением межэлектродного зазора.

Заключение

Исследование влияния непараллельности электродов на электромеханические взаимодействия в МЭМС с латеральным смещением электродов в режиме с контролируемым напряжением показало, что процессы, сопровождающие смещения подвижного электрода в случае его движения с увеличением и с уменьшением среднего межэлектродного зазора, существенно различаются.

Показано, что изменяя приложенное напряжение при смещении подвижного электрода с увеличением среднего межэлектродного зазора, можно установить произвольное контролируемое относительное расположение электродов во всем интервале перекрытия электродов $0 < \tilde{x} < 1$. После того как будет достигнуто максимальное перекрытие электродов, в данном случае дальнейшее увеличение приложенного напряжения не будет приводить к изменению взаимного расположения электродов.

Установлено, что в отличие от случая с движением подвижного электрода переменного конденсатора с увеличением среднего межэлектродного зазора при движении с уменьшением среднего межэлектродного зазора установить произвольное контролируемое относительное расположение электродов во всем интервале перекрытия электродов не всегда возможно.

Обнаружено, что в случае движения подвижного электрода с уменьшением среднего межэлектродного зазора существует такое критическое положение подвижного электрода \tilde{x}_{cr} (и значение напряжения λ_{cr}), при котором электростатическая сила начинает преобладать над упругой силой, что приводит к неконтролируемому смещению подвижного электрода, направленному в сторону увеличения площади перекрытия электродов – наблюдается критический эффект (аналог эффекта “pull-in instability”). После наступления критического состояния система перестает реагировать на изменения управляющего напряжения.

Полученные выражения для оценки емкостей, потенциальных энергий, электростатических сил, критического напряжения и смещения подвижного электрода при различных наклонах электродов показали, что критический эффект проявляется лишь при $\tilde{\Delta} \geq 1$ и $\lambda \geq 1$. При увеличении взаимного наклона электродов значение \tilde{x}_{cr} уменьшается, а λ_{cr} – растет. Причем значение λ_{cr} при $\tilde{\Delta} \geq 2$ начинает практически линейно зависеть от $\tilde{\Delta}$.

Обнаруженные особенности электромеханических взаимодействий в МЭМС с латеральным смещением электродов необходимо учитывать при разработке, изготовлении и сборке микроэлектромеханических устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Chiang C.-T.** Design of a CMOS MEMS accelerometer used in IoT devices for seismic detection // IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems. – 2018. – Vol. 8, N 3. – P. 566–577. – doi: 10.1109/JETCAS.2018.2825604.
2. **Nazdrowicz J., Napieralski A.** Electrical equivalent model of MEMS accelerometer in Matlab/SIMULINK environment // 2018 XIVth International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH): proceedings. – Lviv, Ukraine, 2018. – P. 69–72. – doi: 10.1109/MEMSTECH.2018.8365704.

3. New stability method of a multirate controller for a three-axis high-Q MEMS accelerometer with simultaneous electrostatic damping / L.E. Ciotirca, O. Bernal, J. Enjalbert, T. Cassagnes, H. Tap, H. Beaulaton, S. Sahin // *IEEE Sensors Journal*. – 2018. – Vol. 18, N 15. – P. 6106–6114. – doi: 10.1109/JSEN.2018.2844682.
4. **Zakriya M., Elfadel I.M., Rasras M.** High dynamic range Z-axis hybrid spring MEMS capacitive accelerometer // 2018 Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS and MOEMS (DTIP). – Roma, Italy, 2018. – P. 1–4. – doi: 10.1109/DTIP.2018.8394219.
5. Different methods of capacitive comb drive MEMS accelerometer simulations / J. Nazdrowicz, M. Szenner, C. Maj, A. Napieralski // 2018 Baltic URSI Symposium (URSI). – Poznań, Poland, 2018. – P. 254–256. – doi: 10.23919/URSI.2018.8406772.
6. Design, fabrication, and calibration of a full silicon WLP MEMS sandwich accelerometer / Q. Hu, N. Li, C. Xing, W. Mei, P. Sun // 2018 19th International Conference on Electronic Packaging Technology. – Shanghai, China, 2018. – P. 919–933. – doi: 10.1109/ICEPT.2018.8480835.
7. **Aydemir A., Akin T.** Fabrication of a three-axis capacitive MEMS accelerometer on a single substrate // 2015 IEEE SENSORS. – Busan, South Korea, 2015. – P. 1–4. – doi: 10.1109/ICSENS.2015.7370307.
8. **Shah M.A., Iqbal F., Lee B.-L.** Design and analysis of a single-structure three-axis MEMS gyroscope with improved coupling spring // 2016 IEEE 11th Annual International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. – Piscataway, NJ, 2016. – P. 188–191. – doi: 10.1109/JMEMS.2017.2754506.
9. High scale-factor stability frequency-modulated MEMS gyroscope: 3-axis sensor and integrated electronics design / P. Minotti, S. Dellea, G. Mussi, A. Bonfanti, S. Facchinetti, A. Tocchio, V. Zega, C. Comi, A.L. Lacaita, G. Langfelder // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2018. – Vol. 65, N 6. – P. 5040–5050. – doi: 10.1109/TIE.2017.2772212.
10. Design and fabrication of a novel MEMS vibrating ring gyroscope / Z. Kou, J. Liu, H. Cao, H. Feng, J. Ren, Q. Kang, Y. Shi // 2017 IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference. – Chongqing, China, 2017. – P. 131–134. – doi: 10.1109/ITOEC.2017.8122396.
11. Quadruple mass vibrating MEMS gyroscope with symmetric design / G. Wu, G.L. Chua, N. Singh, Y. Gu // *IEEE Sensors Letters*. – 2018. – Vol. 2, N 4. – doi: 10.1109/LSENS.2018.2873000.
12. **Fang W., Huang Q.** A study of the mechanical reliability of a MEMS microphone // Proceedings of the 20th IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits IPFA 2013. – Suzhou, China, 2013. – P. 716–719. – doi: 10.1109/IPFA.2013.6599261.
13. New architecture of MEMS microphone for enhanced performances / J. Czamy, A. Walther, B. Desloges, Ph. Robert, E. Redon, T. Verdot, K. Ege, C. Guianvarc'h, J.L. Guyader // 2013 International Semiconductor Conference Dresden–Grenoble. – Dresden, Germany, 2013. – P. 1–4. – doi: 10.1109/ISCDG.2013.6656312.
14. Design and simulation of silicon and polymer based piezoelectric MEMS microphone / Y.C. Muralidhar, B.S. Somesh, K.N. Neethu, L.R. Yeshashwini, V.S. Naganja, S.L. Pinjare // 2013 International Conference on Emerging Trends in Communication, Control, Signal Processing and Computing Applications. – Bangalore, India, 2013. – P. 1–6. – doi: 10.1109/C2SPCA.2013.6749409.
15. Development of capacitive MEMS microphone based on slit-edge for high signal-to-noise ratio / I. Yoo, J. Sim, S. Yang, H. Kim // 2018 IEEE Micro Electro Mechanical Systems. – Belfast, Northern Ireland, 2018. – P. 1072–1075. – doi: 10.1109/MEMSYS.2018.8346745.
16. Modeling of a bistable MEMS mechanism with torsion/cantilever beams / Y. Wu, J. Wang, X. Zhang, C. Zhang, G. Ding // 2010 IEEE 5th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. – Xiamen, China, 2010. – P. 153–156. – doi: 10.1109/NEMS.2010.5592168.
17. Simulation and analysis of actuation voltage of electrostatically actuated RF MEMS Cantilever and fixed – fixed switches with variable beam parameters / P. Sindhuja, V. Sharma, M.D. Upadhyay, A.V. Singh // 2016 International Conference on Micro-

- Electronics and Telecommunication Engineering (ICMETE). – IEEE, 2016. – P. 450–454. – doi: 10.1109/ICMETE.2016.84.
18. **Chu C., Liao X., Chen C.** Improved dynamic range of microwave power sensor by MEMS cantilever beam // *Journal of Microelectromechanical Systems*. – 2017. – Vol. 26, N 6. – P. 1183–1185. – doi: 10.1109/JMEMS.2017.2754506.
 19. MEMS deformable mirror actuated by electrostatic piston array / A. Uno, Y. Hirai, T. Tsuchiya, O. Tabata // 2016 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics. – Singapore, 2016. – P. 1–2. – doi: 10.1109/OMN.2016.7565822.
 20. A high fill factor 1×20 MEMS mirror array based on ISC bimorph structure / Q. Chen, J. Ding, W. Wang, H. Xie // 2016 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics. – Singapore, 2016. – P. 1–2. – doi: 10.1109/OMN.2016.7565912.
 21. Portable Fourier transform infrared spectrometer based on an electrothermal MEMS mirror / D. Wang, X. Han, H. Liu, Q. Chen, W. Wang, H. Xie // 2017 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. – Kaohsiung, Taiwan, 2017. – P. 265–268. – doi: 10.1109/TRANSDUCERS.2017.7994039.
 22. **Grzebyk T.** MEMS vacuum pumps // *Journal of Microelectromechanical Systems*. – 2017. – Vol. 26, N 4. – P. 705–717. – doi: 10.1109/JMEMS.2017.2676820.
 23. Graphene gas pumps / D. Davidovikj, D. Bouwmeester, H.S.J. van der Zant, P.G. Steeneken // 2018 IEEE Micro Electro Mechanical Systems. – Belfast, Northern Ireland, 2018. – P. 628–631. – doi: 10.1109/MEMSYS.2018.8346632.
 24. On-chip high-voltage charge pump with MEMS post-processed standard 5-V CMOS on SOI for electroosmotic flow micropumps / Y. Okamoto, H. Takehara, K. Fujimoto, T. Ichiki, T. Ohba, Y. Mita // *IEEE Electron Device Letters*. – 2018. – Vol. 39, N 6. – P. 851–854. – doi: 10.1109/LED.2018.2829925.
 25. **Косцов Э.Г.** Состояние и перспективы микро- и нанoeлектромеханики // *Автометрия*. – 2009. – Т. 43, № 3. – С. 3–52.
 26. **Остертак Д.И., Пельменев К.Г.** Анализ электростатических взаимодействий в плоскопараллельных МЭМС со смещением электродов // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. – 2018. – № 1 (38). – С. 7–21. – doi: 10.17212/1727-2769-2018-1-7-21.
 27. **Драгунов В.П., Остертак Д.И., Драгунова Е.В.** Особенности функционирования несбалансированных МЭМС // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. – 2017. – № 4 (37). – С. 58–69. – doi: 10.17212/1727-2769-2017-4-58-69.
 28. **Драгунов В.П., Киселев Д.Е., Синицкий Р.Е.** Особенности электромеханических взаимодействий в МЭМС с непараллельными электродами // *Нано- и микросистемная техника*. – 2017. – Т. 19, № 6. – С. 360–369. – doi: 10.17587/nmst.19.360-369.
 29. **Драгунов В.П., Остертак Д.И.** Расчет латеральной составляющей электростатической силы в // *Научный вестник Новосибирского государственного технического университета*. – 2009. – № 1 (34). – С. 229–233.
 30. **Драгунов В.П., Остертак Д.И.** Электростатические взаимодействия в МЭМС со встречно-штыревой структурой // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. – 2009. – № 1 (12). – С. 99–106.
 31. **Драгунов В.П., Косцов Э.Г.** МЭМ электростатический генератор энергии // *Нано- и микросистемная техника*. – 2007. – № 11. – С. 47–52.

FEATURES OF ELECTROMECHANICAL INTERACTIONS IN MEMS WITH A LATERAL DISPLACEMENT OF NON-PARALLEL ELECTRODES IN THE VOLTAGE CONTROLLED MODE

**Sinitskiy R.E., Dragunov V.P., Rudenko I.E.,
Koloskov D.B., Dragunova E.V.**

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The paper presents the results of the research into the effect of the electrodes non-parallelism on electromechanical interactions in MEMS with a lateral displacement of electrodes in the voltage controlled operating mode. The analysis was carried out for two cases of a movable electrode

movement: with increasing and with decreasing an average interelectrode gap. Expressions were obtained for the calculation of capacitances, potential energies, electrostatic forces, critical voltage, and a critical displacement of a movable electrode at different slopes of the electrodes.

It was established that in MEMS with a lateral displacement of non-parallel electrodes, with increasing an average interelectrode gap, a controlled displacement of the movable electrode is possible in the entire range of its length at any applied voltages and a mutual slope of the electrodes.

It was found that in MEMS with a lateral displacement of non-parallel electrodes, with decreasing an average interelectrode gap, an unstable state of the system is possible, leading to an uncontrolled movement of the movable electrode directed towards increasing an electrode overlap area – a critical effect (similar to “pull-in instability”). Thus, the movement of a movable electrode with increasing an average interelectrode gap is unstable in contrast to the movement with decreasing an average interelectrode gap. After the onset of a critical state, the system ceases to respond to changes in control voltage. It was shown that this critical effect is possible with system parameters $\lambda \geq 1$ and $\tilde{\Delta} \geq 1$. It was ascertained that in this case, with an increase in the mutual slope of the electrodes, the value of a critical displacement of the movable electrode decreases, and the dependence of the critical voltage λ_{cr} on $\tilde{\Delta}$ is almost linear at $\tilde{\Delta} \geq 2$.

Keywords: MEMS, lateral displacement of electrodes, microelectromechanical capacitor, electric force, voltage controlled mode, critical effect, controlled electrode displacement, critical values.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-4-93-109

REFERENCES

1. Chiang C.-T. Design of a CMOS MEMS accelerometer used in IoT devices for seismic detection. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 2018, vol. 8, no. 3, pp. 566–577. doi: 10.1109/JETCAS.2018.2825604.
2. Nazdrowicz J., Napieralski A. Electrical equivalent model of MEMS accelerometer in Matlab/SIMULINK environment. *2018 XIVth International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH): proceedings*, Lviv, Ukraine, 2018, pp. 69–72. doi: 10.1109/MEMSTECH.2018.8365704.
3. Ciotirca L.E., Bernal O., Enjalbert J., Cassagnes T., Tap H., Beaulaton H., Sahin S. New stability method of a multirate controller for a three-axis high-Q MEMS accelerometer with simultaneous electrostatic damping. *IEEE Sensors Journal*, 2018, vol. 18, no. 15, pp. 6106–6114. doi: 10.1109/JSEN.2018.2844682.
4. Zakriya M., Elfadel I.M., Rasras M. High dynamic range Z-axis hybrid spring MEMS capacitive accelerometer. *2018 Symposium on Design, Test, Integration & Packaging of MEMS and MOEMS*, Roma, Italy, 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/DTIP.2018.8394219.
5. Nazdrowicz J., Szenner M., Maj C., Napieralski A. Different methods of capacitive comb drive MEMS accelerometer simulations. *2018 Baltic URSI Symposium*, Poznań, Poland, 2018, pp. 254–256. doi: 10.23919/URSI.2018.8406772.
6. Hu Q., Li N., Xing C., Mei W., Sun P. Design, fabrication, and calibration of a full silicon WLP MEMS sandwich accelerometer. *2018 19th International Conference on Electronic Packaging Technology*, Shanghai, China, 2018, pp. 919–933. doi: 10.1109/ICEPT.2018.8480835.
7. Aydemir A., Akin T. Fabrication of a three-axis capacitive MEMS accelerometer on a single substrate. *2015 IEEE SENSORS*, Busan, South Korea, 2015, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICSENS.2015.7370307.
8. Shah M.A., Iqbal F., Lee B.-L. Design and analysis of a single-structure three-axis MEMS gyroscope with improved coupling spring. *2016 IEEE 11th Annual International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*. Piscataway, NJ, 2016, pp. 188–191. doi: 10.1109/JMEMS.2017.2754506.
9. Minotti P., Della S., Mussi G., Bonfanti A., Facchinetti S., Tocchio A., Zega V., Comi C., Lacaita A.L. Langfelter high scale-factor stability frequency-modulated MEMS gyroscope: 3-axis sensor and integrated electronics design. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, vol. 65, no. 6, pp. 5040–5050. doi: 10.1109/TIE.2017.2772212.

10. Kou Z., Liu J., Cao H., Feng H., Ren J., Kang Q., Shi Y. Design and fabrication of a novel MEMS vibrating ring gyroscope. *2017 IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference*, Chongqing, China, 2017, pp. 131–134. doi: 10.1109/ITOEC.2017.8122396.
11. Wu G., Chua G.L., Singh N., Gu Y. A quadruple mass vibrating MEMS gyroscope with symmetric design. *IEEE Sensors Letters*, 2018, vol. 2, no. 4. doi: 10.1109/LSSENS.2018.2873000.
12. Fang W., Huang Q. A study of the mechanical reliability of a MEMS microphone. *Proceedings of the 20th IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits IPFA 2013*, Suzhou, China, 2013, pp. 716–719. doi: 10.1109/IPFA.2013.6599261.
13. Czamy J., Walther A., Desloges B., Robert Ph., Redon E., Verdot T., Ege K., Guianvarc'h C., Guyader J.L. New architecture of MEMS microphone for enhanced performances. *2013 International Semiconductor Conference Dresden–Grenoble*, 2013, pp. 1–4. doi: 10.1109/ISCDG.2013.6656312.
14. Muralidhar Y.C., Somesh B.S., Neethu K.N., Yeshashwini L.R., Naganja V.S., Pinjare S.L. Design and simulation of silicon and polymer based piezoelectric MEMS microphone. *2013 International Conference on Emerging Trends in Communication, Control, Signal Processing and Computing Applications*, Bangalore, India, 2013, pp. 1–6. doi: 10.1109/C2SPCA.2013.6749409.
15. Yoo I., Sim J., Yang S., Kim H. Development of capacitive MEMS microphone based on slit-edge for high signal-to-noise ratio. *2018 IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, Belfast, Northern Ireland, 2018, pp. 1072–1075. doi: 10.1109/MEMSYS.2018.8346745.
16. Wu Y., Wang J., Zhang X., Zhang C., Ding G. Modeling of a bistable MEMS mechanism with torsion/cantilever beams. *2010 IEEE 5th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, Xiamen, China, 2010, pp. 53–156. doi: 10.1109/NEMS.2010.5592168.
17. Sindhuja P., Sharma V., Upadhyay M.D., Singh A.V. Simulation and analysis of actuation voltage of electrostatically actuated RF MEMS cantilever and fixed – fixed switches with variable beam parameters. *2016 International Conference on Micro-Electronics and Telecommunication Engineering*, 2016, pp. 450–454. doi: 10.1109/ICMETE.2016.84.
18. Chu C., Liao X., Chen C. Improved dynamic range of microwave power sensor by MEMS cantilever beam. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2017, vol. 26, no. 6, pp. 1183–1185. doi: 10.1109/JMEMS.2017.2754506.
19. Uno A., Hirai Y., Tsuchiya T., Tabata O. MEMS deformable mirror actuated by electrostatic piston array. *2016 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics*, Singapore, 2016, pp. 1–2. doi: 10.1109/OMN.2016.7565822.
20. Chen Q., Ding J., Wang W., Xie H. A high fill factor 1×20 MEMS mirror array based on ISC bimorph structure. *2016 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics*, Singapore, 2016, pp. 1–2. doi: 10.1109/OMN.2016.7565912.
21. Wang D., Han X., Liu H., Chen Q., Wang W., Xie H. Portable Fourier transform infrared spectrometer based on an electrothermal MEMS mirror. *2017 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, Kaohsiung, Taiwan, 2017, pp. 265–268. doi: 10.1109/TRANSDUCERS.2017.7994039.
22. Grzebyk T. MEMS vacuum pumps. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2017, vol. 26, no. 4, pp. 705–717. doi: 10.1109/JMEMS.2017.2676820.
23. Davidovikj D., Bouwmeester D., Zant H.S.J. van der, Steeneken P.G. Graphene gas pumps. *2018 IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, Belfast, Northern Ireland, 2018, pp. 628–631. doi: 10.1109/MEMSYS.2018.8346632.
24. Okamoto Y., Takehara H., Fujimoto K., Ichiki T., Ohba T., Mita Y. On-chip high-voltage charge pump with MEMS post-processed standard 5-V CMOS on SOI for electroosmotic flow micropumps. *IEEE Electron Device Letters*, 2018, vol. 39, no. 6, pp. 851–854. doi: 10.1109/LED.2018.2829925.

25. Kostsov E.G. Sostoyanie i perspektivy mikro- i nanoelektromekhaniki [Status and prospects of micro- and nanoelectromechanics]. *Avtometriya – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2009, vol. 43, no. 3, pp. 3–52. (In Russian).
26. Ostertak D.I., Pelmenev K.G. Analiz elektrostатических взаимодействий в плоскостной MEMS со смещением электродов [An analysis of electrostatic interactions in parallel-plate MEMS with an electrode offset]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 1 (38), pp. 7–21. doi: 10.17212/1727-2769-2018-1-7-21.
27. 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.
28. Dragunov V.P., Kiselev D.E., Sinitskii R.E. Osobennosti elektromekhanicheskikh vzaimodeistvii v MEMS s neparallelnymi elektrodami [Specific features of the electromechanical interactions in MEMS with nonparallel electrodes]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano- and Microsystem Technique*, 2017, vol. 19, no. 6, pp. 360–369. doi: 10.17587/nmst.19.360-369.
29. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Raschet lateral'noi sostavlyayushchei elektrostатической силы в 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 (34), pp. 229–233.
30. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Elektrostатические взаимодействия в MEMS со встречно-штыревой структурой [Coulomb interactions in interdigitated MEMS]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2009, no. 1 (12), pp. 99–106.
31. Dragunov V.P., Kostsov E.G. MEM elektrostатический генератор энергии [Microelectromechanical Electrostatic Power Generator]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano- and Microsystem Technique*, 2007, no. 11, pp. 47–52.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Синецкий Родион Евгеньевич – родился в 1994 году, магистрант 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 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. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: sinitsky.rodion@yandex.ru).



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 160 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 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 160 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: drag@adm.nstu.ru).



Руденко Игорь Евгеньевич – родился в 1997 году, студент кафедры ППИМЭ Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: наноэлектроника, нано- и микросистемная техника. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: igor_rudenko.ru@mail.ru).

Rudenko Igor Evgenevich (b. 1997) – a student at the Department of Semiconductor Devices and Microelectronics in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nanoelectronics, nano- and microsystem technology. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: igor_rudenko.ru@mail.ru).



Колосков Дмитрий Борисович – родился в 1998 году, студент кафедры ППИМЭ Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: наноэлектроника, нано- и микросистемная техника. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: dimakoloskov2009@gmail.com).

Koloskov Dmitrii Borisovich (b. 1998) – a student at the Department of Semiconductor Devices and Microelectronics in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nanoelectronics, nano- and microsystem technology. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. E-mail: dimakoloskov2009@gmail.com).



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 высокотехнологических 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) – Candidate of Sciences (Econ.), associate professor, associate professor at the Department of Computer Science in Economics, Novosibirsk State Technical University. The area of her scientific interests is information technologies and 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 22 октября 2018 г.

Received October 22, 2018

To Reference:

Sinitskiy R.E., Dragunov V.P., Rudenko I.E., Koloskov D.B., Dragunova E.V. Osobennosti elektromekhanicheskikh vzaimodeistvii v MEMS s lateral'nyim smeshcheniem neparallel'nykh elektrodov v rezhime s kontroliruemym napryazheniem [Features of electromechanical interactions in MEMS with lateral displacement of non-parallel electrodes in the voltage controlled mode]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 4 (41), pp. 93–109. doi: 10.17212/1727-2769-2018-4-93-109.