

Применение электронного компонента при обучении дисциплине «Техническая механика микросистем» в НИУ МИЭТ

С. В. Угольников, Е. А. Сахаров

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Показаны особенности и последовательность выполнения самостоятельной работы студентов «Расчет двухкоординатного микрозеркала на торсионных подвесах» с применением электронного компонента, разработанного на кафедре технической механики для обучения студентов второго курса. В качестве электронного компонента студентам предложено использовать речевой видеоролик как наглядный пример расчетно-графической работы. Представлена последовательность расчета при заданных размерах элементов микрозеркала: определение параметров торсионов, коэффициента динамической перегрузки, резонансных частот зеркального элемента и микрозеркала, прогиба микрозеркала в диапазоне рабочих температур.

Ключевые слова: самостоятельная работа студентов; электронный компонент; расчетно-графическая работа; микрозеркало; рамка; торсион; механические напряжения; коэффициент динамичности; собственная частота.

Учебный план подготовки бакалавров по направлению 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника» в Национальном исследовательском университете «Московский институт электронной техники» (НИУ МИЭТ) предусматривает выполнение курсовой работы по дисциплине «Техническая механика микросистем». Курсовая работа способствует формированию компетенции «Готовность выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения в соответствии с техническим заданием с использованием средств автоматизации проектирования».

Рассмотрим методику работы преподавателя со студентами. Самостоятельная работа студентов (СРС) выполняется на 12-й неделе изучения дисциплины. На освоение теоретической части работы студента отводится одна неделя, на выполнение

практической работы — две недели. Студент консультируется с преподавателем и предоставляет черновой вариант расчетов. Затем оформляется чистовой вариант в виде пояснительной записки на листах формата А4. Защита работы происходит на практическом занятии или на консультации (табл. 1).

Общая трудоемкость выполнения задания: на самостоятельную работу отводится 27 часов; на аудиторные занятия — 4 часа.

Критерии оценивания: по накопительно-балльной системе НБС ОРИОКС МИЭТ студент может получить от 5 до 15 баллов. Выполнение работы в срок (на 16-й неделе и ранее) оценивается в 15 баллов. При задержке сдачи работы на одну неделю (на 17-й неделе) снимается 5 баллов, при задержке на две недели — 10 баллов. Кроме того, оценивается качество оформления пояснительной записки.

Таблица 1

Последовательность выполнения СРС

Неделя	Этап выполнения СРС	Трудоемкость
12-я	Ознакомление студентов с теоретической и расчетной частями СРС	Аудиторная работа — 2 часа
13-я	Освоение теоретической части работы, консультация с преподавателем	СРС — 3 часа
14-я—15-я	Выполнение чернового варианта расчетной и графической частей работы, консультация с преподавателем	СРС — 20 часов
16-я	Оформление чистового варианта СРС и ее защита	СРС — 4 часа, аудиторная работа — 2 часа

Электронный компонент представляет собой видеоролик, который показывает пример выполнения расчета двухкоординатного микрозеркала на торсионных подвесах. На экране монитора компьютера последовательно отображаются расчетные схемы и формулы, сопровождаемые голосовым комментарием. Видеоролик планируется поместить в систему информационного обмена ОРИОКС — центр использования электронных модулей индивидуальной работы студентов НИУ МИЭТ.

Рассмотрим последовательность и особенности расчета двухкоординатного микрозеркала на торсионных подвесах.

Двухкоординатные микромеханические системы отклонения лазерного луча нашли применение как в специальной, так и в бытовой технике. Перечислим достоинства таких систем: работа с высокой частотой отклонения луча, малые размеры, простота конструкции, низкая энергоемкость.

Двухкоординатные развертывающие (зеркальные) системы, построенные путем комбинации однокоординатных систем, отличаются сложностью конструкции и невысокой надежностью. Перспективным является подход, основанный на использовании в системе корданового подвеса зеркала, позволяющего

одновременное отклонение луча по двум координатам. В качестве опорных элементов в системе используются торсионы во взаимно перпендикулярных направлениях.

Рассчитаем параметры элементов конструкции микрозеркала: напряжение, деформацию, допустимые перегрузки и др. Рассмотрим три варианта зеркала с отражающим слоем из золота, алюминия и никеля.

Вся конструкция микрозеркала формируется на поликристаллическом кремнии методом планарной технологии. Отражающее металлическое покрытие наносится напылением при температуре 400 °С или электрохимическим осаждением.

Примем диапазон рабочих температур микрозеркала — от +50 °С до –30 °С. Общий вид зеркала приведен на рисунке 1.

Основание элемента несет на себе отражающее покрытие, выполненное из металла (Me): Au, Al или Ni. Материал основания — кремний поликристаллический (Si) с размером зерна 0,3–0,4 мкм.

Масса зеркального элемента определяется массой основания и отражающего металлического слоя толщиной h_m :

$$m_3 = m_0 = m_M,$$

где $m_0 = q_{Si} \cdot a_4 \cdot a_4 \cdot h_0$ — масса основания из Si; $m_M = q_{Me} \cdot a_5 \cdot a_5 \cdot h_{Me}$ — масса

отражающего слоя Me; a_4 , h_0 — ширина и толщина основания из Si; a_5 , h_{Me} — ширина и толщина отражающего слоя Me.

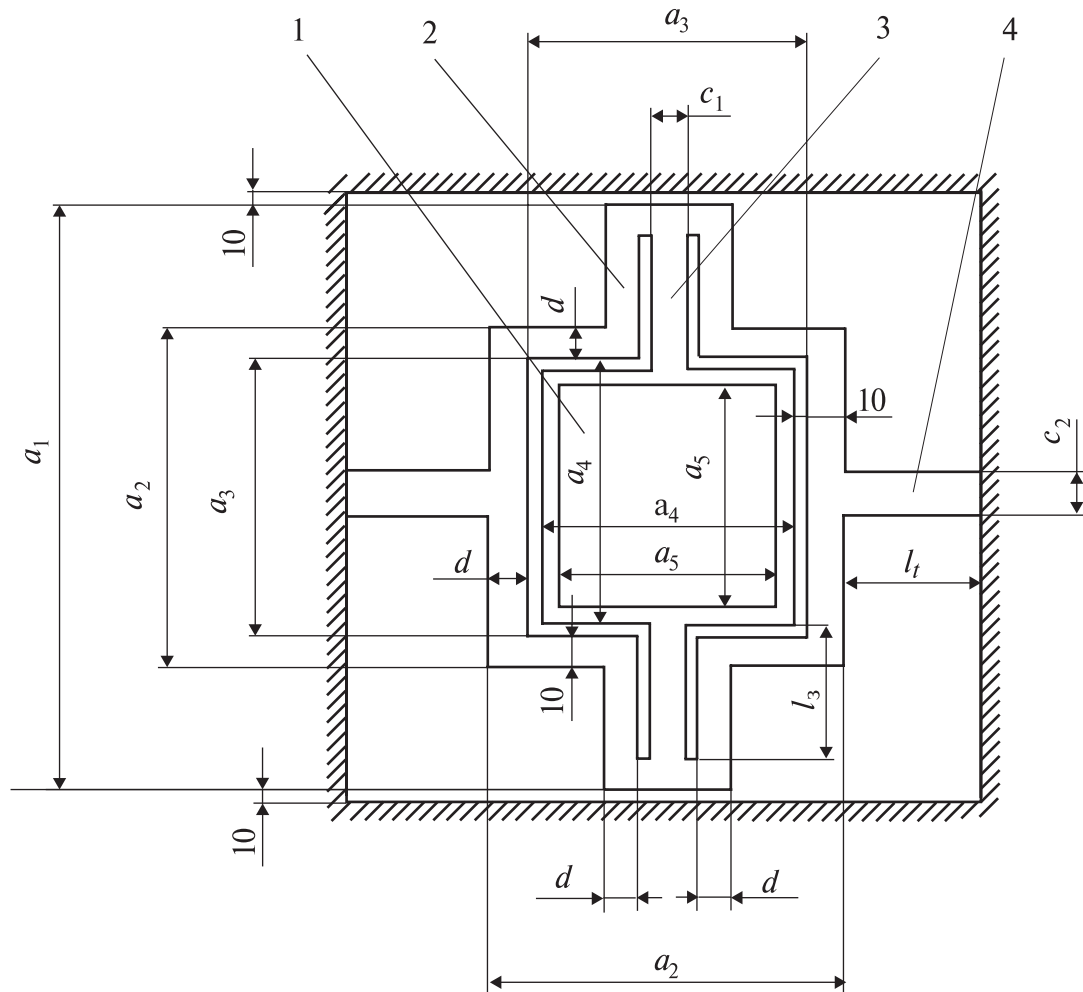


Рис. 1. Общая схема двухкоординатного микрозеркала:

1 — зеркальный элемент; 2 — рама; 3 — торсион зеркального элемента; 4 — торсион рамы

Расчет длины торсиона проводится из условия поворота зеркала на угол θ вокруг оси торсиона. При закручивании торсионов, выполненных из хрупкого материала (Si поликристаллический), при наличии нормальных температур разрушение происходит за счет действия главных растягивающих напряжений, равных главным касательным напряжениям. С учетом этого длину торсиона определим из допускаемых напряжений на растяжение при коэффициенте запаса прочности $n_3 = 2$, т. е. $[\sigma] = [\tau] = \sigma_B/2$, где σ_B — предел прочности

поликристаллического кремния при растяжении, равный 150 МПа.

Допускаемое напряжение при кручении определяется как

$$[\sigma] = \frac{\sigma_B}{2} = \frac{M_{k_3}}{W_{k_3}},$$

где M_{k_3} — крутящий момент на торсионе; W_{k_3} — момент сопротивления торсиона при кручении.

Крутящий момент в сечении торсиона:

$$M_{k_3} \leq [\sigma] \cdot W_{k_3} = \frac{\sigma_B}{2} \cdot W_{k_3}.$$

При кручении торсиона с прямоугольным сечением ($C_1 \cdot h_0$) имеем:

$$W_{k_3} = \beta \cdot C_1^3, \\ I_{k_3} = \alpha \cdot C_1^4,$$

где $I_{k_3} = \alpha \cdot C_1^4$ — момент инерции прямоугольного сечения; h_0, C_1 — высота и ширина сечения торсиона.

Для указанной конструкции зеркального элемента примем прямоугольное сечение торсиона размером $C_1 \cdot h_0$.

Угол закручивания определяется по формуле

$$\theta = \frac{M_{kp} \cdot l_3}{G \cdot I_{k_3}},$$

где l_3 — длина торсиона зеркального элемента.

Длина торсиона для угла закручивания θ_i равна

$$l_3 = \frac{G_i \cdot \theta_i \cdot I_{k_3}}{M_{kp}}.$$

Расчет коэффициента допустимой динамической перегрузки проводится из анализа напряженно-деформированного состояния при изгибе от действия статической нагрузки (собственный вес).

При статическом нагружении торсионов зеркального элемента величину растягивающего напряжения при изгибе найдем из анализа схемы нагружения. Система статически неопределимая, симметричная. При вертикальной нагрузке, в силу симметрии системы, горизонтальными реакциями, из-за их малости, — пренебрегаем. Момент в заделках торсиона на раме идентичен моменту зеркального элемента. Отсюда момент в заделке равен

$$M_{\max 3} = \frac{Q_3 \cdot l_3}{4}.$$

Максимальное растягивающее напряжение в торсионе рассчитаем по формуле:

$$\sigma_{\max 3} = \frac{M_{\max 3}}{W_3} = \frac{Q_3 \cdot l_3 \cdot 6}{4 \cdot C_1 \cdot h_0^2} = \frac{3 \cdot Q_3 \cdot l_3}{2 \cdot C_1 \cdot h_0^2},$$

где $W_3 = \frac{C_1 \cdot h_0^2}{6}$ — момент сопротивления сечения торсиона при изгибе.

Коэффициент допустимой динамической нагрузки для θ_i определяется отношением:

$$K_{дз} = \frac{\sigma_{B_3}}{\sigma_{\max 3}}.$$

Материал рамы — кремний полукристаллический. Массу рамы определим как

$$m_p = l_k \cdot d \cdot h_0 \cdot \rho_{Si},$$

где l_k — длина контура рамы; d — ширина контура рамы; h_0 — толщина рамы; ρ_{Si} — плотность кремния.

Расчет длины торсиона рамы проводится из условия поворота рамы на θ градусов вокруг оси торсиона. Допускаемое напряжение в торсионе:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_B}{2}.$$

Для материала торсиона имеем $\sigma_B = 150$ МПа. Сечение торсиона примем равным $C_2 \cdot h_0$, тогда

$$W_{kp} = \beta \cdot C_2^3, I_{kp} = \alpha \cdot C_2^4.$$

Крутящий момент на торсионе рамы, соответствующий допускаемым напряжениям $[\sigma]$, равен:

$$M_{kp} \leq \frac{150 \cdot W_{kp}}{2}.$$

При заданном угле закручивания длину торсиона рамы определим из уравнения:

$$l_T = \frac{\theta \cdot G \cdot I_{kp}}{M_{kp}}.$$

Расчет коэффициента допускаемой динамической перегрузки рамы проводится из анализа напряженного состояния

при изгибе от действия весовой нагрузки, включающей массу зеркального элемента m_3 и массу рамы m_p .

Максимальные растягивающие напряжения в торсионе рамы равны:

$$\sigma_{\max p} = \frac{(m_3 + m_p) \cdot l_T}{4 \cdot W_p},$$

где $W_p = \frac{C_2 \cdot h_0^2}{6}$.

Коэффициент допустимой динамической нагрузки равен:

$$K_{\text{др}} = \frac{\sigma_B}{\sigma_{\max p}}.$$

Надежность работы двухкоординатного микрозеркала определяется температурной деформацией зеркального элемента, представляющего собой двухслойную пластинку Si — Me. В такой структуре материалы слоев имеют большую разницу в коэффициентах термического расширения α (в 3—5 раз).

Для оценки влияния температуры на деформацию двухслойного элемента напряженное состояние будем считать плоским, а двухслойную пластину — единичной ширины со свободными краями.

Прогиб и угол поворота сечения двухслойной пластины определим из уравнения:

$$\frac{d^2 W}{dx^2} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T \cdot (h_M + h_0)}{\left(\frac{1}{E_1 \cdot h_M} + \frac{1}{E_2 \cdot h_0} \right) \cdot 2 \cdot (I_1 + I_2)},$$

где ΔT — изменение температуры от нормальной; E_1, E_2 — модули упругости металлического слоя и кремния; I_1, I_2 — моменты инерции сечений слоев; h_M, h_0 — толщина металлического слоя и слоя кремния; α_1, α_2 — коэффициенты термического расширения металла и кремния.

Уравнение для расчета угла поворота на периферии пластины имеет вид:

$$\frac{dW}{dx} = \gamma = - \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T \cdot (h_M + h_0)}{\left(\frac{1}{E_1 \cdot h_M} + \frac{1}{E_2 \cdot h_0} \right) \cdot 2 \cdot (I_1 + I_2)} \cdot x.$$

Уравнение для расчета прогиба запишем так:

$$W = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T \cdot (h_M + h_0)}{\left(\frac{1}{E_1 \cdot h_M} + \frac{1}{E_2 \cdot h_0} \right) \cdot 2 \cdot (I_1 + I_2)} \cdot \left(\frac{a_4^2}{8} - \frac{x^2}{2} \right).$$

Свободные колебания зеркального элемента и микрозеркала (демпфирование равно нулю) определяются действием инерционного и упругого моментов. Условие равновесия элемента запишем так:

$$I_M \cdot \frac{d^2 \theta}{dt^2} = - M_{\text{упр}} = - K \theta,$$

или

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} + p^2 \cdot \theta = 0,$$

где $p^2 = \frac{K}{I_m}$, I_m — момент инерции твердого тела; θ — угол закручивания.

Решение уравнения примет вид:

$$\theta = \theta_0 \cdot \cos pt + \frac{\theta_0}{p} \sin pt.$$

Собственная круговая частота определяется зависимостью:

$$\omega = \frac{2\pi}{p} = 2\pi \sqrt{\frac{I_M}{K}},$$

откуда циклическая частота будет равна:

$$\nu = \frac{1}{\omega} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{I_M}},$$

где $K = \frac{2G \cdot I_k}{l_T}$ — момент, необходимый для закручивания элемента с двумя торсионами на один радиан; ω — период колебания.

Уравнение для расчета циклической частоты имеет вид:

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2G \cdot I_k}{l_T \cdot I_M}},$$

где l_T — длина торсиона; I_k — момент инерции при кручении; I_M — момент инерции твердого тела относительно оси вращения; G — модуль сдвига кремния ($G \sim 0,4 E$).

Момент инерции твердого тела I_M определяется массой тела и расстоянием от центра масс до оси вращения:

$$I_M = \sum_{i=1}^n m_i \cdot R_i^2,$$

где R — расстояние от центра массы до оси вращения.

Для квадрата с сечением $h \cdot h$ момент инерции относительно главной оси, проходящей через центр масс, равен:

$$I_M = m \cdot \frac{h^2}{12}.$$

Используя результаты проведенных расчетов, начертим эскиз микрозеркала, проставим размеры (рис. 2).

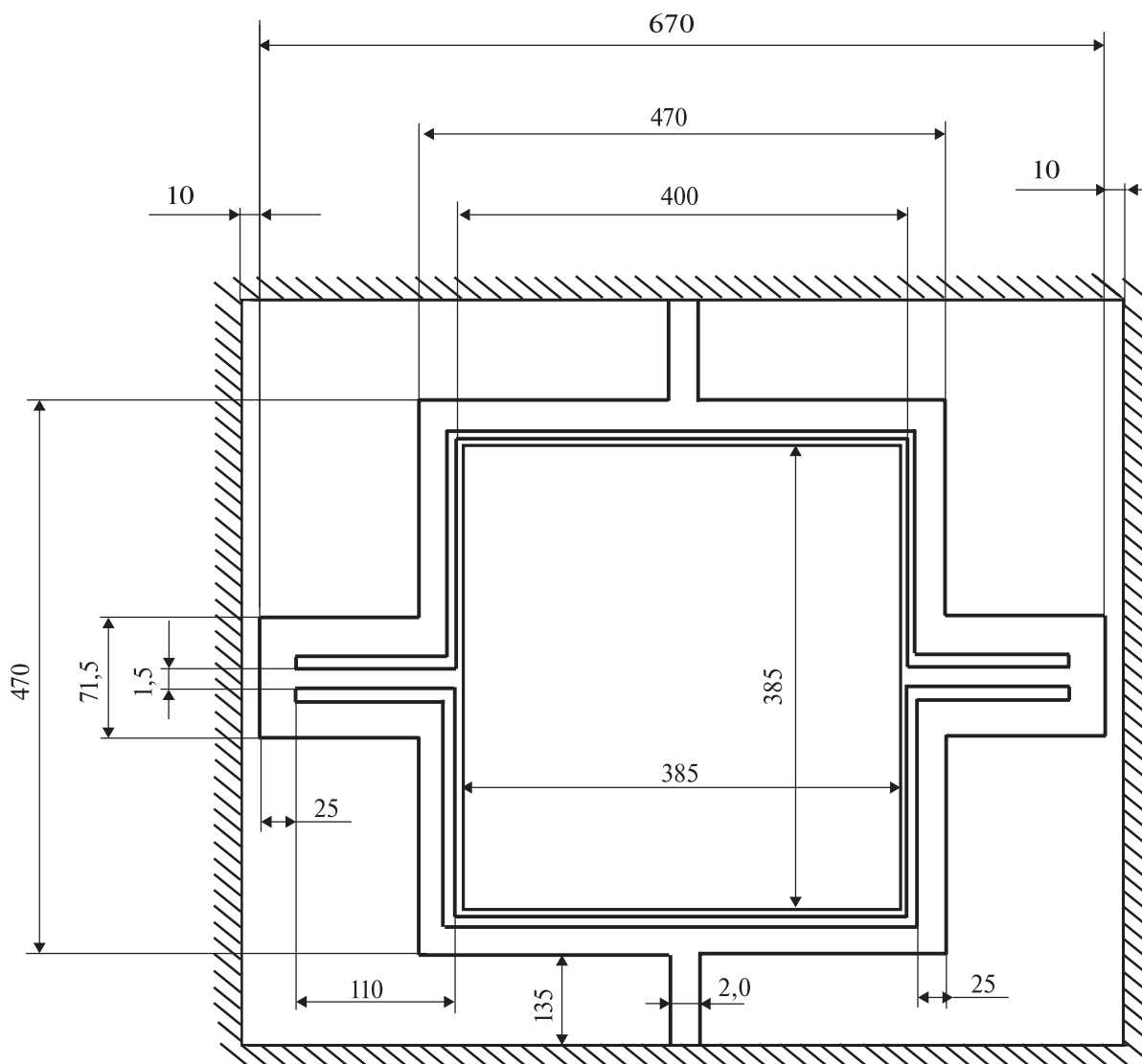


Рис. 2. Схема двухкоординатного микрозеркала по расчетным данным

При выполнении СРС с применением электронного компонента было проведено анкетирование студентов второго курса на кафедре технической механики.

Студенты отметили, что просмотр видеоролика помог им выполнить и успешно защитить расчетно-графическую часть СРС и курсовую работу в целом.

Самостоятельное изучение учебного материала с помощью видеоинструкции дает возможность студенту планировать время выполнения работы и позволяет повысить скорость усвоения дисциплины.

Литература

1. Техническая механика микросистем / А. И. Погалов [и др.]; под ред. В. Н. Тимофеева. М.: МИЭТ, 2006. 188 с.

2. Тимофеев В. Н., Погалов А. И., Угольников С. В. Инженерные расчеты элементов и узлов микросистемной техники / Под ред. В. Н. Тимофеева. М.: МИЭТ, 2009. 192 с.

Угольников Сергей Викторович — кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики (ТМ) МИЭТ. **E-mail: dtm@miee.ru**

Сахаров Евгений Алексеевич — старший преподаватель кафедры ТМ МИЭТ. **E-mail: dtm@miee.ru**

Статья поступила 31 марта 2017 г.