

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель Отделения
электронной инженерии

_____ М. В. Тригуб

«__» _____ 2022 г.

Лабораторная работа №2

**Определение собственных частот и форм колебаний
микромеханических гироскопов в SolidWorks**

Методические указания по выполнению лабораторной работы по курсу
«Сенсорные и актюаторные элементы микросистемной техники» для
студентов IV курса, обучающихся по образовательной программе
направления 11.03.04 – Электроника и наноэлектроника

Томск – 2022

Цель лабораторной работы:

Научиться рассчитывать собственные частоты и формы колебаний проектируемого сенсора.

Пример расчёта собственных частот однокомпонентного микромеханического гироскопа.

Определение собственных частот и форм колебаний проектируемого сенсора является важной задачей, так как от этого будет зависеть правильность работы готового устройства.

Определение и подбор собственных частот и форм колебаний с помощью конечно элементного анализа (КЭА) в программе SolidWorks будет показан на примере однокомпонентного гироскопа LL-типа (рисунок 1).

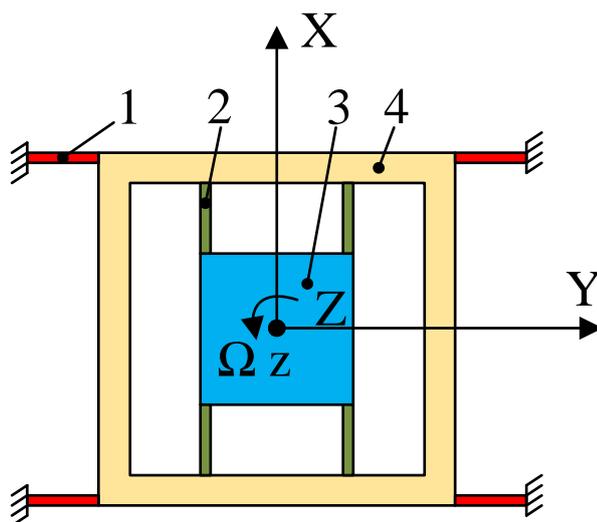


Рисунок 1 – Однокомпонентный гироскоп LL-типа

Принцип работы. Наружная рамка 4 (НР) закреплена на основании с помощью упругих подвесов 1 (УП 1). Инерционная масса 3 (ИМ) с помощью упругих подвесов 2 (УП 2) закреплена за НР 4. Первичные колебания создаются вдоль оси X, при этом, НР 4 и ИМ 3 совершают совместные колебания.

При появлении угловой скорости Ω_z возникает сила Кориолиса, которая вызывает колебания ИМ 3 вдоль оси Y.

Задание. Подобрать собственные частоты первичных и вторичных колебаний гироскопа равными ($10\,000 \pm 100$) Гц.

В качестве упругих подвесов гироскопа по осям первичных и вторичных колебаний используется подвес, показанный на рисунке 2.

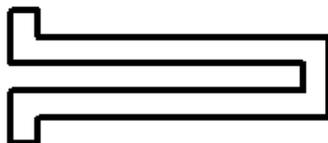


Рисунок 2 – Упругий подвес, используемый при проектировании гироскопа

Для того, чтобы сократить время, необходимое для расчёта, гребенчатые структуры необходимые для создания первичных колебаний, а также для съёма полезного сигнала, в данной модели не будут показаны.

Черчение будет выполняться на виде сверху. Для задания размеров, кратных 1 мкм, необходимо произвести настройку документа, как указано в лабораторной работе №1.

Создайте переменные, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Начальные значения переменных для построения модели

Переменная	Значение, мкм	Комментарий
B1	10	Ширина упругого подвеса 1
B2	10	Ширина упругого подвеса 2
L1	120	Длина упругого подвеса 1
L2	150	Длина упругого подвеса 2
H	40	Высота конструкции

Сначала создайте 2 линии построения с размерами (даны в мм), указанными на рисунке 3.

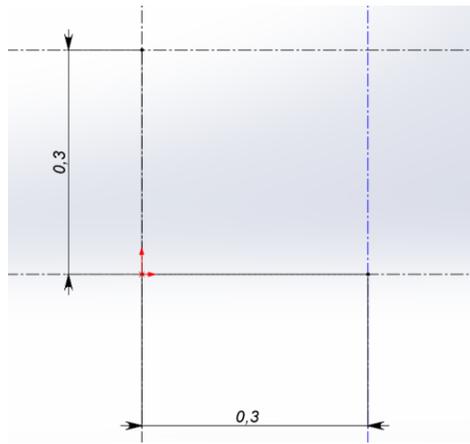


Рисунок 3 – Создание двух линий построения

Затем, от верхнего левого угла с помощью линий построения нарисуйте упругий подвес и обведите линиями изображения только упругий подвес как на рисунке 4. Для задания ширины подвеса используйте параметр В1, а для задания длины подвеса используйте параметр L1.

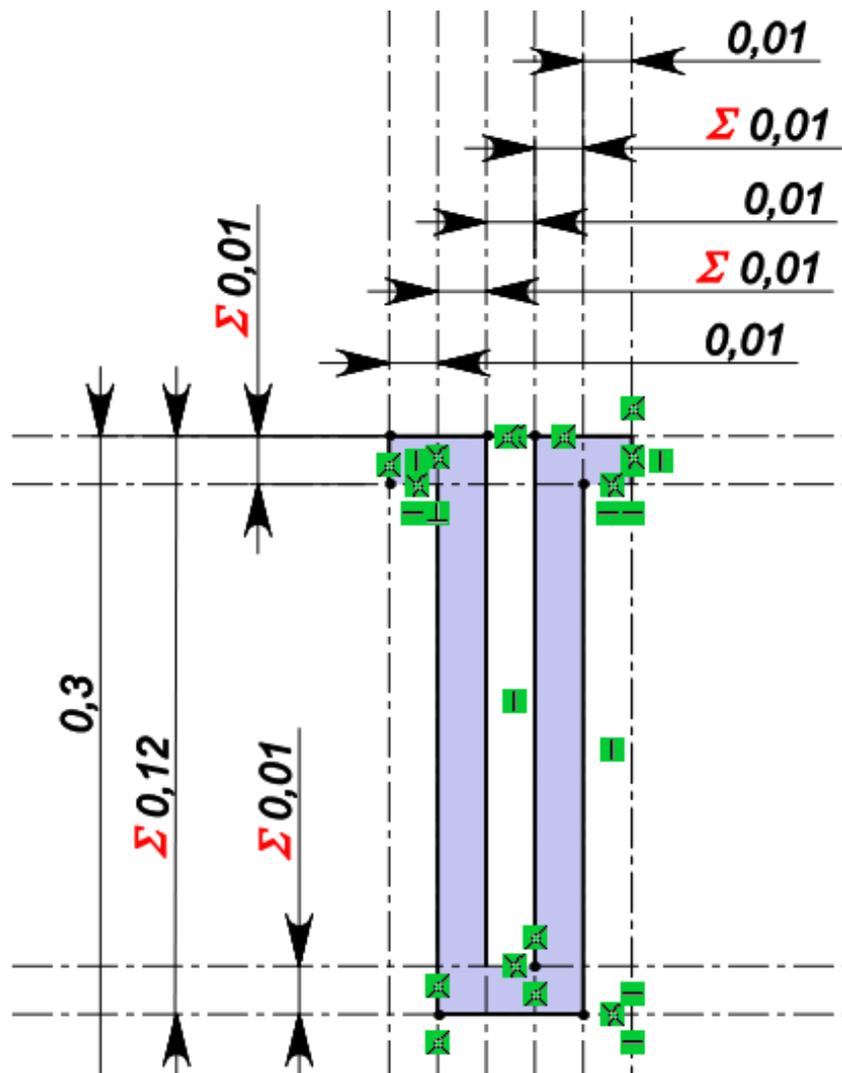


Рисунок 4 – Черчение упругого подвеса

После этого выберите только линии изображения, принадлежащие упругому подвесу, рисунок 5.

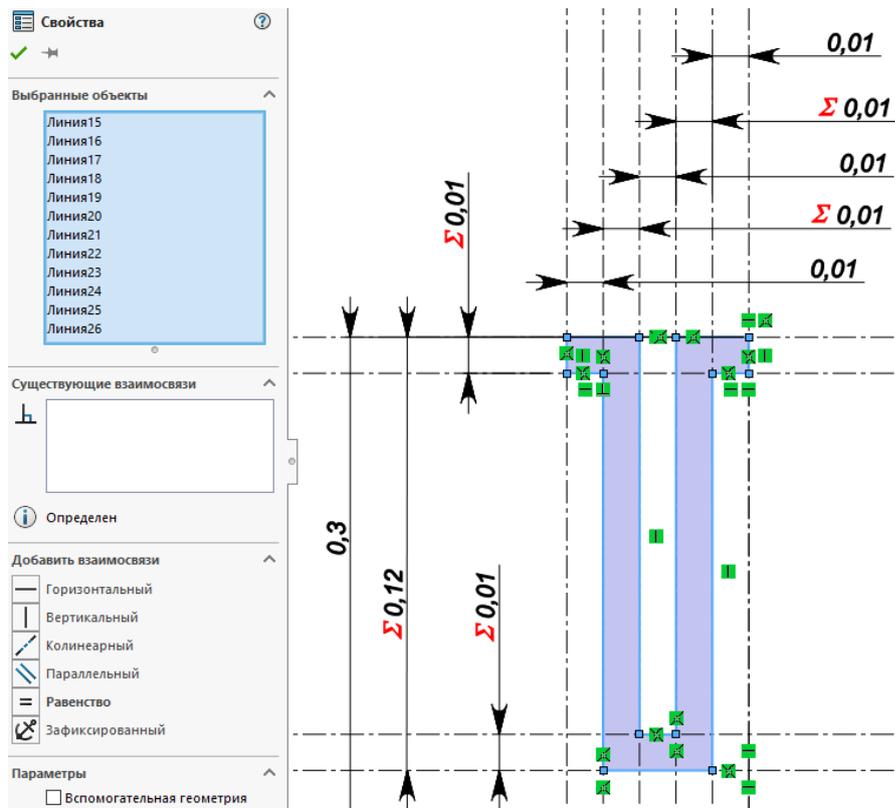


Рисунок 5 – Выбор линий изображения для создания симметрии

На панели инструментов выберите «Зеркально отразить объекты», рисунок 6.

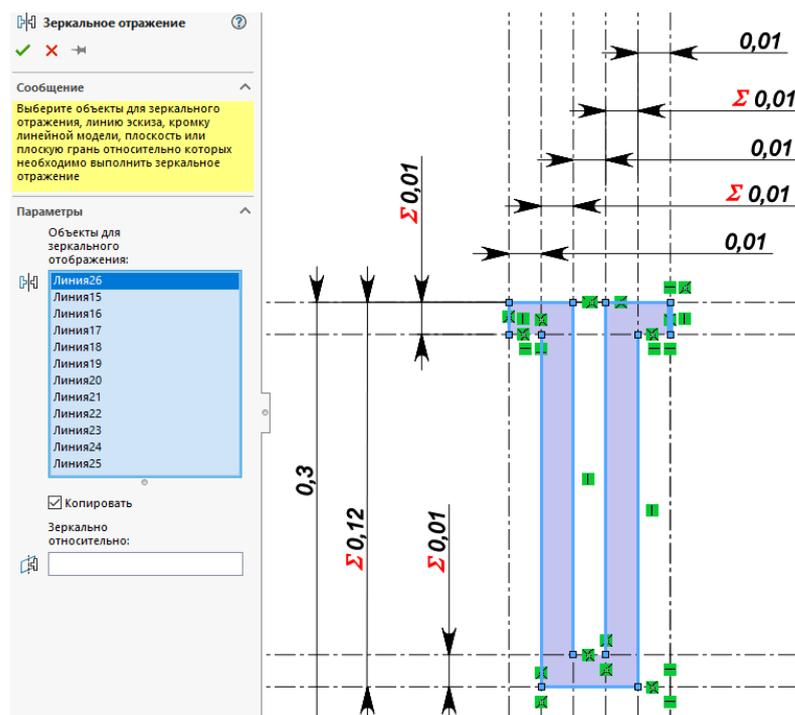


Рисунок 6 – Выбор объектов для зеркального отражения

Выберите ось симметрии, относительно которой необходимо отразить (рисунок 7).

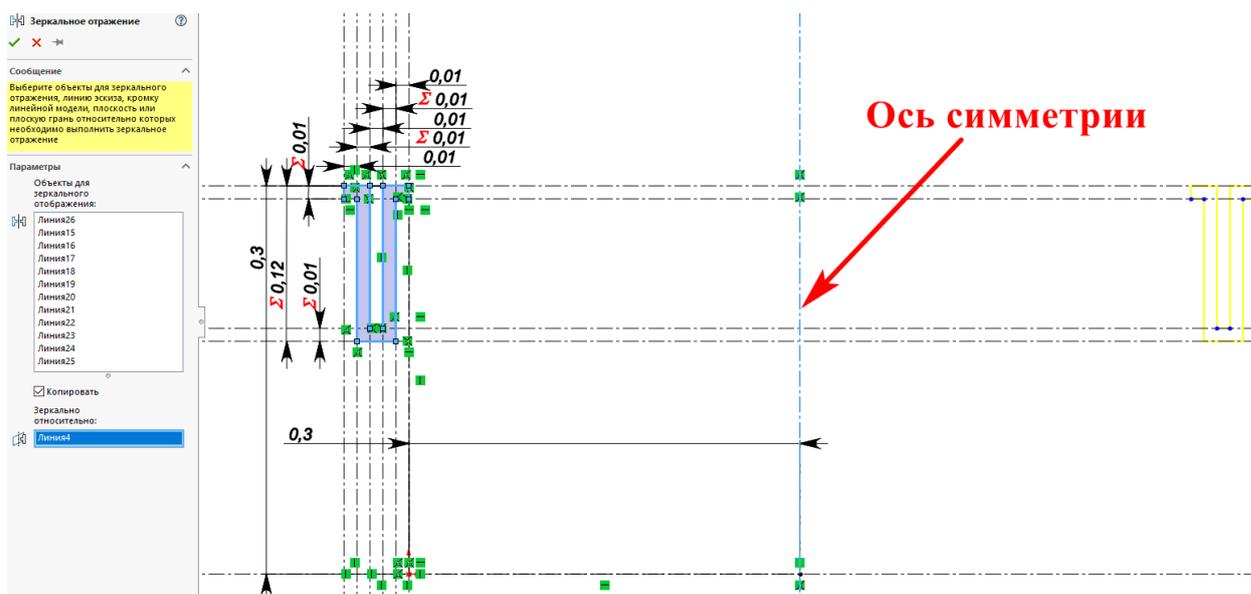


Рисунок 7 – Выбор оси симметрии

Для завершения создания симметрии нажмите на зелёную галочку. Таким образом, создана половина модели. Для создания второй половины модели, выберите все линии изображения двух упругих подвесов. После этого выберите «Зеркально отразить объекты». Далее, выберите ось симметрии, относительно которой необходимо отразить объекты (рисунок 8).

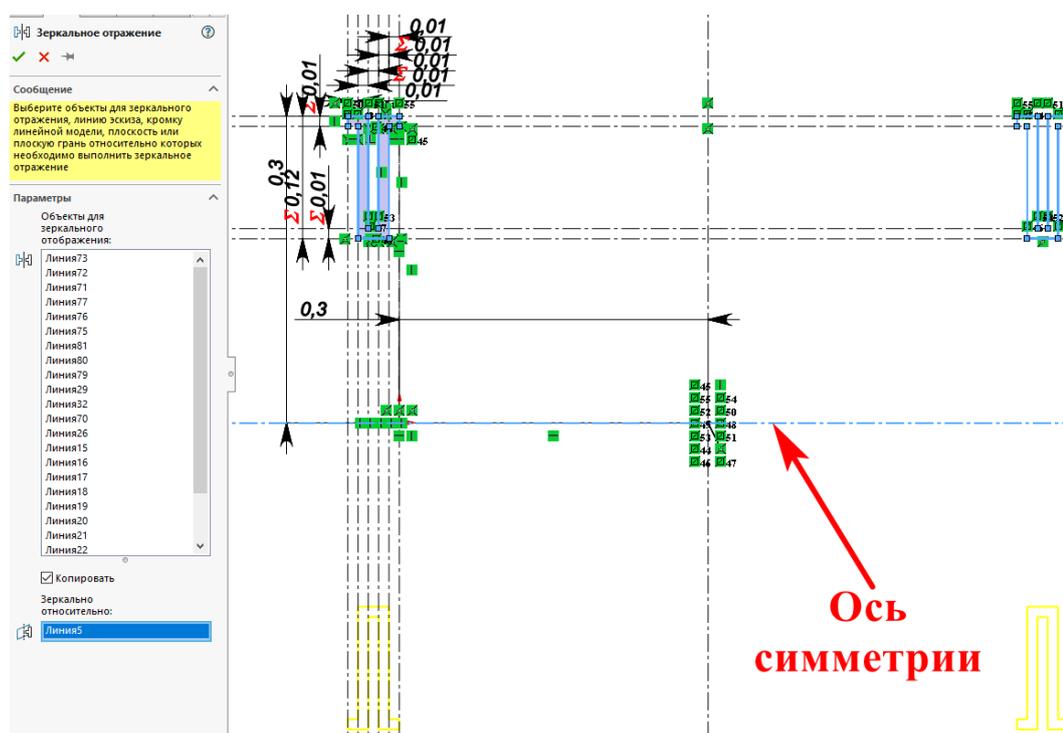


Рисунок 8 – Создание второй симметрии



Завершите черчение на рабочей плоскости, нажав кнопку
Создайте выталкивание только упругих подвесов на высоту H (рисунок 9).

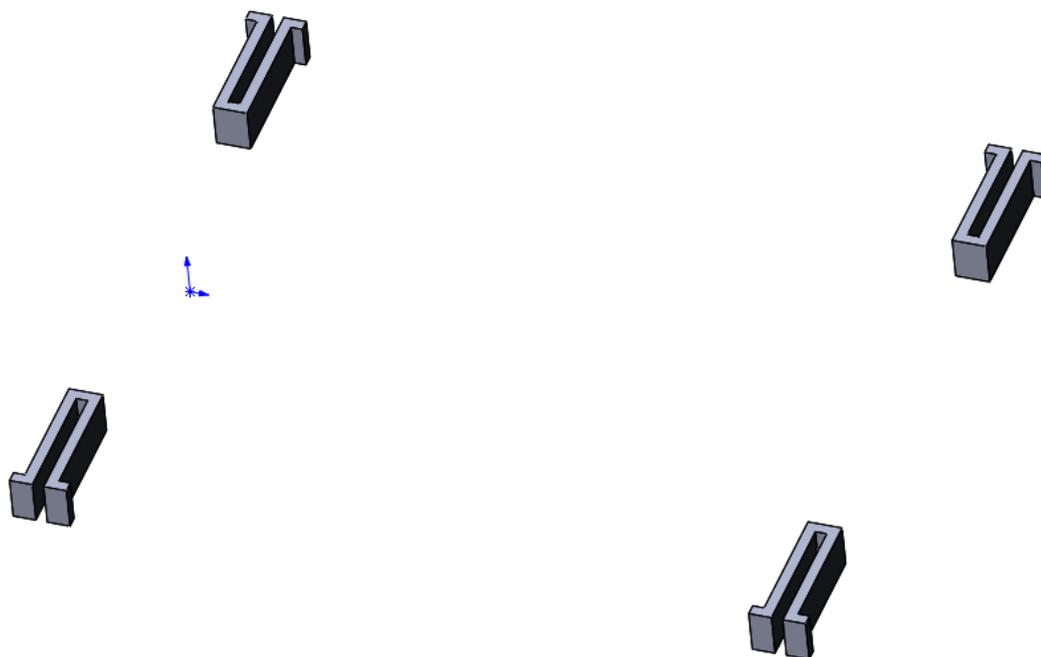


Рисунок 9 – 3D-модель упругих подвесов

Создайте эскиз на виде сверху и нарисуйте 4 линии изображения, совпадающие с углами упругих подвесов, рисунок 10.

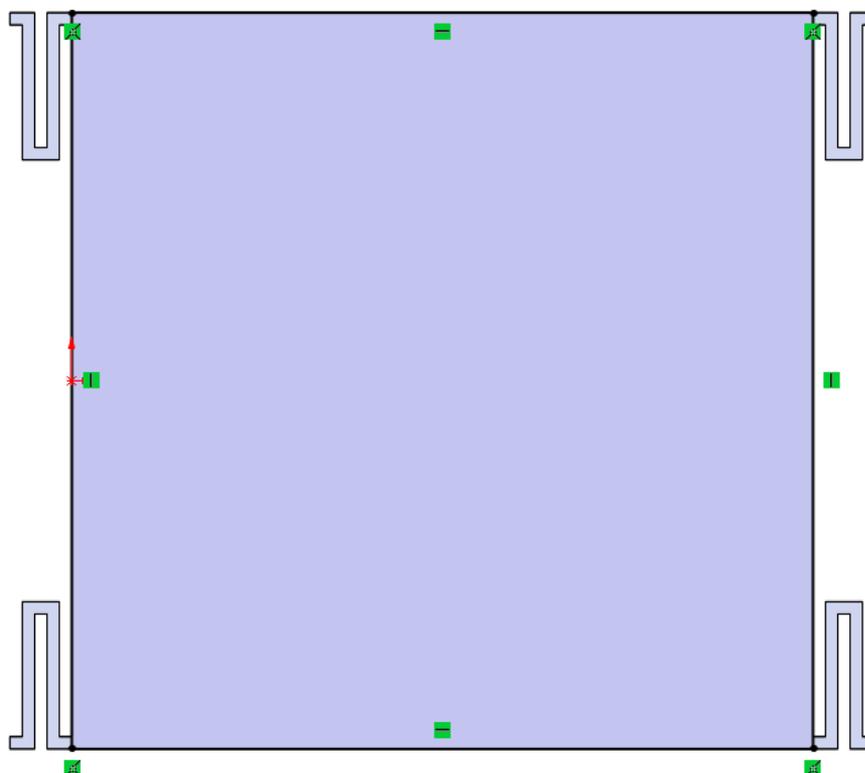


Рисунок 10 – Создание эскиза инерционной массы

После этого произведите выталкивание нового эскиза на высоту H , только обязательно снимите галочку с параметра «Объединить результаты», рисунок 11.

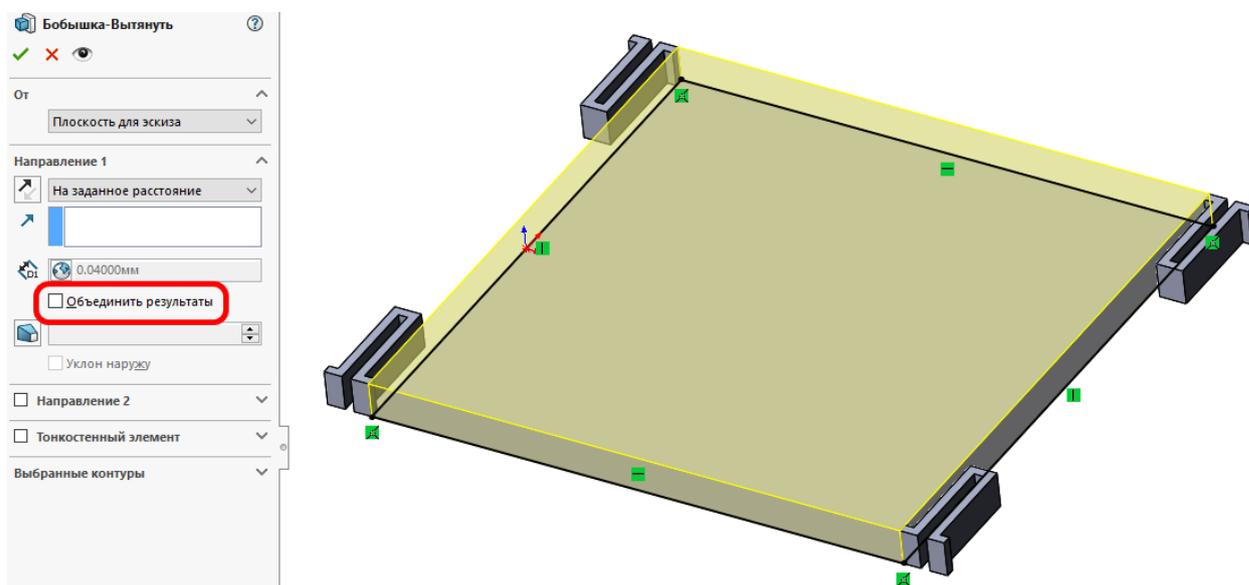


Рисунок 11 – Выталкивание инерционной массы

В результате должна получиться 3D-модель, у которой инерционная масса и упругие подвесы не объединены в одно тело, рисунок 12.

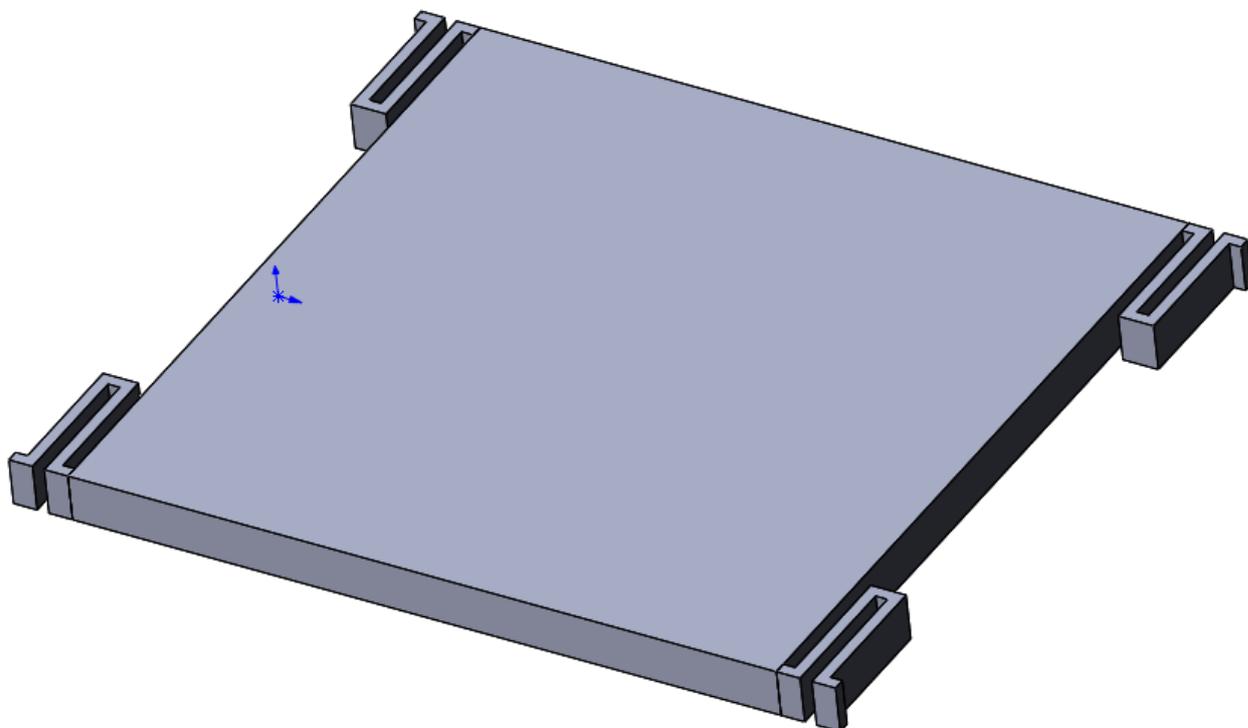


Рисунок 12 – 3D-модель внутренней массы с упругими подвесами
микромеханического гироскопа

Примените ко всем телам созданной модели материал кремний.

Создайте новую задачу по нахождению собственных частот и форм колебаний, рисунок 13.

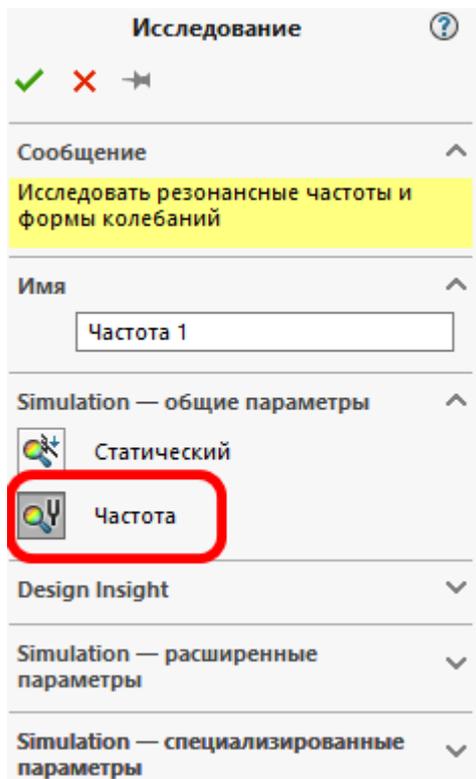


Рисунок 13 – Создание задачи по нахождению собственных частот

После этого, создайте полное закрепление четырёх упругих подвесов (рисунок 14).

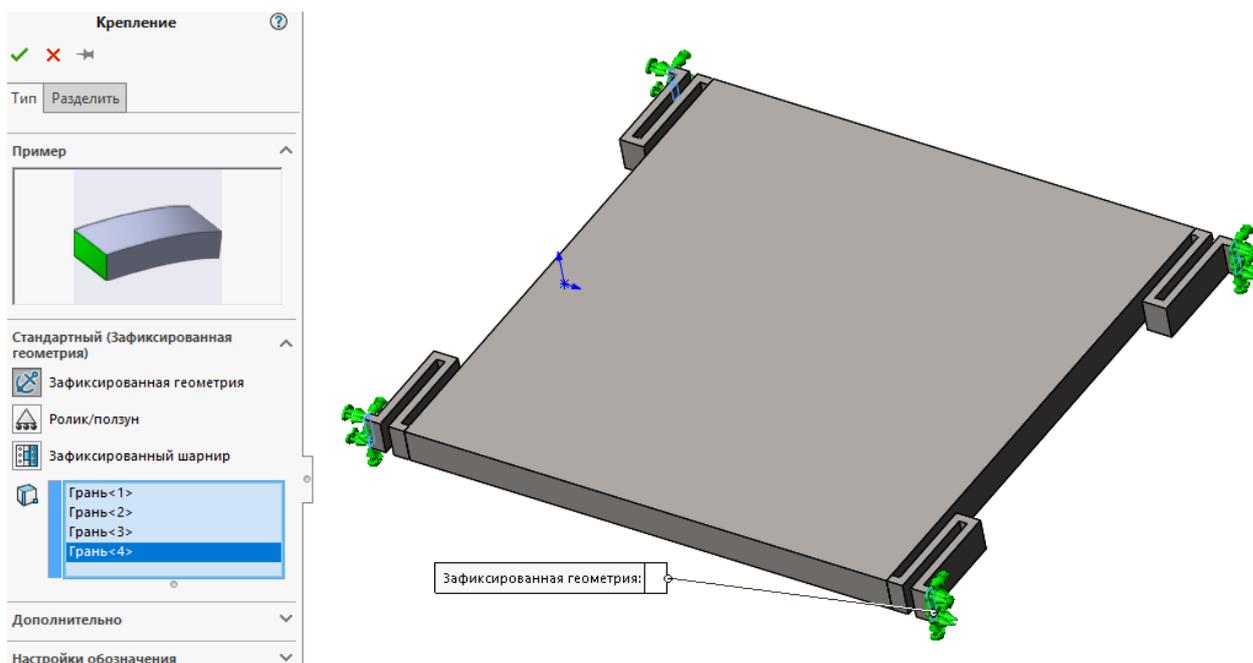


Рисунок 14 – Задание полного закрепления упругих подвесов

Так как основная погрешность, связанная с определением собственных частот, зависит от качества конечно-элементной (КЭ) сетки на упругих подвесах, то для них необходимо выбрать размер КЭ элемента меньше, чем для центральной массы. Для упругих подвесов рекомендуется создавать сетку с размером в три раза меньше, чем ширина упругого подвеса. Но, при таком размере сетки, количество КЭ существенно увеличится, что повлечёт за собой увеличение ресурсов компьютера (оперативная память) и времени для расчёта задачи. Поэтому, в данной учебной задаче будем использовать размер КЭ элемента равный половине ширины упругого подвеса.

В дереве анализа необходимо раскрыть список деталей, входящих в анализ, выбрать четыре упругих подвеса, нажать правую кнопку мыши (ПКМ) и выбрать «Создать сетку». В нашем случае, ширина упругого подвеса равна 10 мкм, следовательно, размер КЭ установим равным 5 мкм или 0,005 мм, рисунок 14.

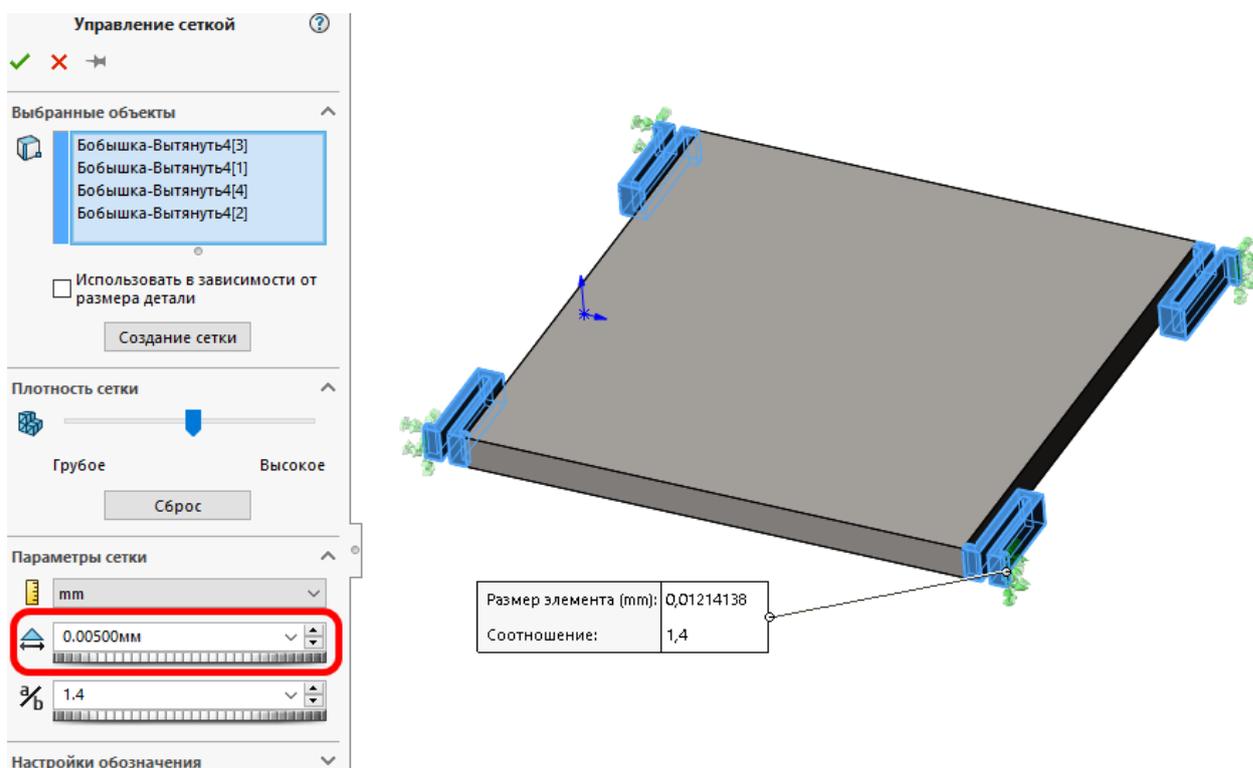


Рисунок 14 – Настройка размера КЭ для упругих подвесов

Инерционная масса не вносит существенного влияния в суммарную ошибку при определении собственных частот, поэтому размер КЭ можно установить равным 100 мкм или 0,1 мм, рисунок 15.

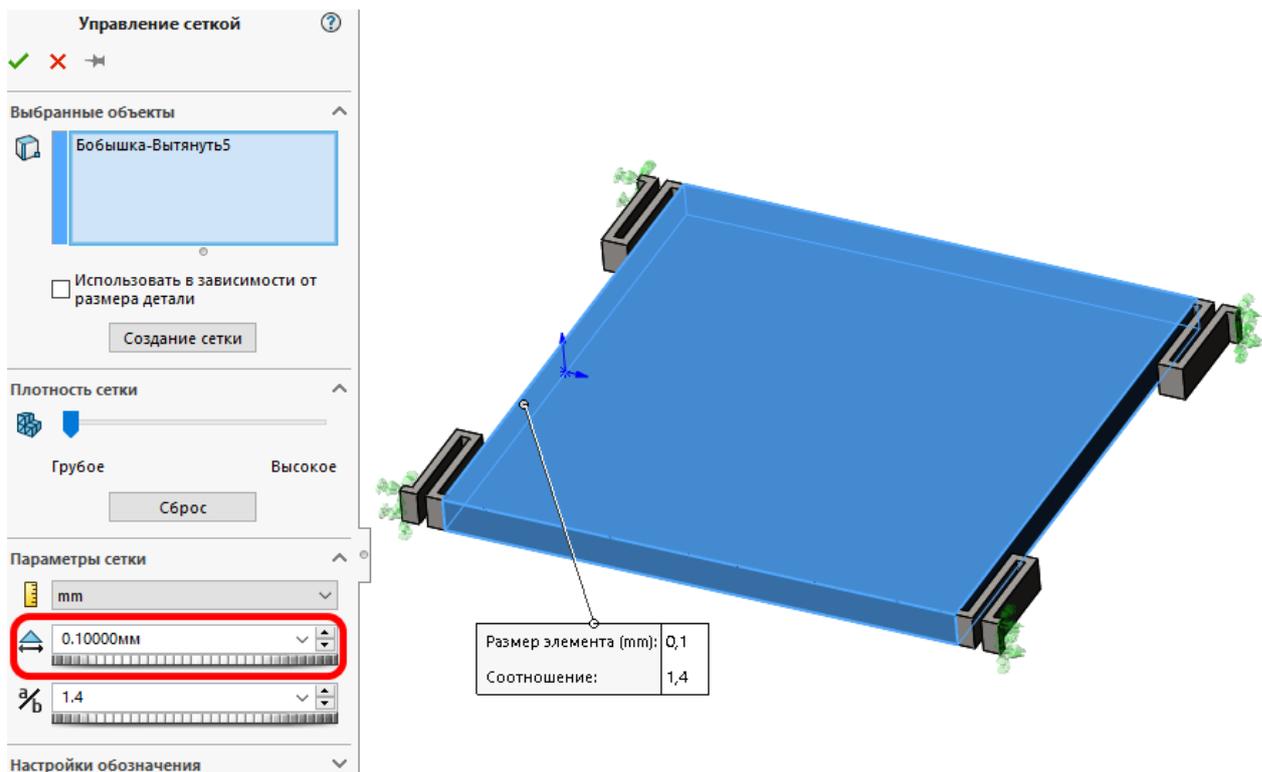


Рисунок 15 – Настройка размера КЭ для инерционной массы

Затем, в дереве анализа задачи, нажмите ПКМ на пункте Сетка и выберите Создать сетку. В появившемся окне, не изменяя никаких параметров нажмите на зелёную галочку. После этого будет создана КЭ сетка, рисунок 16.

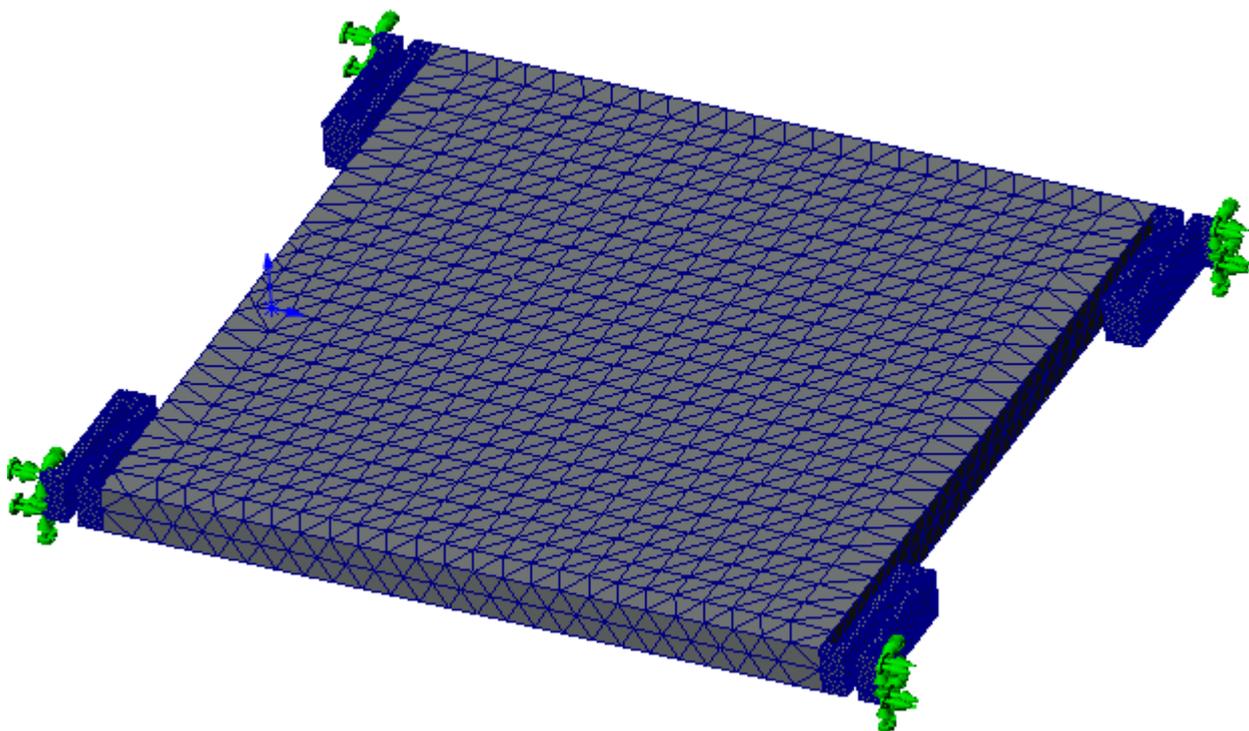


Рисунок 16 – 3D-модель инерционной массы с наложенной КЭ сеткой

После создания КЭ, необходимо на верхней панели выбрать «Запустить это исследование».

По итогам решения задачи будут определены первые четыре собственные частоты и формы колебаний инерционной массы однокомпонентного гироскопа (рисунок 17).

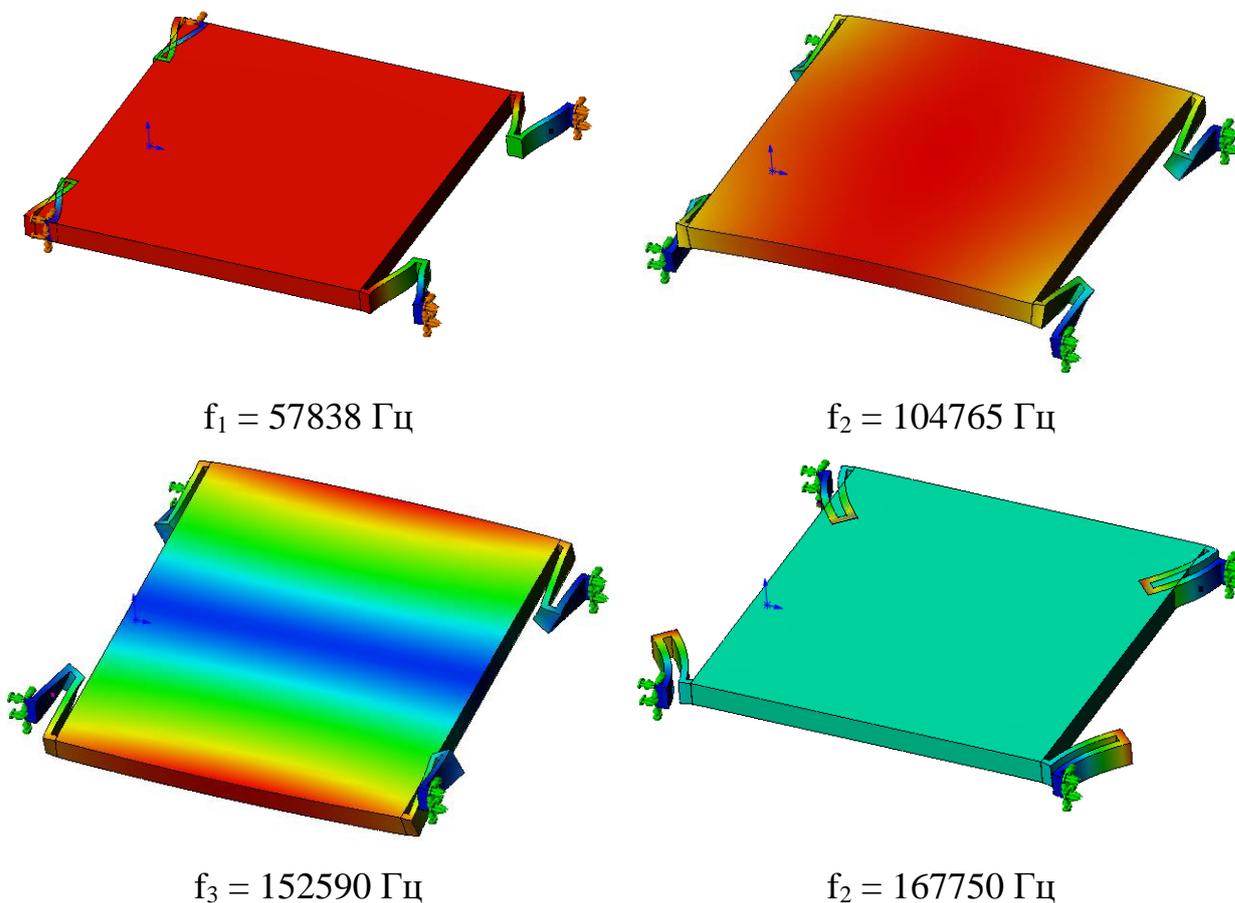


Рисунок 17 – Собственные частоты и формы колебаний инерционной массы гироскопа

При собственной частоте $f_1=57838 \text{ Гц}$, масса перемещается только вдоль оси чувствительности (согласно рисунку 1, это ось X). Эта форма колебаний данной массы возникает при детектировании угловой скорости вокруг оси Z. Остальные собственные частоты являются паразитными, и они должны лежать выше, чем частота f_1 . Если они будут лежать ниже или находиться рядом с частотой f_1 , то инерционное тело будет совершать другие формы колебаний и тем самым вносить погрешности в выходной сигнал гироскопа.

На следующем шаге, изменяя параметры упругого подвеса, необходимо добиться того, чтобы собственная частота f_1 стала равной 10000 ± 100 Гц, при этом последующие (паразитные) частоты должны лежать выше.

Для этого задайте следующие параметры: $B1 = 6$ мкм, $L1 = 235$ мкм. Так как ширина упругого подвеса стала равной 6 мкм, следовательно, необходимо уменьшить размер КЭ для упругих подвесов. Сделайте его равным 6 мкм или 0,003 мм. Для этого, в дереве задачи раскройте пункт Сетка – Управление сеткой и на пункте Управление для упругих подвесов нажмите ПКМ, в раскрывшемся списке выберите Редактировать определение. После создания сетки выполните новый расчёт задачи. Результаты представлены на рисунке 18.

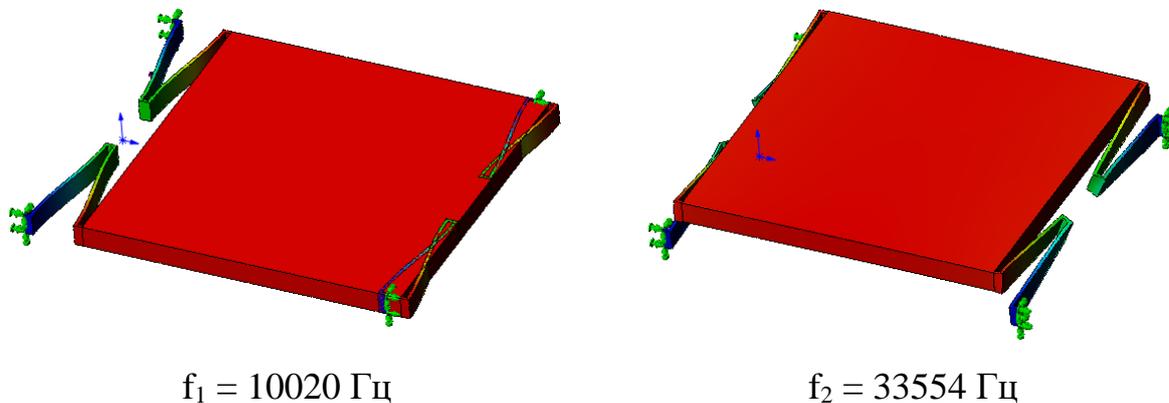
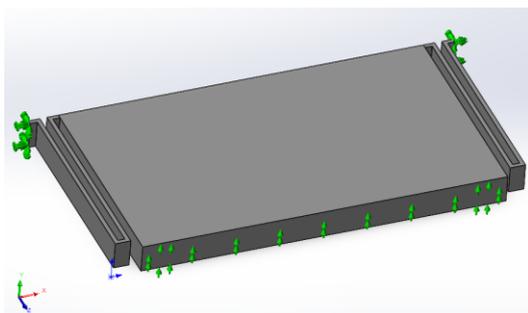


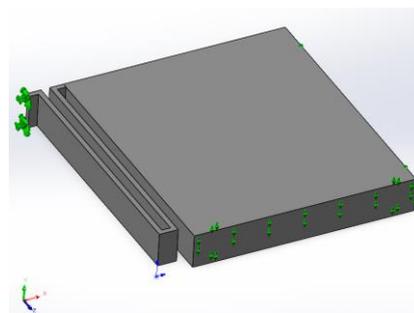
Рисунок 18 – Результаты частотного анализа

Таким образом, изменяя размеры упругого подвеса, подбирается требуемая собственная частота. Также, используя сгущение КЭ сетки только для упругих подвесов, уменьшается время, необходимое для расчёта, при этом повышается точность.

Так как конструкция инерционного тела симметрична, то можно определять собственные частоты только для её половины или четверти (рисунок 19).



а) Половина модели



б) Четверть модели

Рисунок 19 – 3D-модель инерционной массы

Для проведения КЭ анализа, необходимо выполнить те же настройки КЭ сетки, что и для полной модели и задать закрепления упругих элементов. В дополнение к этому, необходимо выполнить частичное закрепление граней с возможностью перемещения только вдоль оси чувствительности (соответствует наименьшей жёсткости упругого подвеса вдоль этой оси) (рисунок 18). Для того, чтобы это сделать, необходимо на верхней панели выбрать «Консультант по закреплениям → Дополнительные крепления» и сделать настройки согласно рисунка 20.

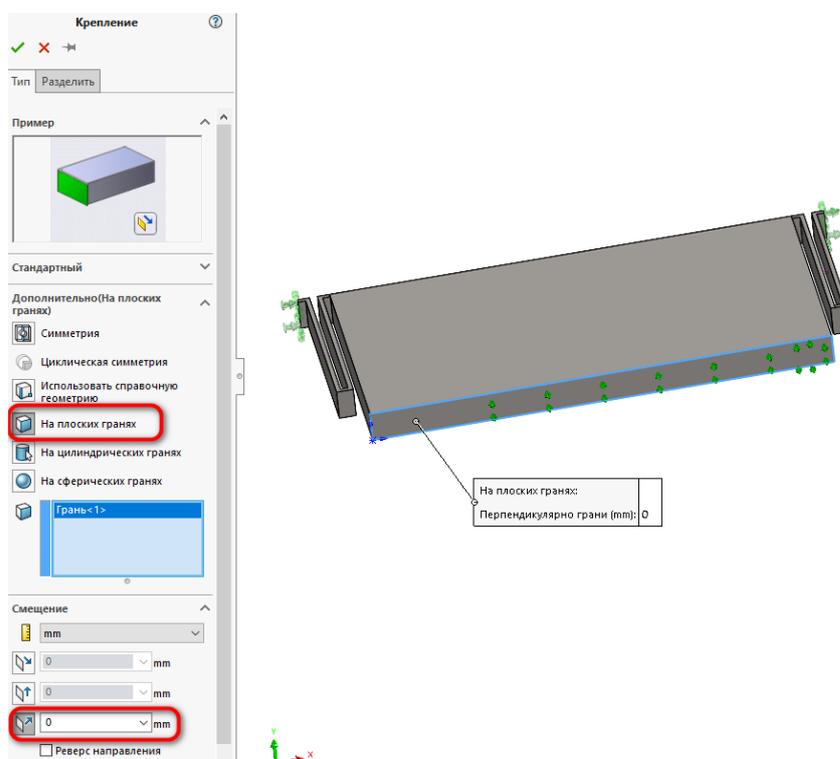


Рисунок 20 – Настройка крепления для задания симметрии

Результаты расчёта собственных частот для половины модели, рисунок 21.

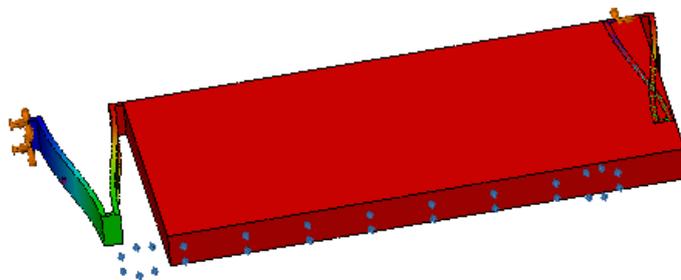


Рисунок 21 – Половина модели $f_1 = 10026$ Гц

Для четверти модели, для грани, указанной на рисунке 22 задайте закрепление аналогично настройкам, приведённым на рисунке 20.

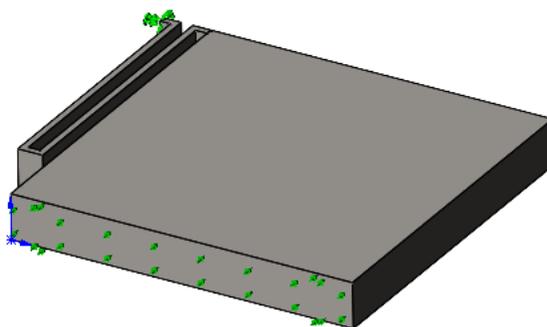


Рисунок 22 – Настройка крепления первой грани для задания симметрии

Настройте специальное крепление для второй грани модели, как показано на рисунке 23.

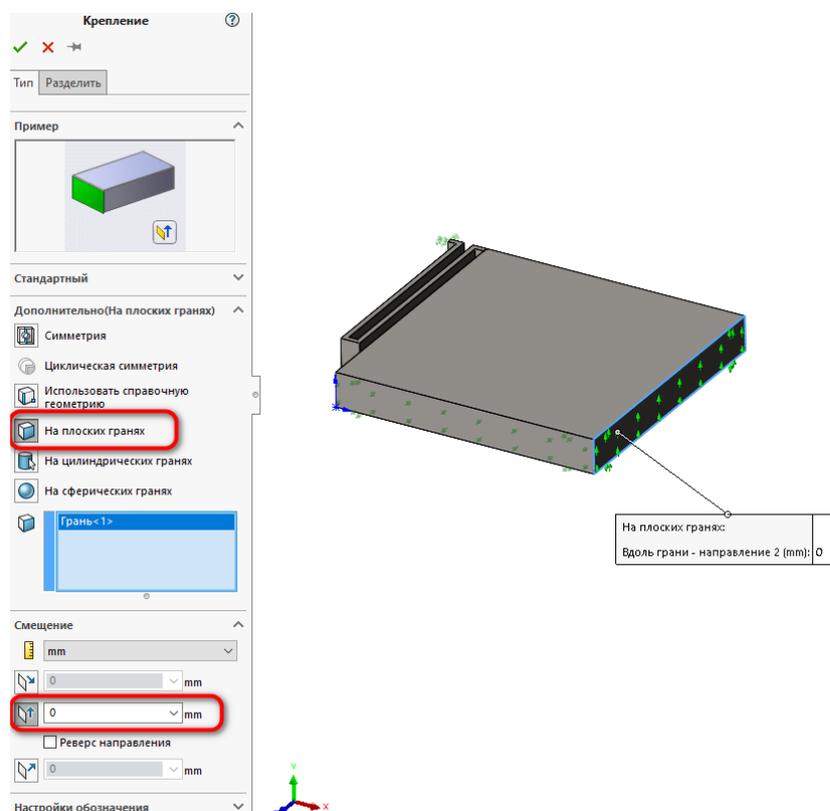


Рисунок 23 – Настройка крепления второй грани для задания симметрии

Результаты расчёта собственных частот для четверти модели, рисунок 24.

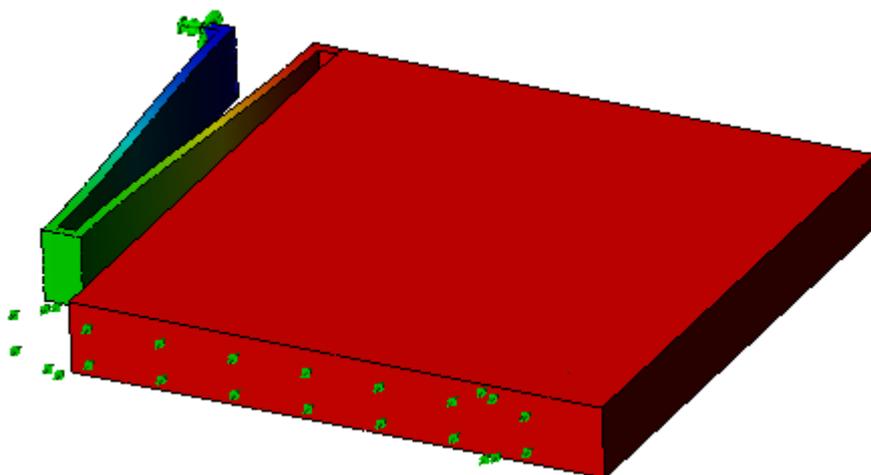


Рисунок 24 – Четверть модели $f_1 = 10064$ Гц

Таким образом, используя для расчёта только половину модели, количество КЭ элементов сократилось с 118889 (целая модель) до 62407 (половина модели), а для четверти модели до 35129, при этом результаты получились одинаковые.

После этого можно переходить к созданию внешней рамки на виде сверху. Постройте линии построения и обведите линиями изображения, как показано на рисунке 25.

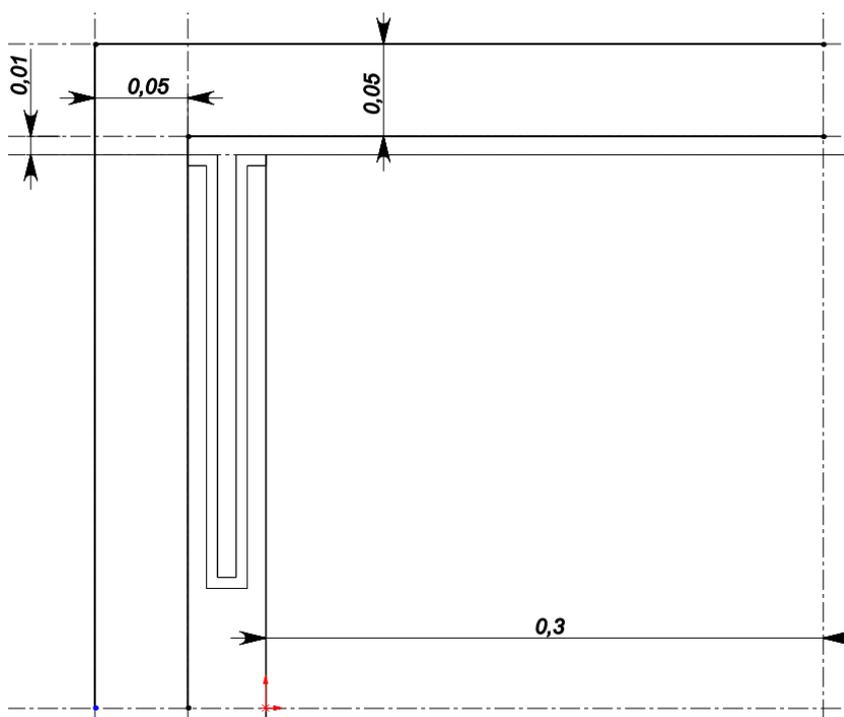


Рисунок 25 – Построение четверти наружной рамки

После этого создайте симметрию по двум плоскостям и выполните выталкивание на высоту Н (снимите галочку с пункта Объединить результаты), рисунок 26.

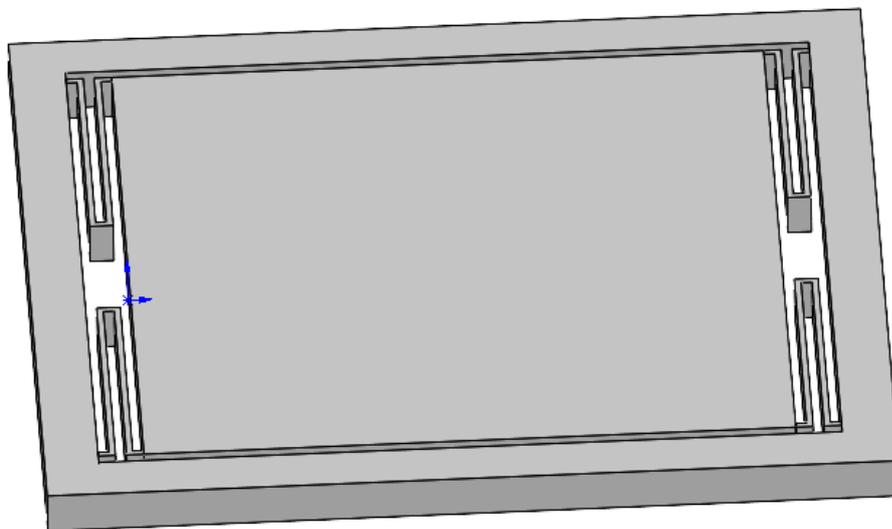


Рисунок 26 – 3D-модель с наружной рамкой

Далее начертите упругий подвес, с размерами, указанными на рисунке 27. Для задания ширины подвеса используйте параметр В2, а для задания длины подвеса используйте параметр L2.

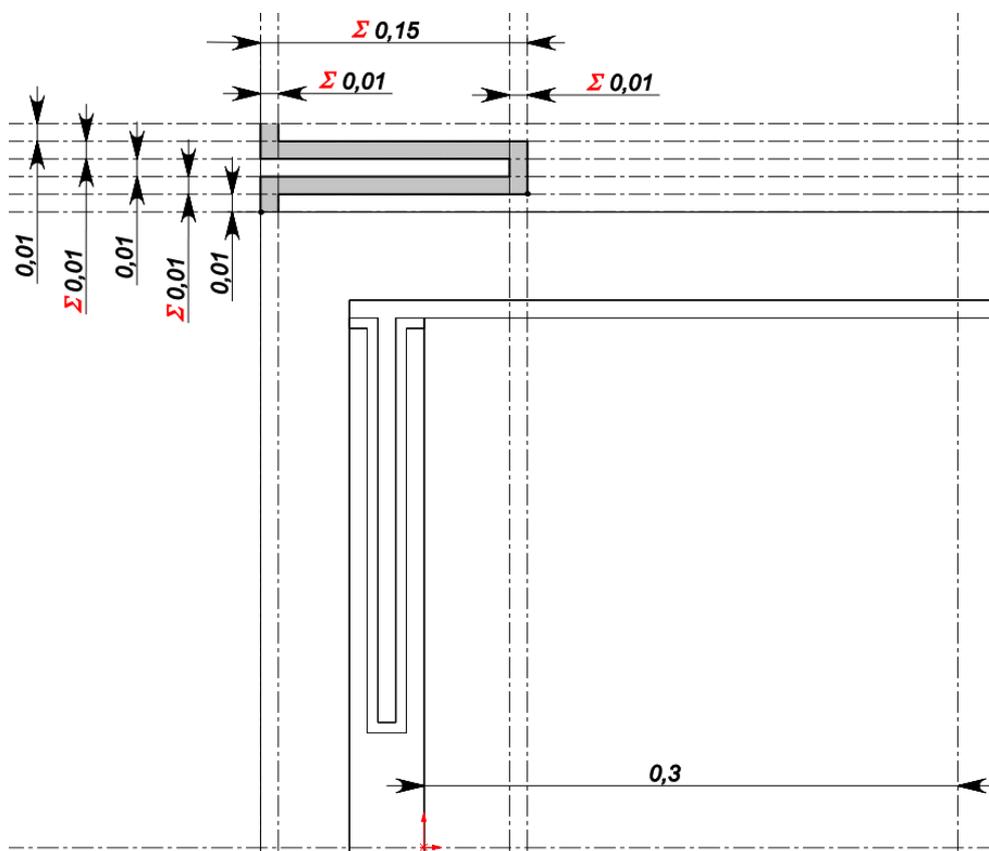


Рисунок 27 – Упругий подвес наружной рамки с размерами

Выделите все линии изображения, создайте две симметрии, после чего вытолкните упругие подвесы на высоту H (снимите галочку с пункта Объединить результаты), рисунок 28.

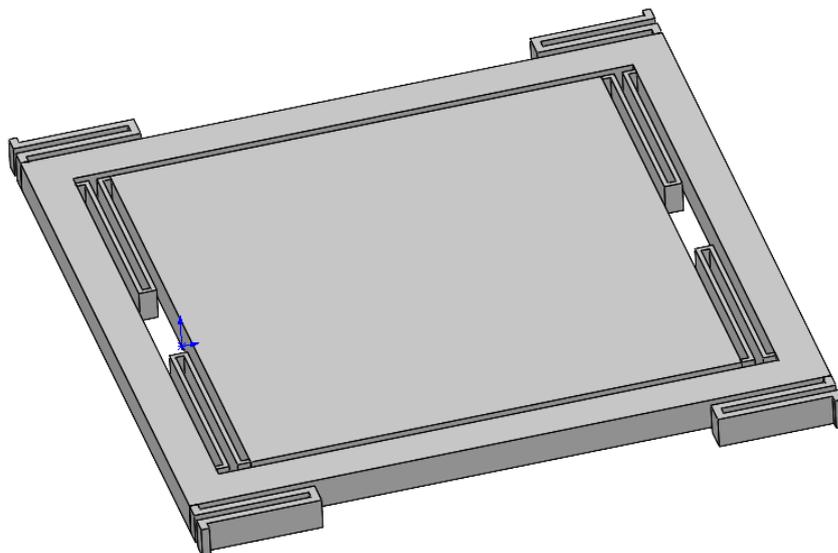


Рисунок 28 – 3D-модель однокомпонентного гироскопа

Примените к созданной модели материал кремний. Сформируйте КЭ сетку, согласно рекомендациям, данным выше (рисунок 29).

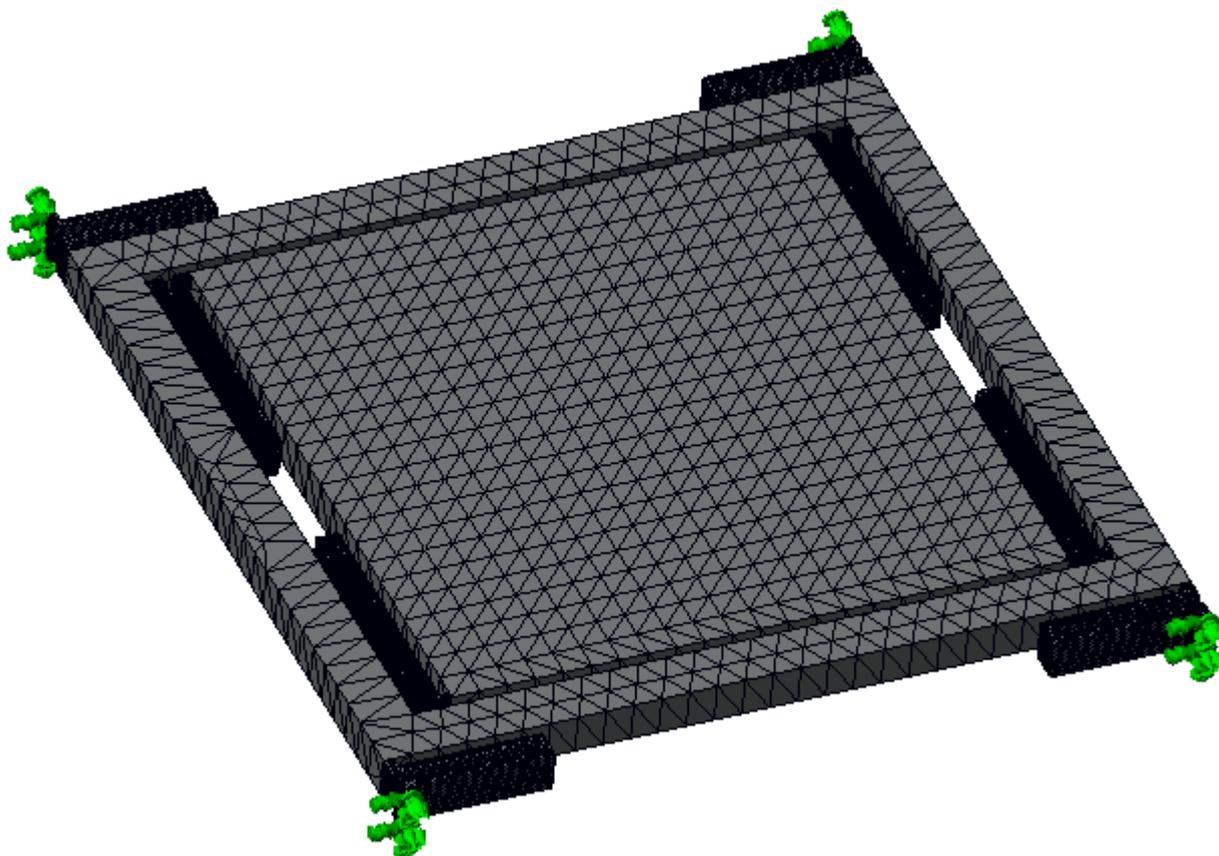


Рисунок 29 – 3D-модель с наложенной КЭ сеткой (КЭ = 154020)

Выполните расчёт задачи. Результаты представлены на рисунке 30.

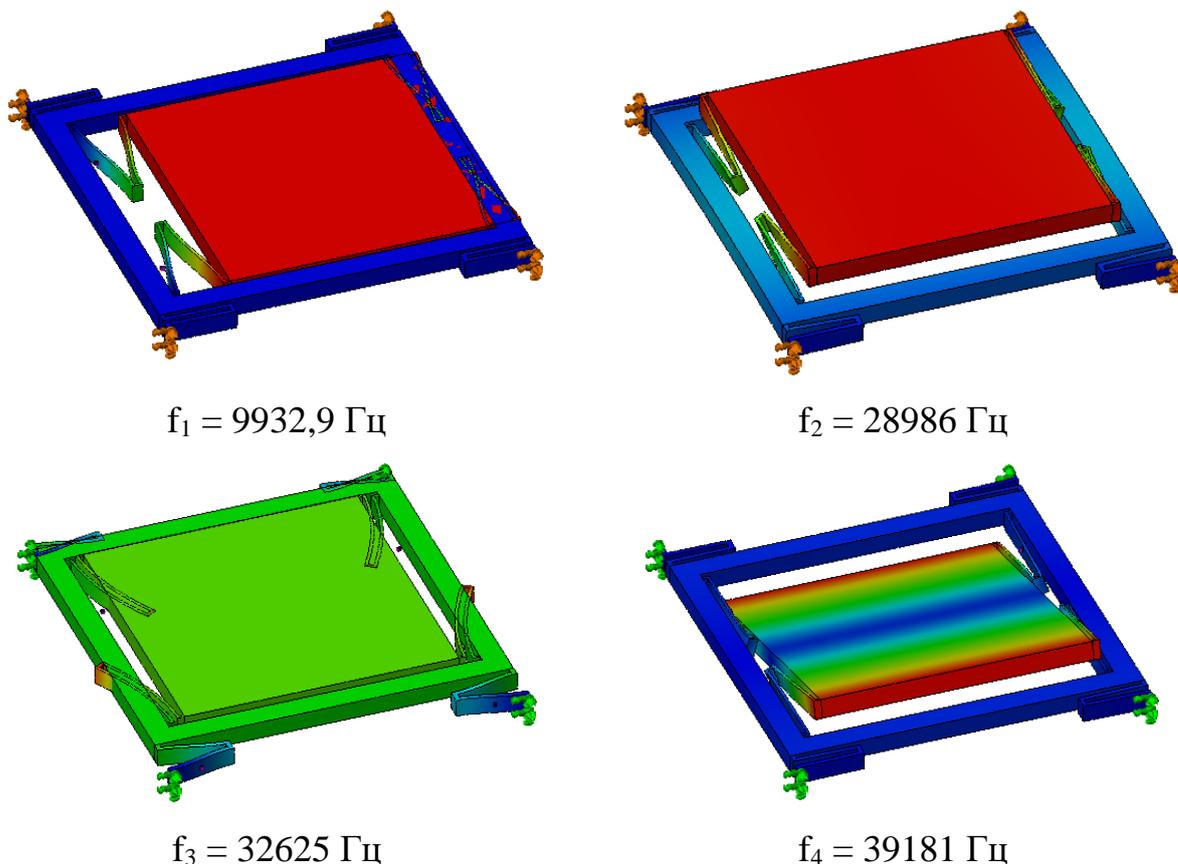
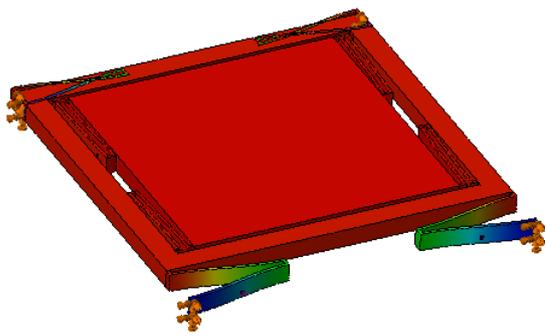


Рисунок 30 – Результаты КЭ анализа

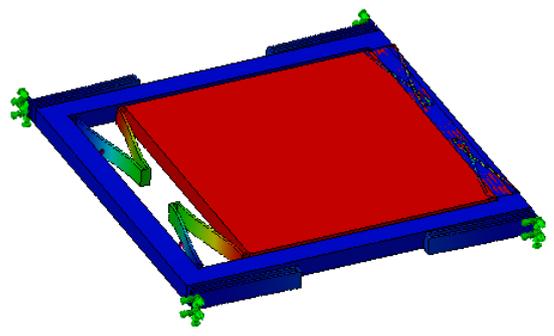
По результатам расчёта видно, что собственная частота f_1 внутренней рамки изменилась. Это связано с тем, что до конца невозможно просчитать, как ведёт себя упругий подвес. При расчёте только инерциальной массы, мы полностью закрепляли упругий подвес. При совместном расчёте инерциальной массы и наружной рамки, упругий подвес крепится к наружной рамке, а она в свою очередь может совершать перемещения. Это приводит к тому, что собственная частота инерционной массы меняется. Поэтому её необходимо скорректировать.

Также, собственная частота f_3 вдоль оси чувствительности существенно выше, чем 10000 Гц, поэтому необходимо, изменяя параметры упругого подвеса наружной рамки, снизить собственную частоту.

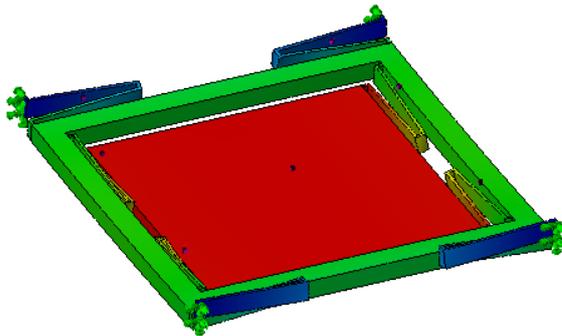
Измените параметры следующим образом: $L1 = 233 \text{ мкм}$, $B2 = 7 \text{ мкм}$, $L2 = 244 \text{ мкм}$. Обновите модель и выполните расчёт заново (рисунок 31).



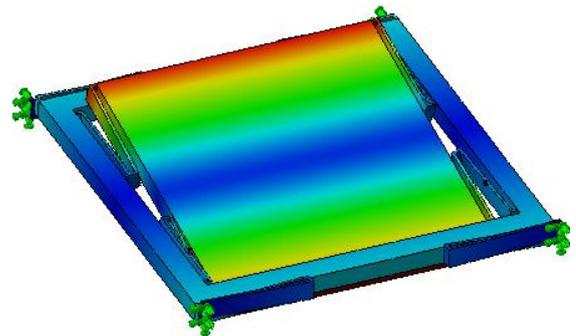
$$f_1 = 9985,3 \text{ Гц}$$



$$f_2 = 10012 \text{ Гц}$$



$$f_3 = 22832 \text{ Гц}$$

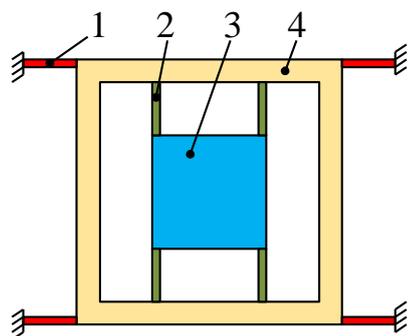


$$f_4 = 35405 \text{ Гц}$$

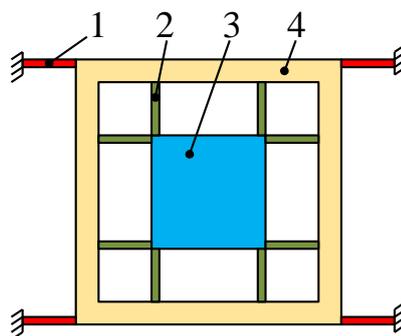
Рисунок 31 – Результаты КЭ анализа после изменения параметров

Как видно из результатов расчёта (рисунок 31), собственные частоты первичных колебаний находятся рядом с друг другом и близки к 10000 Гц, что полностью удовлетворяет поставленной в начале лабораторной работы задаче. Паразитные частоты f_3 и f_4 лежат выше собственных частот однокомпонентного гироскопа и тем самым не будут оказывать существенного влияния на выходной сигнал.

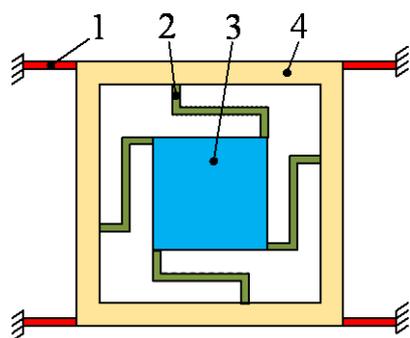
На рисунке 32 представлены схемы однокомпонентных гироскопов для самостоятельного подбора собственных частот.



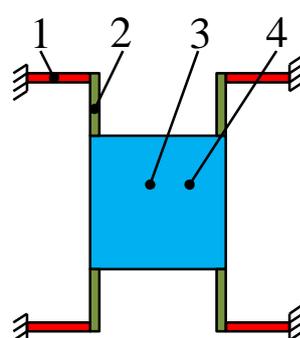
а) LL-тип



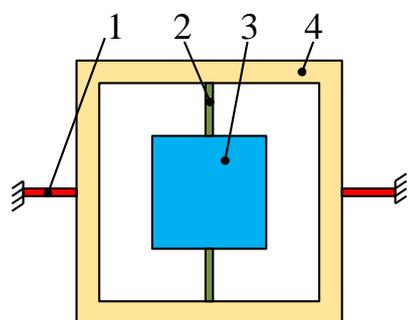
б) LL-тип



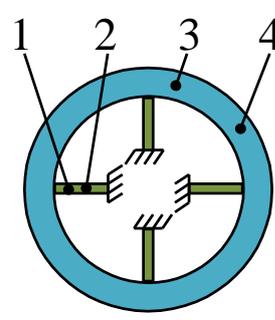
в) LL-тип



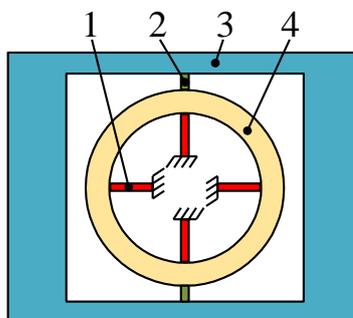
г) LL-тип



д) RR-тип



е) RR-тип



ж) RR-тип

Рисунок 32 – Схемы однокомпонентных ММГ

Цифрами на рисунке 32 обозначено: 1, 2 – упругий подвес; 3 – инерционное тело, 4 – рамка привода.

На рисунке 33 представлены типы упругих подвесов, используемых при проектировании однокомпонентных гироскопов, представленных на рисунке 32. В таблице 2 представлены варианты заданий.

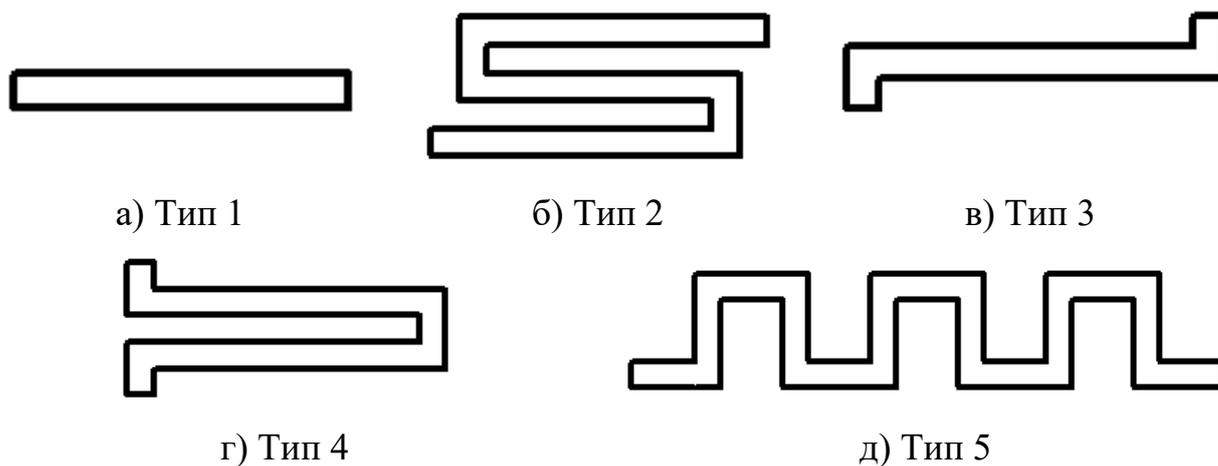


Рисунок 33 – Типы подвесов, используемых при проектировании гироскопов

Таблица 2 – Варианты заданий

№	Тип гироскопа (рисунок 32)	Тип УП 1 (рисунок 33)	Тип УП 2 (рисунок 33)	$f_1, f_2, \text{Гц}$	Отклонение, Гц
1	а	а	а	12000	± 100
2	а	а	б	9000	± 100
3	а	г	д	15000	± 100
4	а	д	а	7000	± 100
5	а	в	г	10000	± 100
6	б	а	г	15000	± 100
7	б	д	б	8000	± 100
8	б	д	г	10000	± 100
9	б	а	а	11000	± 100
10	в	в	г	5000	± 100
11	в	д	б	6000	± 100
12	в	а	д	9000	± 100

Продолжение таблицы 2.

№	Тип гироскопа (рисунок 32)	Тип УП 1 (рисунок 33)	Тип УП 2 (рисунок 33)	f_1, f_2 , Гц	Отклонение, Гц
13	г	а	а	3000	± 100
14	д	д	а	14000	± 100
15	д	а	д	18000	± 100
16	е	а		10000	± 100
17	е	д		14000	± 100
18	ж	а	а	12000	± 100
19	ж	д	а	19000	± 100
20	ж	б	а	16000	± 100
21	а	б	а	10000	± 100
22	б	д	в	9000	± 100

Задание:

1. Согласно выданному варианту (таблица 2), выбрать из рисунков 32 и 33 схему гироскопа и необходимые типы упругих подвесов.

2. Построить 3D-модель однокомпонентного гироскопа и подобрать собственные частоты согласно выданному варианту, используя модуль Simulation программы SolidWorks.

3. Высота всех элементов конструкции должна быть равна 40 мкм. Максимальные габариты конструкции должны быть не более, чем (1000x1000) мкм.

Содержание отчёта:

1. Цель.
2. Вариант задания.
3. 3D-модель гироскопа.
4. Эскизный чертёж гироскопа формата А4 с размерами, достаточными для воспроизведения конструкции.
5. 3D-модель гироскопа с наложенной КЭ сеткой.

6. Первые 3 собственные частоты и рисунки соответствующих им форм колебаний гироскопа.

7. Выводы.

8.

Литература

1. Руководство для учащихся по изучению программного обеспечения SolidWorks [Электронный ресурс]. - Режим доступа:

https://www.solidworks.com/sw/docs/student_wb_2011_rus.pdf (Дата обращения 30.05.2021).

2. Дмитрий Зиновьев. Основы моделирования в SolidWorks. Практическое руководство по освоению программы SolidWorks в кратчайшие сроки.

3. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи. – СПб.,: БХВ-Петербург, 2012. – 448 с.: ил.

4. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 562 с.: ил.

5. Лабораторная работа № 1. Параметрическое моделирование упругих элементов микромеханических систем в SolidWorks. Методическое указание по выполнению лабораторной работы по курсу «Проектирование сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники».