

УДК. 62-233.3/.9

DOI: 10.25206/1813-8225-2021-175-5-11

**Д. И. ЧЕРНЯВСКИЙ**  
**Д. Д. ЧЕРНЯВСКИЙ**Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

## КИНЕМАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОЗЕРКАЛ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ (MEMS)

В настоящее время разработка и применение микромашин является важным направлением развития технологий микроэлектромеханических систем (MEMS). В данных устройствах происходит электромеханическое преобразование энергии, в результате которого возникают силы, осуществляющие механическую работу в пределах размеров корпуса микросхемы.

В работе проведен расчет кинематических параметров механической конструкции микрозеркала. Приведены практические рекомендации по выбору оптимального диапазона изменения углов наклона микрозеркала с целью повышения прочности его конструкции, а также для уменьшения мощности механического привода микромашины, необходимой для изменения углов наклона микрозеркала.

За счет изменения угла наклона микрозеркала лазерный луч попадает в различные входные каналы оптического датчика. При этом формируется управляющий сигнал для дальнейшей работы микросхемы. Таким образом микрозеркало выполняет функцию коммутатора входных оптических каналов, соединяя в различные комбинации определенные входные или выходные элементы микросхемы для последующей обработки.

**Ключевые слова:** микротехнологии, микроэлектромеханические системы (MEMS), микрооптоэлектромеханические устройства (MOEMS), теория подобия, закон сохранения энергии, механический привод микрозеркала, кинематика, механическая прочность.

**Введение.** В настоящее время в мире проектируется и производится большое количество различных приборов и механизмов, которые объединяет одно главное свойство — малые габаритные размеры. Размер таких устройств составляет  $10^{-6}$ – $10^{-3}$  м. Общее название данных изделий — микроэлектрические механические системы (MEMS).

Микроэлектрические механические системы основаны на научных и технологических принципах микроэлектроники. Для такого диапазона размеров инженерные методики расчета традиционных больших изделий невозможно использовать для MEMS. Многие уравнения механики твердого тела, газовой

и жидкостной динамики, проблемы материаловедения, которые ранее можно было не учитывать при проектировании машин и механизмов, в технологиях MEMS приобретают решающее значение. Поэтому проектирование и производство MEMS требует привлечения к решению возникающих проблем специалистов различных отраслей знания.

Среди значительного количества исследований, посвященных различным аспектам производства и функционирования MEMS, необходимо выделить следующие основные публикации: Н. И. Мухурови др. [1], А. Ghoshi др. [2], J. Allen [3], Э. Г. Косцов [4] показывают историю развития и перспективы

применения MEMS, рассматривают физические особенности разработки и применения MEMS-технологий, выявляют основные проблемы материаловедения для MEMS, а также основные конструктивные схемы и принципы работы микромашин. А. Б. Мигранов в работе [5] определяет вопросы, связанные с проектированием микроэлектромеханических систем (MEMS), и проблемы, возникающие при их промышленном изготовлении. Особое внимание уделено микромеханизмам роботов, которые были разработаны методами полунатурного моделирования с использованием виртуальной среды проектирования, тестирования и отладки MEMS.

Анализ библиографии показал, что при проектировании механизмов MEMS часто применяют методы теории подобия. Л. И. Седов в работе [6] излагает общую теорию размерностей физических величин, теорию их механического и физического подобия, а также теорию моделирования. М. Gad-el-Nak в публикации [7] проводит критический обзор библиографии, посвященной моделированию потока жидкости, характерного для микроустройств. Автор рассматривает особенности применения теорий макропотоков жидкости для расчета потоков жидкости в микромашинах MEMS. F.W. David и др. в работе [8] рассматривают основные принципы расчета и проведения экспериментального моделирования в микромашиностроении. В монографии рассматриваются следующие темы: моделирование на основе условий сходства прототипа и модели, применение уравнений механики для экспериментального моделирования, выбор переменных для проведения размерного анализа. R. I. Esmoğ и др. в работе [9] рассматривают вопросы, связанные с проектированием масштабных моделей при проведении различных экспериментов. В книге приведены различные практические примеры использования теории подобия. В работе [10] А. Jha и др. рассматривают применение на практике теории подобия. Консольно закрепленная балка проходит проверку на различные вибрационные нагрузки. Д. И. Чернявский и др. в работах [11, 12] рассматривают возможность применения механического удара и теории подобия в нанотехнологиях. N. S. T. Almuramady в работе [13] изучает трение вращательного движения микрораздаточной передачи путем моделирования трибологических характеристик кремния. Автор разработал модель износа зуб-

ьев микропередачи под действием максимальной нагрузки. В диссертации [14] Евстафьев С. С. рассматривает задачи проектирования микрозеркал с применением тепловых микромеханических актуаторов на основе биметаллов.

Таким образом, можно отметить, что разработка микромашин является важным направлением развития технологий MEMS.

**Постановка задачи.** Одним из направлений развития MEMS является разработка микросканеров (MEMS-зеркал), которые представляют собой микроразмерные зеркала. Такие зеркала производятся на кристалле и активируются электростатическими, пьезоэлектрическими, тепловыми или электромагнитными средствами. Зеркала предназначены для изменения направления или сканирования светового луча (рис. 1) [15].

Конструкции и технологии изготовления таких микросканеров не рекламируются. Однако в библиографических источниках приводятся принципиальные схемы функционирования некоторых зеркал микросканеров (рис. 2, 3) [16].

В данной конструкции металлическое зеркало с электроприводом используется для отклонения лазерного луча. В результате изменения угла наклона зеркала луч лазера отражается по законам физической оптики и попадает в различные фотоприемники, за счет чего формируются управляющие сигналы для последующей работы микросхем (коммутатор оптической маршрутизации).

Проведем кинематические расчеты для конструкции зеркала, приведенного на рис. 2 и 3.

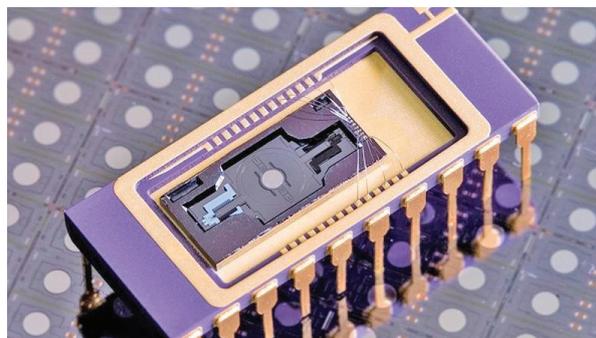


Рис. 1. Промышленный образец микросканера (MEMS-зеркала) [15]

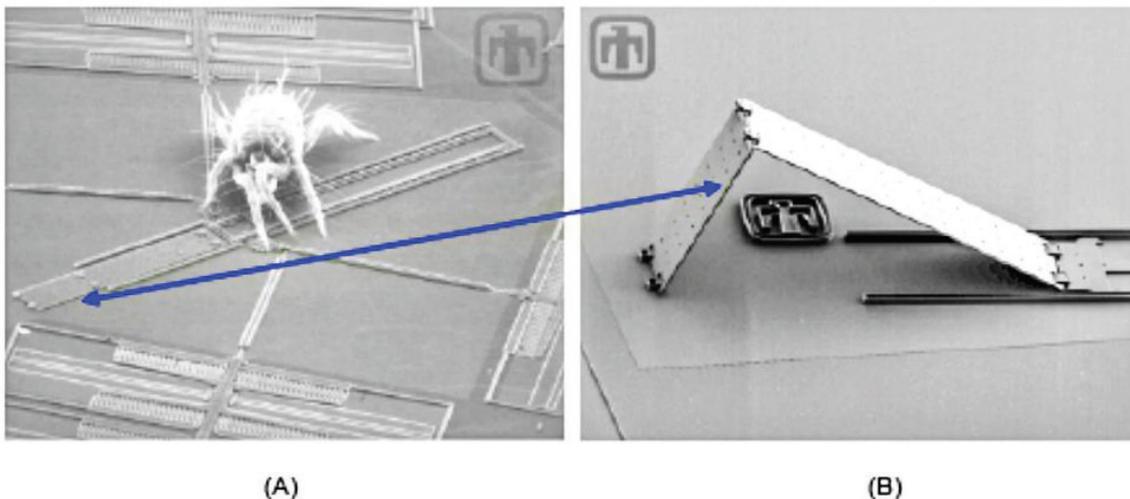


Рис. 2. А — сравнение размеров MEMS и постельного клеща; В — зеркало в поднятом положении [16]

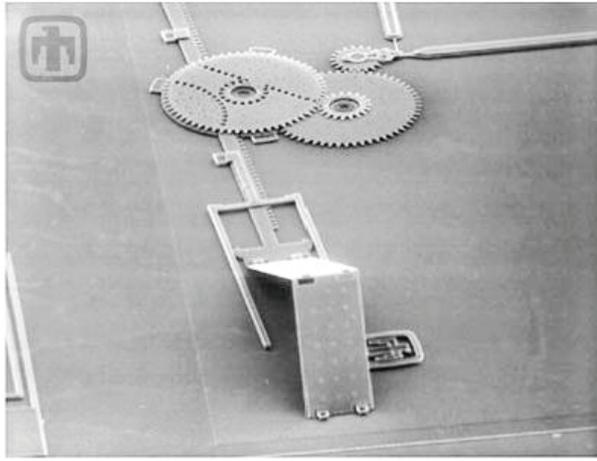


Рис. 3. Схема механического привода оптического зеркала [16]

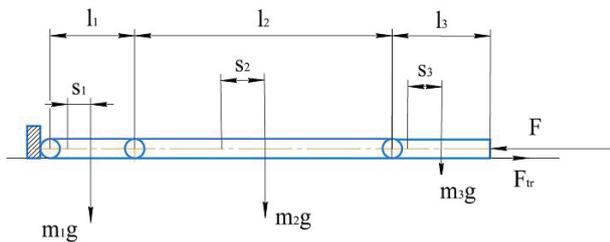


Рис. 4. Расчетная схема механического привода оптического зеркала [16] в начальный период времени

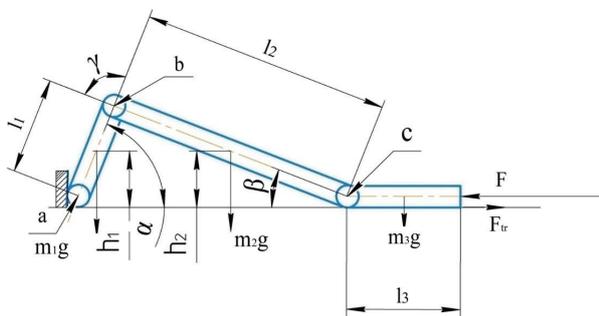


Рис. 5. Расчетная схема механического привода оптического зеркала [16] в рабочем положении

Расчетная схема данной конструкции приведена на рис. 4 и 5.

**Теория.** Для проведения расчетов используем закон сохранения энергии. Исследуемая конструкция зеркала содержит три пластины, соединенные друг с другом шарнирами (рис. 4, 5). Каждая пластина имеет длину  $l_1$ ,  $l_2$  и  $l_3$  соответственно. Примем допущение, что материал каждой пластины изотропный и все массы пластин  $m_1$ ,  $m_2$  и  $m_3$  сосредоточены в геометрическом центре каждой пластины соответственно. Левая часть пластины 1 своим шарниром упирается в упор и в процессе работы не может перемещаться в горизонтальном и вертикальном положении. В начальный период времени  $t_0$  все три пластины лежат горизонтально. Это связано с технологией изготовления исследуемой конструкции. При вращении зубчатого колеса на пластину 3 начинает действовать сила  $F$  (рис. 3–5). В результате действия силы  $F$  на пластину 3 пластины 1 и 2

займут положение, показанное на рис 5. В данный момент времени  $t_1$  центры масс пластин 1, 2 и 3 переместятся на расстояния  $s_1$ ,  $s_2$  и  $s_3$  соответственно. Пластина 1 наклонится по отношению к горизонту на угол  $\alpha$ , а пластина 2 изменит свое положение по отношению к горизонту на угол  $\beta$ . Центры масс пластин 1 и 2 поднимутся относительно основания на высоты  $h_1$  и  $h_2$  соответственно. В результате скольжения пластины 3 вдоль горизонтального основания возникает сила трения  $F_{tr}$ , которая действует в противоположном направлении по отношению к силе  $F$ . Таким образом, на основании закона сохранения энергии можно записать выражение (1)

$$Fs_3 = F_{tr}s_3 + m_1gh_1 + m_2gh_2, \quad (1)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения.

По теореме синусов из решения треугольника  $abc$  (рис. 5) определим выражение (2) и (3)

$$\frac{|ab|}{\sin \beta} = \frac{|bc|}{\sin \alpha} = \frac{|ac|}{\sin(\pi - \alpha - \beta)} = \frac{|ac|}{\sin(\alpha + \beta)}, \quad (2)$$

$$\sin \beta = \frac{|ab|}{|bc|} \sin \alpha = \frac{l_1}{l_2} \sin \alpha. \quad (3)$$

Тогда

$$h_1 = \frac{l_1}{2} \sin \alpha, \quad (4)$$

$$h_2 = \frac{l_2}{2} \sin \beta = \frac{l_2}{2} \sin \alpha. \quad (5)$$

Работа, совершаемая силой  $F$ , определяется перемещением центра масс третьей пластины на расстояние  $s_3$ . Сравнивая положение всех пластин на рис. 4 и 5, запишем выражение (6) с учетом выражения (2).

$$s_3 = l_1 + l_2 - |ac| = l_1 + l_2 - \frac{l_2 \sin(\alpha + \beta)}{\sin(\alpha)}. \quad (6)$$

С учетом формулы синуса суммы углов запишем выражение.

$$\begin{aligned} s_3 &= l_1 + l_2 - \frac{l_2 \sin(\alpha + \beta)}{\sin(\alpha)} = \\ &= l_1 + l_2 - \frac{l_2 \sin \alpha \cos \beta}{\sin(\alpha)} - \frac{l_2 \cos \alpha \sin \beta}{\sin(\alpha)}. \end{aligned} \quad (7)$$

С учетом выражения (3) получим.

$$\begin{aligned} s_3 &= l_1 + l_2 - l_2 \cos \beta - l_1 \cos \alpha = \\ &= l_1(1 - \cos \alpha) + l_2(1 - \cos \beta). \end{aligned} \quad (8)$$

Введем следующее обозначение:

$$k = \frac{l_1}{l_2}. \quad (9)$$

Для упрощения дальнейших вычислений применим формулы Эйлера.

$$\sin \alpha = \frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{2i}, \quad (10)$$

$$\cos \alpha = \frac{e^{i\alpha} + e^{-i\alpha}}{2}, \quad (11)$$

$$\cos \beta = \frac{e^{i\beta} + e^{-i\beta}}{2}. \quad (12)$$

Изменим выражение (3) с учетом формулы (9).

$$\beta = \arcsin \left( k \left[ \frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{2i} \right] \right). \quad (13)$$

Запишем выражение (8) с учетом формул (10–13).

$$s_3 = I_2 \left[ \begin{array}{c} k \left( 1 - \frac{e^{i\alpha} + e^{-i\alpha}}{2} \right) + \\ e^{\frac{i \arcsin \left( k \left[ \frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{2i} \right] \right)}{2}} + e^{\frac{-i \arcsin \left( k \left[ \frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{2i} \right] \right)}{2}} \\ + 1 - \frac{e^{i\alpha} + e^{-i\alpha}}{2} \end{array} \right]. \quad (14)$$

Преобразуем формулу (1) с учетом выражений (4) и (5).

$$F s_3 = F_{tr} s_3 + (m_1 + m_2) g \frac{l_1}{2} \sin \alpha, \quad (15)$$

$$F = F_{tr} + (m_1 + m_2) g \frac{l_1}{2} \sin \alpha \frac{1}{s_3}, \quad (16)$$

$$F = f m_3 g + (m_1 + m_2) g \frac{l_1}{2} \sin \alpha \frac{1}{s_3}. \quad (17)$$

Преобразуем формулу (1) с учетом выражения (14).

$$F = f \rho_3 a_3 b_3 l_3 g + (\rho_1 a_1 b_1 l_1 + \rho_2 a_2 b_2 l_2) \frac{g}{2} k \left[ \frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{2i} \right] \times \\ \times \frac{1}{\left[ k \left( 1 - \frac{e^{i\alpha} + e^{-i\alpha}}{2} \right) + 1 - \frac{e^{\frac{i \arcsin \left( k \left[ \frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{2i} \right] \right)}{2}} + e^{\frac{-i \arcsin \left( k \left[ \frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{2i} \right] \right)}{2}} \right]^2}, \quad (18)$$

где  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  и  $\rho_3$  — плотность материала первой, второй и третьей пластин соответственно;  $a_1$ ,  $a_2$  и  $a_3$  — ширина первой, второй и третьей пластин соответственно;  $b_1$ ,  $b_2$  и  $b_3$  — высота первой, второй и третьей пластин соответственно. Выражение (18) определяет зависимость величины силы  $F$  от значений показателя  $k$  и угла  $\alpha$ . Определим экстремумы функции (18).

Для решения данной задачи необходимо вычислить частные производные от силы  $F$  и приравнять их нулю.

$$\frac{\partial F}{\partial k} = (\rho_1 a_1 b_1 l_1 + \rho_2 a_2 b_2 l_2) \frac{g}{2} \left[ \frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{2i} \right] \times \\ \times \frac{1}{\left[ k \left( 1 - \frac{e^{i\alpha} + e^{-i\alpha}}{2} \right) + 1 - \frac{e^{\frac{i \arcsin \left( k \left[ \frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{2i} \right] \right)}{2}} + e^{\frac{-i \arcsin \left( k \left[ \frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{2i} \right] \right)}{2}} \right]^2} \times$$

$$\left[ \begin{array}{c} 1 - \frac{e^{\frac{i \arcsin \left( k \left[ \frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{2i} \right] \right)}{2}} + e^{\frac{-i \arcsin \left( k \left[ \frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{2i} \right] \right)}{2}}}{2} + \\ e^{\frac{i \arcsin \left( k \left[ \frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{2i} \right] \right)}{2}} - e^{\frac{-i \arcsin \left( k \left[ \frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{2i} \right] \right)}{2}} \\ + \frac{1}{2 \cdot \sqrt{0,25k^2 [e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}]^2 + 1}} \end{array} \right] = 0, \quad (19)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \alpha} = (\rho_1 a_1 b_1 l_1 + \rho_2 a_2 b_2 l_2) \frac{g}{2} k^2 \left[ \frac{e^{i\alpha} + e^{-i\alpha}}{2} \right] \times \\ \times \frac{\left[ 1 - \frac{e^{i\alpha} + e^{-i\alpha}}{2} + \frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{2} \right]}{\left[ k \left( 1 - \frac{e^{i\alpha} + e^{-i\alpha}}{2} \right) + 1 - \frac{e^{\frac{i \arcsin \left( k \left[ \frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{2i} \right] \right)}{2}} + e^{\frac{-i \arcsin \left( k \left[ \frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{2i} \right] \right)}{2}} \right]^2} = 0. \quad (20)$$

Найдем решения выражений (19–20).

Некоторые решения вычислить просто:  $1 - \cos(\beta) \neq -k(1 - \cos(\alpha))$ ,  $k = 0$ ,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\alpha = 90^\circ$ .

Сложнее решить выражение (21)

$$1 - \frac{e^{\frac{i \arcsin \left( k \left[ \frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{2i} \right] \right)}{2}} + e^{\frac{-i \arcsin \left( k \left[ \frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{2i} \right] \right)}{2}}}{2} + \\ + \frac{e^{\frac{i \arcsin \left( k \left[ \frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{2i} \right] \right)}{2}} - e^{\frac{-i \arcsin \left( k \left[ \frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{2i} \right] \right)}{2}}}{2 \cdot \sqrt{0,25k^2 [e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}]^2 + 1}} = 0. \quad (21)$$

С помощью выражений (10–11) преобразуем формулу (21).

$$1 - \cos(\arcsin[k \sin \alpha]) + \frac{\sin(\arcsin[k \sin \alpha])}{\sqrt{k^2 (\sin \alpha)^2 - 1}} = 0, \quad (22)$$

$$1 - \cos(\arcsin[k \sin \alpha]) + \\ + \frac{\sin(\arcsin[k \sin \alpha]) k \sin \alpha}{\sqrt{1 - k^2 (\sin \alpha)^2}} = 0. \quad (23)$$

Алгебраическим решением уравнения (23) является выражение  $\alpha = 0^\circ$  независимо от величины  $k$ . Для оценки оптимального диапазона выбора величины  $k$  построим графики зависимости выражения (24) от угла  $\alpha$  при различных значениях  $k$  (рис. 6).

$$y_k(\alpha) = 1 - \cos(\arcsin[k \sin \alpha]) + \\ + \frac{\sin(\arcsin[k \sin \alpha]) k \sin \alpha}{\sqrt{1 - k^2 (\sin \alpha)^2}}. \quad (24)$$

Критерием оптимальности графиков на рис. 6 является их близость к нулю во всем допустимом диапазоне значения угла  $\alpha - 0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ .

Анализируя графики на рис. 6, можно сделать вывод о том, что оптимальные значения  $k$  находятся в диапазоне  $0,1 \leq k \leq 0,5$ . При таких величинах  $k$  все значения  $y_k(\alpha)$  при  $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  находятся в диапазоне  $0 \leq y_k(\alpha) \leq 0,423$ .

После проведения анализа выражений (19) и (20) преобразуем уравнение (18) из комплексной формы в тригонометрическую форму с учетом выражения (9).

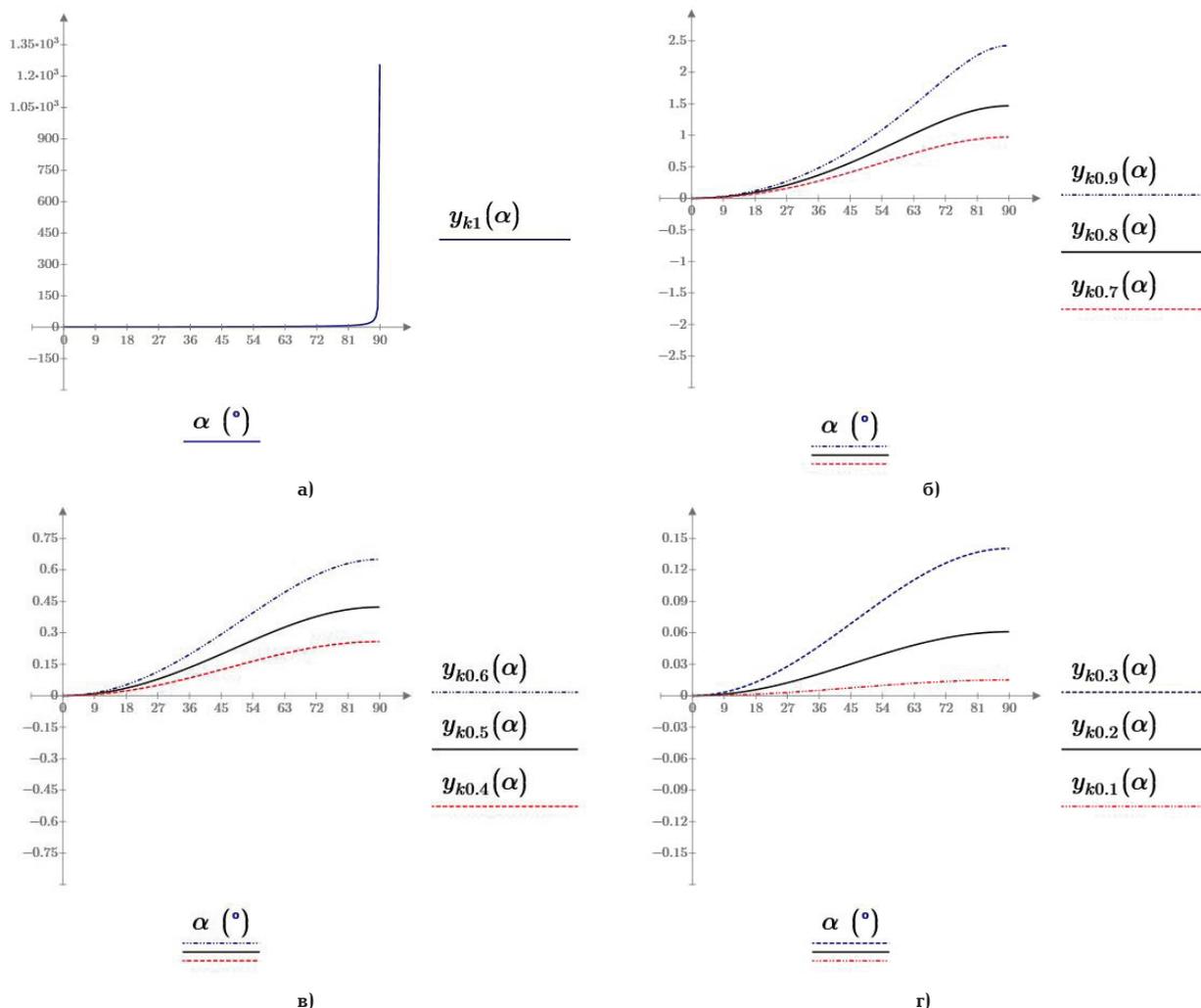


Рис. 6. График выражения (24): а) при  $k = 1$ ; б) при  $k = 0,9$ ;  $k = 0,8$ ;  $k = 0,7$ ; в) при  $k = 0,6$ ;  $k = 0,5$ ;  $k = 0,4$ ; г) при  $k = 0,3$ ;  $k = 0,2$ ;  $k = 0,1$

$$F = f\rho_3 a_3 b_3 l_3 g + l_2 (\rho_1 a_1 b_1 k + \rho_2 a_2 b_2) \frac{g}{2} \times \frac{k \sin \alpha}{[k(1 - \cos \alpha) + 1 - \cos(\arcsin[k \sin \alpha])]} \quad (25)$$

По аналогии с выражение (9) введем следующие обозначения.

$$k_p = \frac{\rho_1}{\rho_2}, \quad (26)$$

$$k_a = \frac{a_1}{a_2}, \quad (27)$$

$$k_b = \frac{b_1}{b_2}. \quad (28)$$

Преобразуем выражение (25) с учетом выражений (9, 26–28).

$$F = g(f\rho_3 a_3 b_3 l_3 + \rho_2 a_2 b_2 l_2) \times \frac{k(k_p k_a k_b k + 1) \sin \alpha}{2[k(1 - \cos \alpha) + 1 - \cos(\arcsin[k \sin \alpha])]} \quad (29)$$

Как видно из уравнения (29) левая часть произведения является величиной постоянной. Поэтому проанализируем дробную часть выражения (29).

$$y_{1k}(\alpha) = \frac{k(k_p k_a k_b k + 1) \sin \alpha}{2[k(1 - \cos \alpha) + 1 - \cos(\arcsin[k \sin \alpha])]} \quad (30)$$

Построим графики функции (30) для  $0,1 \leq k \leq 0,5$  и  $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ .

**Техническая реализация гипотезы.** На рис. 7 видно, что графики функции (30) близки друг к другу. Расчеты показали, что при одинаковых величинах угла  $\alpha$  разница между значениями выражения (30) для  $0,1 \leq k \leq 0,5$  не превышает 3,5 %. Поэтому можно считать, что изменение величины  $k$  не оказывает существенного влияния на формирование величины  $F$  из выражения (30). Проведем анализ функции (30) при изменении величины  $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ . Полученные данные приведены в табл. 1.

Для устойчивой работы механизма, которая заключается в периодическом изменении угла наклона зеркала  $\alpha$ , необходимо выбрать такой рабочий диапазон изменения угла  $\alpha$ , при котором разница между значениями функции (30) при значениях углов  $\alpha$  и  $\alpha + 1^\circ$  не превышает 5 %.

В ином случае, величины необходимой силы для изменения углов наклона зеркала (пластина 2), со-

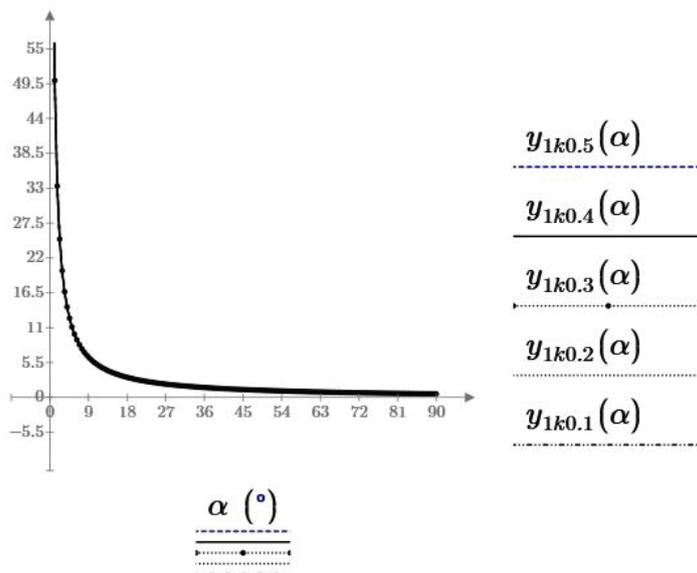
Рис. 7. График выражения (30) при  $0,1 \leq k \leq 0,5$  и  $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ 

Таблица 1

Определение оптимальных значений угла  $\alpha^\circ$ 

$\alpha^\circ$	0,1	5	10	15	18	19	20	21	25	30	35
$\alpha^\circ + 1^\circ$	1,1	6	11	16	19	20	21	22	26	31	36
$y_{1k}(\alpha^\circ)$	571,9	11,45	5,72	3,81	3,16	2,99	2,84	2,71	2,27	1,88	1,56
$y_{1k}(\alpha^\circ + 1^\circ)$	52,09	9,54	5,20	3,56	2,99	2,84	2,71	2,58	2,18	1,82	1,55
$\Delta, \%$	90,91	16,68	9,12	6,31	5,33	5,07	4,84	4,62	3,94	3,34	2,92
$\alpha^\circ$	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	89
$\alpha^\circ + 1^\circ$	41	46	51	56	61	66	71	76	81	86	90
$y_{1k}(\alpha^\circ)$	1,39	1,22	1,09	0,98	0,89	0,81	0,74	0,67	0,62	0,57	0,53
$y_{1k}(\alpha^\circ + 1^\circ)$	1,35	1,19	1,01	0,96	0,87	0,79	0,72	0,66	0,61	0,56	0,52
$\Delta, \%$	2,60	2,36	2,17	2,03	1,92	1,83	1,76	1,71	1,68	1,65	1,65

гласно выражению (29) и рис. 7, были бы неоправданно велики.

**Выводы и заключение.** При анализе полученных данных можно сделать следующие выводы.

1. Для конструкции микрозеркала, представленной на рис. 2–5, рабочий диапазон изменения угла  $\alpha$  должен быть в пределах  $20^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ . В ином случае потребуются большие величины силы  $F$  для изменения угла наклона зеркала  $\alpha$ .

2. Чем больше угол наклона микрозеркала, тем меньше должна быть сила, формируемая приводом, т.е. механической зубчато-реечной передачей (рис. 3). Наибольшие усилия должен формировать привод микрозеркала при углах наклона  $\alpha$ , близких к нулю.

3. Существующие стандартные технологии изготовления механизмов MEMS применяют различные методы напыления химических элементов на подложку с последующим их травлением для формирования подвижных узлов микромеханизмов. В данном случае в процессе изготовления механизм микрозеркала будет находиться в положении, приведенном на рис. 4, т.е.  $\alpha = 0^\circ$ . Для того, чтобы

перевести микрозеркало в рабочее положение при  $20^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ , необходимы значительные усилия привода, которые в рабочем положении микрозеркала не требуются. Таким образом, механический привод микрозеркала должен быть спроектирован с учетом избыточной мощности и прочности его элементов. При этом в начальный момент времени может наблюдаться потеря устойчивости пластин микрозеркала с непредсказуемыми последствиями для их прочности.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что механическая конструкция варианта привода микрозеркала, представленная на рис. 2 и 3, имеет серьезные конструкционные недостатки.

## Библиографический список

1. Мухуров Н. И., Ефремов Г. И. Электромеханические микроустройства. Минск: Беларус. навука, 2012. 257 с. ISBN 978-985-08-1419-7.
2. Ghosh A., Corves B. Introduction to Micromechanisms and Microactuators // Mechanisms and Machine

- Science. 2015. Vol. 28. P. 161. DOI: 10.1007/978-81-322-2144-9.
3. Allen J. J. Micro Electro Mechanical System Design. Ohio: CRC Press, 2005. 496 p. ISBN 9780824758240.
4. Косцов Э. Г. Состояние и перспективы микро- и наноэлектроники // Автометрия. 2009. Т. 45, № 3. С. 3–52.
5. Мигранов А. Б. Разработка методами полунатурного моделирования перспективных микроэлектромеханических систем (МЭМС) // Труды Института механики Уфимского научного центра РАН. 2006. Т. 4. С. 288–305. DOI: 10.21662/uim2006.1.025.
6. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. 8-е изд., перераб. Москва: Наука, 1977. 440 с.
7. Gad-el-Hak M. The Fluid Mechanics of Microdevices — The Freeman Scholar Lecture // Journal of Fluids Engineering. 1999. Vol. 121 (1). P. 5–33. DOI: 10.1115/1.2822013.
8. David F. W., Nolle H. Experimental modeling in Engineering. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1982. 200 p. ISBN 978-0-408-01139-6.
9. Emori R. I., Schuring D. J. Scale Models in Engineering. Fundamentals and applications. Oxford: Pergamon, 1977. 312 p. ISBN 978-0-08-020861-9.
10. Jha A., Sedaghati R., Bhat R. Dynamic Testing of Structures Using Scale Models // 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, April 18–21, 2005. Austin, Texas. AIAA 2005–2259. DOI: 10.2514/6.2005-2259.
11. Чернявский Д. И. Контактная прочность цилиндрических зубчатых передач для микромашин MEMS // Проблемы машиноведения: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., 17–19 марта 2020 г. / ОмГТУ. Омск, 2020. С. 156–161. ISBN 978-5-8149-3011-8.
12. Chernyavskii D. I., Chernyavskaya D. D. Mechanical impact in nanotechnology // Russian Engineering Research. 2011. Vol. 31, Issue 7. 668. DOI: 10.3103/S1068798X11070045.
13. Almuramady N. S. T. Dry friction between rough surfaces of silicon and functionalized gear microelectromechanical systems. Cardiff: Cardiff University, 2017. 219 p.
14. Евстафьев С. С. Разработка и исследование физико-технологических моделей многослойных тепловых микроактюаторов: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2016. 145 с.
15. Микросканеры (МЭМС-зеркала), пр-во Тайвань // MEMS | Русская Ассоциация. URL: <https://mems-russia.ru/produktyi/mikroskaneryi-mems-zerkala/mikroskaneryi-mems-zerkala-pr-vo-taiwan> (дата обращения: 21.09.2020).
16. Laumeister B. Driving microelectromechanical systems (MEMS) with precision control. Tutorials 5418. URL: <http://www.maximintegrated.com/an5418> (дата обращения: 03.10.2020).

**ЧЕРНЯВСКИЙ Дмитрий Иванович**, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Машиноведение».

SPIN-код: 8610-2957

AuthorID (РИНЦ): 473365

ORCID: 0000-0002-7585-433X

AuthorID (SCOPUS): 6506002416

ResearcherID: N-2038-2015

Адрес для переписки: [dichernyavskiy@omgtu.tech](mailto:dichernyavskiy@omgtu.tech)

**ЧЕРНЯВСКИЙ Даниил Дмитриевич**, студент гр. ФИТ-201 факультета информационных технологий и компьютерных систем.

#### Для цитирования

Чернявский Д. И., Чернявский Д. Д. Кинематический расчет элементов микрозеркал микроэлектромеханических систем (MEMS) // Омский научный вестник. 2021. № 1 (175). С. 5–11. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-175-5-11.

Статья поступила в редакцию 15.12.2020 г.

© Д. И. Чернявский, Д. Д. Чернявский