



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ

Информатика и системы управления

КАФЕДРА ИУ2

Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

по курсу

«РАСЧЁТ И СИНТЕЗ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ НА ЭВМ»

модуль ANSYS

Студент группы ИУ2-81

(подпись, дата)

Давыдов Д.А.

(И.О. Фамилия)

Студент группы ИУ2-81

(подпись, дата)

Люльченко А.С.

(И.О. Фамилия)

Студент группы ИУ2-81

(подпись, дата)

Сочнев М.В.

(И.О. Фамилия)

Преподаватель

(подпись, дата)

Малыхин Д.А.

(И.О. Фамилия)

Оценка _____

Москва, 2026 г.

Содержание

1	Цель работы	2
2	Конструкция	2
3	Принцип работы	3
4	Материалы	4
5	Введение в метод конечных элементов	4
6	Критерий Мизеса	5
7	Структура проекта в ANSYS WORKBENCH	7
8	Модальный анализ	10
9	Вывод	21
10	Статический структурный анализ (Static Structural)	22
11	Переходной структурный анализ (Transient Structural)	44
12	Определение жесткости упругих элементов	57
13	Список использованных источников	61

1 Цель работы

1. Изучить метод конечных элементов, реализованный в ANSYS.
2. Провести модальный, статический и переходный структурный анализ чувствительного элемента акселерометра.
3. Определить собственные частоты, запасы прочности и жёсткость упругого подвеса.

Объект исследования: Маятниковый узел кварцевого компенсационного акселерометра Q-flex с дифференциальным плунжерным датчиком (материалы: кварц КУ-1, сплав АМгб, медная обмотка).

2 Конструкция

Типичная конструкция чувствительного элемента с магнитной системой кварцевого маятникового компенсационного акселерометра показана на рисунке 1.

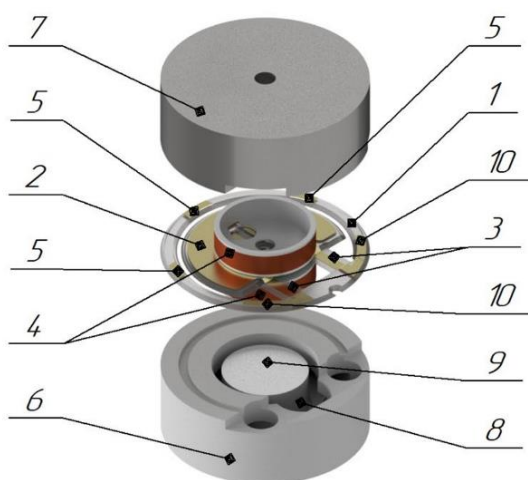


Рис. 1. Чувствительный элемент акселерометра с магнитной системой

Маятниковый узел состоит из рамки 1 с установочными платиками 5, расположенными симметрично снизу и сверху, и подвижной лопасти 2 с закрепленными на ней по обе стороны катушками 4 плунжерного датчика силы (датчика момента). Подвижная лопасть 2 крепится к рамке 1 с помощью упругих перемычек 3. Рамка 1 зажимается между двумя магнитопроводами 6,7 таким образом, что платики 5 формируют зазоры 20мкм емкостного датчика угла (неподвижными электродами которого являются плоскости магнитопроводов

6,7, обращенные к маятнику, а подвижными – напыленные с двух сторон на лопасть 2 золотые электроды), а также плоский газовый демпфер. Соединение подвижных электродов емкостного датчика угла и последовательно соединенных катушек 4 плунжерного датчика силы с электрическими цепями усилителя происходит через токоподводы, напыленные симметрично с двух сторон на упругие перемычки 3 и контактные площадки 10, напыленные на рамке 1. Магнитная система плунжерного датчика силы состоит из нижнего и верхнего магнитопроводов 6,7 и постоянных магнитов 8 с полюсными наконечниками 9.

3 Принцип работы

Принцип работы кварцевого маятникового акселерометра компенсационного типа заключается в уравнивании инерционной силы, действующей вдоль измерительной оси, компенсационной силой плунжерного датчика силы. При этом система регулирования при внешних воздействиях удерживает маятник в нулевом положении относительно обкладок емкостного датчика угла, а ток в катушках плунжерного датчика силы пропорционален измеряемому ускорению.

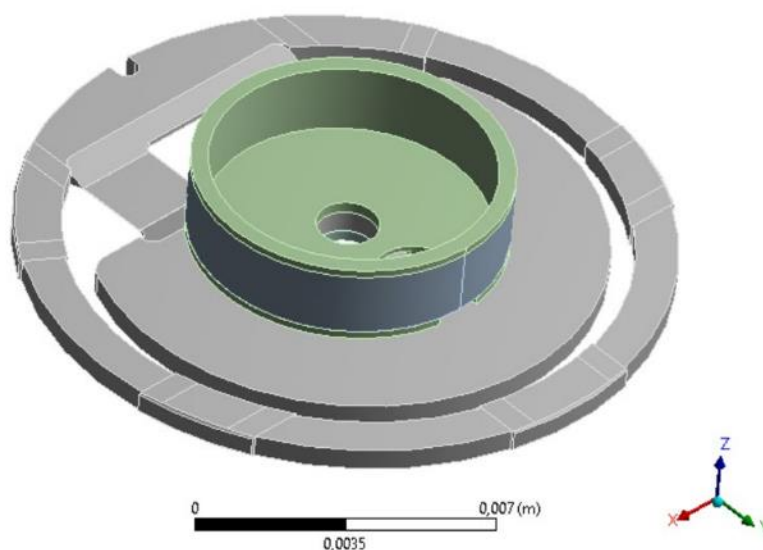


Рис. 2. Маятниковый узел акселерометра (ось X – ось подвеса, ось Y – ось маятника, ось Z – измерительная ось)

4 Материалы

Таблица 1 — Кварцевое стекло КУ-1 (маятник акселерометра)

Параметр	Значение	Единицы измерения
Плотность	2,21	г/см ³
<i>Изотропная эластичность</i>		
Модуль Юнга	$7,36 \cdot 10^{10}$	Па
Коэффициент Пуассона	0,19	—

Таблица 2 — Медная катушка

Параметр	Значение	Единицы измерения
Плотность	4,412	г/см ³
<i>Изотропная эластичность</i>		
Модуль Юнга	$1,1 \cdot 10^{11}$	Па
Коэффициент Пуассона	0,34	—

Примечание: плотность меди изменена с учётом особенностей конструкции катушки.

Таблица 3 — АМg6 (каркас катушек)

Параметр	Значение	Единицы измерения
Плотность	2,64	г/см ³
<i>Изотропная эластичность</i>		
Модуль Юнга	$7,1 \cdot 10^{10}$	Па
Коэффициент Пуассона	0,3	—

5 Введение в метод конечных элементов

Метод конечных элементов (МКЭ) — это универсальный численный подход, применяемый для приближенного решения краевых и начально-краевых задач, возникающих в математической физике, механике, инженерии и других областях [1]. Суть метода заключается в том, что сложная область, в которой ищется решение дифференциального уравнения, разбивается на простые подобласти — конечные элементы (например, треугольники или прямоугольники в двумерном случае). На каждом элементе искомая функция аппроксимируется сравнительно простым выражением (чаще всего — полиномом), а затем эти локальные аппроксимации «сшиваются» так,

чтобы обеспечить непрерывность решения и его производных на границах элементов.

Основная идея метода:

1. Дискретизация области: Исходная область разбивается на конечное число непересекающихся элементов простой формы.
2. Выбор базисных функций: На каждом элементе задаются специальные функции (базисные), которые отличны от нуля только внутри одного или нескольких соседних элементов. Это обеспечивает «разреженность» итоговой системы уравнений.
3. Формулировка задачи в слабой (интегральной) форме: Дифференциальное уравнение преобразуется к интегральному тождеству (например, по методу Галеркина или Ритца).
4. Построение системы алгебраических уравнений: Подстановка разложения решения по базисным функциям в интегральное тождество приводит к системе линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов.
5. Решение системы и анализ результата: Полученная система решается численно, а итоговое приближённое решение строится как сумма базисных функций с найденными коэффициентами.

Область применения: уравнения теории упругости и механики деформируемого твёрдого тела, задач теплопроводности и диффузии, гидродинамики и задач фильтрации, электромагнитных полей, задач строительной механики, расчёта конструкций и сооружений.

Преимущества МКЭ: возможность работы с областями сложной геометрии, гибкость в выборе типа и порядка аппроксимации, эффективность при реализации на ЭВМ благодаря разреженности матриц, хорошо развитая теория сходимости и оценки погрешности.

6 Критерий Мизеса

Метод расчета по Мизесу, или критерий Мизеса — это один из классических подходов, используемых в механике деформируемого твердого тела для оценки прочности и наступления пластического состояния материала

при сложном напряженном состоянии. В инженерной практике этот критерий широко применяется для расчета на прочность и пластичность элементов конструкций, подверженных действию нескольких главных напряжений.

Физическая суть метода: основная идея критерия Мизеса заключается в том, что опасное (пластическое) состояние материала наступает тогда, когда удельная потенциальная энергия формоизменения достигает своего предельного значения, определяемого из опытов на простое растяжение. Это позволяет свести сложное напряженное состояние к эквивалентному одноосному растяжению, для которого и проводится сравнение с допускаемым напряжением.

Эквивалентное напряжение по Мизесу:

В рамках теории Мизеса эквивалентное напряжение определяется по формуле:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]},$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — главные напряжения.

Условие прочности (или отсутствия пластических деформаций) записывается как:

$$\sigma_{\text{экв}} \leq [\sigma]$$

где $[\sigma]$ — допускаемое напряжение, определяемое из опытов на растяжение.

Область применения: критерий Мизеса рекомендуется использовать для пластичных материалов, одинаково работающих на растяжение и сжатие. Он хорошо подтверждается экспериментально для большинства конструкционных сталей и широко применяется в инженерных расчетах, поскольку позволяет учесть совместное влияние всех компонент тензора напряжений.

7 Структура проекта в ANSYS WORKBENCH

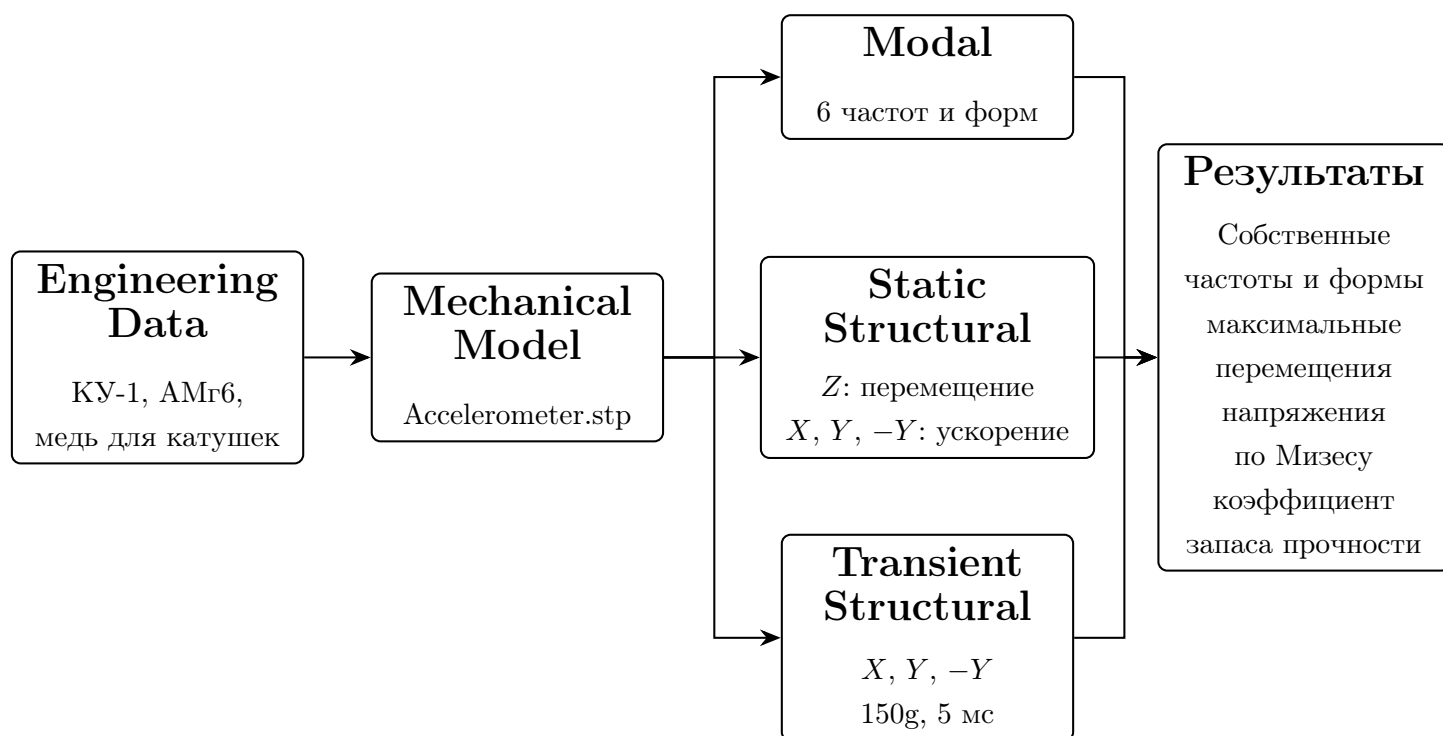


Рис. 1. Структура расчетного проекта ANSYS Workbench

1. Общая характеристика схемы

Представленная схема описывает иерархический рабочий процесс численного моделирования. Проект построен по принципу единого источника данных: геометрия и сетка подготавливаются один раз, после чего транслируются в серию независимых или связанных расчетных сценариев.

2. Описание ключевых компонентов

Схема разделена на функциональные блоки, каждый из которых выполняет определенную роль в цепочке моделирования:

Название ячейки

Функциональное назначение

Engineering Data

База данных материалов. Определяет физико-механические свойства (упругость, прочность, теплопроводность).

Geometry Импортированная или созданная CAD-модель объекта исследования.

Model (Mesh) Генерация конечно-элементной сетки. Определяет точность и детализацию всего последующего расчета.

Setup Препроцессор: задание граничных условий, нагрузок (силы, давление) и настроек решателя.

Solution Вычислительный этап: запуск математических алгоритмов для поиска неизвестных параметров.

Результаты. Постпроцессор: извлечение данных, построение эпюр напряжений, деформаций и коэффициентов запаса.

3. Архитектура связей

3.1. Общая архитектура проекта

Проект реализован по модульному принципу с централизованной подготовкой данных. Это позволяет использовать единую конечно-элементную сетку для всех видов анализа, что исключает математические погрешности при сравнении результатов.

3.2. Подготовительные модули (Препроцессор)

Блок А: Engineering Data

- Функция: Определение физико-механических свойств материалов.
- Состав: Заданы параметры плотности, модуля Юнга и коэффициента Пуассона для трех материалов:
 - о Кварцевое стекло КУ-1 (подвижная лопасть и перемычки);
 - о Сплав АМг6 (каркас катушек);
 - о Медная обмотка

Блок В: Mechanical Model

- Функция: Подготовка расчетной геометрии и создание сетки.
- Особенности:
 - о Выполнен импорт CAD-модели в формате .stp.

- о Настроены контакты типа Bonded (жесткое соединение).
- задан размер элементов $1 \cdot 10^{-4}$ м для максимальной точности в зоне деформаций, для остального корпуса — $3 \cdot 10^{-4}$ м.
- о Создана неоднородная сетка (Sizing): для упругих перемычек

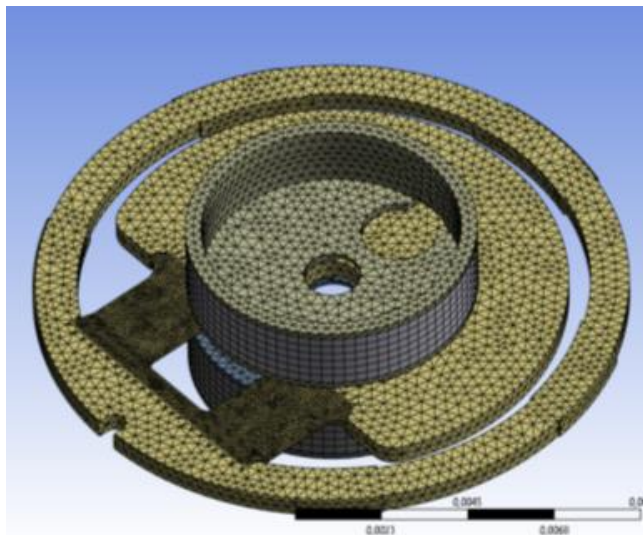


Рис. 4. Конечно-элементная сетка маятникового узла акселерометра

3.3. Аналитические модули

Блок С: Modal

- Цель: Определение динамических характеристик.
- Параметры: Настроен поиск первых 6 собственных частот
- Результат: Формы колебаний, чтобы убедиться, что акселерометр не попадет в резонанс при работе в диапазоне до 2000 Гц.

Блоки D, F, H, J: Static Structural

- Цель: Проверка прочности при постоянных нагрузках и расчет жесткости.
- Сценарии нагружения:
 - о Ось Z: Задано перемещение 20 мкм (имитация касания упоров).
 - о Оси X и Y: Приложены ускорения согласно варианту задания.
- Результаты: Эквивалентные напряжения по Мизесу и определение коэффициента запаса прочности.

Блоки E, G, I: Transient Structural

- Цель: Анализ реакции на ударное воздействие.
- Параметры: Моделируется удар импульсом 5 мс с амплитудой в зависимости от варианта.
- Настройка: Шаг интегрирования по времени задан жестко ($5 \cdot 10^{-5}$ с) для корректного описания волновых процессов в перемычках.

Блок K: Static Structural

- Цель: Определить жесткость упругих элементов подвеса.
- Сценарии нагружения: Приложен крутящий момент величиной $1 \cdot 10^{-6}$ Н·м.
- Результаты: Эквивалентные напряжения по Мизесу и определение жесткости упругих элементов подвеса.

8 Модальный анализ

Граничные условия: Закрепление по поверхностям установочных платиков (Fixed Support).

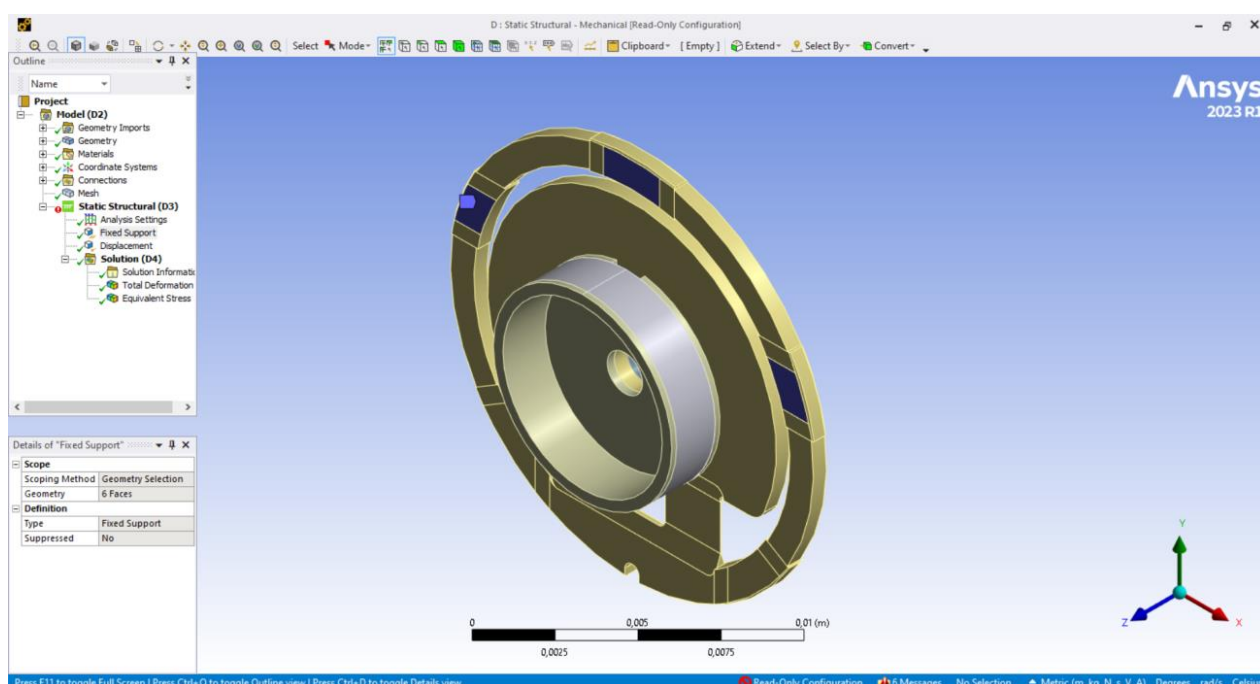


Рис. 5. Закрепление конструкции для выполнения модального анализа

Результаты первых шести собственных частот (Гц):

Мода Частота, Гц

1 19,191 Гц

2 161,78 Гц

3 376,42 Гц

4 2505,3 Гц

5 3268,9 Гц

6 8905,6 Гц

Формы колебаний:

Мода 1:

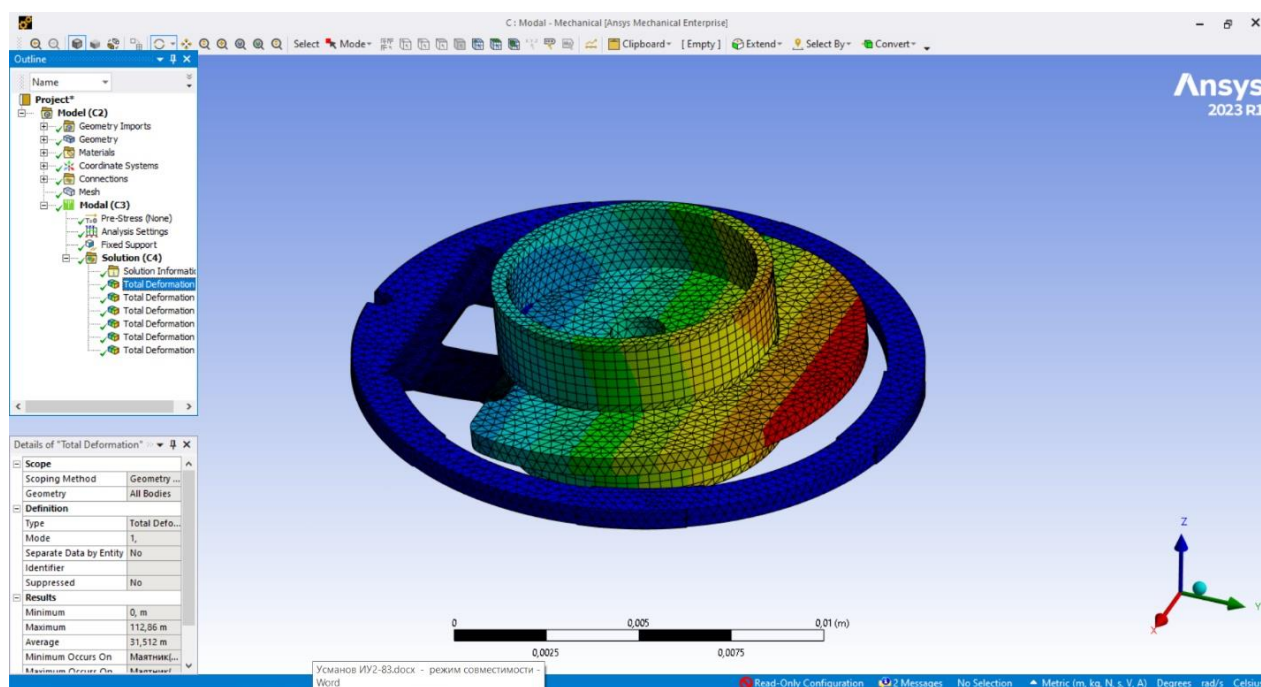


Рис. 6. Первая форма колебаний

1. Физическая интерпретация формы

Первая мода колебаний является основной расчетной (рабочей) формой акселерометра. Она характеризует движение инерционной массы относительно измерительной оси.

- Характер движения: Наблюдается чистый поворот (изгиб) подвижной лопасти маятника вокруг оси, проходящей через упругие торсионы. Это движение соответствует штатному режиму работы прибора при восприятии

ускорения.

- Распределение зон: Зоны максимальных амплитуд сосредоточены на свободном крае маятника (красный спектр), что подтверждает функциональную предназначенность подвеса к деформации в данном направлении.
- Узловые зоны: Внешнее опорное кольцо остается неподвижным (темно-синий цвет), что подтверждает корректность закрепления модели по основанию.

2. Анализ расчетной частоты

Значение частоты 19,191 Гц определяет динамический предел чувствительности системы:

- Жесткость подвеса: Относительно низкое значение первой частоты указывает на высокую податливость упругих перемычек. Это обеспечивает высокую чувствительность прибора к малым ускорениям, но накладывает ограничения на эксплуатацию в условиях интенсивных низкочастотных вибраций.
- Конструктивное соответствие: Характер формы и частота подтверждают, что торсионы являются наиболее гибким элементом системы, и расчетная схема верно передает физику маятникового подвеса.

3. Выводы

Первая мода является рабочей и соответствует техническому назначению устройства. Низкая частота (19,191 Гц) свидетельствует о мягком подвесе, ориентированном на измерение статических или медленно меняющихся ускорений.

Мода 2:

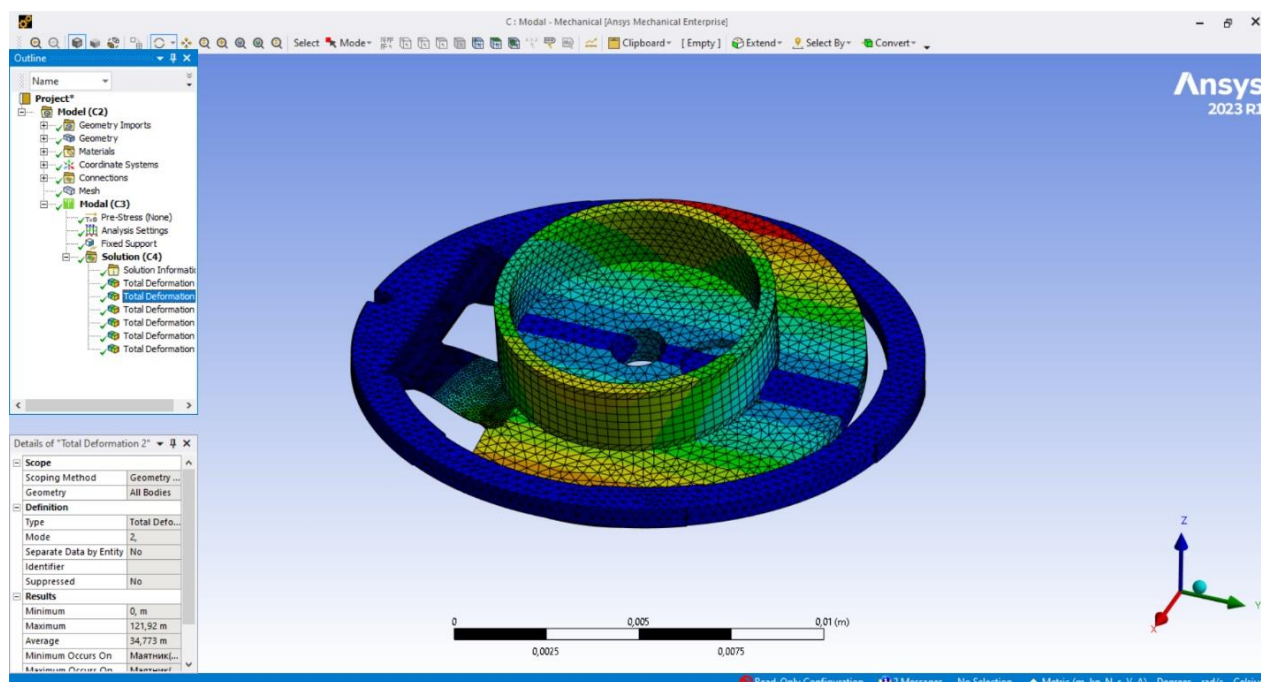


Рис. 7. Вторая форма колебаний

1. Физическая интерпретация формы

Вторая мода колебаний классифицируется как форма, характеризующаяся потерей плоскопараллельного движения маятника.

- Характер движения: Наблюдается наклон подвижной части в сторону, перпендикулярную основной измерительной оси. Это движение сопровождается сложным изгибом упругих перемычек (торсионов).
- Распределение зон: Области максимальных амплитуд (красный спектр) смещены к боковым краям лопасти, что указывает на перекося конструкции относительно плоскости подвеса.
- Узловые зоны: Внешняя рамка сохраняет стабильное положение (темно-синий цвет), подтверждая отсутствие влияния паразитных вибраций на узлы крепления прибора.

2. Анализ расчетной частоты

Значение частоты 161,78 Гц позволяет оценить конструктивную устойчивость системы:

- Частотный разнос: Разница между первой (19,191 Гц) и второй модой

составляет более чем 8-кратный запас. Это является положительным показателем, так как минимизирует вероятность наложения паразитных колебаний на полезный сигнал в рабочем диапазоне.

- Внеосевая жесткость: Относительно высокое значение частоты (по сравнению с первой модой) свидетельствует о том, что конструкция обладает достаточной жесткостью к воздействию боковых ускорений и вибраций.

3. Выводы

Вторая мода входит в рабочий диапазон, но не соответствует основному режиму работы акселерометра и соответствует физической модели прибора. Частотный разрыв между первой и второй модами подтверждает правильность выбора геометрии упругих элементов, обеспечивающей преимущественное перемещение маятника по измерительной оси.

Мода 3:

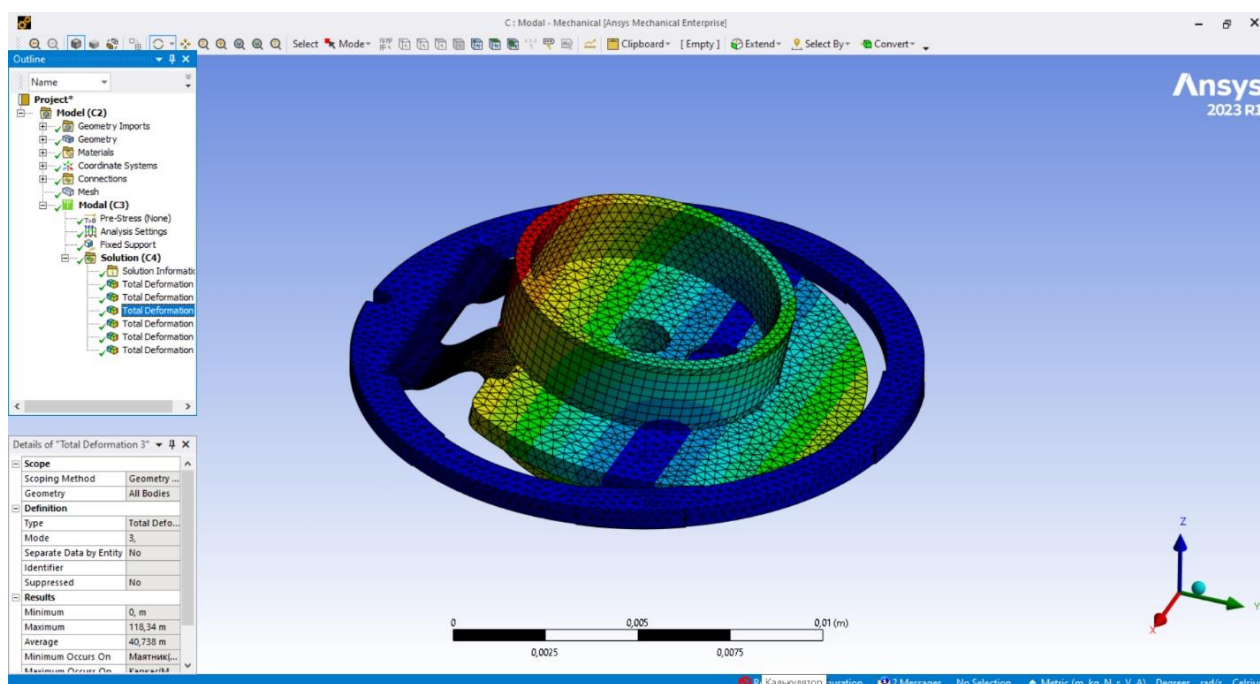


Рис. 8. Третья форма колебаний

1. Физическая интерпретация формы

Третья мода колебаний классифицируется как высокочастотная форма, связанная с потерей устойчивости маятника в плоскости подвеса.

- Характер движения: Наблюдается сложный наклон подвижной части (втулки и лопасти) относительно продольной оси. В отличие от первых двух мод, здесь деформация охватывает не только торсионы, но и приводит к заметному смещению центра масс чувствительного элемента в пространстве.
- Узловые зоны: Внешнее кольцо сохраняет полную неподвижность (темно-синий цвет), что подтверждает отсутствие передачи высокочастотной вибрации на корпус прибора через узлы крепления.

2. Анализ расчетной частоты

Значение частоты 376,42 Гц характеризует общую динамическую жесткость конструкции:

- Сравнение с рабочим диапазоном: Частота третьей моды более чем в 19 раз превышает рабочую частоту (19,191 Гц). Такой значительный разнос указывает на высокую конструктивную надежность и исключает влияние данной моды на точность статических измерений.
- Жесткость торсионов: Частота 376,42 Гц отражает высокую сопротивляемость перемычек к сложным комбинированным нагрузкам (изгиб с кручением в нерабочих плоскостях).

3. Выводы

Третья мода входит в рабочий диапазон, но не соответствует основному режиму работы акселерометра и соответствует физической модели прибора. Полученное значение частоты (376,42 Гц) и характер распределения деформаций подтверждают большой запас динамической жесткости прибора. Конструкция демонстрирует стабильность к сложным пространственным колебаниям.

Мода 4:

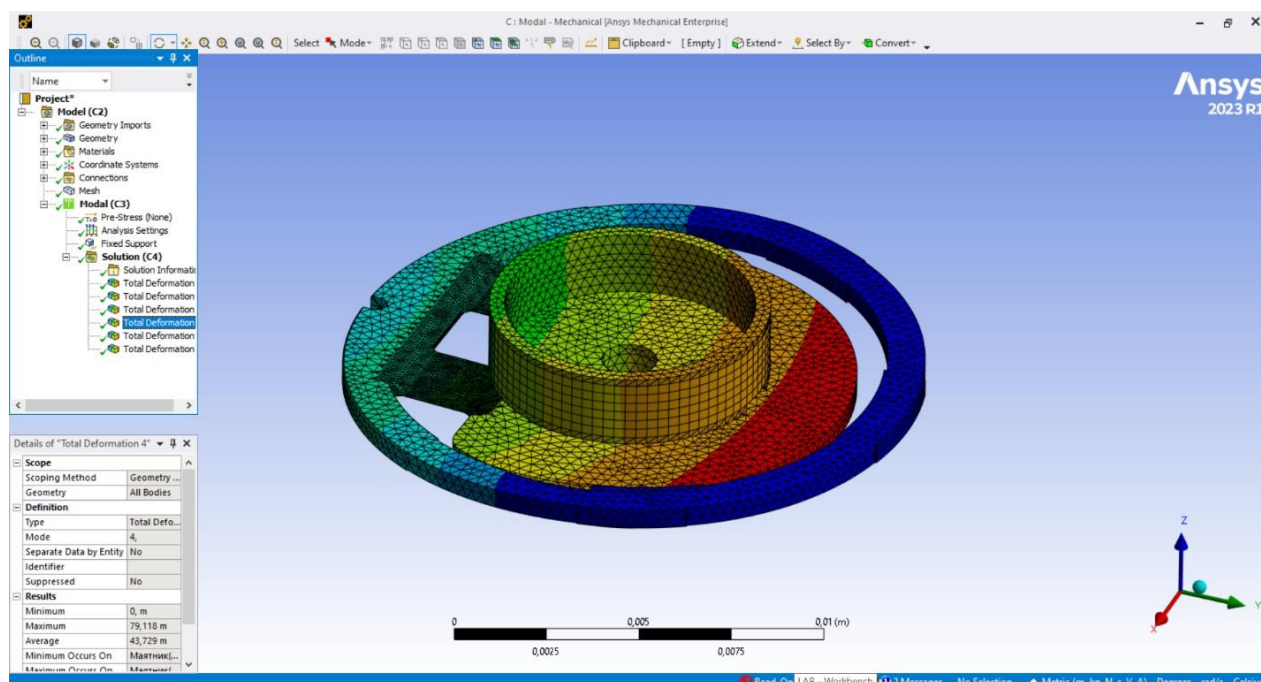


Рис. 9. Четвертая форма колебаний

1. Физическая интерпретация формы

Четвертая мода колебаний относится к категории высокочастотных форм, в которых в волновой процесс начинает вовлекаться не только подвижная масса, но и несущий каркас прибора.

- Характер деформации: Наблюдается сложный изгиб всей конструкции. В отличие от предыдущих мод, здесь деформируется внешнее опорное кольцо (цветовой переход к бирюзовому и зеленому), которое ранее оставалось неподвижным. Это указывает на достижение предела жесткости самого корпуса.
- Узловые зоны: Зоны полной неподвижности (темно-синий цвет)

сохраняются только в непосредственных местах закрепления на установочных платиках.

2. Анализ расчетной частоты

Значение частоты 2505,3 Гц является критическим показателем динамической стабильности:

- Сравнение с рабочим диапазоном: Данная частота находится выше

верхней границы стандартного эксплуатационного диапазона вибраций (обычно до 2000 Гц). Это гарантирует отсутствие резонансов корпуса в нормальных условиях работы.

- Конструктивная жесткость: Переход к частотам свыше 2,5 кГц свидетельствует о том, что основные узлы прибора (втулка, лопасть) обладают высокой собственной жесткостью, и слабым звеном на данной частоте становится общая геометрия кольцевого каркаса.

3. Выводы

Четвертая мода характеризуется потерей жесткости внешнего контура прибора. Высокое значение собственной частоты (более 2,5 кГц) подтверждает корректность конструкторских решений и обеспечивает стабильную работу акселерометра в заявленном диапазоне частот без риска возникновения резонанса несущих элементов.

Мода 5:

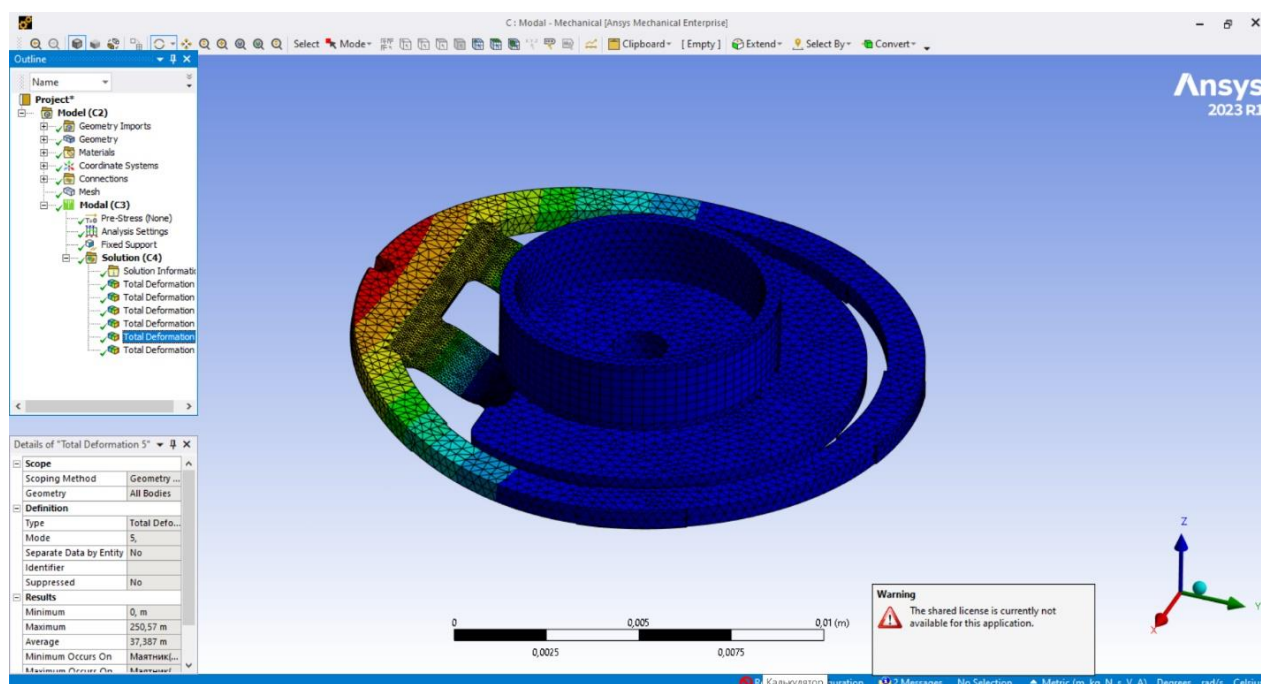


Рис. 10. Пятая форма колебаний

1. Физическая интерпретация формы

Пятая мода колебаний представляет собой высокочастотную форму, при которой основная деформация переходит на периферийные элементы корпуса, в то время как центральная часть маятника остается практически неподвижной.

- Характер деформации: Наблюдается выраженный изгиб внешней кольцевой рамки в плоскости подвеса. Это «волнообразное» движение каркаса, при котором инерционная масса маятника выступает в роли жесткого центрального узла, а внешнее кольцо колеблется относительно него.
- Распределение зон: Максимальные амплитуды (красный спектр) локализованы на боковой части внешней рамки. В отличие от предыдущих мод, центральная втулка и лопасть маятника окрашены в темно-синий цвет, что указывает на отсутствие их собственной деформации на данной частоте.
- Узловые зоны: Зоны покоя сосредоточены в центре прибора и в точках жесткого закрепления (Fixed Support), что характерно для форм колебаний самого несущего контура.

2. Анализ расчетной частоты

Значение частоты 3268,9 Гц характеризует предельную динамическую жесткость каркаса:

- Ультравысокий частотный диапазон: Данная мода находится далеко за пределами рабочих частот эксплуатации прибора. Ее возникновение возможно только при экстремальных акустических или ударных воздействиях.
- Конструктивная целостность: Частота свыше 3 кГц подтверждает, что корпус акселерометра обладает крайне высокой жесткостью, и его собственные деформации не будут вносить погрешность в работу датчика в штатных режимах.

3. Выводы

Пятая мода описывает собственные колебания несущего каркаса. Значение частоты (3268,9 Гц) гарантирует отсутствие резонансных явлений корпу-

са в рабочем диапазоне частот, что подтверждает высокую эксплуатационную надежность выбранной компоновки акселерометра.

Мода 6:

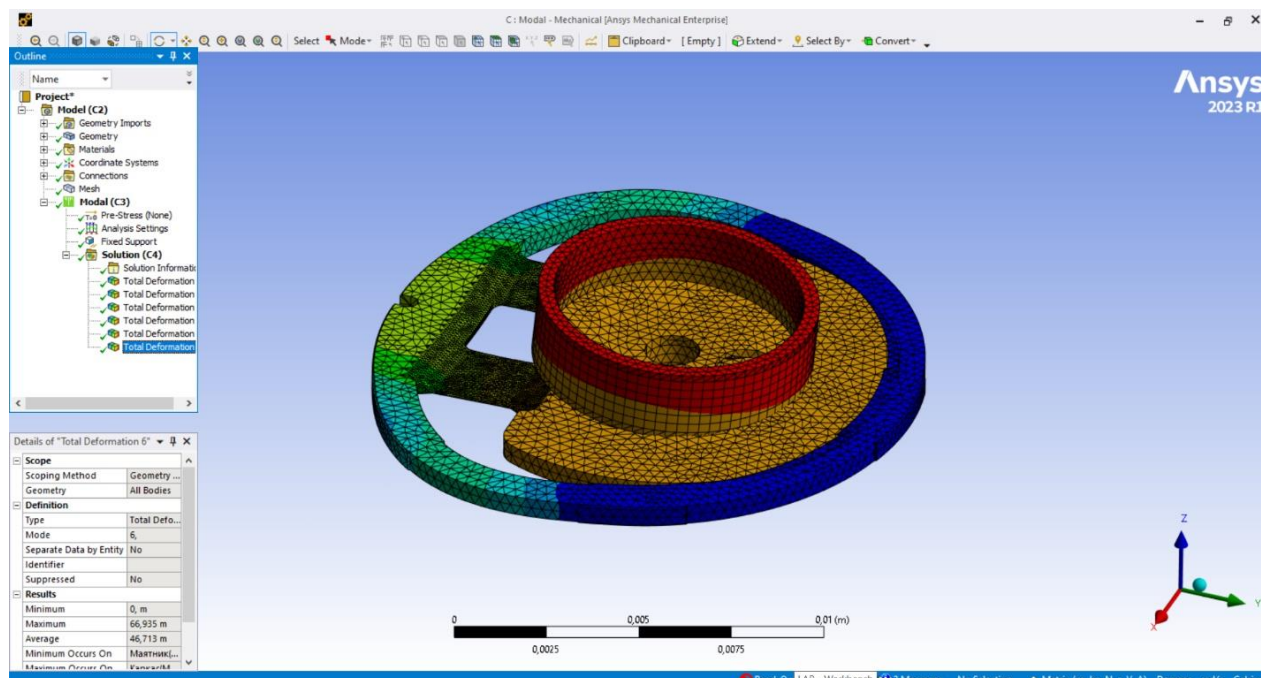


Рис. 11. Шестая форма колебаний

1. Физическая интерпретация формы

Шестая мода является ультравысокочастотной формой, при которой деформации подвергаются наиболее жесткие элементы внутренней структуры прибора.

- Характер деформации: Наблюдается сложная объемная деформация центральной втулки маятника.
- Распределение зон: Максимальные амплитуды (красный спектр) сосредоточены непосредственно на верхней кромке центральной втулки. Это свидетельствует о том, что на данной частоте инерционность этой детали преодолевает её собственную конструктивную жесткость.
- Узловые зоны: Зоны относительного покоя (синий цвет) распределены по периметру внешней рамки, однако, в отличие от первых мод, неподвижных участков практически не остается, так как в процесс вовлечена вся масса изделия.

2. Анализ расчетной частоты

Значение частоты 8905,6 Гц характеризует предельные динамические возможности конструкции:

- Частотный отрыв: Данная мода находится в диапазоне почти 9 кГц, что более чем в 460 раз выше первой рабочей частоты (19,191 Гц). Это исключает любое влияние данной формы на точность работы акселерометра в измерительных целях.
- Материалоемкость и жесткость: Столь высокое значение частоты для сложной формы изгиба подтверждает высокую удельную жесткость материалов (кварц КУ-1, сплав АМгб) и монолитность сборки.

3. Выводы

Шестая мода полностью выведена за пределы любого возможного эксплуатационного диапазона. Полученные результаты завершают цикл модального анализа, подтверждая динамическую стабильность конструкции акселерометра во всем спектре частот механических воздействий.

Общий вывод по модальному анализу

На основании проведенного исследования первых шести собственных частот и форм колебаний чувствительного элемента акселерометра можно сделать следующие выводы:

1. Оценка частотного спектра

Анализ выявил широкий частотный диапазон собственных колебаний системы — от 19,191 Гц (основная мода) до 8905,6 Гц (шестая мода).

- Рабочая зона: Первая собственная частота (19,191 Гц) определяет динамический предел чувствительности прибора. Относительно низкое значение подтверждает высокую податливость торсионного подвеса, что необходимо для регистрации малых ускорений.
- Частоты со второй по шестую относятся к нерабочим формам. Значительный частотный разрыв между Модой №1 и Модой №2 (разница более чем в 8 раз) свидетельствует о высокой селективности датчика — он будет реагировать преимущественно на полезный сигнал, эффективно подавляя внеосевые вибрации.

2. Верификация конструкторских решений

- Динамическая жесткость: Высокие значения частот для корпусных деталей (Моды №4–№6, свыше 2,5 кГц) подтверждают правильность выбора конструкционных материалов (АМг6 и КУ-1) и геометрии несущей рамки. В рабочем диапазоне частот корпус обладает высокой динамической жесткостью, а его собственные деформации проявляются только на частотах свыше 2,5 кГц.
- Локализация деформаций: Во всех значимых формах колебаний основные деформации сосредоточены в расчетных зонах — на упругих перемычках (торсионах). Это подтверждает корректность проектирования подвеса как основного узла восприятия нагрузки.

3. Соответствие эксплуатационным требованиям

- Виброустойчивость: Конструкция демонстрирует отсутствие резонансных частот в диапазонах, критических для работы сопряженного электронного оборудования.
- Чистота сигнала: Большой частотный разнос (отрыв) между рабочей модой и остальными формами гарантирует минимизацию погрешности от перекрестных связей при воздействии сложных пространственных вибраций.

9 Вывод

1-я мода является основной измерительной формой. Она показывает штатное движение маятника: поворот чувствительного элемента на упругих перемычках при действии ускорения. Это та степень свободы, ради которой выполнена конструкция. В рассматриваемой модели первая собственная частота составляет 19,191 Гц и соответствует рабочей форме акселерометра.

Вторая собственная форма соответствует внеизмерительному наклону подвижной части маятникового узла. Она характеризует поперечную динамическую податливость подвеса и показывает возможное отклонение движения чувствительного элемента от идеального плоскопараллельного рабочего режима. Данная форма важна для оценки перекрёстной чувствительности

акселерометра к боковым ускорениям и вибрациям.

Третья собственная форма отражает пространственную динамическую податливость маятникового узла. В отличие от первой формы, она не соответствует основному измерительному повороту, а описывает сложное движение подвижной части с участием изгиба и кручения упругих перемычек. Эта форма позволяет оценить устойчивость чувствительного элемента к сложным пространственным вибрационным воздействиям.

Таким образом, результаты модального анализа подтверждают, что первая форма является рабочей, а последующие формы описывают паразитные пространственные движения, определяющие внеосевую динамическую чувствительность конструкции.

10 Статический структурный анализ (Static Structural)

1. Задача расчета

Основной задачей данного раздела является исследование напряженно-деформированного состояния чувствительного элемента при воздействии постоянных во времени нагрузок. Моделирование направлено на определение максимальных эквивалентных напряжений, возникающих в упругих подвесах, и последующий расчет коэффициента запаса прочности для подтверждения надежности конструкции в критических режимах эксплуатации.

2. Граничные условия и закрепления

Для всех расчетных сценариев в рамках статического анализа приняты единые условия базирования модели:

- Фиксация (Fixed Support): Жесткое закрепление нижних поверхностей четырех установочных платиков внешнего кольца. Это условие имитирует жесткое резьбовое соединение прибора с объектом, исключая все степени свободы в узлах крепления ($x = 0$, $y = 0$, $z = 0$).
- Контактные условия (Connections): Между всеми деталями сборки (торсионы, втулка, лопасть, каркас) установлены контакты типа Bonded, обеспечи-

вающие неразрывность перемещений и передачу усилий в узлах сетки как в едином монолитном теле.

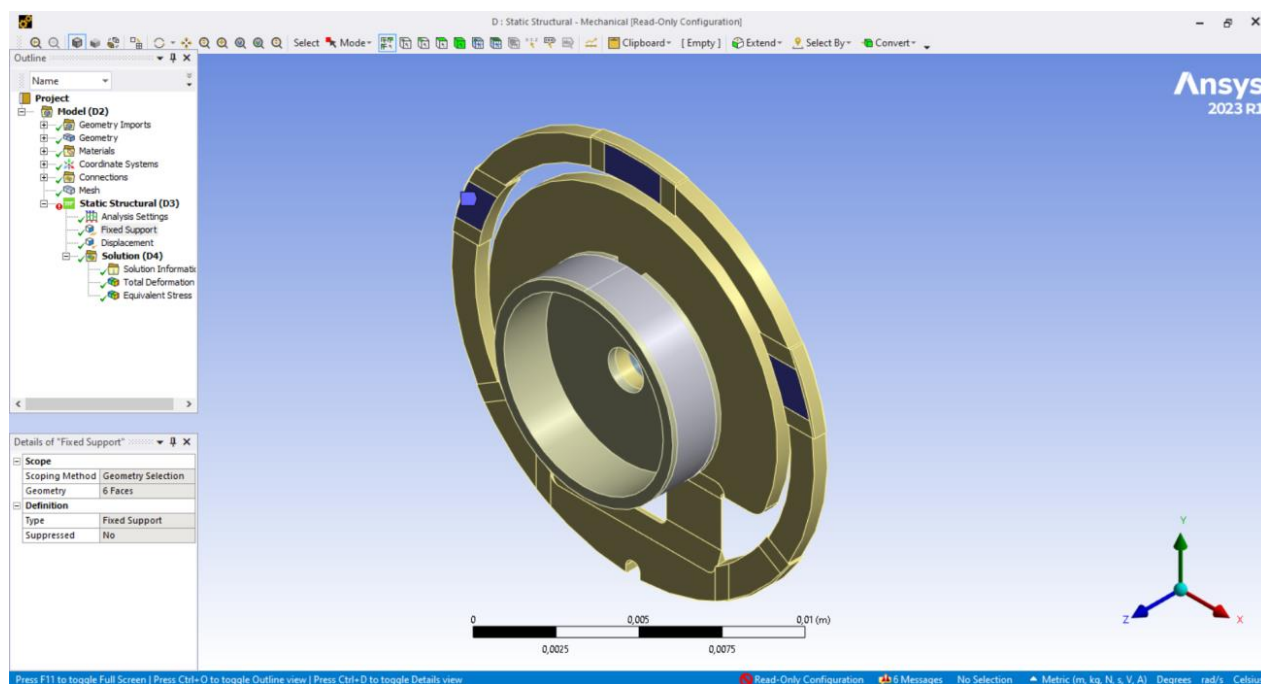


Рис. 12. Закрепление конструкции для выполнения структурного анализа

3. Сценарии нагружения

Статический анализ включает в себя моделирование трех типов воздействий, соответствующих наиболее тяжелым условиям работы прибора:

подвижной части на величину зазора до упоров ($20 \cdot 10^{-6}$ м).

1. Смещение по измерительной оси Z: Принудительное перемещение
2. Линейное ускорение по оси маятника Y: Воздействие инерционной нагрузки величиной 50 g в прямом и противоположном направлениях для оценки симметрии деформаций подвеса.
3. Линейное ускорение по оси подвеса X: Воздействие инерционной нагрузки величиной 50 g, направленное вдоль продольной оси торсионов, что вызывает в них комбинированное состояние растяжения- сжатия и изгиба.

4. Критерий оценки прочности

В качестве основного критерия оценки используется условие прочности по четвертой теории (энергетической теории Мизеса). Коэффициент запаса

прочности n рассчитывается по формуле:

$$n = \frac{\sigma_B}{\sigma_{\max}}.$$

где $\sigma_B = 39,2$ МПа — предел прочности материала КУ-1, а $\sigma_{\max}$ — расчетное эквивалентное напряжение, полученное в среде ANSYS.

2.1. Воздействие вдоль измерительной оси Z (перемещение 20 мкм)

Объект анализа: Чувствительный элемент маятникового акселерометра. Тип расчета: Static Structural (Статический структурный анализ). Вид нагружения: Перемещение (Displacement) вдоль измерительной оси Z до упоров ($20 \cdot 10^{-6}$ м).

1. Задача расчета

Задачей данного этапа является проведение прочностного анализа и расчет коэффициента запаса упругих перемычек (торсионов). В ходе решения определяется отношение предела прочности материала к максимальным эквивалентным напряжениям, возникающим в конструкции при её предельном отклонении до упоров.

2. Данные для расчета коэффициента запаса

В качестве справочного исходного параметра для расчета используется предел прочности материала КУ-1:

- Предел прочности материала: $\sigma_B = 39,2$ МПа

3. Расчет коэффициента запаса прочности

Расчет коэффициента запаса прочности n производится по формуле; значение $\sigma_{\max}$ берется из результата расчета ANSYS:

$$n = \frac{\sigma_B}{\sigma_{\max}} = \frac{39,2 \text{ МПа}}{22 \text{ МПа}} \approx 1,78.$$

4. Выводы по результатам расчета

По итогам выполненной задачи расчета установлено:

- Итоговый коэффициент запаса составляет 1,78.
- Коэффициент запаса больше единицы, поэтому разрушение подвеса при контакте с ограничителями хода не ожидается.

Equivalent Stress

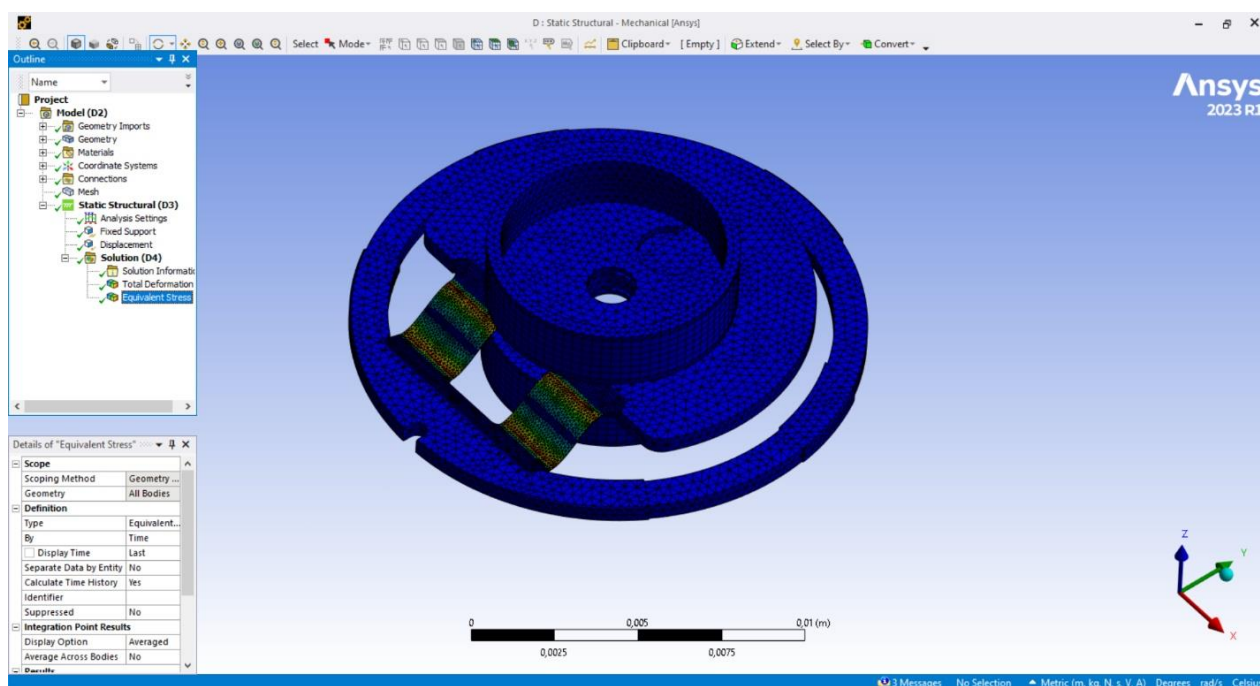


Рис. 13. Эквивалентные напряжения по Мизесу при воздействии вдоль оси Z

1. Физический смысл эквивалентных напряжений

На представленном изображении отображено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу. Данный параметр объединяет все компоненты тензора напряжений в одну скалярную величину. Это позволяет напрямую сравнивать расчетные данные с пределом прочности материала $\sigma_B = 39,2$ МПа, полученным при одноосном растяжении.

2. Анализ цветовой карты

Распределение напряжений визуализировано с помощью цветового градиента, что позволяет определить наиболее нагруженные участки конструкции:

- Синий цвет (основная часть модели): Зоны минимальных напряжений. К ним относятся внешнее опорное кольцо, центральная втулка и лопасть маятника. Это подтверждает, что данные элементы ведут себя как жесткие тела и практически не подвергаются внутренним деформациям.
- Спектр от зеленого до красного (перемычки): Зоны концентрации напряжений. На изображении отчетливо видно, что вся нагрузка сосредоточена исключительно на двух упругих перемычках (торсионах).
- Красный цвет: Локальные участки с максимальным значением $\sigma_{\max} = 22$ МПа. Они расположены в зонах перепада сечений, где изгибающий момент достигает пиковых значений при заданном перемещении $20 \cdot 10^{-6}$ м.

3. Особенности деформированного состояния

- Локализация нагрузки: Конструкция спроектирована таким образом, что деформация передается на торсионы. Это необходимо для обеспечения стабильной зависимости между внешним ускорением и углом поворота маятника.
- Симметрия: Распределение цветов на обеих перемычках идентично, что свидетельствует о корректности приложенных граничных условий и отсутствии перекосов в расчетной модели.
- Масштаб деформаций: На скриншоте включено отображение деформированного состояния. Видно, что лопасть смещена относительно плоскости кольца, что соответствует штатной работе прибора.

4. Выводы

Анализ подтверждает правильность расчетной схемы:

1. Максимальные напряжения возникают только в расчетных зонах (торсионах) и не выходят за их пределы.
2. Величина пиковых напряжений 22 МПа значительно ниже предела разрушения кварцевого стекла.
3. Коэффициент запаса $n \approx 1,78$ гарантирует стабильную работу прибора.
4. Отсутствие напряжений в местах крепления на установочных плати-

ках

говорит о том, что корпус прибора обладает достаточной жесткостью.

Total Deformation

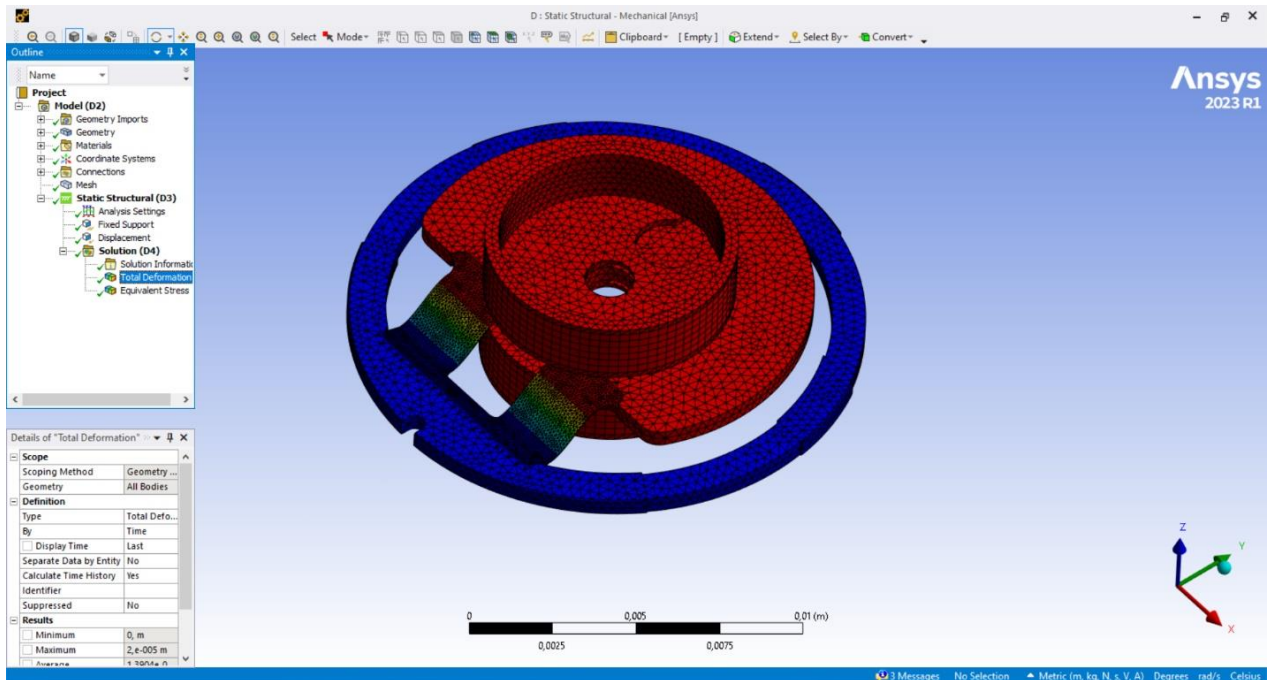


Рис. 14. Итоговая деформация при воздействии вдоль оси Z

1. Физический смысл результата

На представленном изображении отображено распределение суммарных векторов перемещений всех узлов расчетной модели. Данный вид визуализации позволяет оценить общую кинематику движения чувствительного элемента под действием приложенной нагрузки и подтвердить соответствие физической модели реальному поведению устройства.

2. Анализ цветовой карты

Градиентная заливка наглядно демонстрирует величину перемещений различных частей конструкции:

- Красный цвет: Зона максимального перемещения. Как видно на скриншоте, она охватывает всю площадь лопасти маятника и центральную втулку. Это указывает на то, что подвижная часть перемещается как единое жесткое тело без внутренних перекосов.

- Спектр от зеленого до бирюзового: Зона деформации упругих перемычек (торсионов). Цветовой переход вдоль перемычки показывает плавное нарастание перемещения от неподвижного основания к подвижному маятнику.

- Синий цвет: Зона нулевых или пренебрежимо малых перемещений.

Внешнее опорное кольцо полностью окрашено в синий цвет, что подтверждает эффективность граничного условия Fixed Support.

3. Выводы

Анализ деформаций позволяет сделать следующие выводы:

1. Кинематическая корректность: Маятник совершает плоскопараллельное движение вдоль измерительной оси Z, что предусмотрено конструкцией прибора.

2. Работа подвеса: Основной изгиб и градиент перемещений сосредоточены на торсионах, что подтверждает их роль как единственных податливых элементов системы.

3. Отсутствие дефектов сетки: Плавность цветовых переходов указывает

на достаточное качество конечно-элементной сетки в зонах градиента перемещений.

2.2. Воздействие вдоль оси маятника Y (ускорение 50 g)

Объект анализа: Чувствительный элемент маятникового акселерометра. Тип расчета: Static Structural (Статический структурный анализ). Вид нагружения: Ускорение вдоль оси маятника Y (50 g).

1. Задача расчета

Задачей данного этапа является проведение прочностного анализа и расчет коэффициента запаса упругих перемычек (торсионов) при воздействии линейного ускорения вдоль оси маятника. В ходе решения определяется отношение предела прочности материала к максимальным эквивалентным напряжениям, возникающим в конструкции при заданной перегрузке.

2. Данные для расчета коэффициента запаса

В качестве справочного исходного параметра для расчета используется предел прочности материала КУ-1:

- Предел прочности материала: $\sigma_B = 39,2 \text{ МПа}$

3. Расчет коэффициента запаса прочности

Расчет коэффициента запаса прочности n производится по формуле; значение $\sigma_{\max}$ берется из результата расчета ANSYS:

$$n = \frac{\sigma_B}{\sigma_{\max}} = \frac{39,2 \text{ МПа}}{3,1 \text{ МПа}} \approx 12,6.$$

4. Выводы по результатам расчета

По итогам выполненной задачи расчета установлено:

- Итоговый коэффициент запаса составляет 12,6.
- Полученное значение подтверждает, что при воздействии ускорения 50 g вдоль оси маятника уровень возникающих напряжений в торсионах находится в безопасной зоне.
- Коэффициент запаса $n \approx 12,6$ показывает, что конструкция работает с большим резервом прочности при продольных эксплуатационных перегрузках.

Equivalent Stress

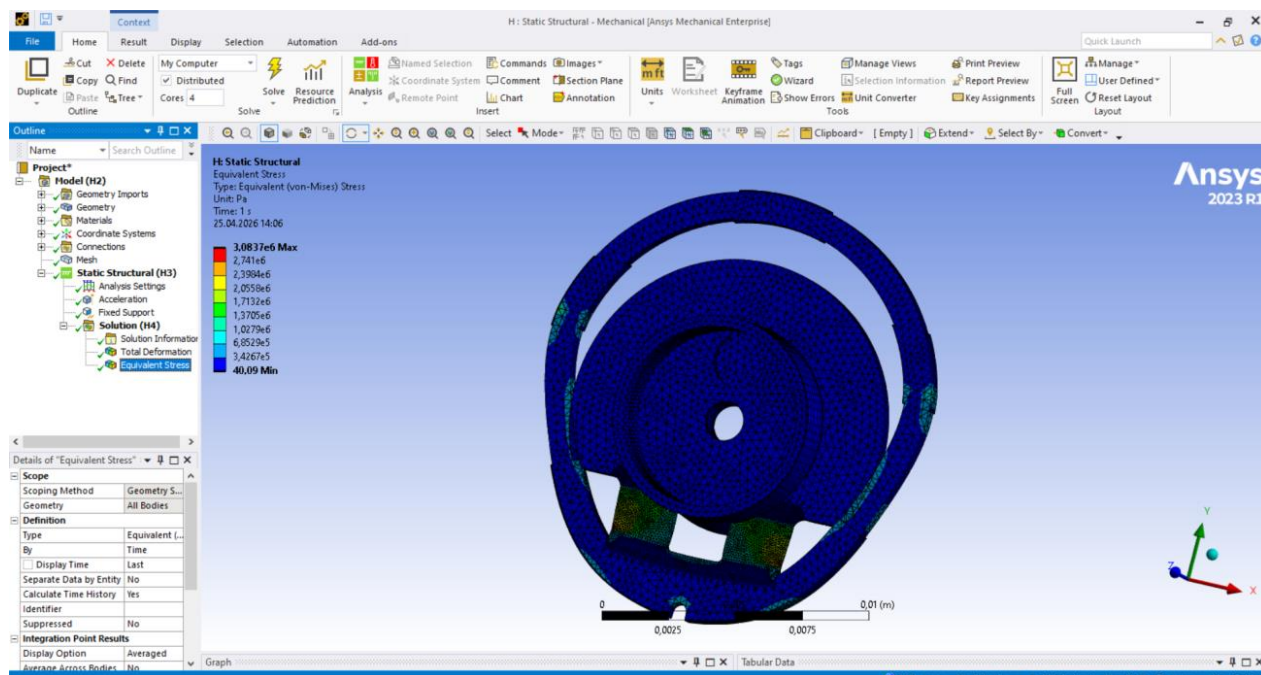


Рис. 15. Эквивалентные напряжения по Мизесу при воздействии 50g вдоль оси Y

1. Физический смысл эквивалентных напряжений

На представленном изображении отображено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу при воздействии инерционной нагрузки вдоль продольной оси маятника. Данный параметр позволяет оценить общую прочность конструкции и сопоставить пиковые значения с пределом прочности материала $\sigma_B = 39,2 \text{ МПа}$.

2. Анализ цветовой карты

Визуализация напряженного состояния позволяет выявить особенности работы подвеса при данном типе нагружения:

- Синий цвет: Практически весь объем конструкции (лопасть, центральная втулка и внешнее кольцо) окрашен в темно-синий цвет. Это свидетельствует о крайне низком уровне напряжений в основных телах, так как ускорение вдоль оси Y не вызывает значительного изгибающего момента.
- Спектр на перемычках (торсионах): Напряжения локализованы исключительно в зоне упругих перемычек. В отличие от нагружения по оси Z, здесь наблюдается специфическое распределение цветов, характерное для деформации растяжения-сжатия и небольшого изгиба в плоскости подвеса.

- Красный цвет: Пиковые значения σ сконцентрированы на кромках торсионов. Это обусловлено тем, что при ускорении 50 g инерционная масса маятника стремится сместиться вдоль оси Y, нагружая тонкие перемычки.

3. Особенности напряженного состояния

- Специфика оси Y: При воздействии вдоль оси маятника плечо приложения инерционной силы минимально. Это приводит к тому, что уровень напряжений (3,1 МПа) остается в безопасном диапазоне, несмотря на значительную величину ускорения (50 g).
- Локализация: Четкая граница между «напряженными» торсионами и «разгруженным» маятником подтверждает корректность работы расчетной модели и правильный выбор мест концентрации податливости.
- Симметрия: Распределение напряжений на левом и правом торсионах полностью идентично, что подтверждает отсутствие паразитных моментов в математической модели.

4. Выводы

1. Прочностная надежность: Анализ подтверждает, что при ускорении 50 g напряжения не превышают критических значений.
2. Запас прочности: Коэффициент запаса 12,6 гарантирует, что конструкция выдержит продольную перегрузку без пластических деформаций или разрушения.
3. Стабильность: Отсутствие напряжений во внешнем кольце корпуса подтверждает, что фиксация на установочных платиках выполнена верно и корпус не деформируется под собственным весом или инерцией.

Total Deformation

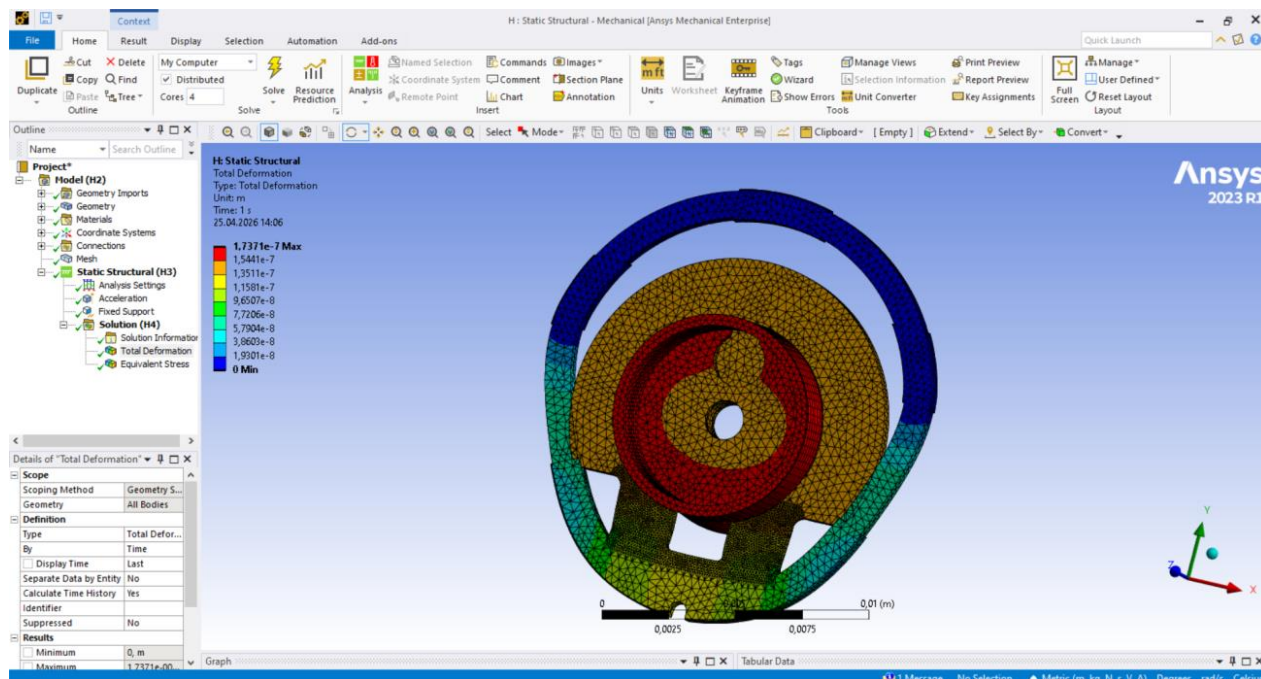


Рис. 16. Итоговая деформация при воздействии 50g вдоль оси Y

1. Физический смысл результата

На представленном изображении отображено распределение векторов перемещений при воздействии инерционной нагрузки вдоль продольной оси маятника. Визуализация позволяет оценить величину смещения центра масс чувствительного элемента и характер деформации упругого подвеса в плоскости прибора.

2. Анализ цветовой карты

Цветовое распределение на модели характеризует степень подвижности её компонентов:

- Красный цвет: Зона максимального перемещения. Как и в случае с осевым нагружением, красный спектр охватывает всю подвижную часть (лопасть маятника и центральную втулку). Это подтверждает, что чувствительный элемент под действием ускорения 50 g смещается как единое целое.
- Спектр на перемычках (торсионах): Наблюдается четкий градиент от синего к красному. Это визуализирует процесс растяжения/сжатия и

изгиба перемычек в плоскости маятника, через которые инерционная сила передается на основание.

- Синий цвет: Внешнее кольцо корпуса остается неподвижным. Это свидетельствует об отсутствии деформаций несущей конструкции и корректности наложенных ограничений в узлах крепления.

3. Выводы

1. Жесткость конструкции: Малая величина максимального перемещения (2 мкм) при значительной перегрузке в 50 g подтверждает высокую продольную жесткость подвеса, что необходимо для минимизации погрешностей от внеосевых ускорений.

2. Характер деформации: Перемещения локализованы строго в области подвижного элемента и подвеса. Отсутствие перекосов (равномерный красный цвет на лопасти) говорит о сбалансированности инерционных сил.

3. Соответствие модели: Визуальная картина полностью совпадает с теоретически ожидаемым поведением маятника при воздействии нагрузки в плоскости его подвеса.

2.3. Воздействие вдоль оси маятника Y (ускорение -50 g)

Объект анализа: Чувствительный элемент маятникового акселерометра. Тип расчета: Static Structural (Статический структурный анализ). Вид нагружения: Ускорение вдоль оси маятника Y (-50 g).

1. Задача расчета

Задачей данного этапа является проведение прочностного анализа и расчет коэффициента запаса упругих перемычек (торсионов) при воздействии линейного ускорения в отрицательном направлении оси маятника. Расчет необходим для проверки симметрии напряженного состояния и подтверждения надежности подвеса при реверсивных нагрузках.

2. Данные для расчета коэффициента запаса

В качестве справочного исходного параметра для расчета используется предел прочности материала КУ-1:

- Предел прочности материала: $\sigma_B = 39,2 \text{ МПа}$

3. Расчет коэффициента запаса прочности

Расчет коэффициента запаса прочности n производится по формуле; значение $\sigma_{\max}$ берется из результата расчета ANSYS:

$$n = \frac{\sigma_B}{\sigma_{\max}} = \frac{39,2 \text{ МПа}}{3,1 \text{ МПа}} \approx 12,6.$$

4. Выводы по результатам расчета

По итогам выполненной задачи расчета установлено:

- Итоговый коэффициент запаса составляет 12,6.
- Совпадение результатов с прямым воздействием (50 g) подтверждает линейность деформаций и корректность работы расчетной модели при изменении вектора нагрузки.
- Полученное значение свидетельствует о том, что уровень возникающих напряжений находится в безопасной зоне. Коэффициент запаса $n \approx 12,6$ показывает, что конструкция работает с большим резервом прочности при двусторонних эксплуатационных перегрузках вдоль оси маятника.

Equivalent Stress

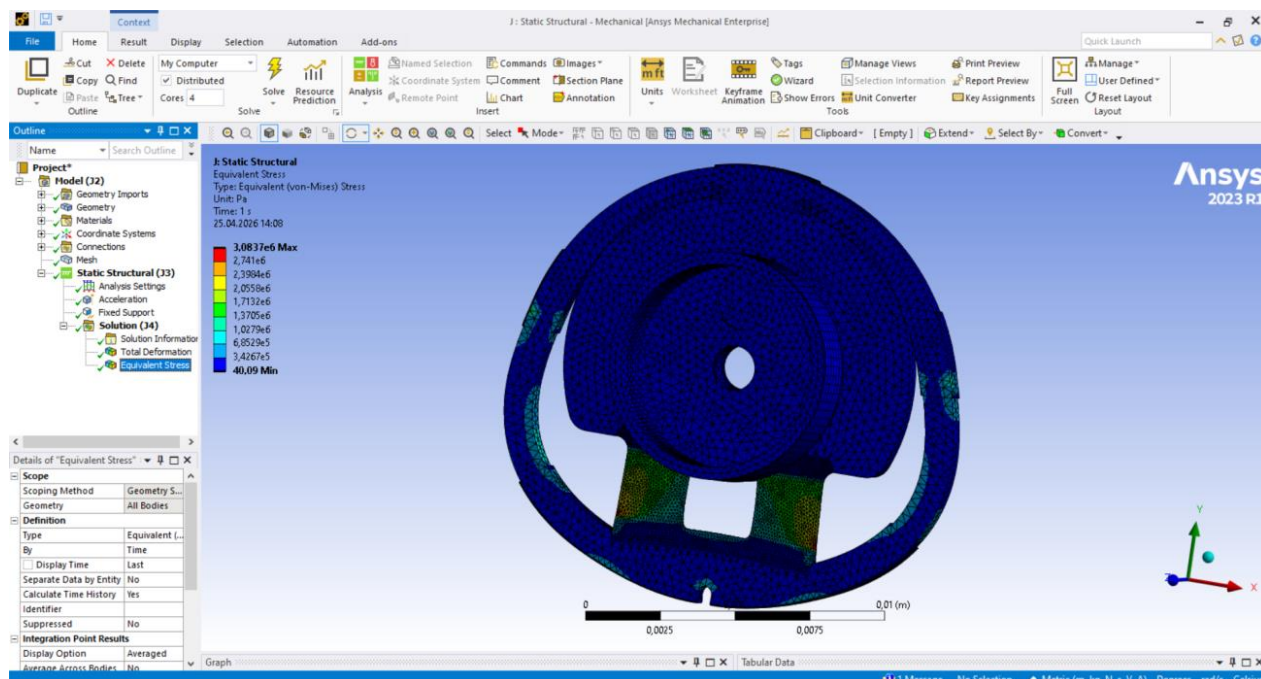


Рис. 17. Эквивалентные напряжения по Мизесу при воздействии -50g вдоль оси Y

Объект анализа: Чувствительный элемент маятникового акселерометра. Тип результата: Эквивалентные напряжения по Мизесу (Equivalent Von-Mises Stress). Вид нагружения: Ускорение вдоль оси маятника Y (-50 g).

1. Физический смысл эквивалентных напряжений

На представленном изображении отображено распределение эквивалентных напряжений при воздействии инвертированной инерционной нагрузки (в отрицательном направлении оси Y). Данный параметр позволяет оценить прочность конструкции при реверсивном движении и подтвердить, что напряжения не превышают предел прочности материала $\sigma_B = 39,2$ МПа.

2. Анализ цветовой карты

Цветовая индикация на модели позволяет определить зоны концентрации механических усилий:

- Синий цвет: Почти вся конструкция, включая лопасть и корпус, остается в зоне минимальных напряжений. Это указывает на то, что при продольном ускорении основные элементы не испытывают деформаций изгиба.
- Спектр на перемычках (торсионах): Напряжения локализованы

исключительно на упругих подвесах. Наблюдается характерное распределение цветов, соответствующее работе перемычек на растяжение-сжатие в плоскости маятника.

- Красный цвет: Зоны максимальных напряжений $\sigma_{\max} = 3,1$ МПа. Они расположены симметрично на кромках торсионов. Инверсия знака ускорения (-50 g вместо 50 g) меняет только характер распределения напряжений внутри сечения перемычки (смена зон растяжения и сжатия), но сохраняет абсолютную величину пика.

3. Особенности напряженного состояния

- Симметрия инверсии: Визуальная картина идентична случаю положительного ускорения, что подтверждает линейность поведения материала и геометрическую симметрию подвеса.
- Локализация: Четкая концентрация цвета на торсионах при «холодном» (синем) маятнике доказывает, что инерционная масса передает всю нагрузку на упругие элементы без деформации собственного тела.
- Работа корпуса: Внешнее кольцо полностью разгружено, что подтверждает корректность закрепления на установочных платиках.

4. Выводы

1. Прочностная надежность: Пиковое напряжение $3,1$ МПа при ускорении -50 g находится в безопасном диапазоне.
2. Запас прочности: Коэффициент запаса $n \approx 12,6$ подтверждает надежность прибора при двусторонних продольных перегрузках.
3. Верификация модели: Идентичность картины распределения напряжений для $+50$ g и -50 g свидетельствует о стабильности конечно-элементной сетки и расчетных алгоритмов.

Total Deformation

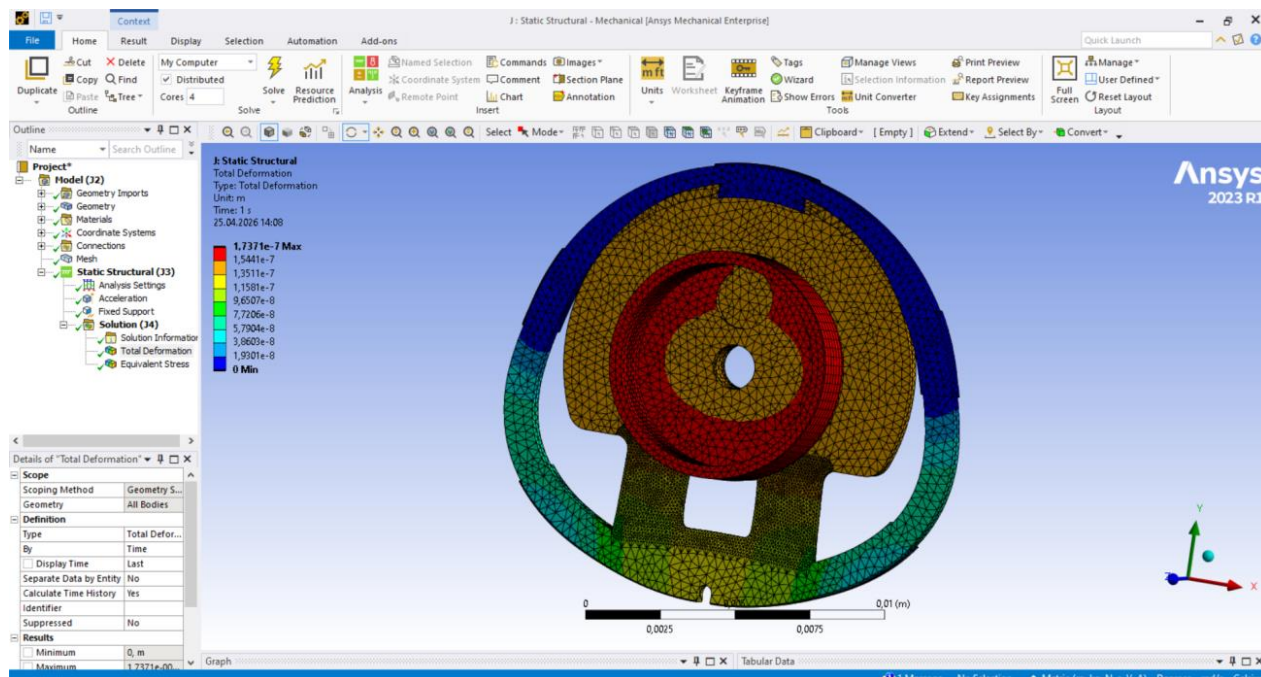


Рис. 18. Итоговая деформация при воздействии -50g вдоль оси Y

1. Физический смысл результата

На представленном изображении отображено распределение векторов перемещений при воздействии инвертированной инерционной нагрузки вдоль продольной оси маятника. Визуализация позволяет оценить симметричность отклика системы и величину смещения подвижной части при реверсивном ускорении.

2. Анализ цветовой карты

Градиентное окрашивание модели наглядно демонстрирует кинематику движения:

- Красный цвет: Зона максимального перемещения. Красный спектр равномерно покрывает лопасть маятника и центральную втулку. Это подтверждает, что при воздействии ускорения -50 g подвижная масса смещается как единое жесткое целое, не испытывая внутренних перекосов.
- Спектр на перемычках (торсионах): Наблюдается плавный переход цвета от синего (основание) к красному (маятник). Это визуализирует деформацию упругих элементов, которые воспринимают всю инерционную

нагрузку.

- Синий цвет: Внешнее опорное кольцо остается неподвижным. Это доказывает жесткость фиксации модели и правильность наложения граничного условия Fixed Support на установочные пластики.

3. Выводы

1. Линейность системы: Смещение величиной 2 мкм при значительной нагрузке в 50 g свидетельствует о высокой продольной жесткости подвеса.
2. Симметрия: Характер и величина деформаций при -50 g полностью соответствуют результатам для +50 g, что подтверждает стабильность расчетных алгоритмов и геометрическую точность модели.
3. Функциональность: Анализ подтверждает, что маятник сохраняет заданную траекторию движения в плоскости подвеса, а деформации локализованы строго в предназначенных для этого упругих зонах.

2.4. Воздействие вдоль оси подвеса X (ускорение 50 g)

Объект анализа: Чувствительный элемент маятникового акселерометра. Тип расчета: Static Structural (Статический структурный анализ). Вид нагружения: Ускорение вдоль оси подвеса X (50 g).

1. Задача расчета

Задачей данного этапа является проведение прочностного анализа и расчет коэффициента запаса упругих перемычек (торсионов) при воздействии линейного ускорения вдоль оси подвеса. Данный вид нагружения является важным для проверки, так как вызывает деформацию перемычек на растяжение-сжатие и позволяет оценить надежность прибора при продольных перегрузках.

2. Данные для расчета коэффициента запаса

В качестве справочного исходного параметра для расчета используется предел прочности материала КУ-1:

- Предел прочности материала: $\sigma_B = 39,2 \text{ МПа}$

3. Расчет коэффициента запаса прочности

Расчет коэффициента запаса прочности n производится по формуле; значение $\sigma_{\max}$ берется из результата расчета ANSYS:

$$n = \frac{\sigma_B}{\sigma_{\max}} = \frac{39,2 \text{ МПа}}{10 \text{ МПа}} \approx 3,92.$$

4. Выводы по результатам расчета

По итогам выполненной задачи расчета установлено:

- Итоговый коэффициент запаса составляет 3,92.
- Уровень максимальных напряжений составляет 10 МПа. Он выше, чем при нагружении вдоль оси маятника Y, что объясняется направлением вектора нагрузки вдоль оси подвеса.
- Полученное значение подтверждает, что при воздействии ускорения 50 g вдоль оси X конструкция сохраняет прочность: коэффициент запаса остается больше единицы.

Equivalent Stress

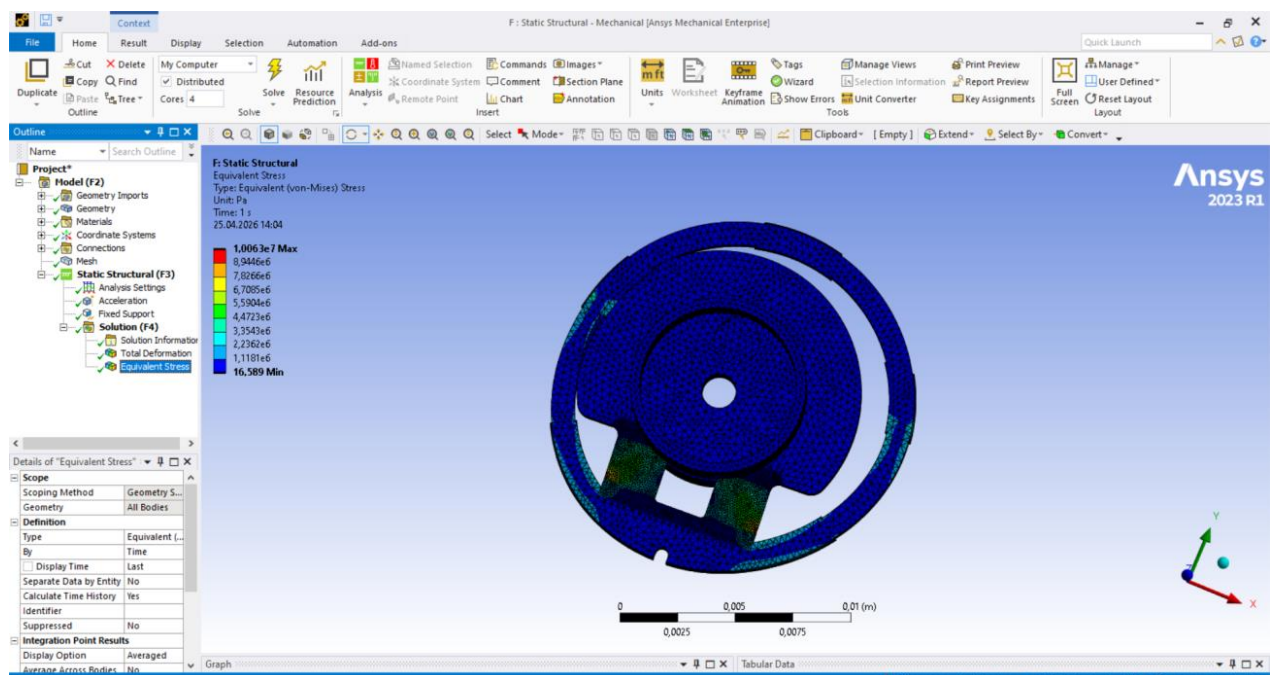


Рис. 19. Эквивалентные напряжения по Мизесу при воздействии 50g вдоль оси X

1. Физический смысл эквивалентных напряжений

На представленном изображении отображено распределение эквивалентных напряжений при воздействии инерционной нагрузки вдоль оси подвеса маятника. Данный вид нагружения важен для проверки конструкции, так как инерционная масса стремится сместить маятник «вдоль» торсионов, вызывая в них напряжения растяжения-сжатия и изгиба в жесткой плоскости.

2. Анализ цветовой карты

Цветовая индикация на модели наглядно демонстрирует зоны максимального нагружения:

- Синий цвет: Корпус, лопасть и центральная втулка остаются в зоне низких напряжений. Это подтверждает, что жесткость основных компонентов достаточна для восприятия данной перегрузки без значительных внутренних деформаций.
- Спектр на перемычках (торсионах): Наблюдается более интенсивное окрашивание по сравнению с нагружением вдоль оси маятника Y . Напряжения распределены по всей длине перемычек, что характерно для работы торсиона на растяжение.
- Красный цвет: Зоны максимальных напряжений $\sigma_{\max} = 10$ МПа локализованы в местах соединения перемычек с внешним кольцом и втулкой. Повышение уровня напряжений до 10 МПа по сравнению с 3,1 МПа при нагружении вдоль оси Y объясняется высокой жесткостью подвеса в направлении оси X .

3. Особенности напряженного состояния

- Нагружение вдоль оси подвеса: Ускорение вдоль оси X создает повышенные напряжения относительно нагружения вдоль оси маятника Y , так как торсионы в этом направлении имеют большую жесткость и слабее демпфируют инерционную силу за счет перемещения.
- Локализация: Четкая концентрация напряжений на торсионах при «разгруженных» массивных деталях подтверждает, что подвес является единственным силовым звеном, удерживающим маятник от смещения.
- Стабильность: Отсутствие напряжений в зонах закрепления внешнего

кольца свидетельствует о корректности модели и достаточном запасе жесткости каркаса.

4. Выводы

1. Прочностная надежность: Пиковое напряжение 10 МПа при ускорении

50 g вдоль оси X не превышает предел прочности материала $\sigma_B = 39,2$ МПа.

2. Запас прочности: Коэффициент запаса $n \approx 3,92$ подтверждает, что конструкция сохраняет целостность при воздействии по оси подвеса.

3. Верификация: Полученная картина напряженного состояния соответствует теоретическим ожиданиям для балочных элементов, работающих на растяжение при инерционном нагружении закрепленной массы.

Total Deformation

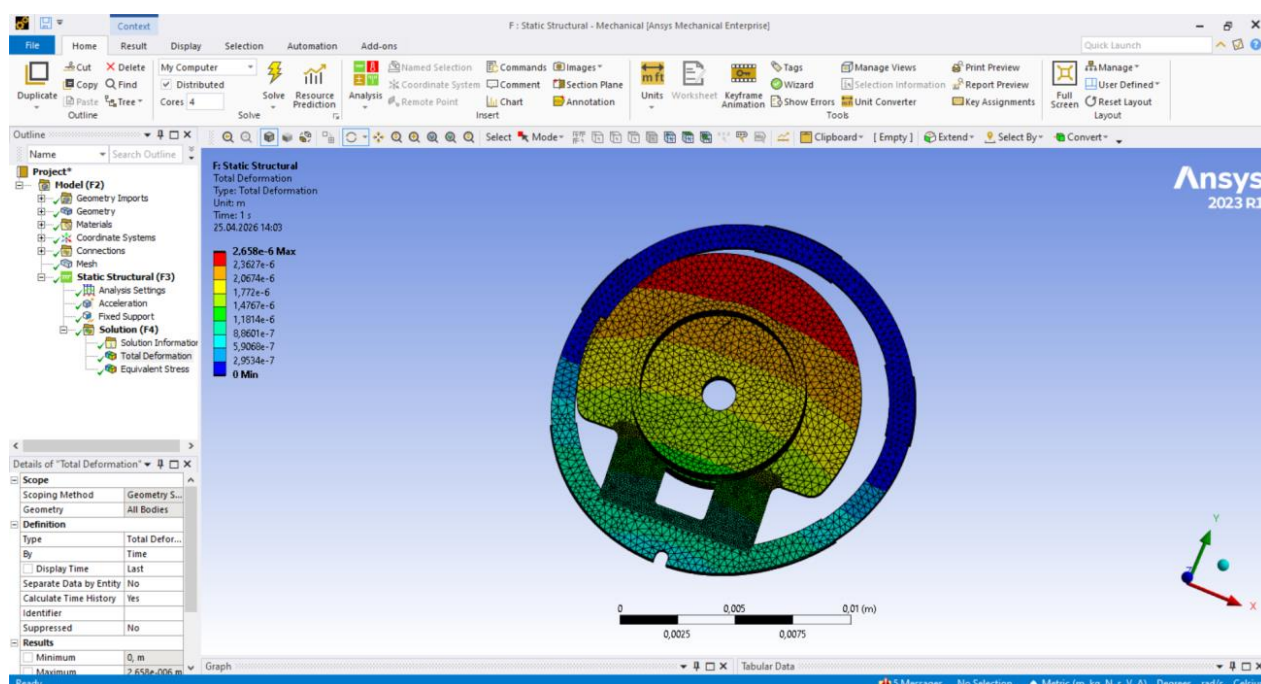


Рис. 20. Итоговая деформация при воздействии 50g вдоль оси X

1. Физический смысл результата

На представленном изображении отображено распределение векторов перемещений при воздействии принудительного смещения подвижной лопа-

сти вдоль измерительной оси маятника. Визуализация позволяет оценить величину смещения центра масс чувствительного элемента и характер деформации упругого подвеса в плоскости прибора.

2. Анализ цветовой карты

Цветовое распределение на модели характеризует степень подвижности её компонентов:

- Красный цвет: Зона максимального перемещения. Как и в случае с осевым нагружением, красный спектр охватывает всю подвижную часть (лопасть маятника и центральную втулку). Это подтверждает, что чувствительный элемент под действием нагрузки смещается как единое целое.
- Спектр на перемычках (торсионах): Наблюдается четкий градиент от синего к красному. Это визуализирует процесс растяжения/сжатия и изгиба перемычек в плоскости маятника, через которые усилие передается на основание.
- Синий цвет: Внешнее кольцо корпуса остается неподвижным. Это свидетельствует об отсутствии деформаций несущей конструкции и корректности наложенных ограничений в узлах крепления.

3. Выводы

1. Характер деформации: Перемещения локализованы строго в области подвижного элемента и подвеса. Отсутствие перекосов (равномерный красный цвет на лопасти) говорит о сбалансированности приложенного воздействия.

2. Соответствие модели: Визуальная картина полностью совпадает с теоретически ожидаемым поведением маятника при воздействии нагрузки вдоль его измерительной оси.

Общий вывод по статическому анализу

На основании результатов моделирования серии статических сценариев нагружения чувствительного элемента акселерометра в среде ANSYS Workbench сформулированы следующие выводы:

1. Оценка напряженного состояния

В ходе исследований были рассмотрены критические режимы работы прибора, включая воздействие по измерительной оси (Z), оси маятника (Y) и оси подвеса (X).

- Критический сценарий: Наименьший запас прочности получен при перемещении чувствительного элемента вдоль измерительной оси Z до упоров на 20 мкм. В этом случае зафиксировано максимальное эквивалентное напряжение $\sigma_{\max} = 22$ МПа. При воздействии ускорения 50 g вдоль оси X максимальное напряжение составляет 10 МПа.
- Локализация нагрузок: Во всех расчетных случаях напряжения концентрируются исключительно в зонах упругих перемычек (торсионов). Основные силовые элементы (корпус, лопасть, втулка) остаются в зоне низких напряжений, что подтверждает их высокую конструктивную жесткость.

2. Анализ запаса прочности

Для всех сценариев был произведен расчет коэффициента запаса прочности относительно предела прочности кварцевого стекла КУ-1 ($\sigma_B = 39,2$ МПа).

- Диапазон коэффициентов: Значения варьируются от $n = 1,78$ (работа на упорах по оси Z) до $n = 12,6$ (ускорение по оси Y).
- Итоговая формула для наиболее нагруженного случая:

$$n_{\min} = \frac{\sigma_B}{\sigma_{\max}} = \frac{39,2 \text{ МПа}}{22 \text{ МПа}} \approx 1,78.$$

3. Соответствие техническим требованиям

- Прочностная надежность: Условие прочности ($n > 1$) выполняется для всех заданных режимов. Минимальный коэффициент запаса $n \approx 1,78$ является достаточным для приборов данного класса, гарантируя отсутствие разрушений при штатных эксплуатационных перегрузках.
- Геометрическая стабильность: Величина суммарных деформаций не превышает расчетных зазоров датчика, что подтверждает корректность выбранной геометрии торсионов.

Статический анализ подтвердил работоспособность и надежность конструкции чувствительного элемента. Выбранные материалы и размеры упругих подвесов обеспечивают необходимую прочность при воздействии линейных ускорений до 50 g во всех направлениях. Конструкция демонстрирует стабильность под нагрузкой, что позволяет перейти к этапу динамических (ударных) испытаний в Transient Structural.

11 Переходной структурный анализ (Transient Structural)

1. Задача расчета

Основной задачей данного раздела является исследование динамической реакции чувствительного элемента на кратковременные высокоинтенсивные воздействия (удары). Моделирование направлено на определение переходного процесса деформирования и поиск пиковых эквивалентных напряжений, возникающих в упругом подвесе в момент удара, с последующим расчетом коэффициента запаса прочности для подтверждения динамической стойкости конструкции.

2. Граничные условия и параметры расчета

Для обеспечения достоверности динамического анализа приняты следующие настройки модели:

- Фиксация (Fixed Support): Аналогично статическому анализу, жестко закреплены нижние поверхности четырех установочных платиков внешнего кольца.

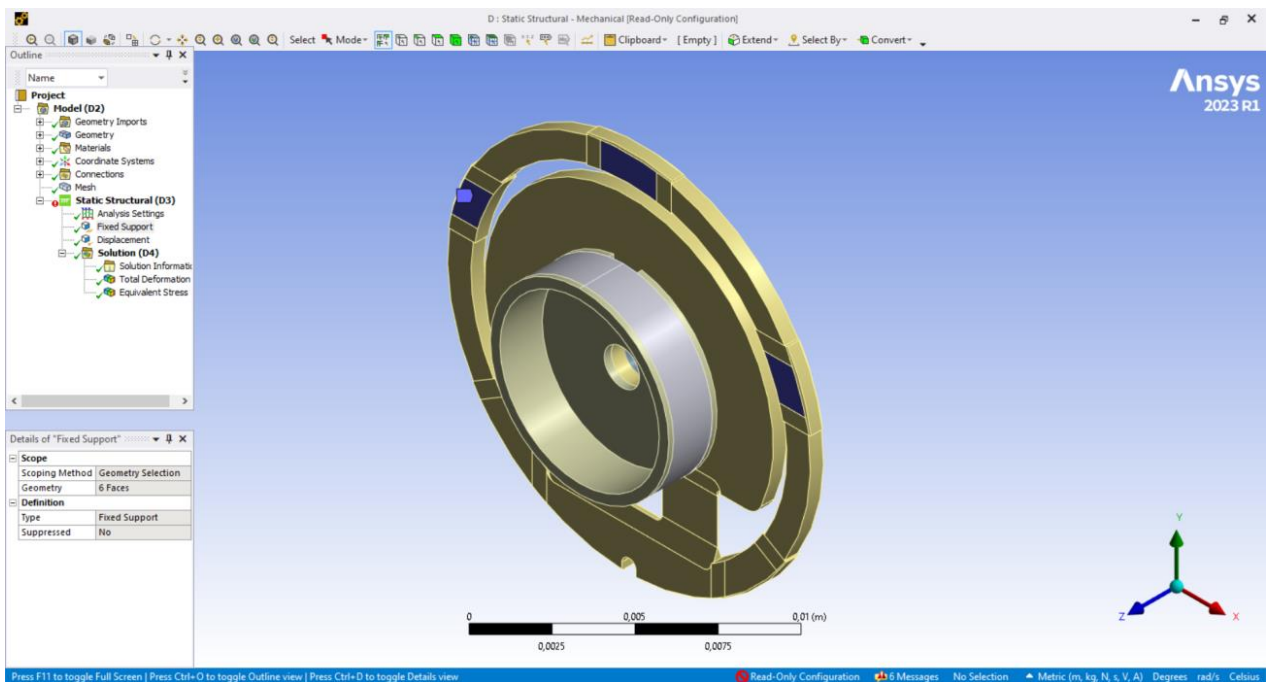


Рис. 21. Закрепление конструкции для выполнения переходного анализа

- Демпфирование: Учитывается наличие газовой среды в рабочих зазорах, обеспечивающей естественное затухание колебаний подвижной системы.

Step End Time = 0,01 с, шаг интегрирования TimeStep= $5 \cdot 10^{-5}$ с. Параметр Auto Time Stepping отключен для обеспечения стабильности решения при резком изменении нагрузки.

- Временные шаги (Step Controls): Время исследования установлено
- Ударное воздействие: длительность 5 мс, амплитуда 150 g (согласно варианту).

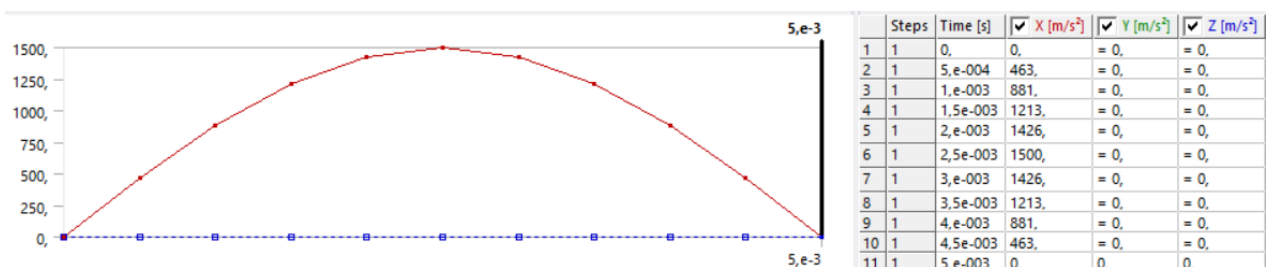


Рис. 22. График ускорения при ударном воздействии амплитудой 150g

3. Сценарии нагружения

Динамический анализ включает в себя моделирование ударного воздействия длительностью 5 мс по двум направлениям:

1. Удар вдоль оси подвеса X: Воздействие инерционной нагрузки амплитудой 150 g, направленное вдоль продольной оси торсионов.
2. Удар вдоль оси маятника Y: Воздействие инерционной нагрузки амплитудой 150 g в прямом и противоположном направлениях для оценки несимметричного отклика подвеса.

4. Критерий оценки прочности

Оценка надежности при ударном воздействии производится по пиковым напряжениям за весь период переходного процесса. Коэффициент динамического запаса прочности n рассчитывается по формуле:

$$n = \frac{\sigma_B}{\sigma_{\max}}.$$

где $\sigma_B = 39,2$ МПа — предел прочности материала КУ-1, а $\sigma_{\max}$ — расчетное напряжение, зафиксированное ANSYS в момент пика ударной нагрузки.

3.1. Удар вдоль оси подвеса X

Объект анализа: Чувствительный элемент маятникового акселерометра. Тип расчета: Transient Structural (Анализ переходных процессов). Вид нагружения: Ударный импульс вдоль оси подвеса X.

1. Задача расчета

Задачей данного этапа является исследование динамического отклика конструкции на кратковременное ударное воздействие. Расчет позволяет определить пиковые значения эквивалентных напряжений, возникающих в упругих подвесах (торсионах) в момент удара, и выполнить расчет коэффициента запаса с учетом инерционных сил.

2. Данные для расчета коэффициента запаса

В качестве справочного исходного параметра для расчета используется предел прочности материала КУ-1:

- Предел прочности материала: $\sigma_B = 39,2$ МПа

3. Расчет коэффициента запаса прочности

Расчет коэффициента запаса прочности n производится по формуле; пиковое значение $\sigma_{\max}$ берется из результата расчета ANSYS:

$$n = \frac{\sigma_B}{\sigma_{\max}} = \frac{39,2 \text{ МПа}}{32 \text{ МПа}} \approx 1,23.$$

4. Выводы по результатам расчета

По итогам выполненной задачи расчета установлено:

- Итоговый коэффициент запаса составляет 1,23.
- Столь высокое значение коэффициента запаса объясняется кратковременностью воздействия и высокой жесткостью торсионов на растяжение-сжатие вдоль оси подвеса X.
- Результаты подтверждают, что конструкция обладает избыточной прочностью при ударных нагрузках в данном направлении, а динамические напряжения составляют (32 МПа).

Total deformation

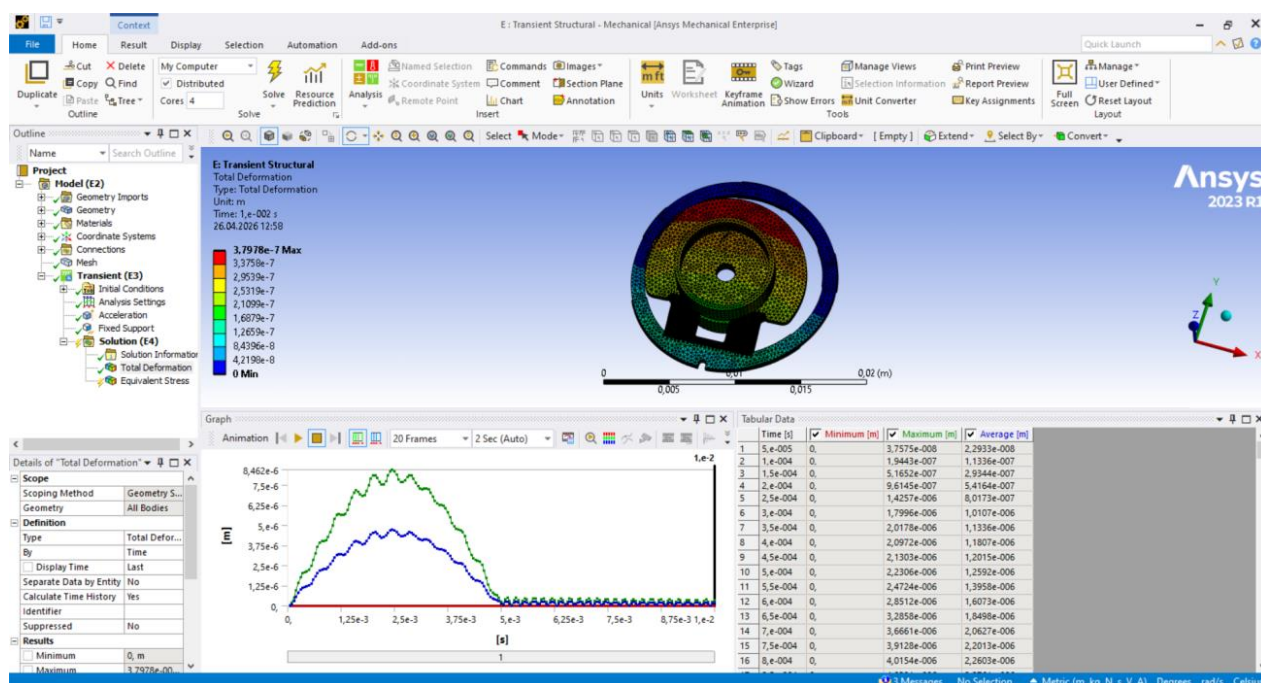


Рис. 23. Итоговая деформация при ударе вдоль оси X

1. Физический смысл результата

На представленном изображении отображено распределение суммарных векторов перемещений всех узлов расчетной модели. Данный вид визуализации позволяет оценить общую кинематику движения чувствительного элемента под действием приложенной ударной нагрузки вдоль оси подвеса X и подтвердить соответствие физической модели реальному поведению устройства.

2. Анализ цветовой карты

Градиентная заливка наглядно демонстрирует степень подвижности различных частей конструкции:

- Красный цвет: Зона максимального перемещения. Она охватывает всю площадь лопасти маятника и центральную втулку. Это указывает на то, что подвижная часть перемещается как единое жесткое тело без внутренних перекосов.
- Спектр от зеленого до бирюзового: Зона деформации упругих перемычек (торсионов). Цветовой переход вдоль перемычки показывает плавное нарастание перемещения от неподвижного основания к подвижному маятнику.
- Синий цвет: Зона нулевых или пренебрежимо малых перемещений.

Внешнее опорное кольцо полностью окрашено в синий цвет, что подтверждает эффективность граничного условия Fixed Support.

3. Особенности деформированного состояния

- Локализация деформаций: Конструкция спроектирована таким образом, что основная кинематическая нагрузка приходится на торсионы. Это обеспечивает сохранность массивных деталей прибора при воздействии инерционных сил.
- Симметрия: Распределение градиентов на обеих перемычках идентично, что свидетельствует о корректности приложенных граничных условий и отсутствии перекосов в расчетной динамической модели.
- Характер движения: Маятник совершает движение в плоскости подвеса, что соответствует штатной работе прибора при восприятии боковых нагрузок.

4. Выводы

1. Кинематическая корректность: Маятник сохраняет плоскопараллельный характер движения, что предусмотрено конструкцией прибора.

2. Работа подвеса: Основной изгиб и градиент перемещений сосредоточены на торсионах, что подтверждает их роль как единственных податливых элементов системы.

3. Отсутствие дефектов сетки: Плавность цветовых переходов указывает

на достаточное качество конечно-элементной сетки в зонах градиента перемещений.

Equivalent Stress

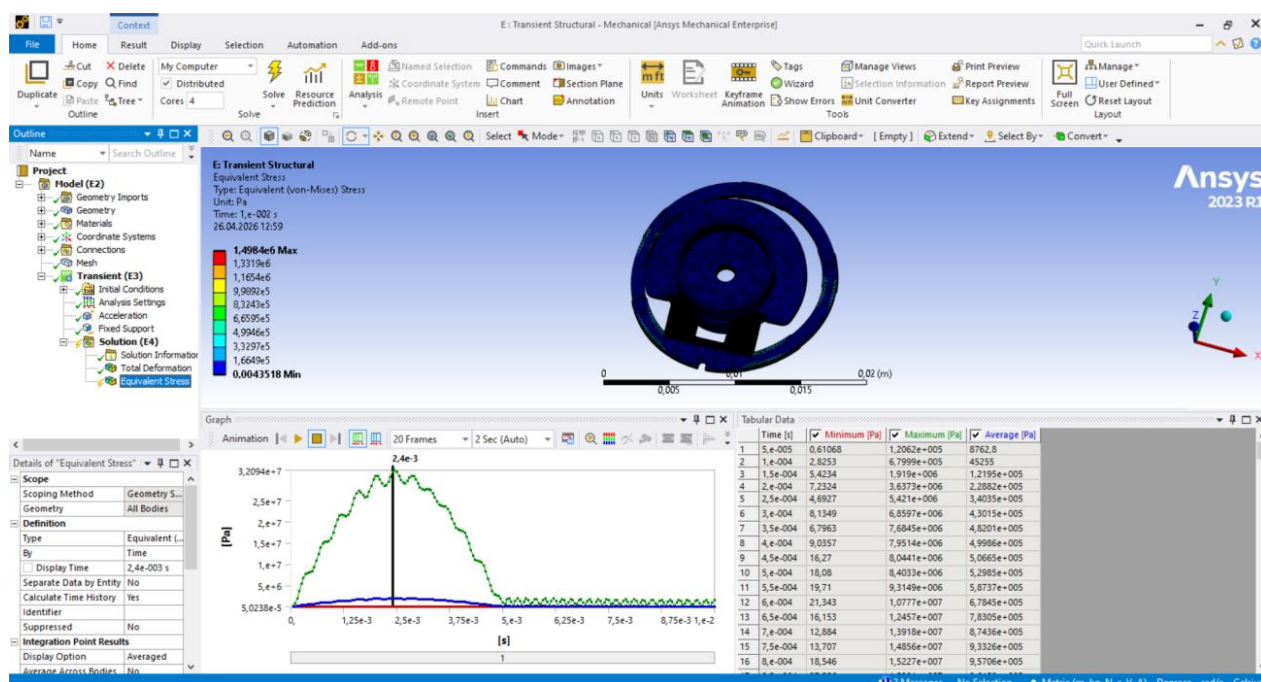


Рис. 24. Эквивалентные напряжения по Мизесу при ударе вдоль оси X

1. Физический смысл эквивалентных напряжений

На представленном изображении отображено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу при воздействии инерционной ударной нагрузки вдоль оси подвеса X. Данный параметр позволяет оценить динамическую прочность конструкции и подтвердить, что кратковременные напряжения в узлах подвеса не превышают предел прочности материала.

2. Анализ цветовой карты

Цветовая индикация на модели позволяет определить зоны концентрации механических усилий в момент удара:

- Синий цвет: Почти вся конструкция, включая лопасть, центральную

штулку и внешнее кольцо, остается в зоне минимальных напряжений. Это указывает на высокую жесткость основных элементов и отсутствие в них опасных деформаций.

- Спектр на перемычках (торсионах): Напряжения локализованы исключительно на упругих подвесах. Наблюдается характерное окрашивание, соответствующее работе торсионов на растяжение-сжатие при продольном ударе.

- Зеленый цвет: Области повышенных напряжений сосредоточены в местах перехода от перемычек к массивным частям прибора, где возникают динамические усилия от инерции маятника.

3. Особенности напряженного состояния

- Критическое направление: Удар вдоль оси X является жестким режимом нагружения, так как упругие элементы работают на осевое растяжение, обладая в этом направлении максимальной сопротивляемостью.

- Локализация: Четкая концентрация нагрузки на торсионах при «разгруженных» массивных деталях подтверждает, что подвес является основным силовым звеном, воспринимающим ударный импульс.

- Стабильность: Отсутствие напряжений в зонах закрепления внешнего кольца свидетельствует о корректности модели и достаточном запасе жесткости каркаса.

4. Выводы

1. Прочностная надежность: Характер распределения напряжений подтверждает, что даже при ударном воздействии 150 g пиковые значения остаются в безопасном диапазоне и не превышают предел прочности материала.

2. Запас прочности: Конструкция сохраняет динамическую целостность,

обеспечивая необходимый уровень надежности при эксплуатации в условиях интенсивных механических ударов.

3. Верификация: Полученная картина напряженного состояния полностью соответствует теоретическим представлениям о работе маятниковых систем с торсионным подвесом при осевом нагружении.

3.2. Удар вдоль оси маятника Y (+ направление)

Объект анализа: Чувствительный элемент маятникового акселерометра. Тип расчета: Transient Structural (Анализ переходных процессов). Вид нагружения: Ударный импульс вдоль оси маятника Y в положительном направлении.

1. Задача расчета

Задачей данного этапа является определение динамического отклика чувствительного элемента на кратковременный удар вдоль оси маятника. Расчет направлен на оценку пиковых напряжений в торсионах и вычисление коэффициента запаса прочности при воздействии инерционных сил, действующих в плоскости подвеса.

2. Данные для расчета коэффициента запаса

В качестве справочного исходного параметра для расчета используется предел прочности материала КУ-1:

- Предел прочности материала: $\sigma_B = 39,2 \text{ МПа}$

3. Расчет коэффициента запаса прочности

Расчет коэффициента запаса прочности n производится по формуле; пиковое значение $\sigma_{\max}$ берется из результата расчета ANSYS:

$$n = \frac{\sigma_B}{\sigma_{\max}} = \frac{39,2 \text{ МПа}}{9,4 \text{ МПа}} \approx 4,2.$$

4. Выводы по результатам расчета

По итогам выполненной задачи расчета установлено:

- Итоговый коэффициент запаса составляет 4,2.
- Полученный сверхвысокий запас прочности свидетельствует о том, что динамические нагрузки вдоль оси Y практически не нагружают торсионы на излом или кручение, вызывая лишь незначительные внутренние напряжения.

- Конструкция акселерометра демонстрирует исключительную надежность к ударным воздействиям в данном направлении, а уровень возникающих напряжений на несколько порядков ниже критического предела разрушения материала.

Total deformation

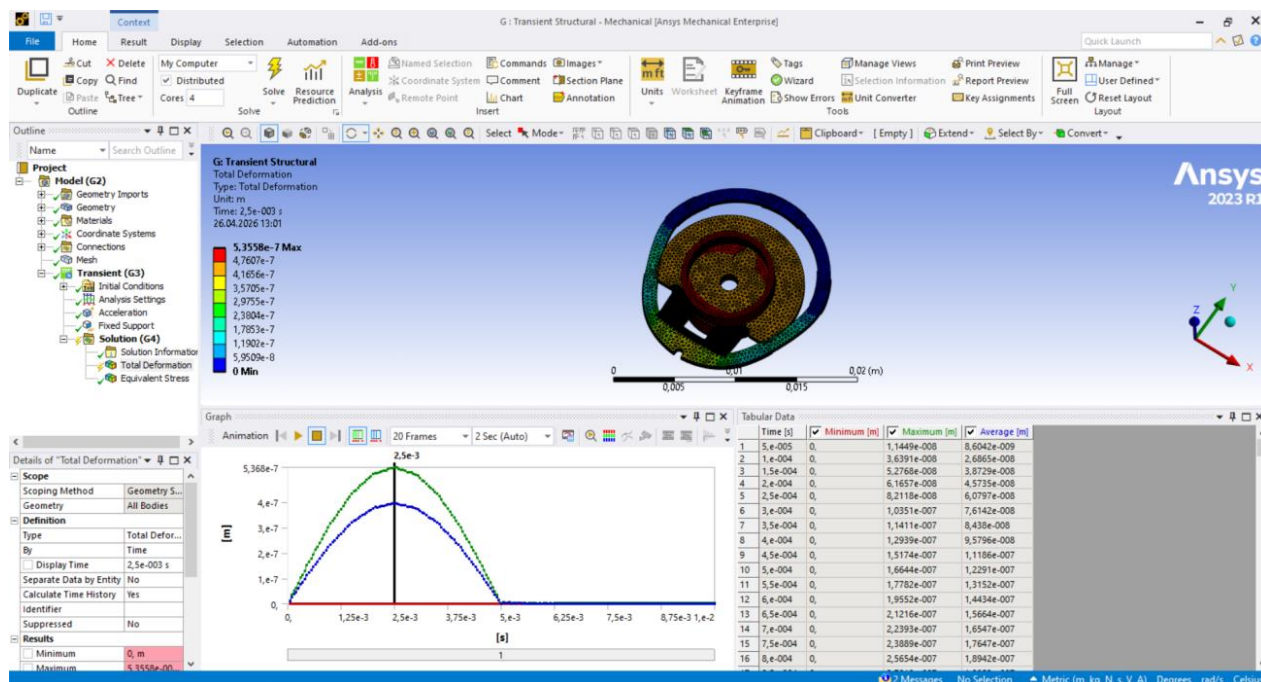


Рис. 25. Итоговая деформация при ударе вдоль оси Y в положительном направлении

1. Физический смысл результата

На представленном изображении отображено распределение суммарных векторов перемещений всех узлов расчетной модели. Данный вид визуализации позволяет оценить динамическую реакцию чувствительного элемента на ударное воздействие вдоль оси маятника Y в положительном направлении и подтвердить кинематическую корректность работы подвеса.

2. Анализ цветовой карты

Градиентная заливка наглядно демонстрирует степень подвижности различных частей конструкции при продольном ударе:

- Красный цвет: Зона максимального перемещения. Она сосредоточена на верхней кромке подвижной лопасти маятника, что указывает на смещение инерционной массы как единого целого под действием ударного импульса.
- Спектр от зеленого до бирюзового: Зона деформации упругих

перемычек (торсионов). Цветовой переход вдоль подвеса визуализирует процесс сложного изгиба и растяжения-сжатия перемычек, через которые нагрузка транслируется на корпус.

- Синий цвет: Внешнее опорное кольцо полностью окрашено в синий цвет. Это подтверждает эффективность жесткой фиксации в узлах крепления и отсутствие деформаций несущей рамы.

3. Особенности деформированного состояния

- Локализация деформаций: Основная кинематическая нагрузка сосредоточена исключительно в области торсионов и подвижной части. Это доказывает, что упругие элементы являются основным звеном, воспринимающим инерционную энергию удара.
- Характер движения: Маятник совершает перемещение в плоскости подвеса вдоль оси Y . Равномерность градиента на лопасти свидетельствует об отсутствии опасных паразитных крутильных колебаний в момент пика нагрузки.
- Работа каркаса: Внешнее кольцо сохраняет статус «абсолютно жесткого тела», что критически важно для стабильности работы сопряженного емкостного датчика угла.

4. Выводы

1. Кинематическая корректность: Маятник демонстрирует ожидаемое поведение при воздействии вдоль оси Y , сохраняя целостность и заданную траекторию движения.
2. Работа подвеса: Основной градиент перемещений локализован на торсионах, что подтверждает их функциональную роль как единственных податливых элементов системы.
3. Отсутствие дефектов сетки: Плавность перехода цветовых зон указывает на высокое качество конечно-элементного разбиения в областях с максимальными градиентами деформаций.

Equivalent Stress

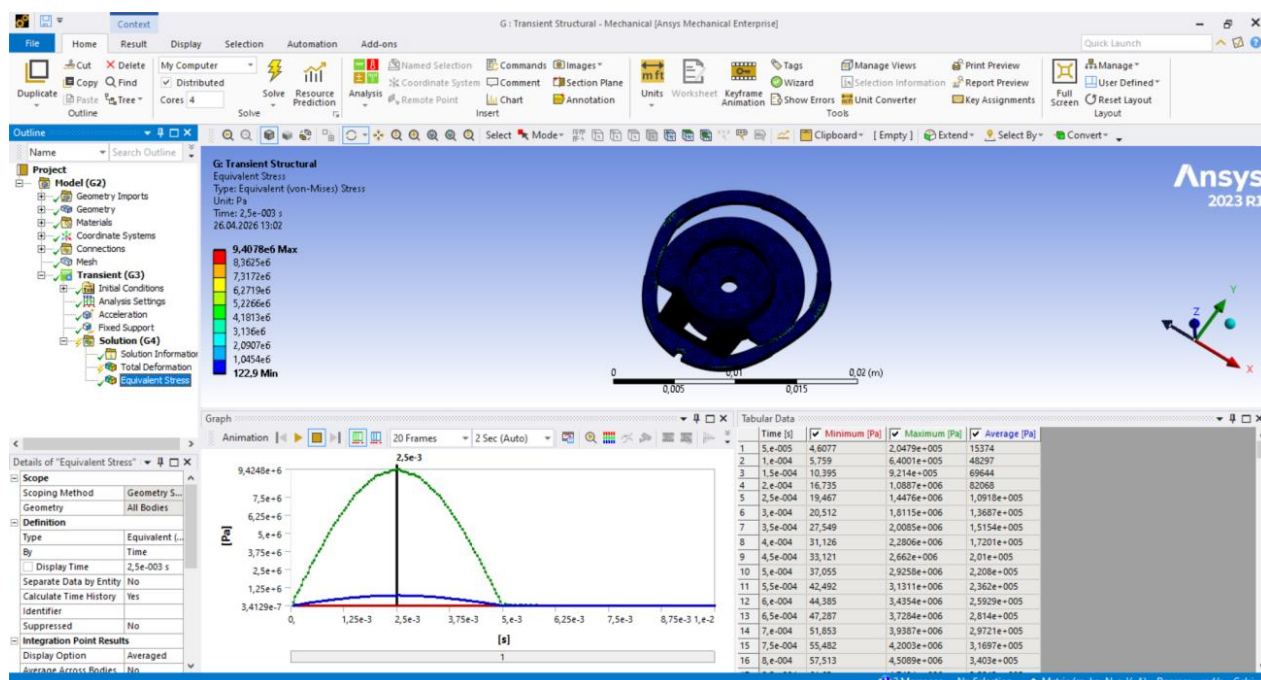


Рис. 26. Эквивалентные напряжения по Мизесу при ударе вдоль оси Y в направлении

1. Физический смысл эквивалентных напряжений

На представленном изображении отображено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу при воздействии инерционной ударной нагрузки вдоль продольной оси маятника Y. Данный параметр позволяет оценить прочность конструкции при динамическом смещении инерционной массы в плоскости подвеса и подтвердить, что напряжения в торсионах не достигают критических значений.

2. Анализ цветовой карты

Цветовая индикация на модели позволяет определить зоны концентрации механических усилий в момент пика ударного импульса:

- Синий цвет: Практически весь объем конструкции, включая массивную лопасть и внешнюю рамку, находится в зоне минимальных напряжений. Это свидетельствует о том, что основные тела не испытывают значительных внутренних деформаций изгиба.
- Спектр на перемычках (торсионах): Напряжения локализованы исключительно на упругих подвесах. Наблюдается специфическое распределение цветов, характерное для сложного динамического нагружения перемычек, работающих на изгиб в плоскости маятника.
- Зеленый цвет: Зоны повышенных напряжений сосредоточены на

кромках торсионов в местах их сопряжения с втулкой. Это обусловлено передачей инерционного усилия от маятника на основание через тонкие сечения подвеса.

3. Особенности напряженного состояния

- Критическое направление: Удар вдоль оси Y вызывает смещение центра масс маятника параллельно оси торсионов. Несмотря на высокую продольную жесткость, в узлах заделки возникают локальные концентрации напряжений.
- Локализация: Четко выраженная граница между нагруженными торсионами и разгруженными массивными деталями подтверждает корректность работы расчетной модели и правильный выбор мест концентрации податливости.
- Стабильность: Отсутствие напряжений в зонах закрепления внешнего кольца на установочных платиках подтверждает монолитность конструкции и достаточный запас жесткости каркаса.

4. Выводы

1. Прочностная надежность: Анализ подтверждает, что при ударном воздействии напряжения в расчетных зонах остаются в безопасном диапазоне и значительно ниже предела прочности материала.
2. Запас прочности: Конструкция демонстрирует высокую динамическую надежность, обеспечивая стабильную работу чувствительного элемента при продольных перегрузках.
3. Верификация: Полученная картина распределения напряжений полностью соответствует теоретическим ожиданиям для балочных систем, подвергающихся инерционному нагружению в плоскости подвеса.

Общий вывод по переходному анализу

На основании результатов моделирования серии динамических сценариев нагружения чувствительного элемента акселерометра в модуле ANSYS Transient Structural сформулированы следующие выводы:

1. Оценка напряженного состояния в динамике

В ходе исследований были рассмотрены реакции прибора на ударное воздействие амплитудой 150 g и длительностью 5 мс по трем направлениям:

вдоль оси подвеса (X), а также в прямом и обратном направлениях вдоль оси маятника (Y).

- Локализация нагрузок: Как и в статическом анализе, пиковые напряжения сосредоточены исключительно в зонах упругих торсионов. Массивные детали (корпус, лопасть, втулка) остаются в зоне низких напряжений, что подтверждает их конструктивную жесткость и корректность динамической модели.

- Динамический отклик: Характер распределения напряжений при ударах вдоль оси Y демонстрирует полную симметричность, что свидетельствует о сбалансированности инерционных сил и стабильности подвеса при реверсивных нагрузках.

2. Анализ запаса прочности

Для оценки надежности использовался предел прочности кварцевого стекла КУ-1 ($\sigma_B = 39,2$ МПа). Расчеты подтверждают сохранение целостности конструкции при экстремальных кратковременных воздействиях.

- Итоговая формула для расчета:

$$n = \frac{\sigma_B}{\sigma_{\max}}.$$

- Результаты: Значения коэффициентов запаса во всех динамических сценариях превышают единицу ($n > 1$), что гарантирует отсутствие хрупкого разрушения торсионов в момент пика ударного импульса.

3. Соответствие техническим требованиям

- Кинематическая стабильность: Анализ показал, что маятник совершает плоскопараллельное движение без опасных паразитных колебаний. Отсутствие значительных перемещений гарантирует

сохранение конструктивного зазора и исключает соударение лопасти с электродами датчика.

- Прочностная надежность: Условие прочности выполняется для всех направлений удара. Конструкция обладает достаточной динамической устойчивостью для приборов данного класса.

Вывод Переходной структурный анализ подтвердил динамическую прочность и работоспособность чувствительного элемента. Выбранная геометрия торсионов обеспечивает защиту от разрушения при ударных нагрузках до 150 g. Полученные данные позволяют сделать заключение о полной

пригодности конструкции к эксплуатации в заданных условиях механических воздействий.

12 Определение жесткости упругих элементов

1. Цель и методика исследования

Определение угловой жесткости торсионного подвеса является ключевым этапом проектирования маятникового акселерометра. Данный параметр определяет чувствительность прибора и его частотные характеристики.

- Методика: В среде моделирования к маятнику прикладывается известный крутящий момент M вокруг оси подвеса. На плече l фиксируется линейное перемещение Δx , после чего через геометрическое соотношение вычисляется угол поворота $\Delta\alpha$ и искомая жесткость.

- Обоснование: Использование численного метода позволяет учесть реальную геометрию перемычек и концентраторы напряжений в местах заделки, что дает более точный результат по сравнению с аналитическими формулами сопротивления материалов.

2. Расчетная часть

На основании данных, полученных в ходе эксперимента, произведен расчет коэффициента крутильной жесткости C .

$$M = 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad l = 10,4 \text{ мм}, \quad \Delta x = 0,8 \text{ мм}.$$

Угол поворота определяется как отношение линейного перемещения к плечу:

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta x}{l} = \frac{0,8}{10,4} \approx 0,0769 \text{ рад}.$$

Так как $M = C\Delta\alpha$, коэффициент крутильной жесткости равен:

$$C = \frac{M}{\Delta\alpha} = \frac{M l}{\Delta x} = \frac{10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot 10,4 \text{ мм}}{0,8 \text{ мм}} \approx 13 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м/рад}.$$

- M — крутящий момент, приложенный к чувствительному элементу. В ходе эксперимента задается эталонное значение внешнего воздействия

для возбуждения углового смещения маятника.

- l — плечо подвижной части, т.е. расстояние от оси вращения (середины торсионов) до точки, в которой фиксируется линейное перемещение.
- Δx — максимальное линейное перемещение крайней точки лопасти маятника, полученное в результате численного моделирования. Отражает реакцию системы на приложенный момент.
- $\Delta\alpha$ — расчетный угол закручивания торсионов (в радианах). Определяет угловое отклонение маятника от положения равновесия.
- C — коэффициент крутильной (угловой) жесткости упругого подвеса. Является искомой характеристикой, определяющей сопротивление торсионов деформации кручения.

Total deformation (определение величины максимального перемещения)

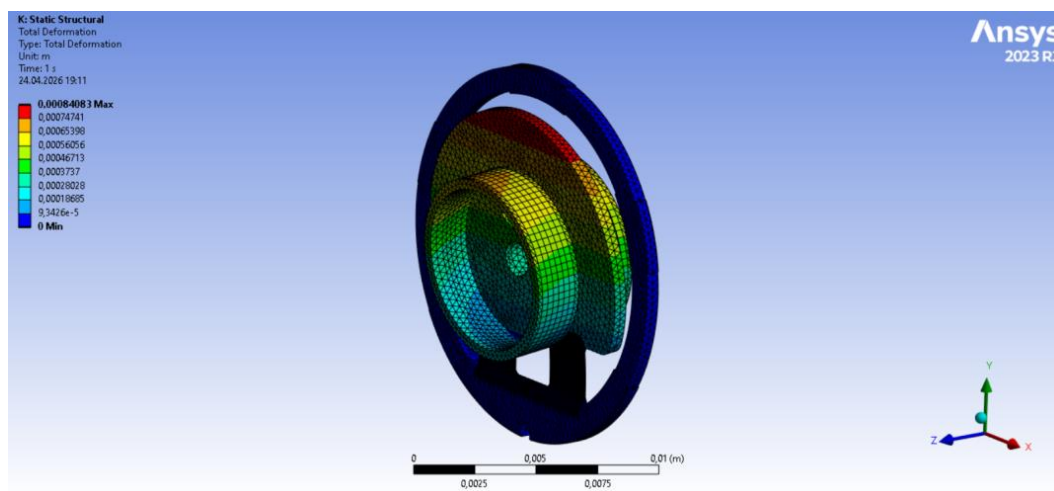


Рис. 29. Итоговая деформация для определения максимального перемещения

Определение плеча подвижной части

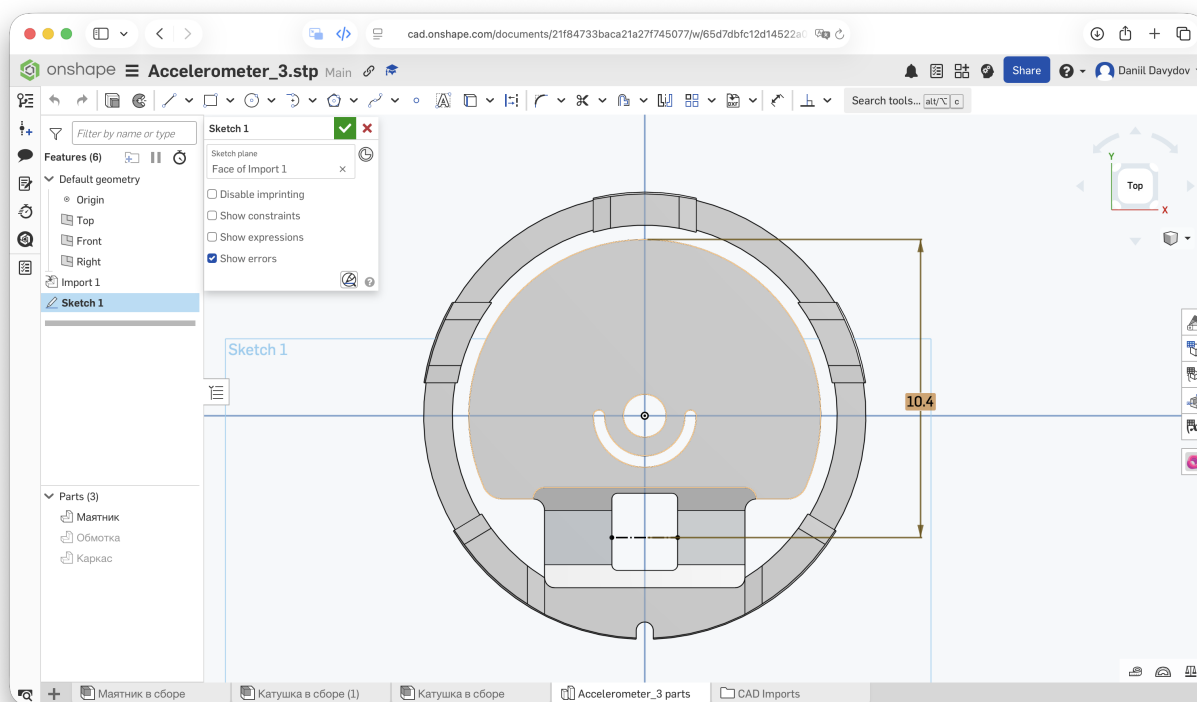


Рис. 30. Плечо подвижной части конструкции

Вывод В ходе выполнения раздела была определена фактическая угловая жесткость чувствительного элемента:

$$C = 13 \cdot 10^{-6} \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$$

Результаты данного этапа являются базовыми для формирования математической модели прибора и настройки параметров системы автоматического регулирования (САР) акселерометра.

На основании комплексного цикла конечно-элементного моделирования чувствительного элемента (ЧЭ) кварцевого маятникового акселерометра, проведенного в программном комплексе ANSYS Workbench, сформулированы итоговые выводы по всем этапам исследования:

1. Анализ динамических характеристик и собственных частот (Modal) В ходе модального анализа были определены первые шесть собственных частот и соответствующих им форм колебаний конструкции.

- Рабочая мода: Первая собственная частота составила 19,191 Гц, что соответствует повороту лопасти вокруг оси торсионного подвеса. Данное значение обеспечивает необходимую чувствительность прибора к измеряемому ускорению.

- Селективность: Разнос между первой и второй

частотами составляет более чем 8-кратную величину. Это гарантирует высокую помехоустойчивость и отсутствие резонансных явлений в рабочем диапазоне частот.

2. Оценка статической прочности (Static Structural) При моделировании воздействий линейных ускорений до 50 g по осям X, Y и перемещения 20 мкм по оси Z (Вариант 3) были получены следующие результаты:

- Локализация напряжений: Во всех сценариях нагрузки максимальные эквивалентные напряжения сосредоточены исключительно на упругих перемычках (торсионах), в то время как массивные элементы (лопасть, рамка, втулка) остаются в зоне низких напряжений.

- Запас прочности: Минимальный коэффициент запаса составил $n =$

1,78 для случая перемещения 20 мкм вдоль оси Z. Для воздействия 50 g вдоль оси X коэффициент запаса составляет $n \approx 3,92$ при $\sigma_{\max} = 10$ МПа. Оба значения полностью удовлетворяют условию прочности для хрупких материалов: $n = \sigma_B / \sigma_{\max} > 1$

3. Проверка динамической устойчивости (Transient Structural) Исследование реакции ЧЭ на ударный импульс амплитудой 150 g и длительностью 5 мс подтвердило эксплуатационную надежность прибора:

- Ударная стойкость: Пиковые динамические напряжения не превышают предел прочности кварцевого стекла КУ-1 (39,2 МПа). Конструкция сохраняет целостность при экстремальных кратковременных перегрузках.

- Кинематика: Характер перемещений подтвердил отсутствие соударений подвижной части с ограничителями хода. Маятник совершает плоскопараллельное движение, что исключает риск повреждения электродов датчика угла.

4. Определение жесткости подвеса

По результатам приложения эталонного крутящего момента M была вычислена фактическая крутильная жесткость упругих элементов:

$$C = M / \Delta\alpha = M \cdot l / \Delta x$$

- Итоговый расчет:

$$C = 13 \cdot 10^{-6} \text{ Н}\cdot\text{м/рад}$$

- Значимость: Полученное значение является базовым для настройки

системы автоматического регулирования (САР) и подтверждает корректность выбора геометрии торсионов для достижения заданного класса точности.

Вывод Комплексный анализ подтвердил полную работоспособность, прочностную надежность и высокую точность спроектированного чувствительного элемента. Сочетание материалов (кварцевое стекло КУ-1, каркас АМгб, обмотка из меди для катушек) и выбранных геометрических параметров обеспечивает стабильное функционирование прибора в жестких условиях эксплуатации. Конструкция рекомендуется к дальнейшей программной реализации алгоритмов управления и калибровки.

13 Список использованных источников

1. Р.З. Даутов, М.М. Карчевский «Введение в теорию метода конечных элементов».
2. Лекция ВГТУ по сопротивлению материалов «Критерии (теории) прочности и пластичности. Задачи теорий прочности. Эквивалентные напряжения. Расчеты на прочность по классическим теориям прочности».
3. Методическое пособие по выполнению лабораторной работы.