

## Модель равновесия подвижных элементов микромеханических зеркал с внутренними подвесами

И.Е. Лысенко

Одним из направлений развития микрооптикоэлектромеханических систем является разработка и исследование микромеханических зеркал (ММЗ). Данные микромеханические компоненты находят широкое применение как в микросистемах управления оптическими потоками, так и в лазерных и оптических дальномерах, используемых в системах ориентации и навигации подвижных объектов по рельефу местности [1, 2].

В работах [3, 4] рассмотрены конструкции интегральных микромеханических зеркал с крестообразным [5] и интегрированным внутренними подвесами [6], соответственно.

Для отклонения зеркального элемента в предложенных микромеханических компонентах применяются электростатические приводы (ЭСП). Всем электростатическим приводам присущ эффект неконтролируемого электростатического притяжения [7-10]. Критерии, позволяющие определить условия наступления данного эффекта, могут быть получены из модели равновесия зеркального элемента.

Разработанная модель равновесия зеркальных элементов предложенных микромеханических компонентов может быть представлено в нормированном виде:

$$W(1 - W\sqrt{n})^2 = U^*, \quad (1)$$

где  $W$ ,  $n$ ,  $U^*$  – безразмерные переменные, определяемые выражениями:

$$W = \frac{l_1}{d} \operatorname{tg} \beta; \quad (2)$$

$$n = \frac{l_2}{l_1}; \quad (3)$$

$$U^* = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 w U_{от}^2}{k_\beta \beta_{max} d} L, \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость воздушного зазора;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $l_1, l_2$  – расстояния от оси вращения до краев неподвижных электродов электростатических приводов;  $w$  – ширина неподвижных электродов;  $d$  – расстояние между неподвижными электродами электростатических приводов и зеркальным элементом;  $\beta, \beta_{max}$  – угол и максимальный угол отклонения зеркального элемента;  $k_\beta$  – коэффициент жесткости упругого подвеса зеркального элемента;  $U_{от}$  – отклоняющее напряжение;  $L$  – длина зеркального элемента.

На рис. 1 представлена зависимость относительного смещения зеркального элемента  $W$  от приведенного напряжения  $U^*$  при изменении относительного размера  $n$  неподвижных электродов электростатических приводов.

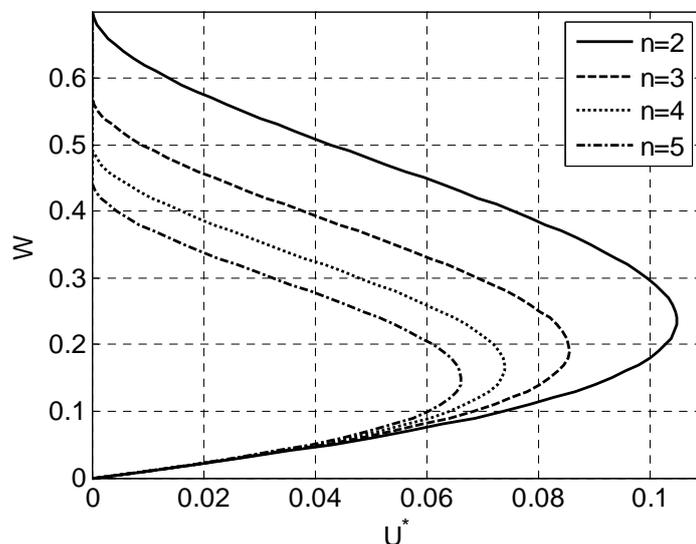


Рис. 1. Зависимость относительного смещения зеркального элемента  $W$  от приведенного напряжения  $U^*$

Кривые на рис. 1 отражают поведение зеркального элемента ММЗ при изменении управляющих напряжений на электростатических приводах. Оптимумы кривых определяют два состояния системы: нижняя ветвь

соответствует устойчивому состоянию системы, а верхняя – неустойчивому. В неустойчивом состоянии системы малейшее изменение управляющих напряжений приводит к наступлению эффекта неконтролируемого электростатического притяжения и, соответственно, поломки устройства. Таким образом, работа электростатических приводов ММЗ должна выполняться в нижней части кривых. На расположение оптимума также влияет конфигурация электростатических приводов, в частности размеры неподвижных электродов ЭСП.

На рис. 2 и 3 представлены зависимости критических значений относительного смещения зеркального элемента  $W$  и приведенного напряжения  $U^*$  определяющих наступление эффекта неконтролируемого электростатического притяжения от относительного размера неподвижных электродов  $n$ .

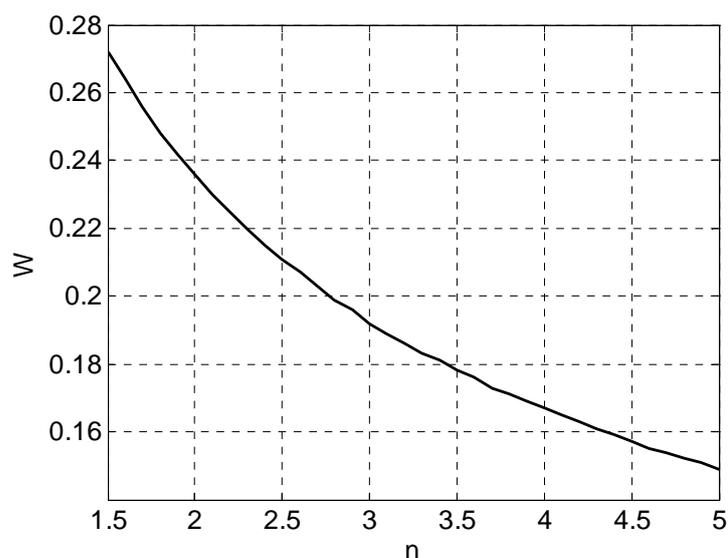


Рис. 2. Зависимость относительного смещения зеркального элемента  $W$  от относительного размера неподвижных электродов  $n$  ЭСП

С использованием выражений (1)-(4) и рис. 2, 3 можно определить максимальное значение отклоняющего напряжения приводящего к наступлению эффекта неконтролируемого электростатического притяжения при движении зеркального элемента (например, при  $n=2$ ):

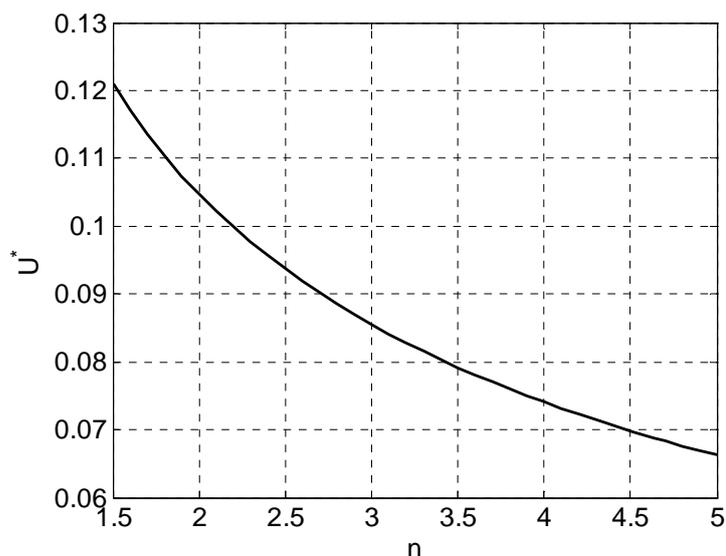


Рис. 3. Зависимость приведенного напряжения  $U^*$  от относительного размера неподвижных электродов  $n$  электростатических приводов

$$U_{от1} = \sqrt{0,105 \frac{k_{\beta} \beta_{\max} d}{\varepsilon \varepsilon_0 w L}}; \quad (5)$$

$$\tan(\beta_{\max}) = 0,235 \frac{d}{l_1}. \quad (6)$$

Однако, выражение (5) позволяет определить только максимальное значение постоянного отклоняющего напряжения  $U_{от1}$ . При подачи отклоняющего напряжения, изменяющегося по определенному гармонического закону, максимальное значение  $U_{от2}$ , приводящее к наступлению неконтролируемого электростатического притяжения, будет больше чем  $U_{от1}$ . Это связано с влиянием коэффициента электростатической упругости, создаваемого электростатическими актюаторами. В этом случае выражение для определения максимального значения отклоняющего напряжения при котором наступает эффект неконтролируемого электростатического притяжения примет следующий вид:

$$U_{от2} = \sqrt{0,105 \frac{(k_{\beta} + k_{эл}) \beta_{\max} d}{\varepsilon \varepsilon_0 w L}}. \quad (7)$$

Разработанная модель равновесия зеркальных элементов и полученные результаты моделирования могут использоваться при проектировании микромеханических зеркал с внутренними подвесами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (шифр проекта «8.5757.2011»).

### **Литература:**

1. Berkeley sensor & actuator center [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://www-bsac.eecs.berkeley.edu>.

2. Zhou, L. Optical MEMS for free-space communication [Text] / L. Zhou.– University of California, Berkeley, 2004.– 140p.

3. Коноплев, Б.Г. Моделирование микрозеркала с электростатической активацией / Б.Г. Коноплев, И.Е. Лысенко // Микросистемная техника, 2002, №12.– С.22-25.

4. Лысенко, И.Е. Моделирование интегрированного внутреннего упругого подвеса микромеханического устройства [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона, 2010, №3. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/> (доступ свободный) – Загл. с экрана.– Яз. рус.

5. Пат. 2265871 РФ, МКИ7 G 02 В 5/08, 26/08. Интегральное микромеханическое зеркало [Текст] / И.Е. Лысенко (Рос. Федерация) – № 2004117284/28; Заяв. 07.06.2004; Оpubл. 10.12.2005, Бюл. № 34; Приоритет 07.06.2004. – 10 с.: ил. УДК 621.3.049.77.

6. Пат. 2277255 РФ, МКИ7 G 02 В 26/08. Интегральное микромеханическое зеркало [Текст] / Б.Г. Коноплев (Рос. Федерация), И.Е. Лысенко (Рос. Федерация) – № 2005108758/28; Заяв. 28.03.2005; Оpubл. 27.05.2006, Бюл. № 15; Приоритет 28.03.2005. – 10 с.: ил. УДК 621.3.049.77.

7. Распопов, В.Я. Микромеханические приборы [Текст]: учебное пособие / В.Я. Распопов. – Тула: Тульский государственный университет, 2007. – 400 с.

8. Лысенко, И.Е. Интегральный сенсор угловых скоростей и линейных ускорений [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона, 2010, №3. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/> (доступ свободный) – Загл. с экрана.– Яз. рус.

9. Лысенко, И.Е. Интегральные сенсоры угловых скоростей и линейных ускорений LR-типа на основе углеродных нанотрубок [Электронный ресурс] / И.Е. Лысенко, А.В. Лысенко // Инженерный вестник Дона, 2012, №4. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/> (доступ свободный) – Загл. с экрана.– Яз. рус.

10. Лысенко, И.Е. Моделирование двухосевого микромеханического сенсора угловых скоростей и линейных ускорений LR-типа [Электронный ресурс] / И.Е. Лысенко // Инженерный вестник Дона, 2013, №1. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/> (доступ свободный) – Загл. с экрана.– Яз. рус.