

УДК. 62-233.3/.9

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

Д. И. ЧЕРНЯВСКИЙ
Д. Д. ЧЕРНЯВСКИЙОмский 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. Etoji 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.

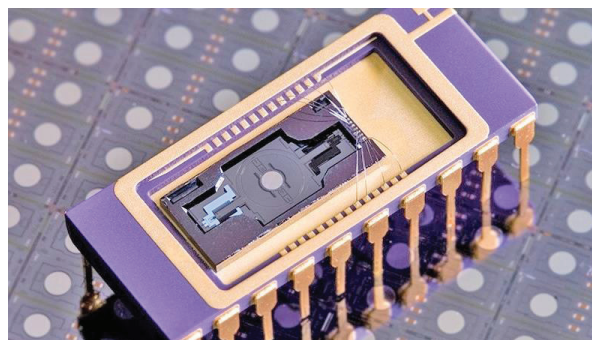


Рис. 1. Промышленный образец микросканера (MEMS-зеркала) [15]

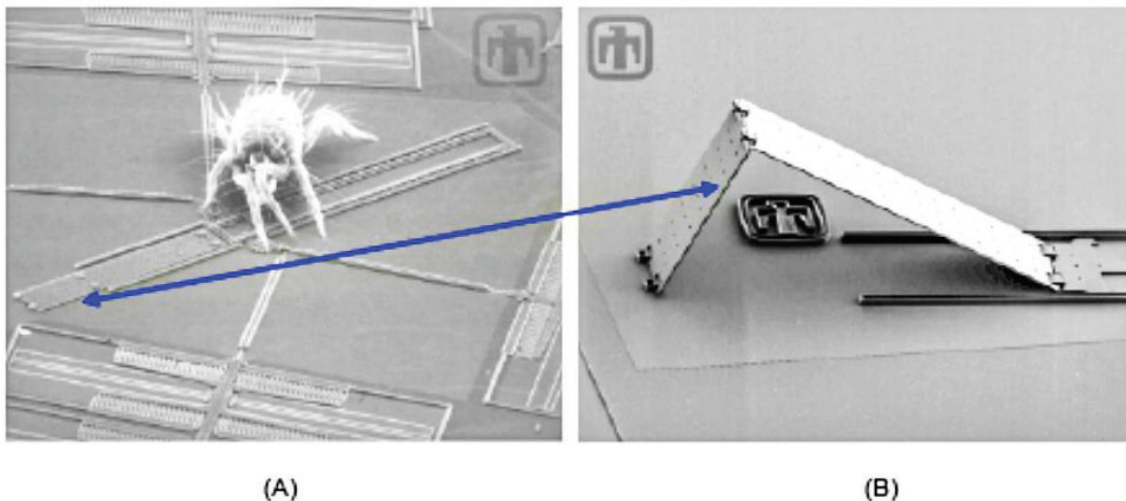


Рис. 2. А — сравнение размеров MEMS и постельного клеща; В — зеркало в поднятом положении [16]

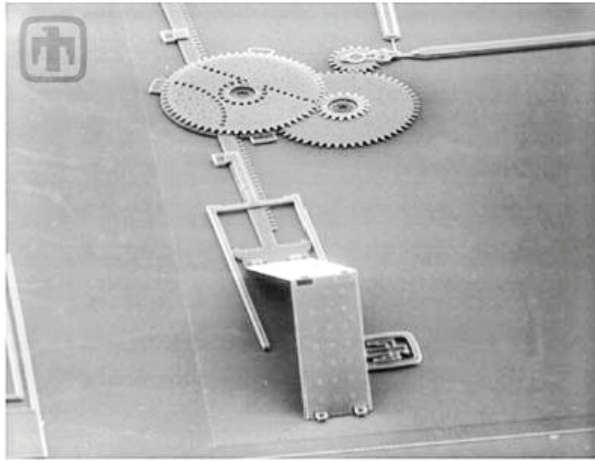


Рис. 3. Схема механического привода оптического зеркала [16]

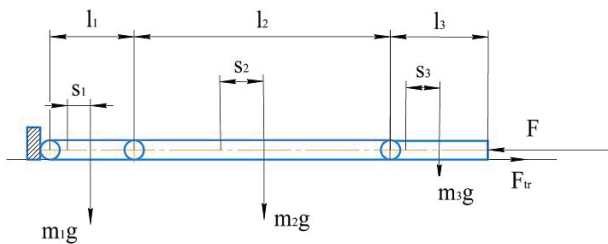


Рис. 4. Расчетная схема механического привода оптического зеркала [16] в начальный период времени

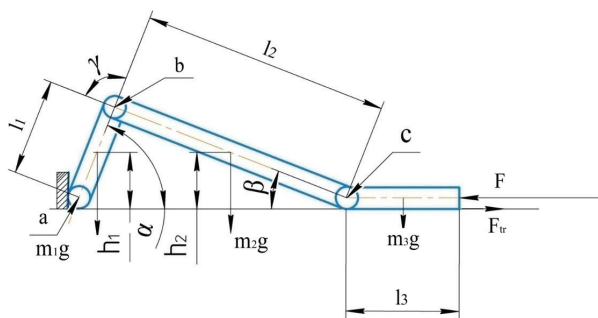


Рис. 5. Расчетная схема механического привода оптического зеркала [16] в рабочем положении

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 α , а пластина 2 изменит свое положение по отношению к горизонту на угол β . 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).

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

где ρ_1 , ρ_2 и ρ_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 α . Определим экстремумы функции (18).

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

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

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

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

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 α 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).

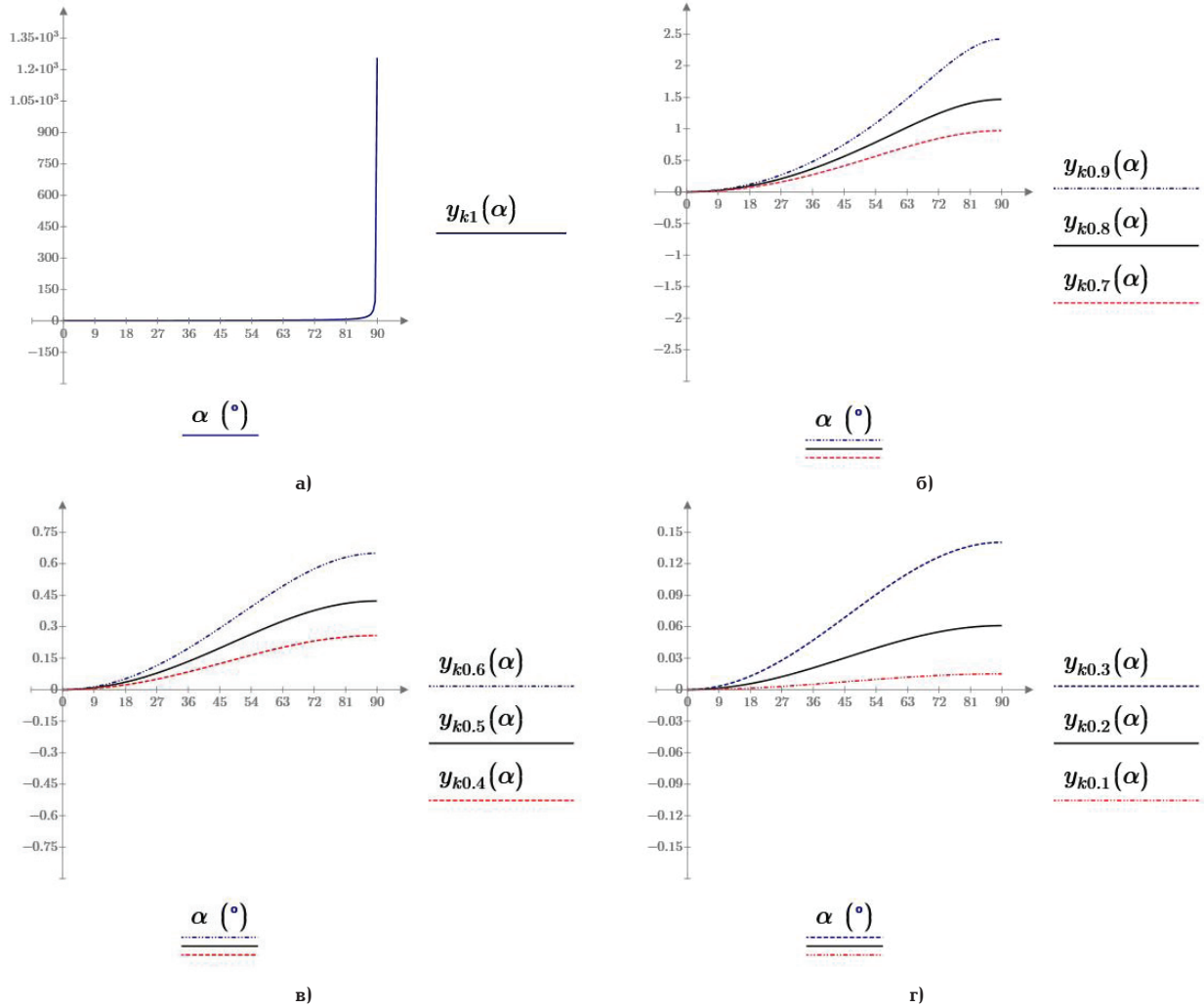


Рис. 6. График выражения (24): а) при $k = 1$; б) при $k = 0,9$; $k = 0,8$; $k = 0,7$; в) при $k = 0,6$; $k = 0,5$; $k = 0,4$; г) при $k = 0,3$; $k = 0,2$; $k = 0,1$

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

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 α 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 α , необходимо выбрать такой рабочий диапазон изменения угла α , при котором разница между значениями функции (30) при значениях углов α и $\alpha + 1^\circ$ не превышает 5 %.

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

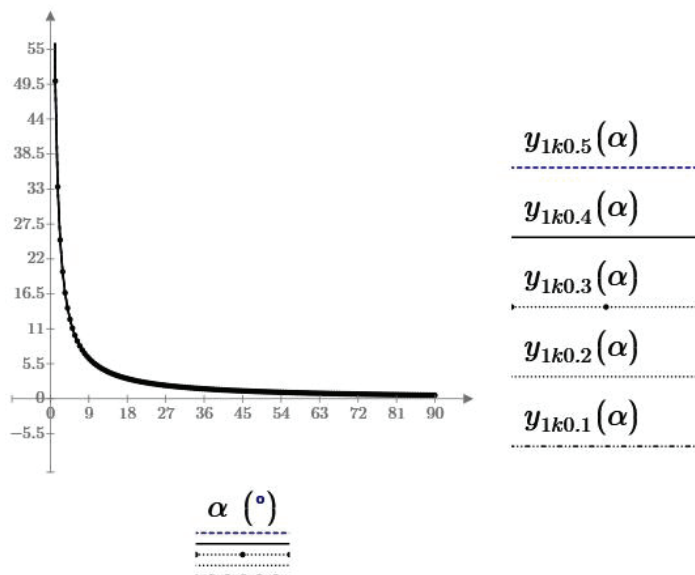
Рис. 7. График выражения (30) при $0,1 \leq k \leq 0,5$ и $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$

Таблица 1

Определение оптимальных значений угла α°

α°	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
α°	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 α должен быть в пределах $20^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$. В ином случае потребуются большие величины силы F для изменения угла наклона зеркала α .

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 α , 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

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