

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»
(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)**

ДОПУСКАЕТСЯ К ЗАЩИТЕ:

Факультет	<u>И</u> индекс факультета
Выпускающая кафедра	<u>И1</u> индекс кафедры
Группа	<u>И1М31</u> индекс группы

Заведующий кафедрой	И1
Борейшо А.С.	индекс кафедры
Фамилия ИО	подпись
« 07 »	2019 г.
июня	

ОТЧЕТ

о прохождении преддипломной практики

наименование практики

Патлана Валентина Игоревича

Фамилия, имя, отчество обучающегося

обучающегося по
направлению/специальности
нужное подчеркнуть
ТЕХНОЛОГИИ

12.04.05

КОД

Лазерная техника и лазерные

полное наименование направления/специальности

Руководитель практики:

Киселев И.А, к.т.н., доцент

Фамилия ИО, ученая степень, ученое звание, должность

Срок написания НИР:

с 27.03.2019 г. по 07.06.2019 г.

Должность обучающегося на практике:

магистрант

Руководитель практики:

 Подпись
 « 07 » июня 2019 г.

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2019 г.

Оглавление

1. Список используемых переменных	3
2. Введение	5
3. Конструкторский раздел	7
3.1. Лазерный сканер	7
3.2. Осциллирующее микрозеркало.....	8
3.2.1. Расчет резонансной частоты	8
3.2.2. Расчет параметров микрозеркала	10
3.2.3. Коэффициент затухания	11
3.2.4. Решение уравнения движения зеркала.....	12
4. Заключение	16
5. Список используемой литературы	17

1. Список используемых переменных

Обозначение	Физическая величина	Единицы измерения
ρ	Плотность	кг/м ³
w_1	Длина наружной части контура	м
w_2	Длина внутренней части контура	м
h	Толщина	м
d_1	Ширина наружной части контура	м
d_2	Ширина внутренней части контура	м
G_{Si}	Модуль сдвига кремния	ГПа
N	Число витков катушки	-
J	Переменный ток	А
$d_{нити}$	Диаметр нити катушки	м
f_p	Резонансная частота	Гц
I	Момент инерции	кг*м ²
$\ddot{\theta}$	Вторая производная от угла по времени (угловое ускорение)	рад/с ²
K	Жесткость торсионной балки	кг*м ² /с ²
$\dot{\theta}$	Первая производная от угла по времени (угловая скорость)	рад/с
D	Коэффициент затухания	кг*м ² /с
θ	Угол отклонения зеркала	рад
M	Крутящий момент	Н*м
ω_p	Круговая резонансная частота	Гц
B	Магнитное поле, создаваемое постоянными магнитами	Тл
J_m	Амплитуда переменного тока	А
F	Сила	Н
v	Скорость	м/с
S	Площадь	м ²

ξ	Корень характеристического уравнения	-
φ_{max}	Максимально допустимый угол отклонения зеркала	рад
$M_{к max}$	Максимально допустимый крутящий момент	Н*м
$[\tau]$	Допустимые касательные напряжения	Па
W_k	Момент сопротивления	м ⁻³
$[\sigma]$	Предел прочности	Па
ν	Коэффициент Пуассона	-

2. Введение

Современные тенденции технологического развития общества ведут к минимизации. Поэтому невозможно представить производство без использования устройств микросистемной техники (МСТ). К таким механизмам относятся системы для сбора, обработки и отображения информации.

Одним из главных преимуществ МСТ, кроме компактности, можно отнести возможность интегрирования устройств различного назначения в состав других систем. Например МЭМС может быть установлена на общую плату прибора (не обязательно на свою собственную - отдельную). С каждым днем становится все больше микроэлектромеханических систем (МЭМС), и все больше производителей начинают активное их использование в своих приборах.

В 70-х годах прошлого столетия начали появляться первые электромеханические устройства, это были интегральные датчики давления. Они изготавливались посредством объемной микрообработки. Так началось поколение приборов, создаваемых по технологии формирования тонкопленочных мембранных структур.

В начале 80-х годов были разработаны первые МЭМС акселерометры. А менее чем через десять лет была создана технология поверхностной микромеханической обработки. С ее помощью первыми были изготовлены акселерометры для подушек безопасности автомобилей. В то же самое время стали разрабатываться микроактюаторы.

В 90-х были разработаны микрозонды, МЭМС гироскопы, микровентили и головки струйных принтеров. В след за этим были созданы элементы проекционных систем, осциллирующих зеркал и газовых хроматографических систем.

Сейчас МЭМС представляют собой совокупность элементов и схем управления, созданных на общей подложке. Размеры МЭМС элементов достигают от сотен до тысяч нанометров. Основное отличие МЭМС от микросхем - это трехмерная структура: обычно такая система в разрезе представляет подобие многослойного пирога из различных материалов.

Большая часть операций по изготовлению микроэлектромеханических систем заимствована у микроэлектроники. Также были разработаны и специфические операции, к примеру, химическое анизотропное травление. Данная операция позволяет формировать структуры одного материала в слоях другого при гальваническом выращивании. Были разработаны процессы селективного травления, зависящие от концентрации примесей, а также метод анодной сварки или плавления для соединения кремниевых пластин.

Впоследствии начали соединять микроэлектромеханические системы с оптическими элементами, в основном ими стали микрозеркала. Это значительно расширило функциональные возможности МЭМС, так как позволило воздействовать на оптические сигналы. Данные устройства принято условно классифицировать (они не имеют отдельного от МЭМС класса) как микрооптоэлектромеханические системы (МОЭМС). МОЭМС находят свое применение в устройствах представления информации (проекторы и дисплеи); системах оптической связи (модуляторы и демодуляторы); адаптивной оптике, освещении и т.п.

В настоящее время разработками и изготовлением МОЭМС занимаются Германия, США и Япония. Объем отечественных разработок в данной области значительно уступает зарубежным, так как имеющиеся разработки по большей части не выходят за пределы лабораторий и ОО, а также теории и моделей. Главное преимущество как МЭМС, так и МОЭМС является совмещение в одном устройстве электронных и механических составляющих, сохраняя при этом малые габариты.

3. Конструкторский раздел

На микроэлектромеханические приборы и системы (МЭМС) возлагаются большие надежды, их быстрый технологический рост определяет развитие современной микроэлектроники. Применение таких технологий обеспечивает получение готовых цельных узлов будущего прибора, имеющих минимальные габариты. При этом все компоненты узла располагаются вместе с обрабатывающей схемой на одной подложке, что позволяет обеспечить лучшую точность и надежность. Часто МЭМС изготавливают в вакуумированном, герметичном корпусе, что дополнительно повышает надежность.

3.1. Лазерный сканер

Разрабатываемый в данной работе сканер, в связи с описанными выше преимуществами, будет включать в себя технологии МЭМС. Сканер представляет собой ЛИДАР, встроенный в беспилотный автомобиль и осуществляющий сканирование дороги в заданном секторе. Система беспилотного управления (рис. 4.1) можно представить как блок сканирования (ЛИДАР) и блок обработки информации.

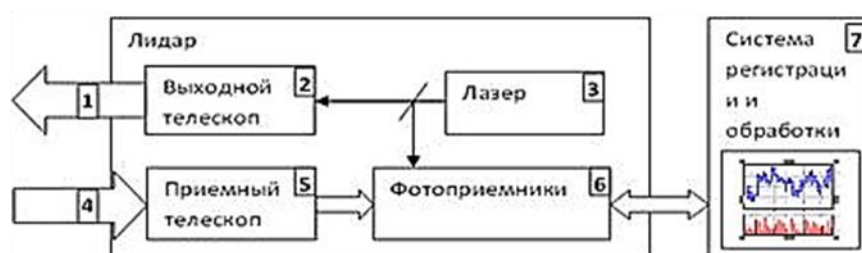


Рисунок 4.1. Блок-схема системы беспилотного управления¹

Как показано выше (рис. 4.1) ЛИДАР можно рассматривать как систему, состоящую из источника, приемника и приемо-передающего оптического тракта.

¹ Система регистрации лидарных сигналов с широким динамическим диапазоном. [Электронный ресурс]. URL: <http://lab18.ipu.ru/projects/conf2009/3/8.htm> (дата обращения: 10.10.2017)

3.2. Осциллирующее микрозеркало

В разрабатываемом сканере основным компонентом для осуществления сканирования в заданном секторе является микрозеркало. Его разработка основывалась на электромагнитных МЭМС технологиях.

В качестве исходных данных были взяты следующие величины, сведенные в таблицы 1.

Таблица 1 - Исходные данные

Подложка					
ρ_{Si}^1 , кг/м ³	w_{Si} , м		h_{Si} , м	d_{Si} , м	ϑ^1
2330	0,01		0,0004	0,015	0,28
Балки					
G_{Si}^1 , ГПа	w , м		h , м	L , м	$[\sigma]^1$, ГПа
66	0,00085		0,0004	0,009	1,32
Зеркальная пластина					
ρ_{Ag}^2 , кг/м ³	w_m , м		h_m , м	d_m , м	
19300	0,01		$2 \cdot 10^{-7}$	0,015	
Катушка					
ρ_{Cu}^2 , кг/м ³	w_{Cu1} , м	w_{Cu2} , м	h_{Cu} , м	d_{Cu1} , м	d_{Cu2} , м
8900	0,01	0,008	0,0005	0,015	0,013
N	J, А	$d_{нити}^3$, мм	B^{4*} , Тл		
200	0,6	0,05	3		

3.2.1. Расчет резонансной частоты

Микрозеркало (рис. 4.2) является осциллирующим, то есть колеблющимся с определенной частотой. Частота, при которой для колебания зеркала будет затрачиваться минимальная работа, - частота собственных колебаний зеркала.

¹ Liangchen Ye, Gaofei Zhang, Zheng You. Large-Aperture kHz Operating Frequency Ti-alloy Based Optical Micro Scanning Mirror for LiDAR Application. [Текст] / Liangchen Ye, Gaofei Zhang, Zheng You // micromachines. - 2017. - 10 апреля. - 14 с.

² Плотность твердых веществ, справочная таблица. [Электронный ресурс]. URL: https://www.fxuz.ru/справочные_данные/механические_свойства_веществ/плотность_твердых_веществ/ (дата обращения: 12.08.2018).

³ Марка проволоки ПЭВТЛ-1 ТУ 16-505.446-77.

⁴ Магниты и магнитные поля. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kakras.ru/doc/magnets-and-magnetic-fields.html> (дата обращения: 12.08.2018).

* Используются два магнита ХК (железо-хром-кобальт, Fe-Cr-Co), для каждого $B = 1,5$ Тл.

При данной частоте зеркало попадает в резонанс, то есть начинает раскачивать само себя. Для определения резонансной частоты был использован программный пакет SolidWorks Simulation, полученные результаты представлены на рисунке 4.3.

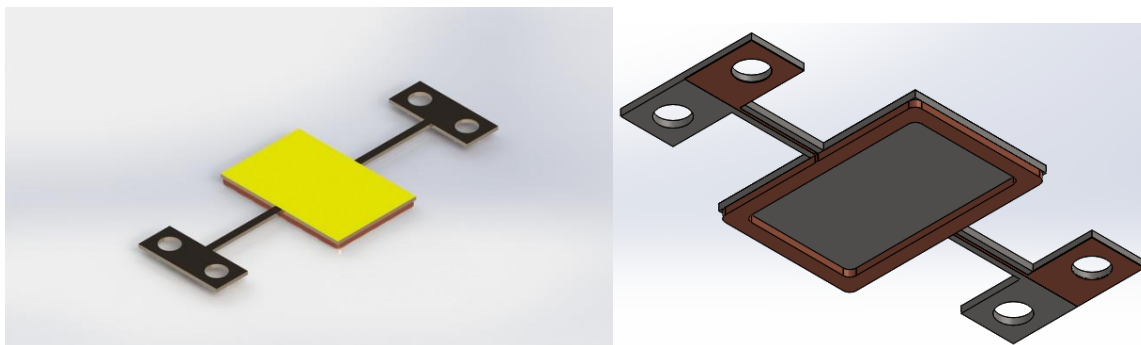


Рисунок 4.2. Модель микрозеркала

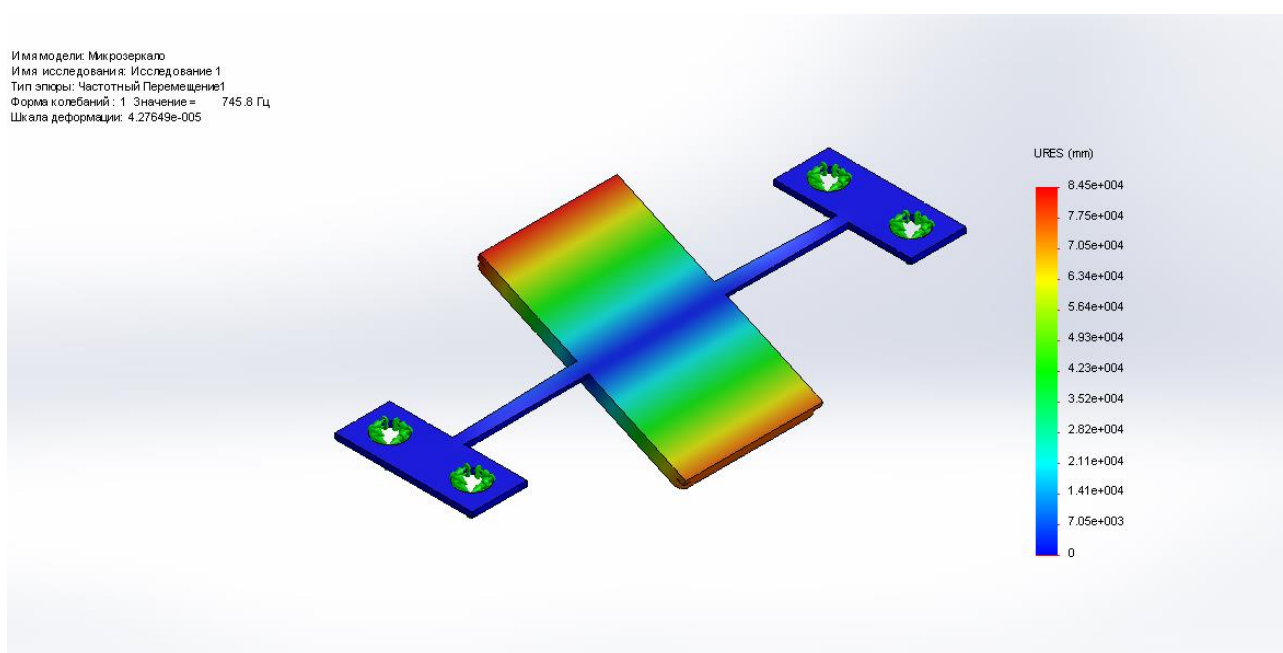


Рисунок 4.3. Результаты симуляции для определения резонансной частоты

По итогам симуляции колебательного движения, резонансная частота (f_p) составила 745,8 Гц.

Для проверки полученной резонансной частоты можно воспользоваться теоретическим расчетом, с использованием формулы 1.

$$f_p = \frac{1}{2 * \pi} * \sqrt{\frac{K}{I}} \quad (1)$$

Полученная теоретическая резонансная частота 621,74 Гц. Практическое и теоретическое значения расходятся, поэтому в дальнейшем следует проверить, какой результат верен.

3.2.2. Расчет параметров микрозеркала

Уравнение движения микрозеркала описывается уравнением 2¹.

$$I * \ddot{\theta} + D * \dot{\theta} + K * \theta = M \quad (2)$$

Момент инерции описывается уравнением 3².

$$I = 1/12 * \left(\rho_{Si} * h_{Si} * d_{Si} * w_{Si} * (h_{Si}^2 + d_{Si}^2) + \rho_{Ag} * h_m * d_m * w_m * (h_m^2 + d_m^2) + \rho_{Cu} * h_{Cu} * d_{Cu1} * w_{Cu1} * (h_{Cu}^2 + d_{Cu1}^2) - \rho_{Cu} * h_{Cu} * d_{Cu2} * w_{Cu2} * (h_{Cu}^2 + d_{Cu2}^2) \right) \quad (3)$$

Жесткость торсионной балки вычисляется с помощью уравнения 4¹.

$$K = \frac{G_{Si} * w * h^3}{3 * L} * \left(1 - \frac{192 * h}{\pi^5 * w} * \tanh\left(\frac{\pi * w}{2 * h}\right) \right) \quad (4)$$

Для вычисления крутящего момента воспользуемся формулой 5¹.

$$M = N * B * J * S = M_m * \sin(\omega_p * t) \quad (5)$$

$$J = J_m * \sin(\omega_p * t) \quad (6)$$

$$\omega_p = 2 * \pi * f_p \quad (7)$$

$$S = \left(\frac{d_{Cu1} + d_{Cu2}}{2} \right) * \left(\frac{w_{Cu1} + w_{Cu2}}{2} \right) \quad (8)$$

¹ Liangchen Ye, Gaofei Zhang, Zheng You. Large-Aperture kHz Operating Frequency Ti-alloy Based Optical Micro Scanning Mirror for LiDAR Application. [Текст] / Liangchen Ye, Gaofei Zhang, Zheng You // micromachines. - 2017. - 10 апреля. - 14 с.

² ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ ТЕЛ, ИМЕЮЩИХ ПРОСТЕЙШУЮ ГЕОМЕТРИЧЕСКУЮ ФОРМУ. [Электронный ресурс]. URL: <http://genphys.phys.msu.ru/rus/lab/mech/opis7/i2.htm> (дата обращения: 08.01.2018).

3.2.3. Коэффициент затухания

Коэффициент затухания можно вычислить по формуле 9, для этого необходимо определить максимальный угол отклонения зеркала.

$$D = \frac{M_m}{\omega_p \cdot \theta_{max}} \quad (9)$$

Максимальный угол отклонения зеркала не должен превышать максимально допустимого угла отклонения, который определяется с помощью теории Сопротивления материалов по формуле 10¹.

$$\varphi_{max} = \frac{M_{kmax} * L}{G_{Si} * D} \quad (10)$$

Максимально допустимый крутящий момент можно вычислить, исходя из допустимых касательных напряжений, по формуле 11¹.

$$M_{kmax} = [\tau] * W_k \quad (11)$$

Момент сопротивления можно представить в виде формулы 12¹, а допустимые касательные напряжения, согласно второй теории прочности, вычисляются через предел прочности по формуле 14².

$$W_k = K_2 * d * h^2 \quad (12)$$

$$K_2 \approx \frac{1}{3 + 1,8 * \frac{h}{d}} \quad (13)^1$$

$$[\tau] = \frac{[\sigma]}{1 + \vartheta} \quad (14)$$

Таким образом, максимально возможный угол отклонения можно представить в виде уравнения 15.

¹ Биргер И. А. Сопротивление материалов [Текст]: Учебное пособие / И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986.- 560 с.

² ДОПУСТИМОЕ НАПРЯЖЕНИЕ. [Электронный ресурс]. URL: <http://isopromat.ru/sopromat/teoria/dopustimoe-napryazhenie> (дата обращения: 12.08.2018).

$$\varphi_{max} = \frac{[\sigma] * L * \left\{ 3 + 2 * \left(\frac{h}{d} + \frac{h^2}{d^2} \right) \right\}}{\{1 + \vartheta\} * \left\{ 3 + 1,8 * \frac{h}{d} \right\} * G_{Si} * h} \quad (15)$$

3.2.4. Решение уравнения движения зеркала

Для уравнения движения зеркала (2) были составлены однородное уравнение 16 и характеристическое уравнение 17:

$$I * \ddot{\theta} + D * \dot{\theta} + K * \theta = 0 \quad (16)$$

$$I * \xi^2 + D * \xi + K = 0 \quad (17)$$

Корни характеристического уравнения можно вычислить из формулы 18, а общее решение однородного уравнения может быть получено из уравнения 19.

$$\xi_{1,2} = \frac{-D \pm \sqrt{D^2 - 4 * I * K}}{2 * I} \quad (18)$$

$$\theta_{00} = e^{-\frac{D*t}{2*I}} * \left\{ C_1 * \cos\left(\frac{\sqrt{4 * I * K - D^2}}{2 * I} t\right) + C_2 * \sin\left(\frac{\sqrt{4 * I * K - D^2}}{2 * I} t\right) \right\} \quad (19)$$

Так как правая часть (20) уравнения 2 специального вида, то частное решение было получено по формуле 21.

$$f(x) = M_m * \sin(\omega_p * t) \quad (20)$$

$$\tilde{\theta} = A * \cos(\omega_p * t) + B * \sin(\omega_p * t) \quad (21)$$

Для нахождения коэффициентов A и B были взяты первая и вторая производные по времени (22, 23) от выражения 14:

$$\dot{\tilde{\theta}} = -A * \omega_p * \sin(\omega_p * t) + B * \omega_p * \cos(\omega_p * t) \quad (22)$$

$$\ddot{\tilde{\theta}} = -A * \omega_p^2 * \cos(\omega_p * t) - B * \omega_p^2 * \sin(\omega_p * t) \quad (23)$$

Уравнения 21-23 были подставлены в закон движения микрозеркала 2, и получена формула 24, из которой были найдены коэффициенты A и B (25, 26).

$$\begin{aligned}
& -I * A * \omega_p^2 * \cos(\omega_p * t) - I * B * \omega_p^2 * \sin(\omega_p * t) - D * A * \omega_p \\
& * \sin(\omega_p * t) - D * B * \omega_p * \cos(\omega_p * t) + K * A * \cos(\omega_p * t) \\
& + K * B * \sin(\omega_p * t) = M_m * \sin(\omega_p * t)
\end{aligned} \tag{24}$$

$$A = -\frac{M * D * \omega_p}{(K - I * \omega_p^2)^2 + D^2 * \omega_p^2} \tag{25}$$

$$B = \frac{M * D * \omega_p * (K - I * \omega_p^2)}{D * \omega_p * [(K - I * \omega_p^2)^2 + D^2 * \omega_p^2]} \tag{26}$$

С учетом выше описанных формул общее решение для уравнения движения микрозеркала примет вид (27):

$$\begin{aligned}
\theta = e^{-\frac{D*t}{2*I}} * & \left\{ C_1 * \cos\left(\frac{\sqrt{4 * I * K - D^2}}{2 * I} t\right) + C_2 * \sin\left(\frac{\sqrt{4 * I * K - D^2}}{2 * I} t\right) \right\} \\
& - \frac{M * D * \omega_p}{(K - I * \omega_p^2)^2 + D^2 * \omega_p^2} * \cos(\omega_p * t) \\
& + \frac{M * D * \omega_p * (K - I * \omega_p^2)}{D * \omega_p * [(K - I * \omega_p^2)^2 + D^2 * \omega_p^2]} * \sin(\omega_p * t)
\end{aligned} \tag{27}$$

Приняв во внимание начальные условия (28) были вычислены коэффициенты C_1 и C_2 (29, 30). Уравнение движения микрозеркала может быть определено по формуле 31 и имеет вид колебаний, представленных на граф. 1.

$$\begin{cases} \theta(t = 0) = 0 \\ \dot{\theta}(t = 0) = 0 \end{cases} \tag{28}$$

$$C_1 = \frac{M * D * \omega_p}{(K - I * \omega_p^2)^2 + D^2 * \omega_p^2} \tag{29}$$

$$C_2 = \frac{M * \omega_p * (D^2 - 2 * I * K + 2 * I^2 * \omega_p^2)}{\sqrt{4 * I * K - D^2} * [(K - I * \omega_p^2)^2 + D^2 * \omega_p^2]} \tag{30}$$

$$\begin{aligned}
\theta = e^{-\frac{D \cdot t}{2 \cdot I}} * & \left\{ \frac{M * D * \omega_p}{(K - I * \omega_p^2)^2 + D^2 * \omega_p^2} * \cos\left(\frac{\sqrt{4 * I * K - D^2}}{2 * I} t\right) \right. \\
& + \frac{M * \omega_p * (D^2 - 2 * I * K + 2 * I^2 * \omega_p^2)}{\sqrt{4 * I * K - D^2} * [(K - I * \omega_p^2)^2 + D^2 * \omega_p^2]} \\
& * \sin\left(\frac{\sqrt{4 * I * K - D^2}}{2 * I} t\right) \left. \right\} - \frac{M * D * \omega_p}{(K - I * \omega_p^2)^2 + D^2 * \omega_p^2} \\
& * \cos(\omega_p * t) + \frac{M * D * \omega_p * (K - I * \omega_p^2)}{D * \omega_p * [(K - I * \omega_p^2)^2 + D^2 * \omega_p^2]} \\
& * \sin(\omega_p * t)
\end{aligned} \tag{31}$$

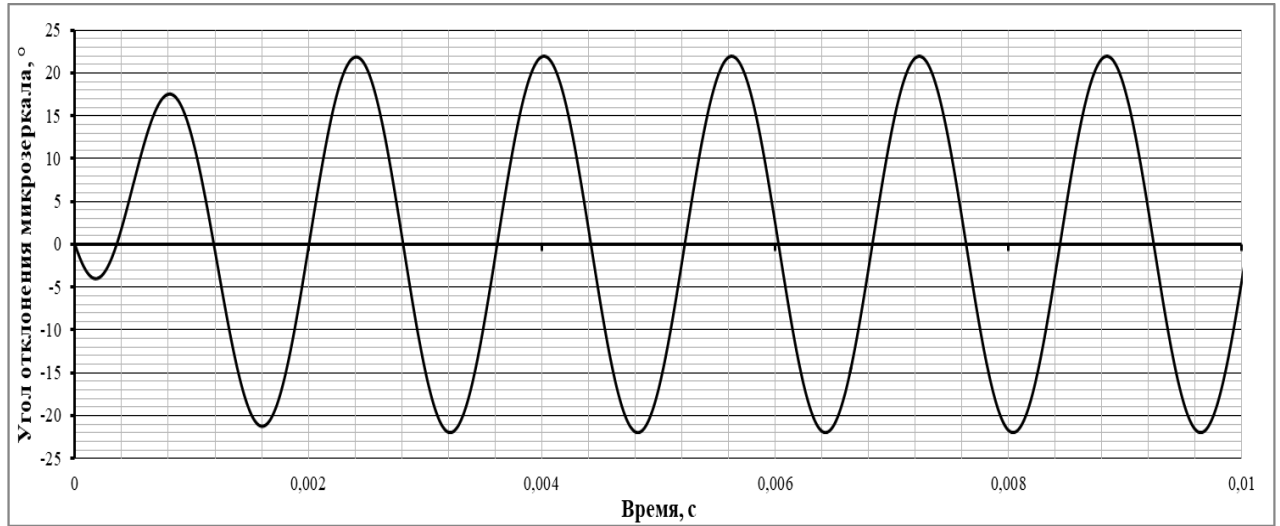


График 1. Зависимость угла отклонения зеркала от времени

Полный угол сканирования может быть вычислен по формуле 32:

$$\theta_{scan} = 4 \cdot \theta \tag{32}$$

Вернемся к проверке резонансной частоты, для этого для этого рассмотрим изменение максимального угла отклонения осциллирующего зеркала в зависимости от частоты колебания приведено на граф. 2.

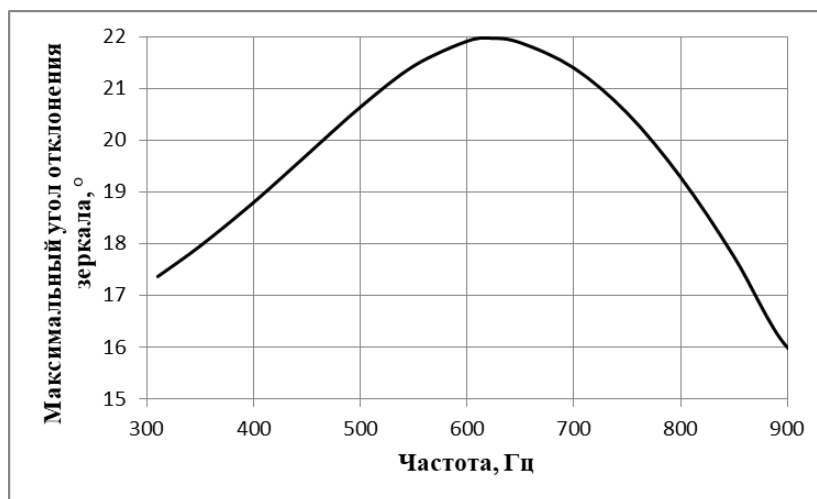


График 2 – Зависимость максимального угла отклонения зеркала от частоты

Из графика отчетливо видно, что резонансная частота зеркала совпадает с определенной по теоретической формуле. Результаты вычисления сведены в таблицу 2.

Таблица 2 - Результаты расчета

Резонансная частота	621,74	Гц
Допустимый угол отклонения зеркала	22,82	°
Угол отклонения зеркала ($\omega = 622$ Гц)	21,97	°
Полный угол сканирования ($\omega = 622$ Гц)	87,88	°
Диаметр апертуры	6,5	мм
Рабочий ток	0,6	А
Рабочее напряжение	40,76	В
Время выхода на режим	$2 \cdot 10^{-3}$	с

4. Заключение

Задачей данной работы было спроектировать осциллирующее микрозеркало (МЭМС зеркало), для этого были проанализированы различные виды МЭМС зеркал и выбрана разработка микрозеркала на основе электромагнетизма.

Был рассчитан коэффициент затухания для осциллирующего зеркала. С помощью программного обеспечения SolidWorks Simulation было смоделировано колебание зеркала и определена резонансная частота. По теории Сопротивления материалов был рассчитан максимально допустимый угол изгиба торсионных балок.

Решено дифференциальное уравнение закона колебания зеркала, и построен закон осцилляции микрозеркала с помощью программного пакета Excel Microsoft Office.

Были подобраны геометрические параметры микрозеркала и его компонентов удовлетворяющие все требуемые условия. В программном обеспечении SolidWorks смоделирована модель микрозеркала.

5. Список используемой литературы

- 1) Биргер И. А. Сопротивление материалов [Текст]: Учебное пособие / И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986.- 560 с.
- 2) Бритков О. М. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ В ГЕРМЕТИЧНОМ ИСПОЛНЕНИИ. [Текст]: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук (05.27.06) / Бритков Олег Михайлович. - Москва 2009. - 34 с.
- 3) ДОПУСТИМОЕ НАПРЯЖЕНИЕ. [Электронный ресурс]. URL: <http://isopromat.ru/sopromat/teoria/dopustimoe-napryazhenie> (дата обращения: 12.08.2018).
- 4) Евстафьев С.С. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МНОГОСЛОЙНЫХ ТЕПЛОВЫХ МИКРОАКТЮАТОРОВ. [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.27.06: утв. 05.05.16 / Евстафьев Сергей Сергеевич. - Москва, 2016. - 150 с.
- 5) Коэффициент сопротивления формы. [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Коэффициент_сопротивления_формы (дата обращения: 08.01.2018).
- 6) Магниты и магнитные поля. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kakras.ru/doc/magnets-and-magnetic-fields.html> (дата обращения: 12.08.2018).
- 7) ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ ТЕЛ, ИМЕЮЩИХ ПРОСТЕЙШУЮ ГЕОМЕТРИЧЕСКУЮ ФОРМУ. [Электронный ресурс]. URL: <http://genphys.phys.msu.ru/rus/lab/mech/opis7/i2.htm> (дата обращения: 08.01.2018).
- 8) Плотность твердых веществ, справочная таблица. [Электронный ресурс]. URL: https://www.fxyz.ru/справочные_данные/механические_свойства_веществ/плотность_твердых_веществ/ (дата обращения: 12.08.2018).

- 9) Система регистрации лидарных сигналов с широким динамическим диапазоном. [Электронный ресурс]. URL: <http://lab18.ipu.ru/projects/conf2009/3/8.htm> (дата обращения: 10.10.2017).
- 10) Damping ratio. [Электронный ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Damping_ratio (дата обращения: 08.01.2018).
- 11) Liangchen Ye, Gaofei Zhang, Zheng You. Large-Aperture kHz Operating Frequency Ti-alloy Based Optical Micro Scanning Mirror for LiDAR Application. [Текст] / Liangchen Ye, Gaofei Zhang, Zheng You // micromachines. - 2017. - 10 апреля. - 14 с.