

Лабораторная работа по дисциплине «РиС на ЭВМ» модуль Ansys

Задание на лабораторную работу:

- 1) Изучить метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе Ansys.
- 2) Провести механические расчеты конструкции акселерометра с помощью модулей Modal, Static Structural и Transient Structural.
- 3) Составить отчет по результатам проведения лабораторной работы.

Объект исследования:

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

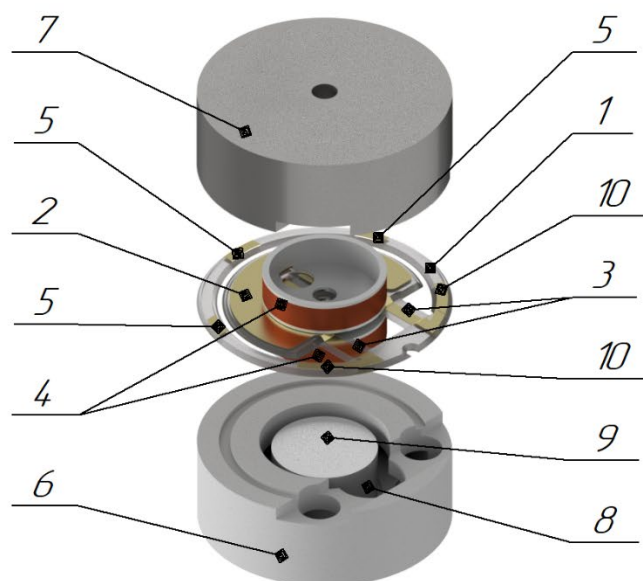


Рис. 1. Чувствительный элемент акселерометра с магнитной системой (1 – рамка, 2 – подвижная лопасть с напыленными электродами, 3 – упругие перемычки с напыленными на них токоподводами, 4 – катушки плунжерного датчика силы, 5 – установочные пластики, 6,7 – нижний и верхний магнитопроводы, 8 – постоянный магнит, 9 – полюсный наконечник, 10 – контактные площадки)

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.

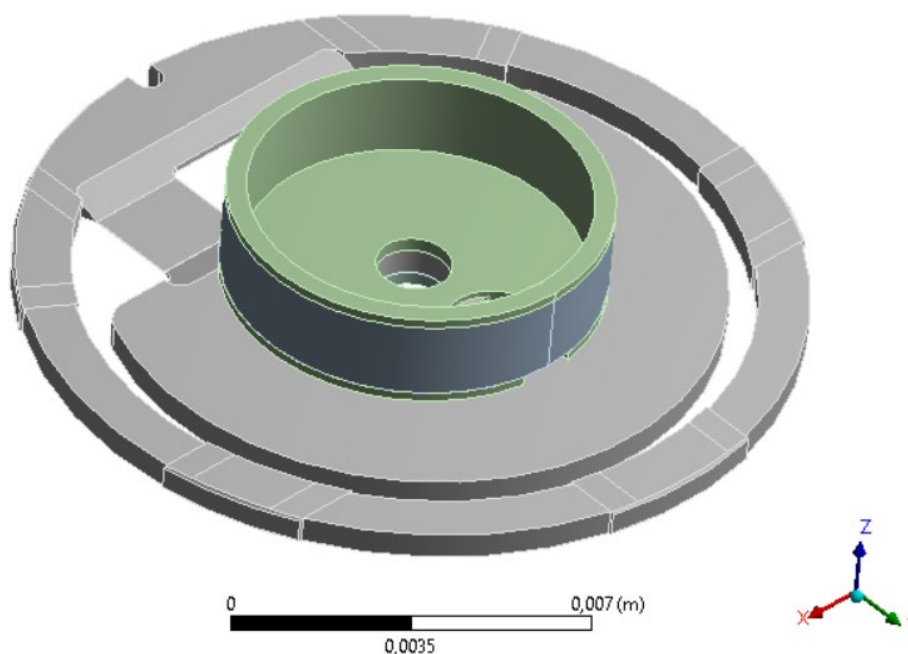


Рис. 2. Маятниковый узел акселерометра (ось X – ось подвеса, ось Y – ось маятника, ось Z – измерительная ось)

Материалы акселерометра:

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

Density	2,21	g cm ⁻³
<i>Isotropic Elasticity</i>		
Young's Modulus	7,36E+10	Pa
Poisson's Ratio	0,19	

Таблица 2 - Медная катушка

Density	4,412	g cm ⁻³
<i>Isotropic Elasticity</i>		
Young's Modulus	1,1E+11	Pa
Poisson's Ratio	0,34	

Примечание: плотность меди изменена с учетом особенностей конструкции катушки.

Таблица 3 – АМg6 (Каркас катушек)

Density	2,64	g cm ⁻³
<i>Isotropic Elasticity</i>		
Young's Modulus	7,1E+10	Pa
Poisson's Ratio	0,3	

Таблица 4 – Условия эксплуатации акселерометра

Параметры	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Рабочий диапазон частот	20-2000 Гц			
Диапазон измеряемых ускорений	±35g	±40g	±50g	±45g
Ударные воздействия*	±130g	±140g	±150g	±135g

Примечание: ударное воздействие длительностью 5 мс.

Проводимые исследования и расчеты:

- 1) Провести модальный анализ для определения первых шести собственных частот и форм колебаний на этих частотах.
- 2) Провести статический анализ конструкции чувствительного элемента акселерометра (маятникового узла) при наличии ускорений, в пределах диапазона измерения, по всем осям акселерометра (вдоль оси маятника расчет проводится в положительном и отрицательном направлении).
- 3) Определить запасы прочности конструкции для каждого исследования.
- 4) Определить жесткость упругого подвеса маятникового узла акселерометра.
- 5) Провести переходной структурный анализ чувствительного элемента акселерометра (маятникового узла) при воздействии ударных нагрузок (последовательно вдоль оси маятника и подвеса).

Описание основных элементов программного комплекса Ansys

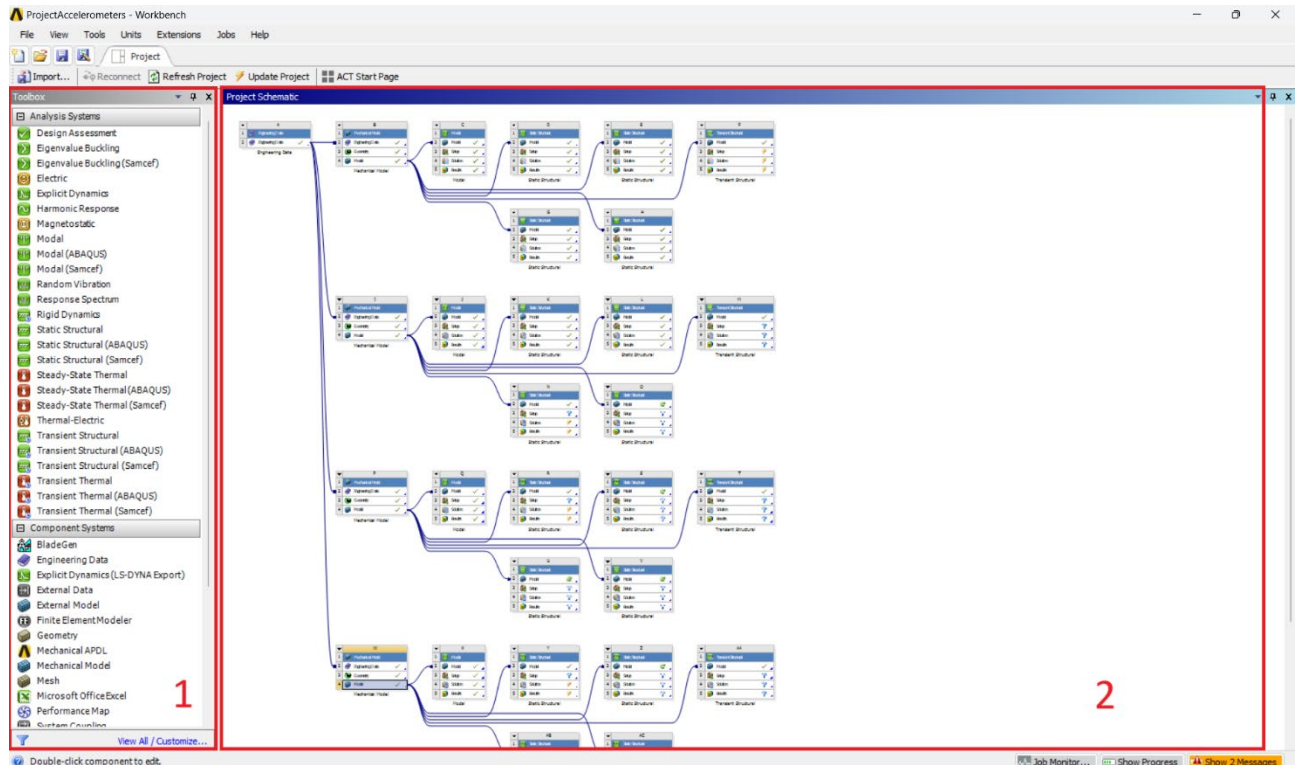
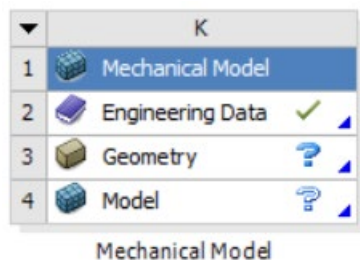


Рис. 3. Пользовательский интерфейс Ansys Workbench (1 – область с модулями Ansys для настройки и проведения расчетов, 2 – рабочая область проекта)

Для создания и настройки параметров проекта необходимо из области 1 добавлять блоки в рабочую область проекта 2 перетаскиванием ЛКМ или двойным нажатием ЛКМ на модуль. Добавленные блоки могут соединяться между собой для обмена настроенными или рассчитанными параметрами. Это дает возможность оптимизировать процесс настройки проекта для одного объекта исследований.

Основные модули, используемые в данной лабораторной работе:

	Модуль Engineering Data необходим для настройки параметров материалов, используемых в проекте. В данном программном комплексе есть библиотека готовых материалов, а также имеется возможность создавать материалы с необходимыми параметрами.
--	---



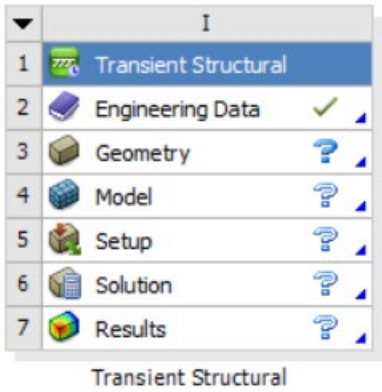
Модуль **Mechanical Model** необходим для настройки расчетной модели для проведения дальнейших исследований. В данном модуле настраиваются материалы (элемент **Engineering Data**), импортируется готовая или создается новая геометрическая модель (элемент **Geometry**), настраиваются параметры модели (элемент **Model**). Элементом конструкции назначаются материалы, добавленные в проект, настраиваются контакты между отдельными элементами конструкции, задаются параметры сеточного построителя для реализации численного метода конечных элементов.



Модуль **Modal** необходим для проведения модального анализа конструкции. Элементы **Engineering Data**, **Geometry**, **Model** настраиваются отдельно или импортируются из модуля **Mechanical Model**, описанного ранее. В **Setup**, **Solution**, **Results** производится настройка параметров расчета, определение граничных условий модели и вывод результатов.



Модуль **Static Structural** необходим для проведения статического структурного анализа конструкции, то есть исследование реакции системы на входные воздействия, не зависящие от времени. Элементы **Engineering Data**, **Geometry**, **Model** настраиваются отдельно или импортируются из модуля **Mechanical Model**, описанного ранее. В **Setup**, **Solution**, **Results** производится настройка параметров расчета, определение граничных условий модели и вывод результатов.

	Модуль Transient Structural необходим для проведения переходного структурного анализа конструкции, то есть исследование реакции системы на входные воздействия, зависящие от времени. Элементы Engineering Data, Geometry, Model настраиваются отдельно или импортируются из модуля Mechanical Model, описанного ранее. В Setup, Solution, Results производится настройка параметров расчета, определение граничных условий модели и вывод результатов.
---	--

Состояния элементов модулей

✓	Элемент настроен правильно. Данные актуальны, расчет выполнен или параметры заданы корректно
↻	Данные блока изменены, но еще не применены к другим блокам. (Необходимо нажать кнопку Refresh Project)
⚡	Внутри модуля изменились параметры или не выполнен расчет
?	Не заданы необходимые параметры

Соединение блоков:

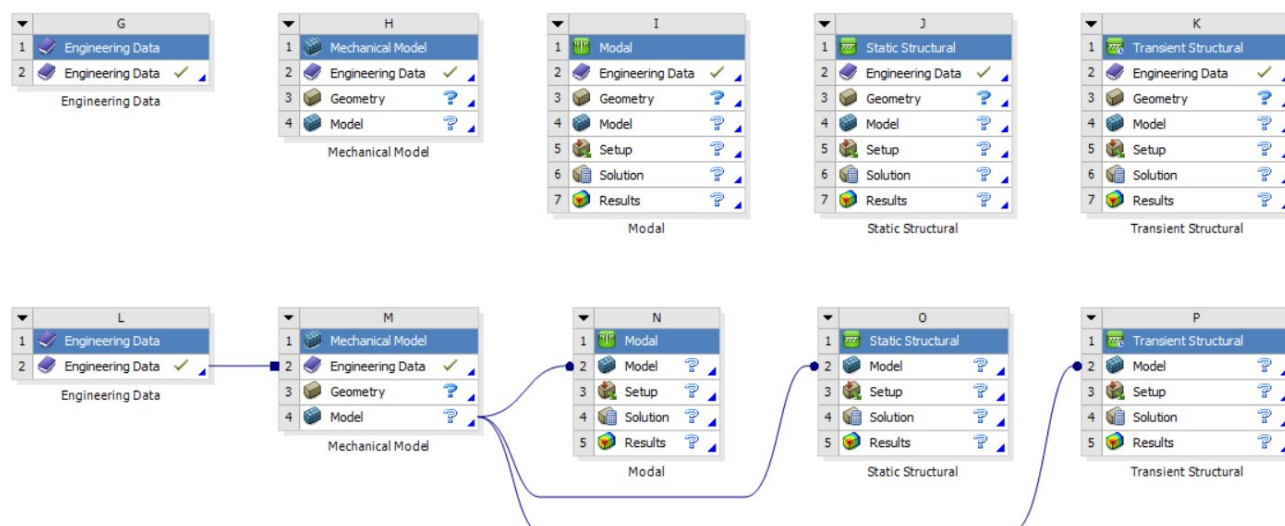


Рис. 4. Соединение блоков

Соединение блоков между собой производится перетаскиванием ЛКМ соответствующих элементов модулей. Элемент **Engineering Data** соединяется с

элементом **Engineering Data** модуля **Mechanical Model**. Элемент **Model** модуля **Mechanical Model** соединяется с элементом **Model** модулей **Modal**, **Static Structural**, **Transient Structural**. Такой подход настройки проекта необходим для оптимизации процесса моделирования, так как создание и добавление материалов, настройка контактов деталей конструкции и построение сетки расчетной модели производится в модулях **Engineering Data** и **Mechanical Model** один раз для всех исследований.

Модуль Engineering Data

При двойном нажатии ЛКМ на элемент **Engineering Data** блока **Engineering Data** открывается новая вкладка с параметрами (Рис. 5).

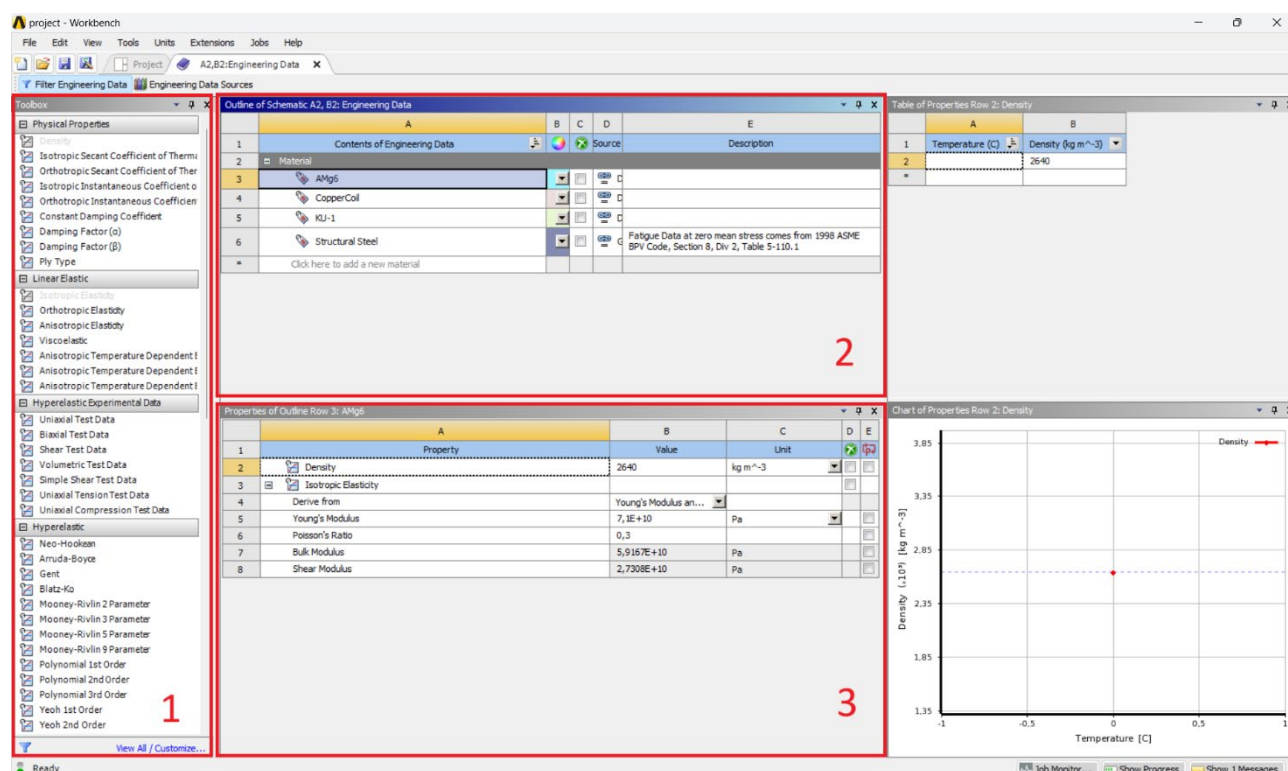


Рис. 5. Вкладка настройки материалов в модуле **Engineering Data** (1 – параметры, которые можно добавлять и настраивать для каждого созданного материала; 2 – созданные и добавленные из библиотеки материалы; 3 – настройка добавленных характеристик материалов)

В данной лабораторной работе необходимо создать три материала для конструкции исследуемого объекта: КУ-1, АМг6 и материал медной обмотки с

учетом упрощения конструкции (в геометрической модели обмотка выполнена в виде кольца).

Для создания нового материала в области 2 (Рис. 5) в первом столбце таблицы вводится наименование материала и далее из области 1 перетаскиваются ЛКМ необходимые параметры. Для механических исследований конструкции без учета тепловых эффектов достаточно добавить параметры **Density** и **Isotropic Elasticity**. Далее в области 3 вводятся значения необходимых характеристик (плотность, модуль Юнга, коэффициент Пуассона). Значения указаны в таблицах 1-3.

Модуль Mechanical Model

Для начала работы с геометрией исследуемого объекта необходимо импортировать файл с расширением .step/.stp. Для этого на элементе **Geometry** модуля **Mechanical Model** вызывается ПКМ контекстное меню и выбирается пункт **Import Geometry** → **Browse...** (Рис. 6). Далее выбирается файл геометрии.

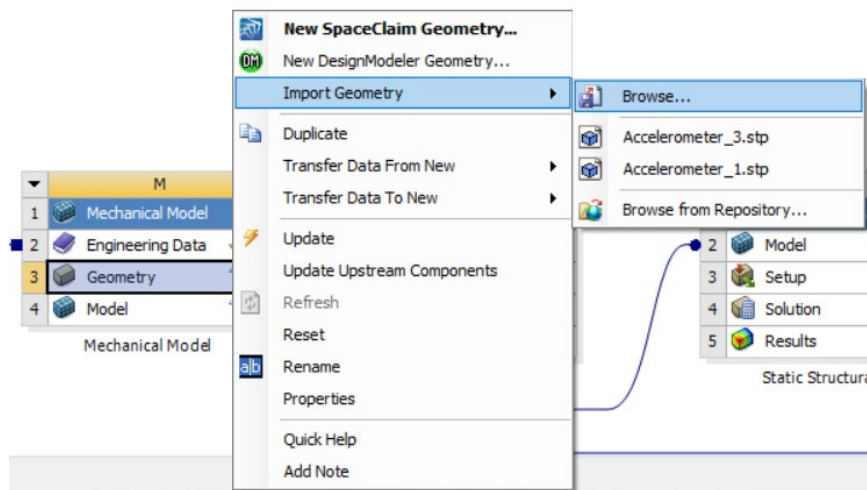


Рис. 6. Добавление файла геометрии в проект

После выбора геометрии повторно вызывается контекстное меню элемента **Geometry** и выбирается пункт **Edit Geometry in DesignModeler**. Далее откроется новое окно (Рис. 7), в котором нужно сгенерировать геометрию нажатием кнопки **Generate** в меню окна.

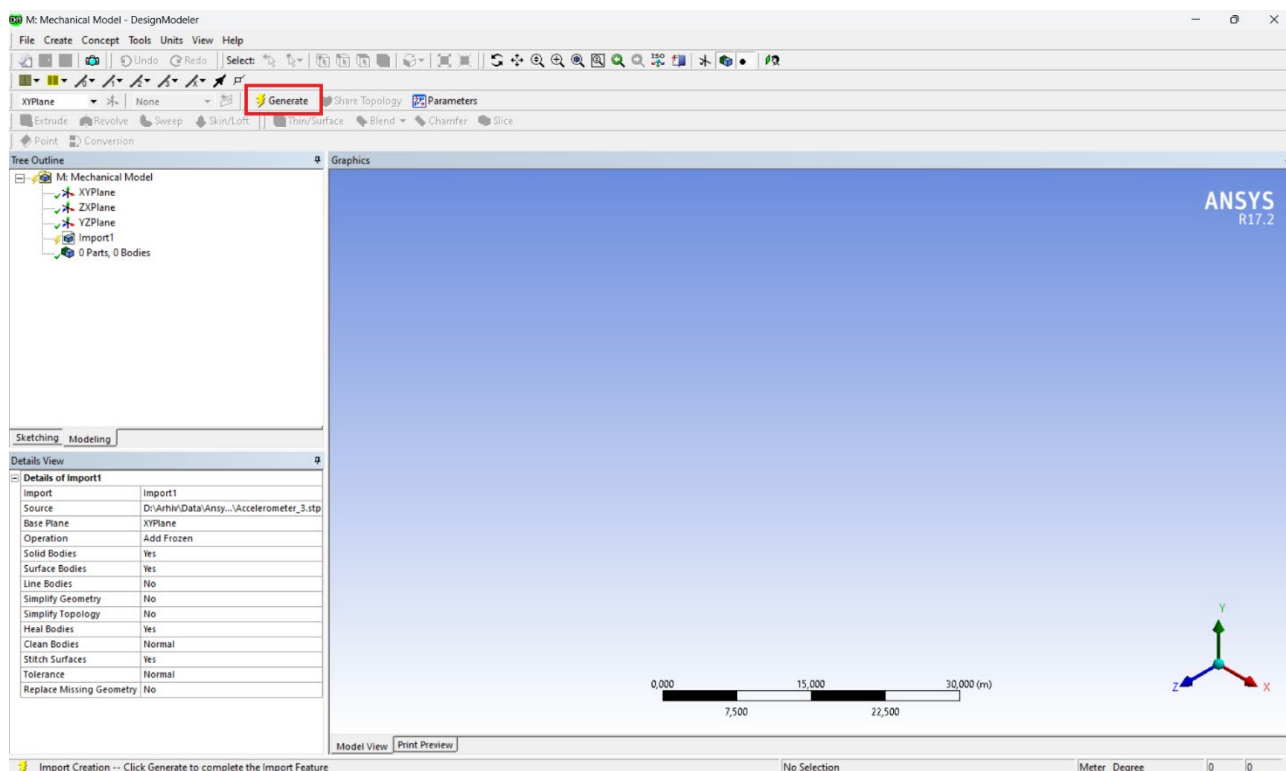


Рис. 7. Окно DesignModeler

Далее отобразится геометрическая модель чувствительного элемента акселерометра, выполненная в виде сборки из отдельных деталей (Рис. 8).

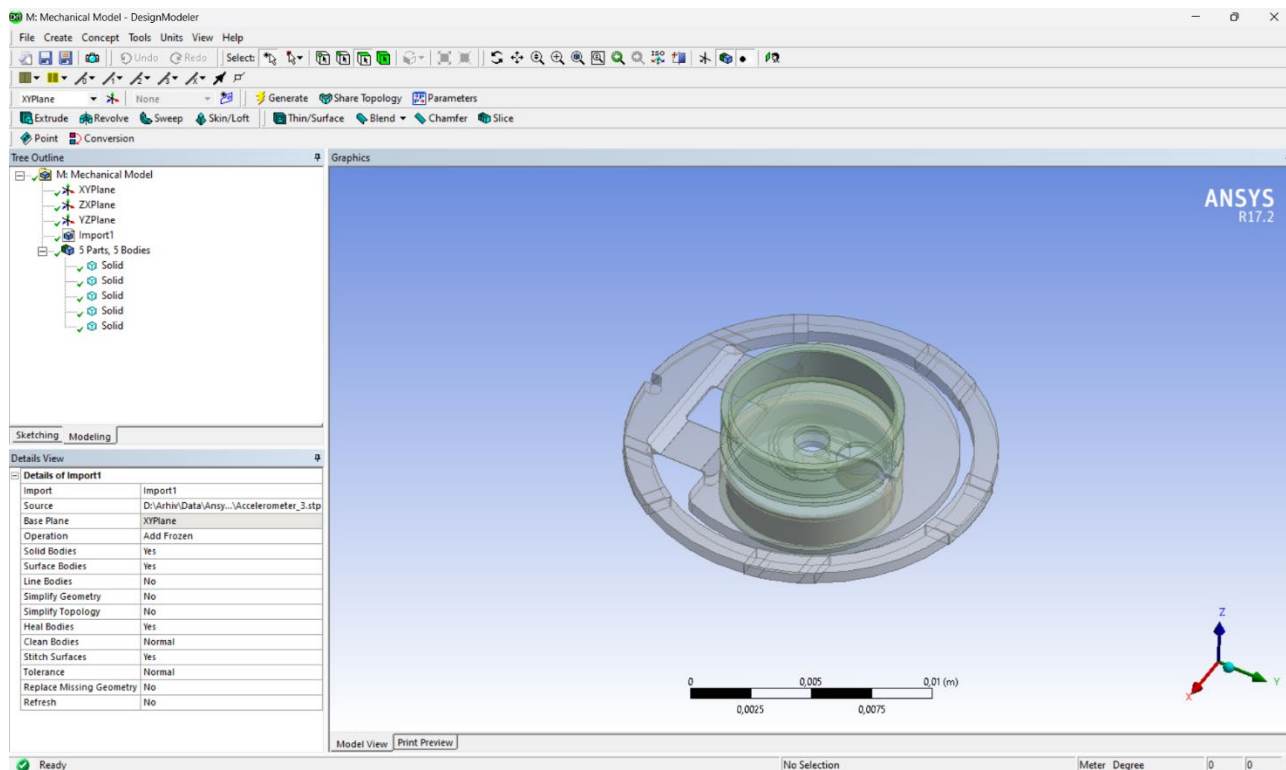


Рис. 8. Геометрия чувствительного элемента акселерометра

После этого окно **DesignModeler** можно закрывать.

Переходим к настройке модели в модуле **Mechanical Model**. Для этого в главном окне проекта в блоке **Mechanical Model** нажимаем два раза ЛКМ на элемент **Model**, после чего откроется новое окно (Рис. 9).

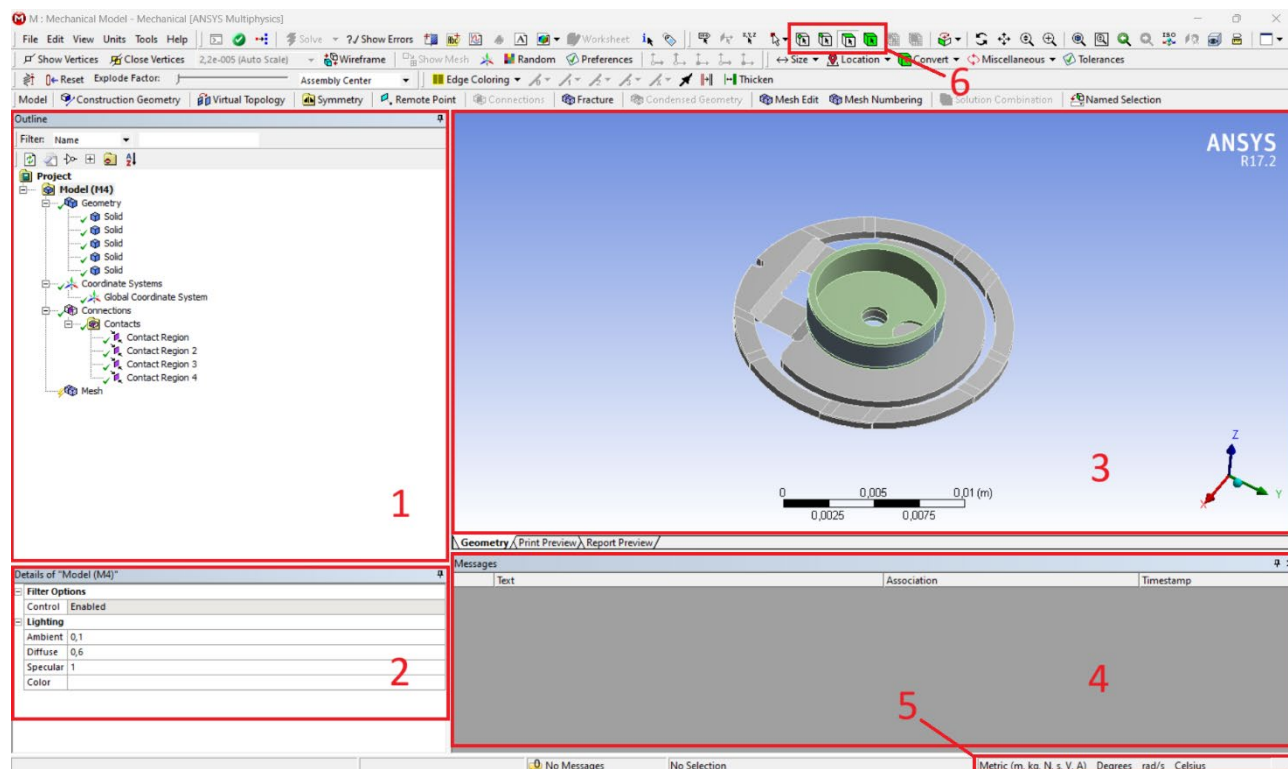


Рис. 9. Окно Mechanical Model (1 – область элементов модуля; 2 – параметры выбранного элемента; 3 – область отображения модели; 4 – область с сообщениями программы; 5 – текущие единицы измерения; 6 – кнопки переключения режима выделения объектов модели (точки, ребра, поверхности, тела))

Присвоим каждому элементу конструкции соответствующий материал, заранее созданный в модуле **Engineering Data**. Для этого в области 1 в пункте **Geometry** выберем одну из деталей конструкции и в области 2 (**Details of ...**) выберем **Material** → **Assignment** → «Наименование материала» (для кварцевой пластины чувствительного элемента «КУ-1», для каркаса катушек – «АМг6», для медной обмотки – медь с измененной плотностью). На рисунке 10 выделены необходимые элементы для настройки.

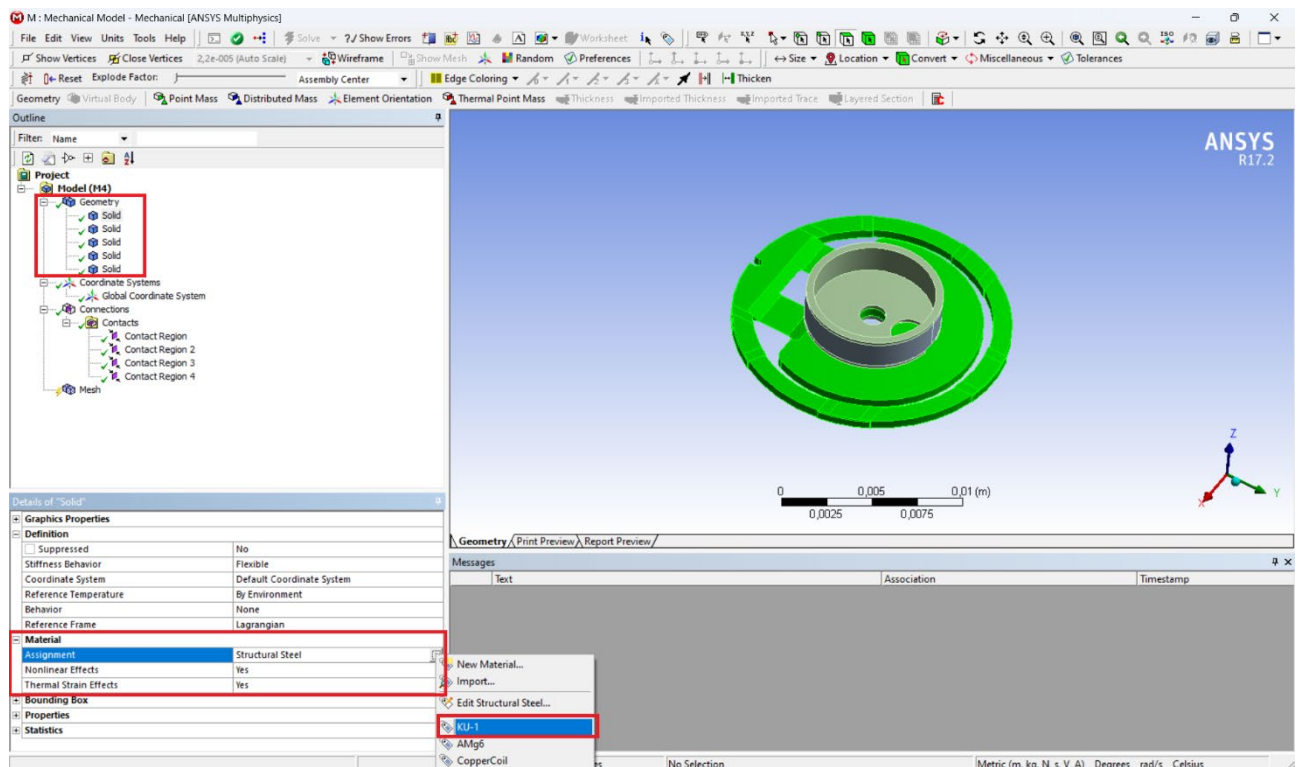


Рис. 10. Присваивание материалов элементам конструкции

Далее настроим соединения между деталями сборки. Для этого в области 1 (Рис. 9) выберем все автоматически созданные контакты («Contact Region») и удалим их (Рис. 11).

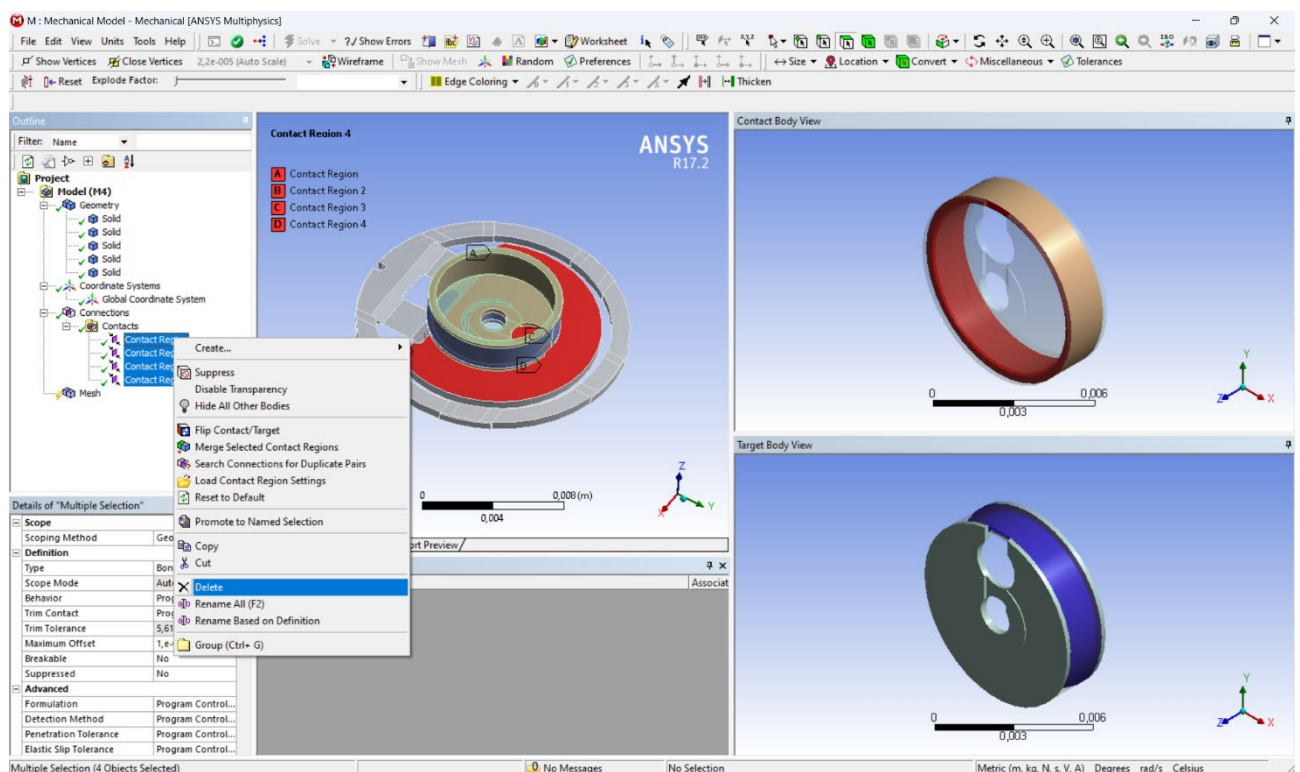


Рис. 11. Удаление автоматически созданных контактов

Также необходимо отключить автоматическое определение контактов при обновлении проекта, как показано на рисунке 12 (нажимаем ЛКМ на элемент **Connections** и в области **Details of...** выбираем параметр **Auto Detection** → **Generate Automatic Connection On Refresh** и присваиваем значение «No») и произвести ручную настройку параметров определения контактов, как показано на рисунке 13 (нажимаем ЛКМ на элемент **Contacts** и в области **Details of...** выбираем параметр **Auto Detection** → **Tolerance Type** и присваиваем значение «Value»; а также параметру **Tolerance Value** присваиваем значение «1E-6», указав допуск, равный 1 мкм). Данные настройки необходимы для более точного определения контактных плоскостей между элементами конструкции, так как это в дальнейшем влияет на построение сетки и результаты расчетов.

Далее создаем новые контакты, как показано на рисунке 14 (нажимаем ПКМ на элемент **Contacts** → **Create Automatic Connections**). После этих действий будут созданы новые контактные соединения типа Bonded, то есть жесткое крепление по трем осям.

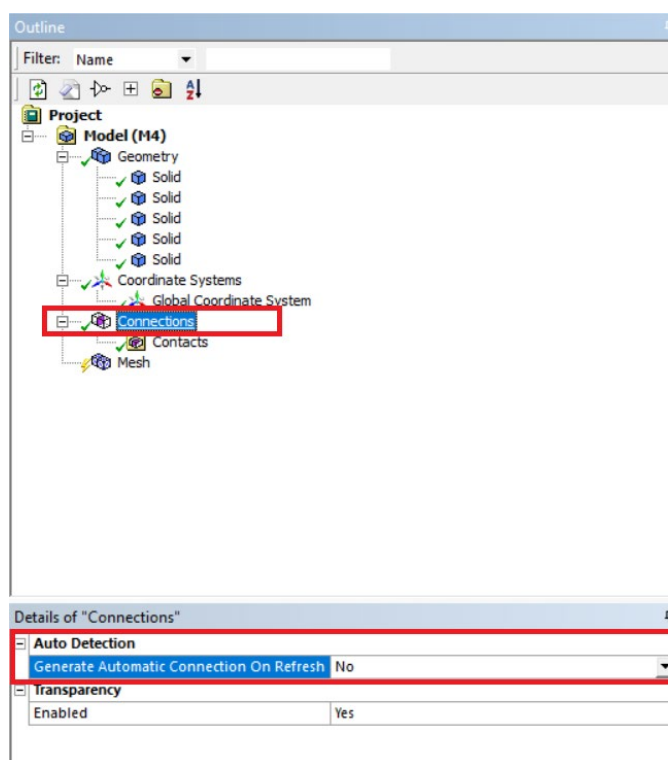


Рис. 12. Отключение автоматического определения контактов между элементами конструкции при обновлении проекта

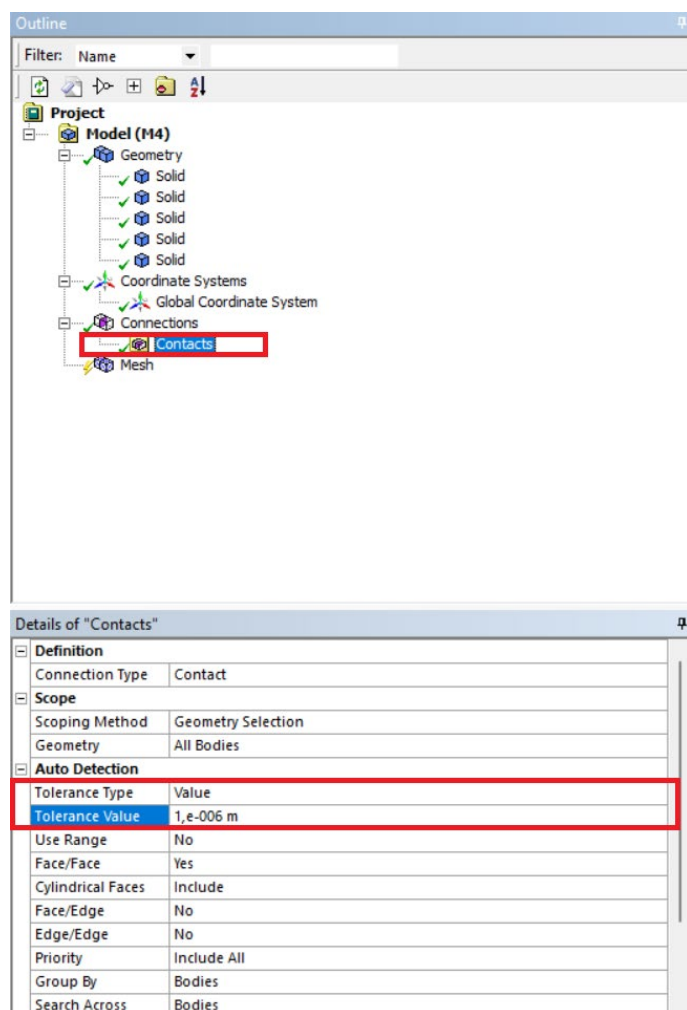


Рис. 13. Настройка определения контактов между деталями конструкции

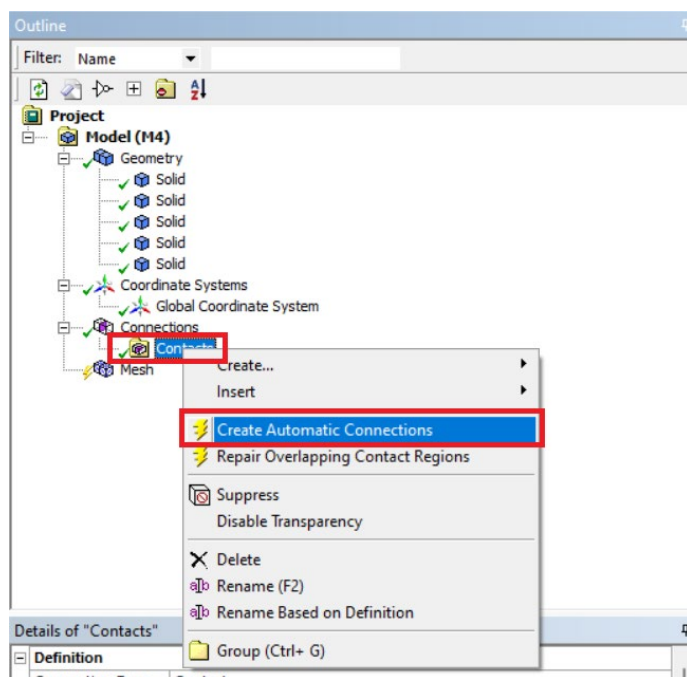


Рис. 14. Создание новых контактов между деталями конструкции

Следующий этап настройки расчетной модели — это создание расчетной сетки. Для реализации метода конечных элементов необходимо правильно настроить сеточный построитель с учетом особенностей конструкции, точности решения и вычислительной мощности рабочей станции. Размеры элементов сетки и количество этих элементов в расчетной области влияют на точность решения, а также на время вычисления, поэтому необходимо оптимизировать данные параметры.

В маятниковом узле акселерометра (Рис.1) наиболее деформируемыми элементами конструкции являются упругие перемычки, поэтому в этой области необходимо повышать точность решения, уменьшив размеры элементов сетки относительно размеров элементов в других областях расчетной модели. Подбор оптимальных параметров происходит итерационно в зависимости от полученных результатов и времени расчета до тех пор, пока результат не станет удовлетворительным.

Зададим размер элементов сетки для всей расчетной области $3 \cdot 10^{-4}$ м, а для упругих перемычек — $1 \cdot 10^{-4}$ м. Для этого нажимаем ПКМ на элемент **Mesh** и в контекстном меню выбираем **Insert** → **Sizing**, как показано на рисунке 15. При этом в дереве проекта появится новый элемент **Sizing** (Рис. 16), который необходимо настроить.

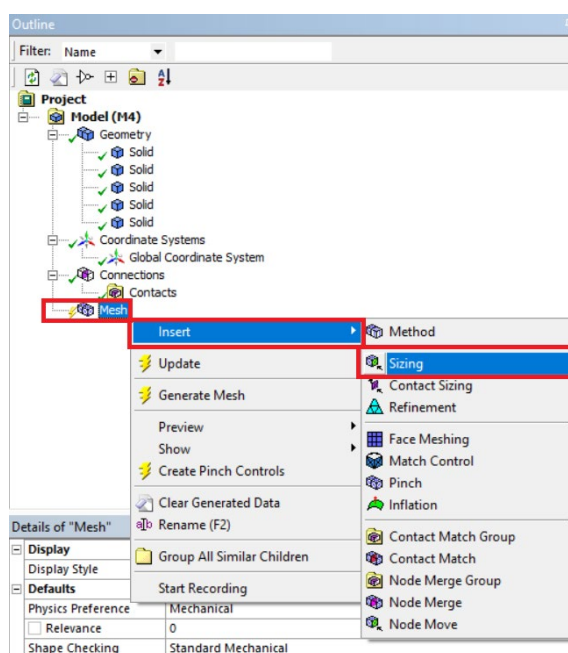


Рис. 15. Добавление нового элемента Sizing

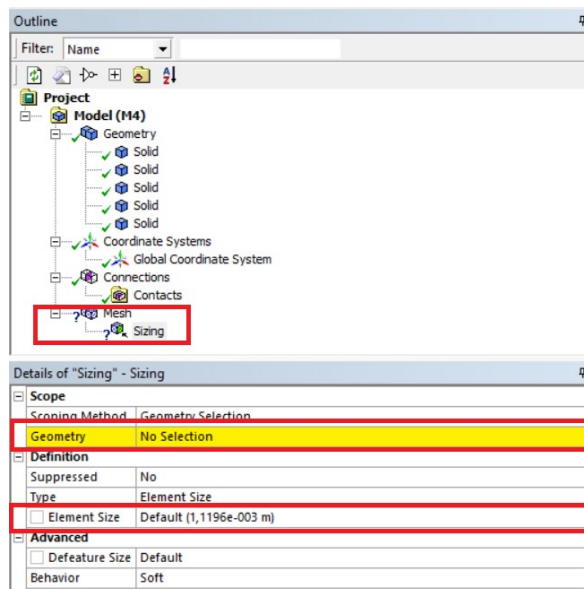


Рис. 16. Настройка элемента Sizing

Выберем элемент **Sizing** и в окне **Details of...** выберем пункт **Geometry**, после чего в верхней панели (или сочетанием **Ctrl+B**) выберем режим выделения объектов **Body** и выделим все элементы конструкции. Далее нажимаем кнопку **Apply**. После этого в окне **Details of...** в пункте **Element Size** установим значение « $3E-4$ ».

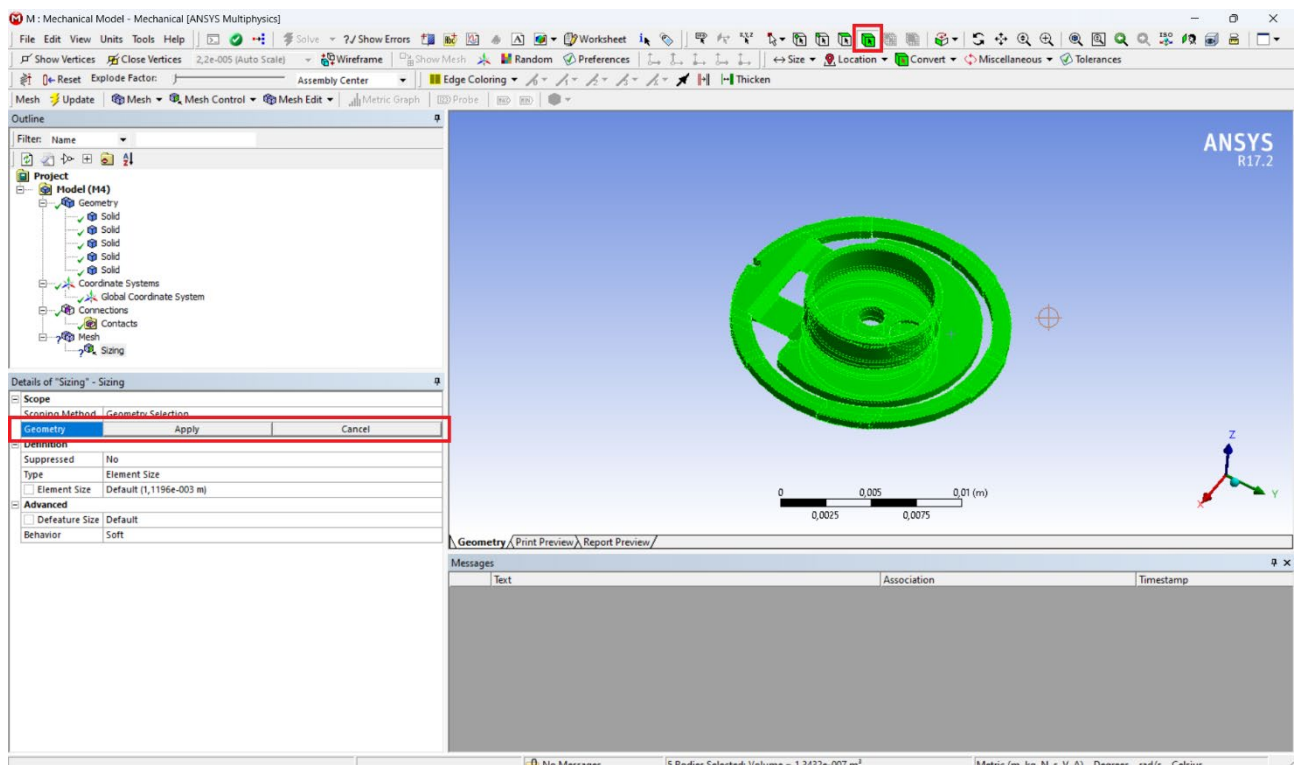


Рис. 17. Настройка элемента Sizing

Далее создадим еще один элемент **Sizing** для упругих элементов конструкции. Для этого повторим действия, показанные на рисунке 15. Но в качестве геометрии выберем поверхности, относящиеся к упругим элементам (Рис. 18). В данном случае необходимо переключить режим выделения объектов на **Face** с помощью кнопки на верхней панели или с помощью сочетания (**Ctrl+F**). При этом выделяются поверхности, как показано на рисунке 18, симметрично сверху и снизу. Размер элементов сетки устанавливается $1 \cdot 10^{-4}$ м (1E-4).

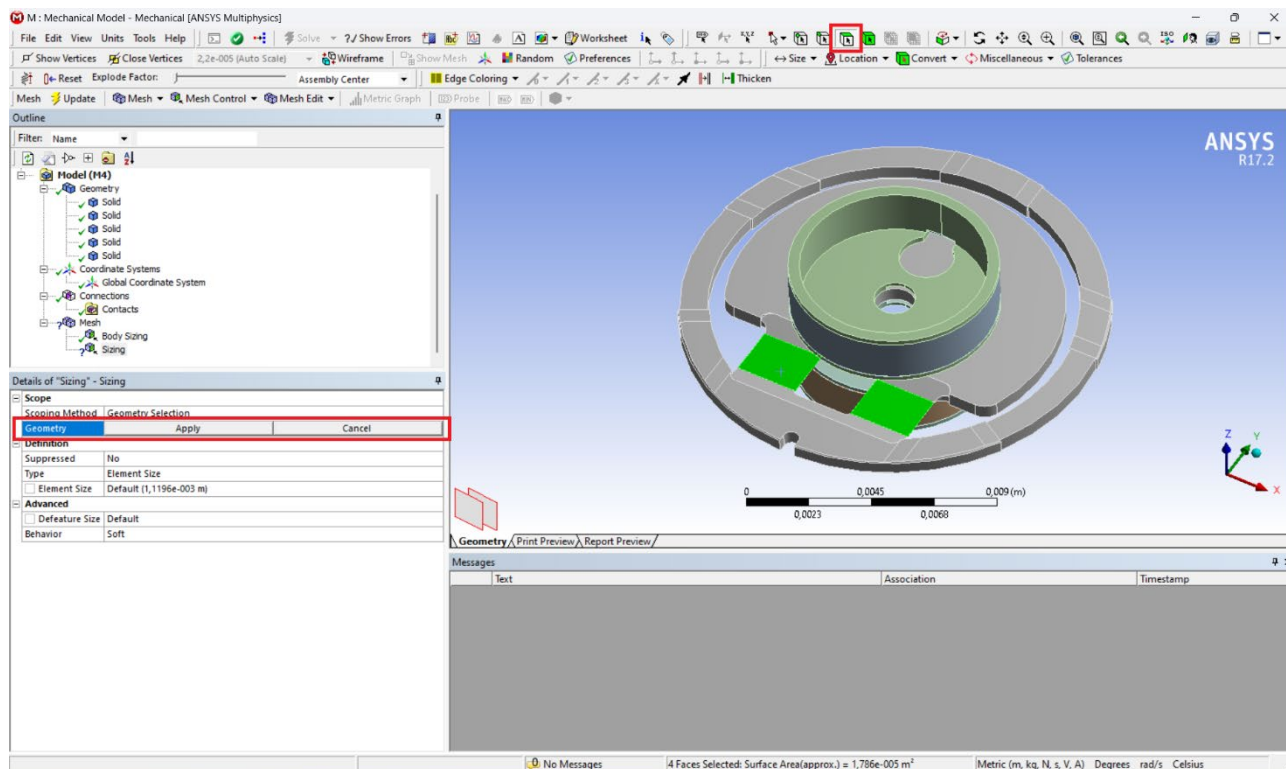


Рис. 18. Настройка элемента Sizing для упругих перемычек

Далее нажимаем ПКМ на элемент **Mesh** и в контекстном меню выбираем **Generate Mesh**.

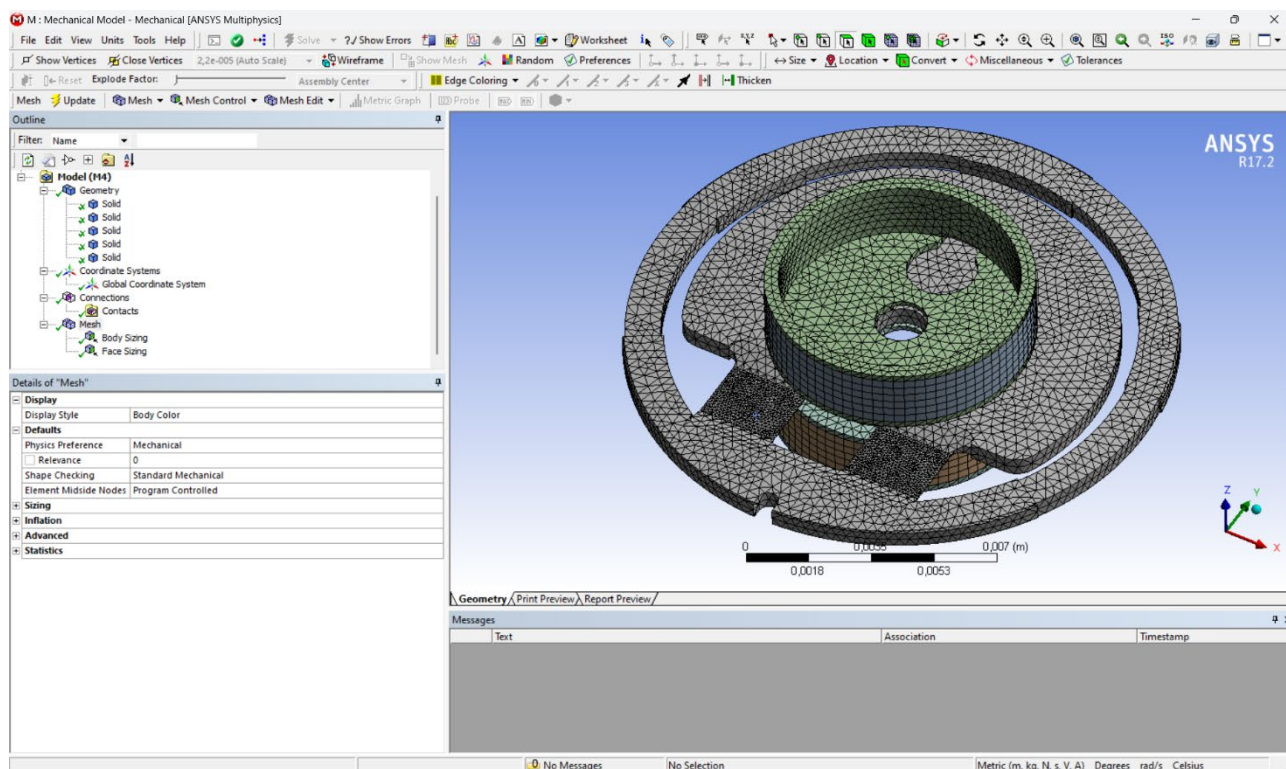


Рис. 19. Результирующая сетка

После получения сгенерированной сетки (Рис. 19) процесс настройки модели завершен. Текущее окно можно закрыть. В основном окне программы нажимаем кнопку **Update Project** и затем **Refresh Project**.

Модуль Modal

В модуле **Modal** двойным нажатием ЛКМ на элемент **Setup** открываем окно настройки модального расчета конструкции (Рис. 20).

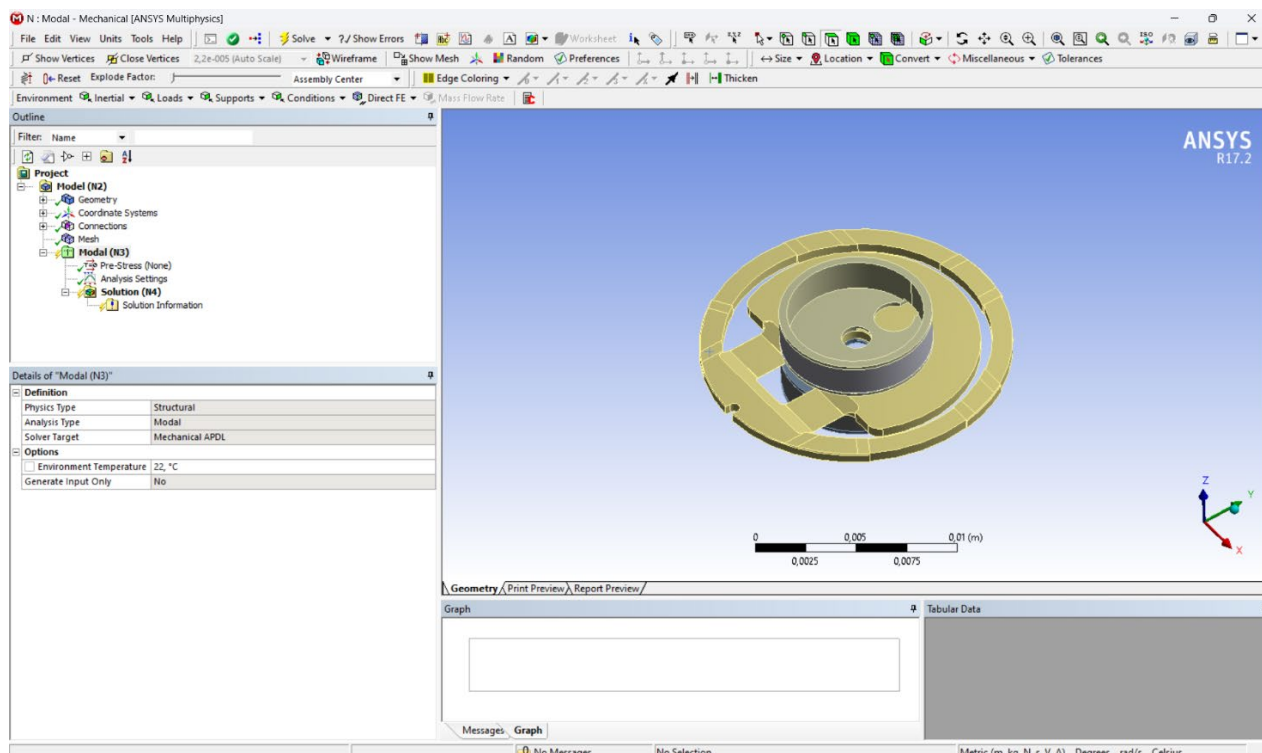


Рис. 20. Окно Modal

Для данного исследования необходимо задать граничные условия, а именно, закрепить модель (ограничить перемещения по трем осям) в необходимых точках с учетом особенностей конструкции. Маятниковый узел компенсационного акселерометра зажимается между двумя магнитопроводами (Рис. 1) таким образом, что установочные пластины формируют зазоры 20 мкм. Следовательно, закреплять модель необходимо в местах контактов магнитопроводов и установочных пластинок на рамке. Для этого нажимаем ПКМ на элемент **Mesh** и выбираем **Insert** → **Fixed Support**. В качестве геометрии выделим поверхности установочных пластинок, как показано на рисунке 21.

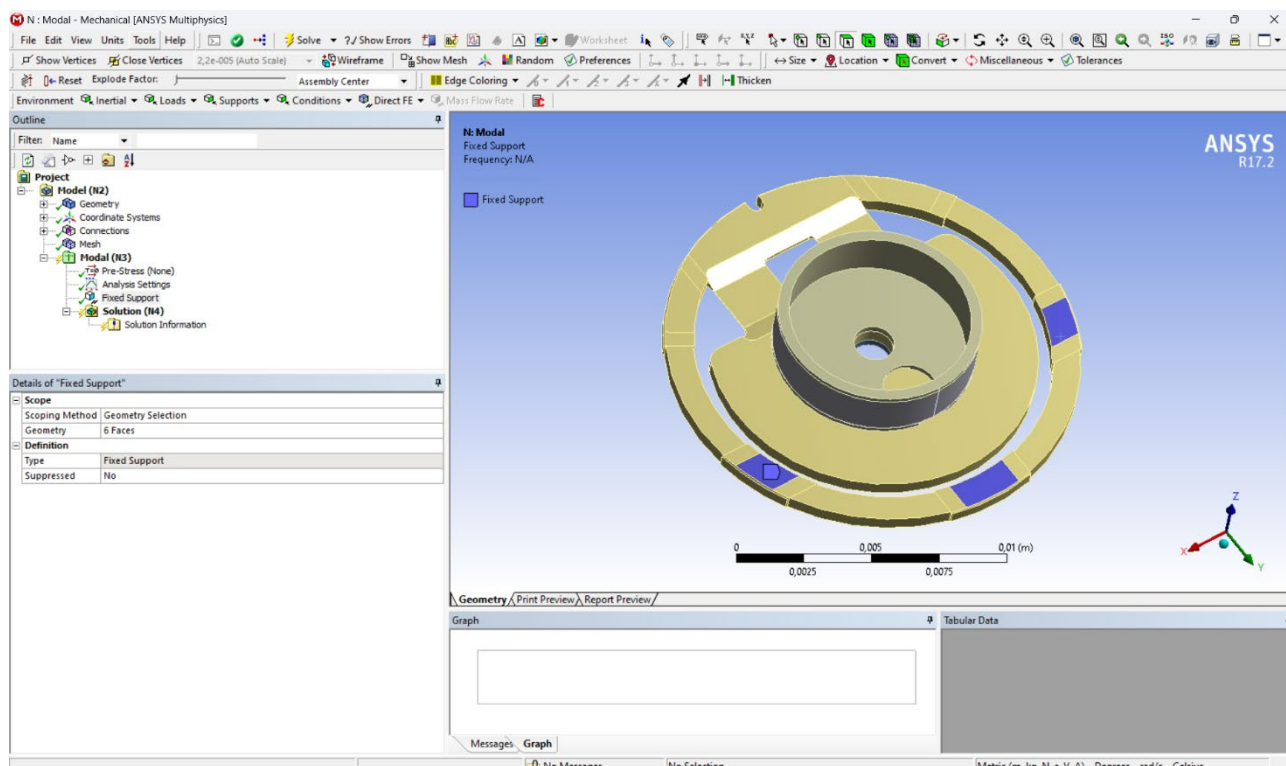


Рис. 21. Настройка закрепления модели

Далее в настройках элемента **Analysis Settings** в пункте **Max Modes to Find** установим значение «6», что соответствует поиску первых шести мод конструкции (Рис. 22).

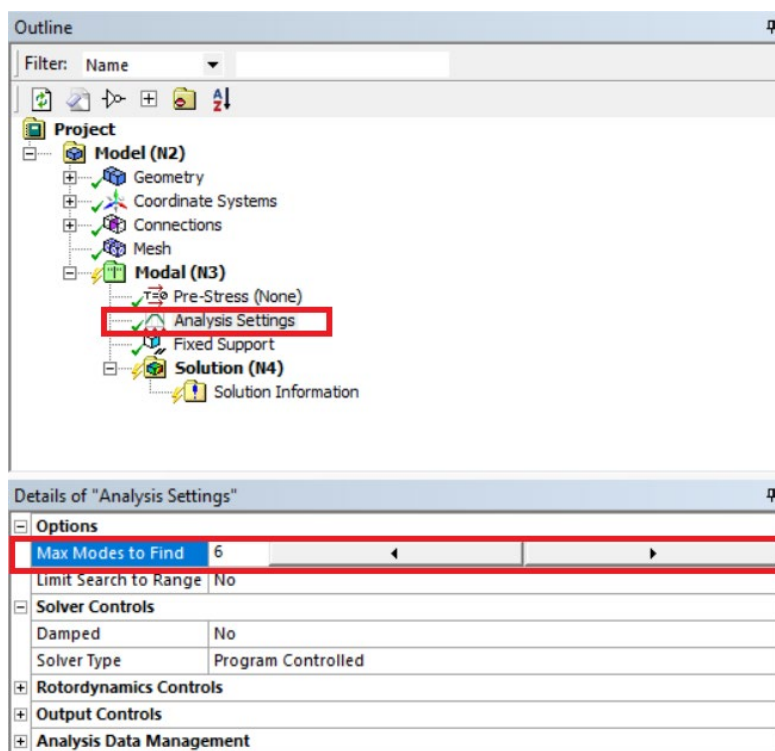


Рис. 22. Настройка параметров Analysis Settings

Следующий этап настройки предполагает добавление формата вывода результатов расчета. Так как модальный анализ подразумевает не только нахождение значений собственных частот, но и определение форм колебаний на этих частотах, то добавим в качестве результатов вывод деформаций конструкции. Для этого в элемент **Solution** добавим новые элементы (нажимаем ПКМ на элемент **Solution** и в контекстном меню выбираем **Insert → Deformation → Total**) и продублируем данное действие, добавив шесть таких элементов (для каждой моды). В каждом из этих элементов необходимо выбрать соответствующую моду для вывода эпюры перемещений (Рис. 23).

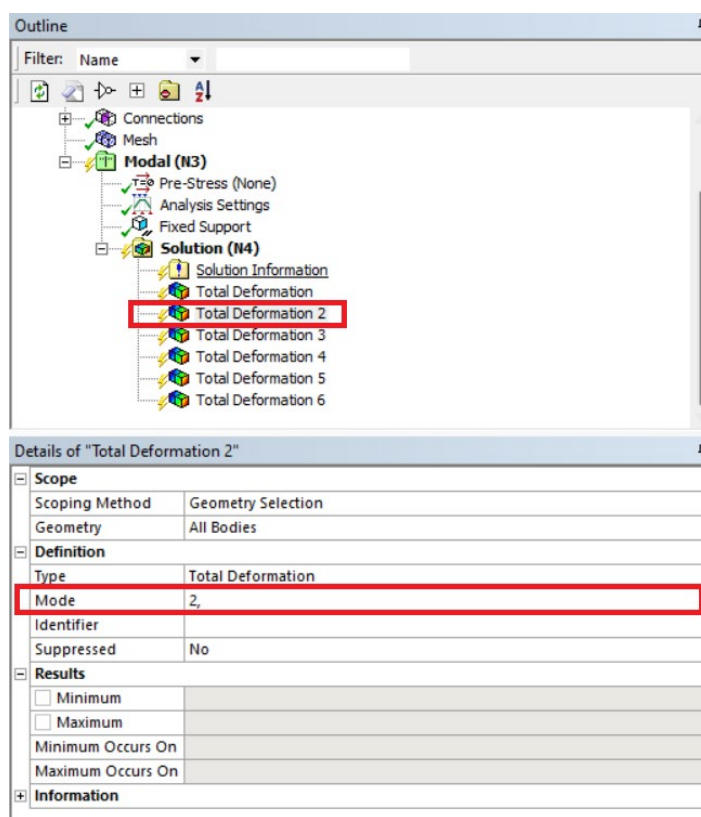


Рис. 23. Настройка параметров Total Deformation

После всех настроек нажимаем кнопку **Solve** на верхней панели и ждем окончания расчета. Посмотреть полученные результаты для каждой моды и оценить характер движения лопасти маятникового узла можно по эпюре перемещений или запустив анимацию. Значения собственных частот отображаются в таблице (Рис. 24).

Стоит отметить, что компенсационные маятниковые акселерометры являются газозаполненными приборами, следовательно, внутри чувствительного

элемента присутствует газовая среда, которая выступает в качестве естественного демпфера. Оценивая величину демпфирования колебаний необходимо учитывать, что зазор между подвижной лопастью и магнитопроводами очень мал (порядка 20 мкм), а относительная площадь верхней и нижней поверхностей лопасти достаточно большая, что говорит о достаточной величине демпфирования колебаний, основные перемещения которых происходят вдоль измерительной оси. При этом колебания, основные перемещения которых происходят вдоль осей маятника и подвеса, из-за большого зазора между лопастью и рамкой, а также малой площади боковой поверхности, будут демпфироваться недостаточно. Исходя из вышесказанного, в рабочем диапазоне частот (Таблица 4) должны находиться только собственные частоты, формы колебаний которых имеют основные перемещения вдоль измерительной оси, все остальные собственные частоты с основными перемещениями вдоль других осей должны находиться вне диапазона рабочих частот.

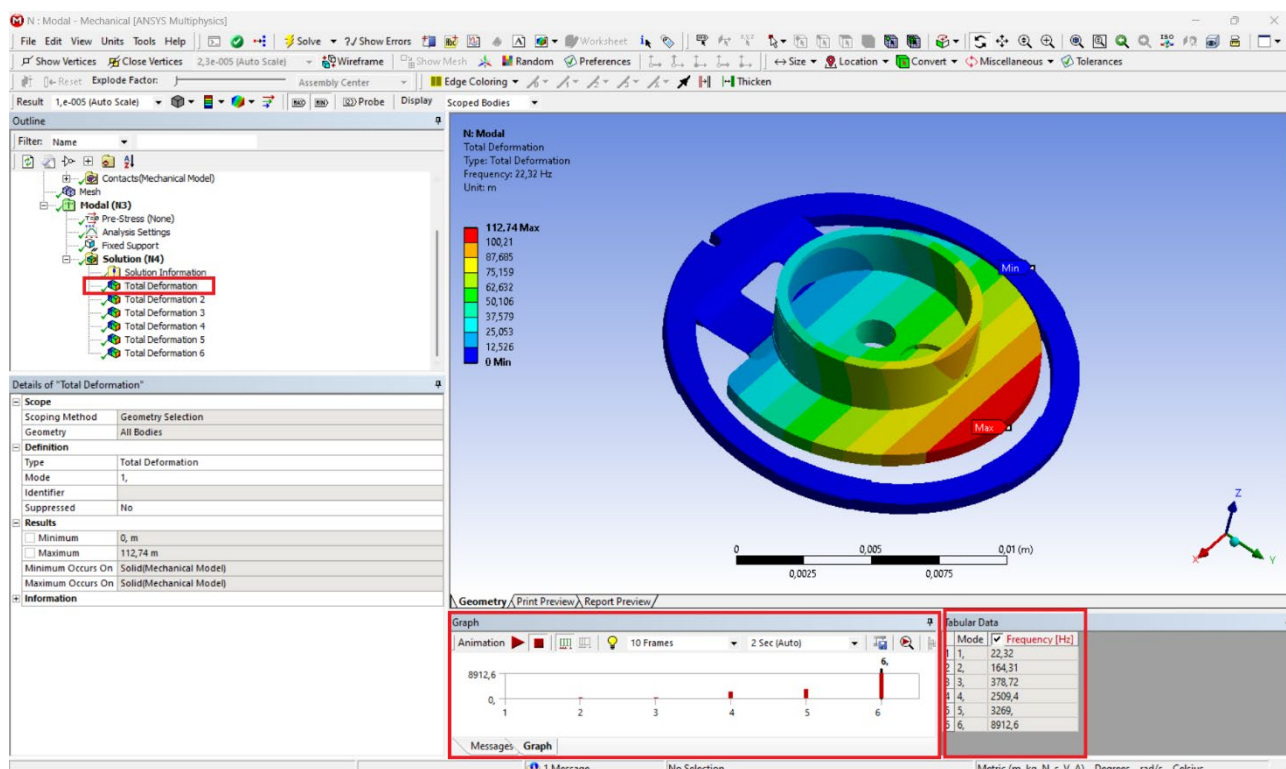


Рис. 24. Результаты расчета модального анализа

Модуль Static Structural

В данном модуле производится расчет реакции системы на входное воздействие, не зависящее от времени. Для настройки расчета в главном окне проекта нажимаем два раза ЛКМ на элемент **Setup** модуля **Static Structural**. В открывшемся окне настраиваем граничные условия. Закрепление модели производим аналогично предыдущему исследованию (модальному анализу).

Далее необходимо задать входное воздействие на конструкцию маятникового узла акселерометра. В качестве входного воздействия выступает максимальное ускорение, лежащее в диапазоне измерения акселерометра (Таблица 4). Но стоит учитывать, что в данном моделировании отсутствует электрическая обратная связь и инерционный момент компенсируется только упругостью перемычек, поэтому при приложении больших входных воздействий вдоль измерительной оси вместо ускорения необходимо задать плоскопараллельное перемещение подвижной лопасти на величину зазора 20 мкм. Так как при отсутствии электрической обратной связи и с учетом малой толщины упругих перемычек подвижная лопасть «ляжет» на упоры (неподвижные электроды емкостного датчика перемещений).

Для исследования реакции маятникового узла на входное воздействие вдоль измерительной оси (Z) зададим параметр **Displacement** (Рис. 25). Для этого нажимаем ПКМ на элемент **Static Structural** и в контекстном меню выбираем **Insert → Displacement**. Далее выбираем верхнюю поверхность подвижной лопасти в качестве геометрии, которая будет смещаться, и добавим величину перемещения, равную 20 мкм (соответствует высоте установочных платиков), как показано на рисунке 25.

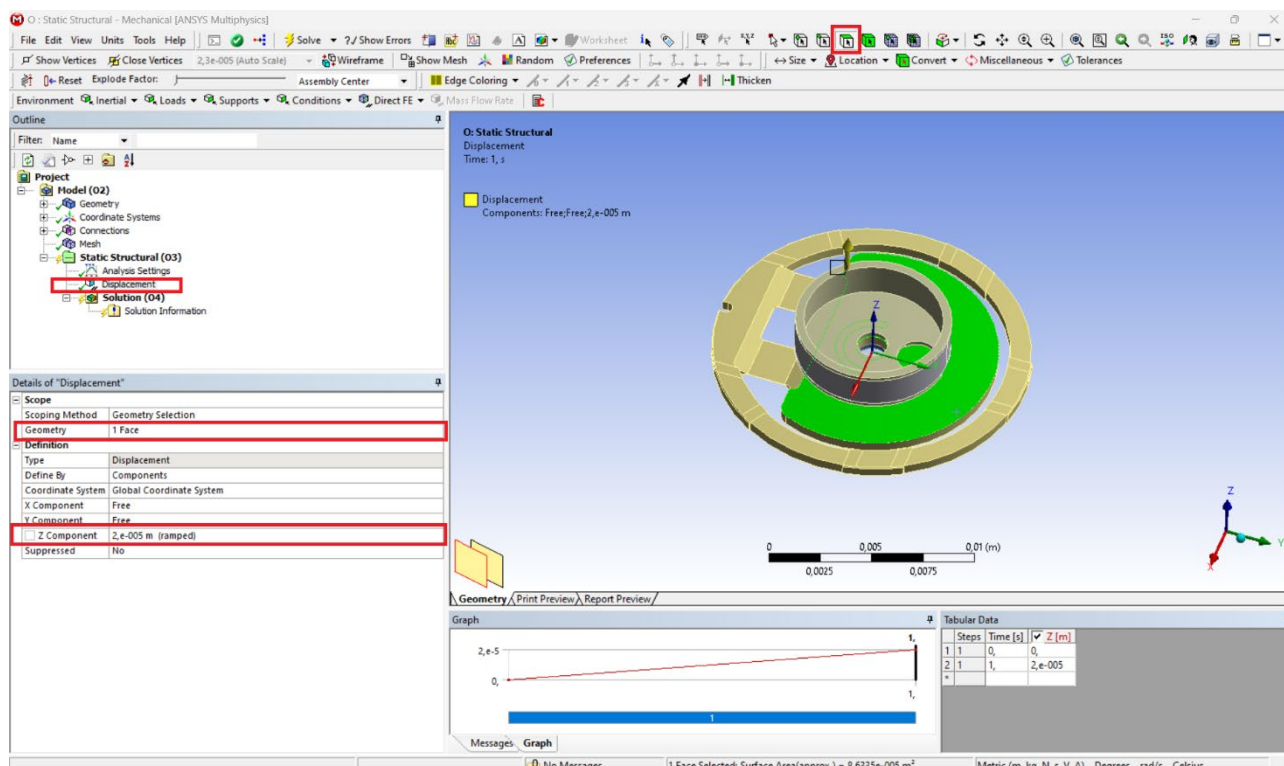


Рис. 25. Настройка параметров Static Structural

В качестве результатов в элемент **Solution** добавим **Total Deformation** (нажимаем ПКМ на элемент **Solution** и в контекстном меню выбираем **Insert** → **Deformation** → **Total**) и **Equivalent Stress** (нажимаем ПКМ на элемент **Solution** и в контекстном меню выбираем **Insert** → **Stress** → **Equivalent (von-Mises)**). Далее запускаем расчет кнопкой **Solve**.

По другим осям в качестве входного воздействия задается ускорение **Acceleration** вместо **Displacement** (нажимаем ПКМ на элемент **Static Structural** и в контекстном меню выбираем **Insert** → **Acceleration**) (Рис. 26). Для параметра **Define By** устанавливается значение **Components** и задается величина ускорения вдоль оси **X** или **Y** (величина ускорения указана в таблице 4, согласно выбранному варианту).

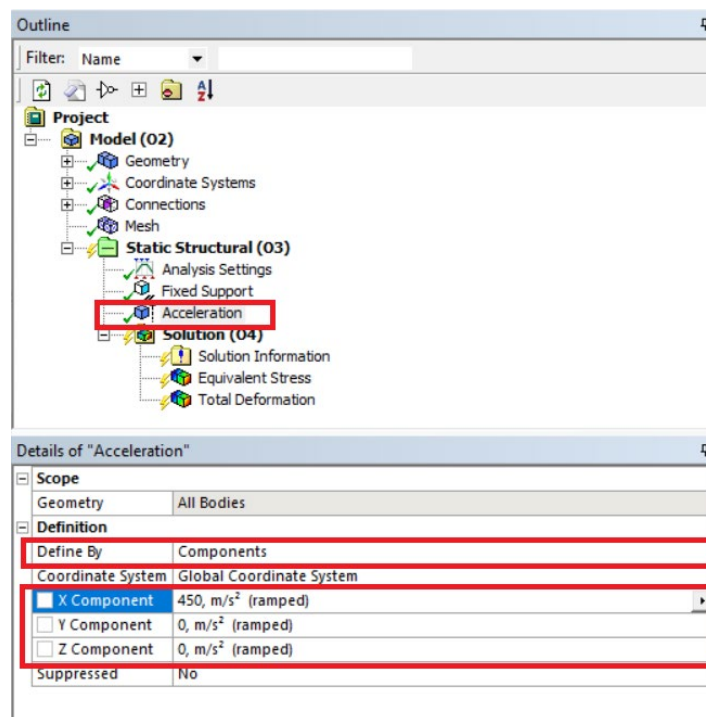


Рис. 26. Параметры входного воздействия по оси X для варианта 4

Исследования проводятся отдельно для каждого из направлений ускорения (вдоль измерительной оси (Z), оси маятника (Y), оси подвеса (X)). При этом вдоль оси маятника (Y) ускорение задается как в положительном, так и в отрицательном направлении, так как деформации конструкции маятника акселерометра в этих случаях не симметричны.

По полученным результатам необходимо рассчитать коэффициенты запаса для каждого случая.

Модуль Transient Structural

В данном модуле производится расчет реакции системы на входное воздействие, зависящее от времени. Для настройки расчета в главном окне проекта нажимаем два раза ЛКМ на элемент **Setup** модуля **Transient Structural**. В открывшемся окне настраиваем граничные условия. Закрепление модели производим аналогично предыдущему исследованию (модальному анализу).

Настроим параметры переходного структурного анализа. Для этого в дереве проекта выберем элемент **Transient** → **Analysis Settings** и в **Details of...** настроим время исследования (**Step End Time = 0,01**) и шаг исследования (**Time**

Step = 0,00005), а также отключим параметр автоматического определения временного шага расчета (**Auto Time Stepping**), как показано на рисунке 27.

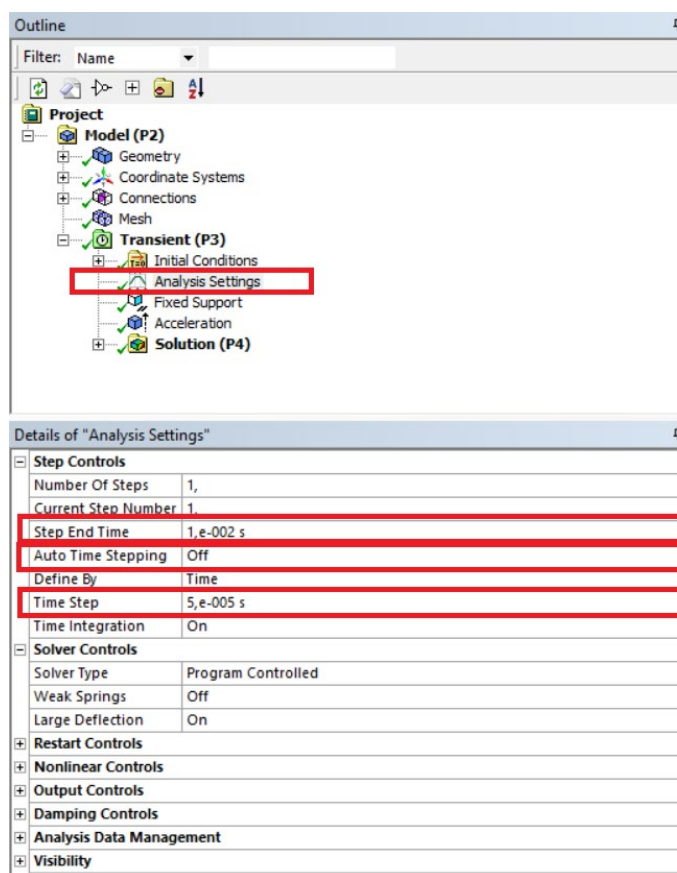


Рис. 27. Настройка Analysis Settings

Далее необходимо задать входное воздействие на конструкцию маятникового узла акселерометра. В качестве входного воздействия выступает максимальное ускорение, действующее при ударном воздействии на акселерометр (Таблица 4). Длительность такого воздействия – 5 мс.

Добавим элемент **Acceleration** (нажимаем ПКМ на элемент **Transient** и в контекстном меню выбираем **Insert → Acceleration**). Выделим новый элемент **Acceleration** и зададим в **Details of...** параметр **Define By = Components**. А для параметра **X Component** (если задаем ускорение вдоль оси X) выбираем значение **Tabular Data** (как показано на рисунке 28). И далее заполняем таблицу значениями ускорений с временным шагом 0,5 мс, как показано на рисунке 30.

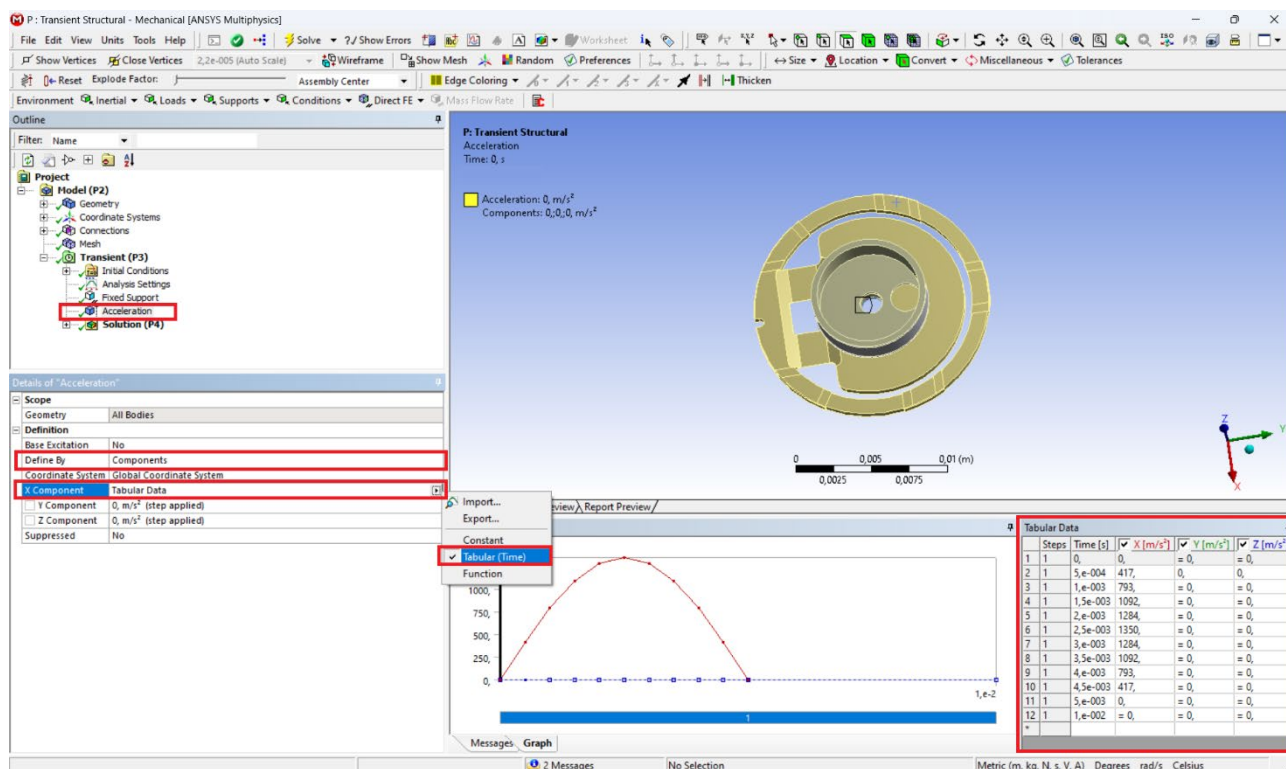


Рис. 28. Настройка ускорений вдоль оси подвеса (X)

Вид графика и значения ускорений показаны на рисунке 29 для варианта 4 (максимальное ускорение 135g).

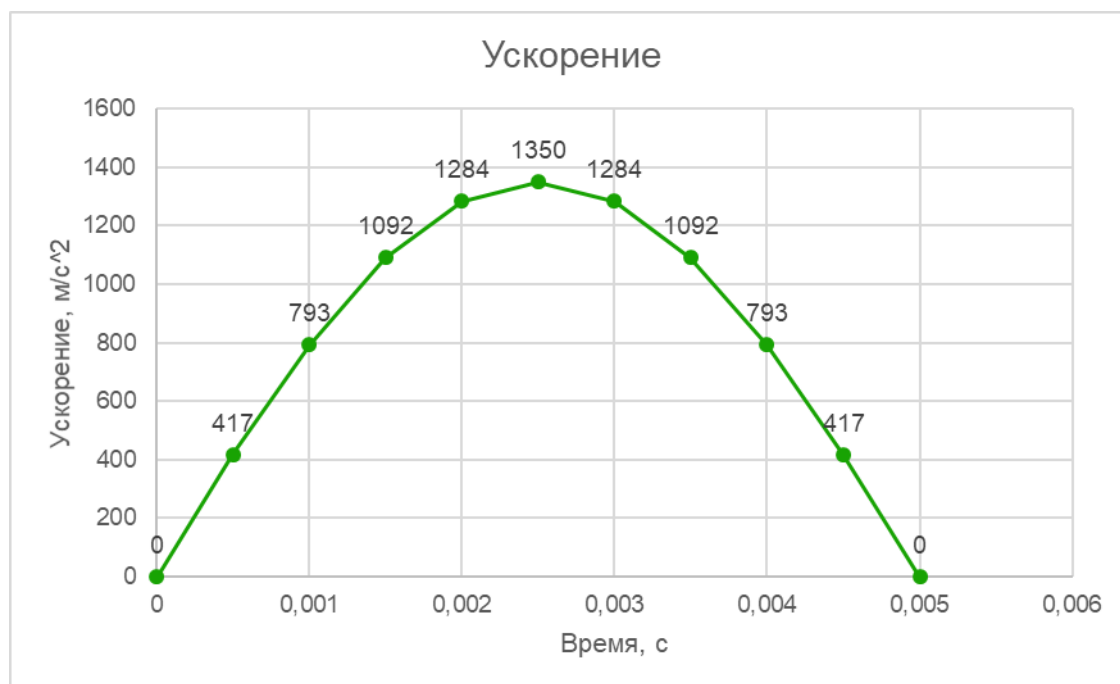


Рис. 29. График ускорения при ударном воздействии амплитудой 135g (Вариант 4)

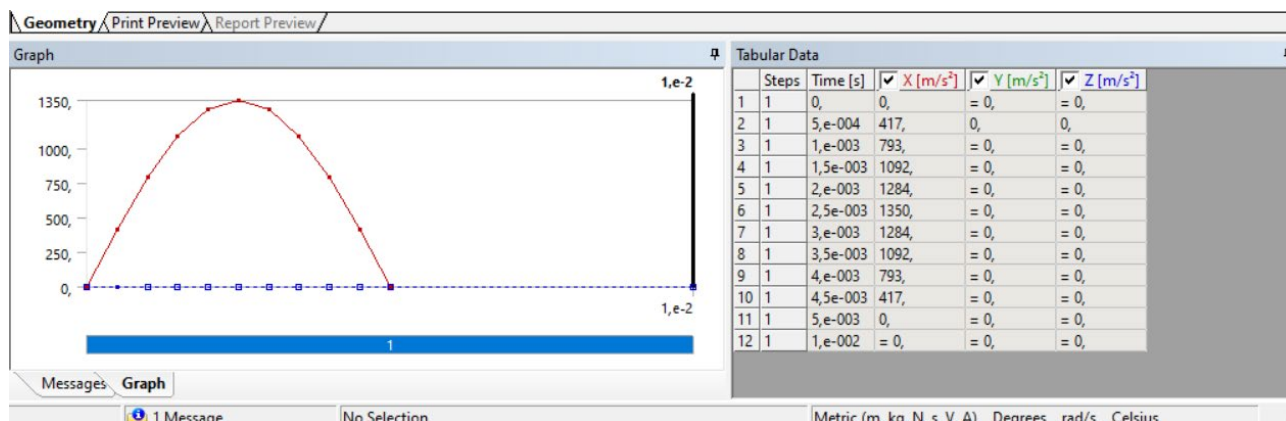


Рис. 30. Таблица ускорений вдоль оси подвеса (X)

В качестве результатов в элемент **Solution** добавим **Total Deformation** (нажимаем ПКМ на элемент **Solution** и в контекстном меню выбираем **Insert** → **Deformation** → **Total**) и **Equivalent Stress** (нажимаем ПКМ на элемент **Solution** и в контекстном меню выбираем **Insert** → **Stress** → **Equivalent (von-Mises)**). Далее запускаем расчет кнопкой **Solve**.

Исследования проводятся отдельно для каждого из направлений ускорения (оси маятника (Y), оси подвеса (X)). При этом вдоль оси маятника (Y) ускорение задается как в положительном, так и в отрицательном направлении, так как деформации конструкции маятника акселерометра в этих случаях не симметричны.

По полученным результатам необходимо рассчитать коэффициенты запаса для каждого случая.

Ниже представлены графики ускорений для вариантов 1-3 (Рис. 31-33).

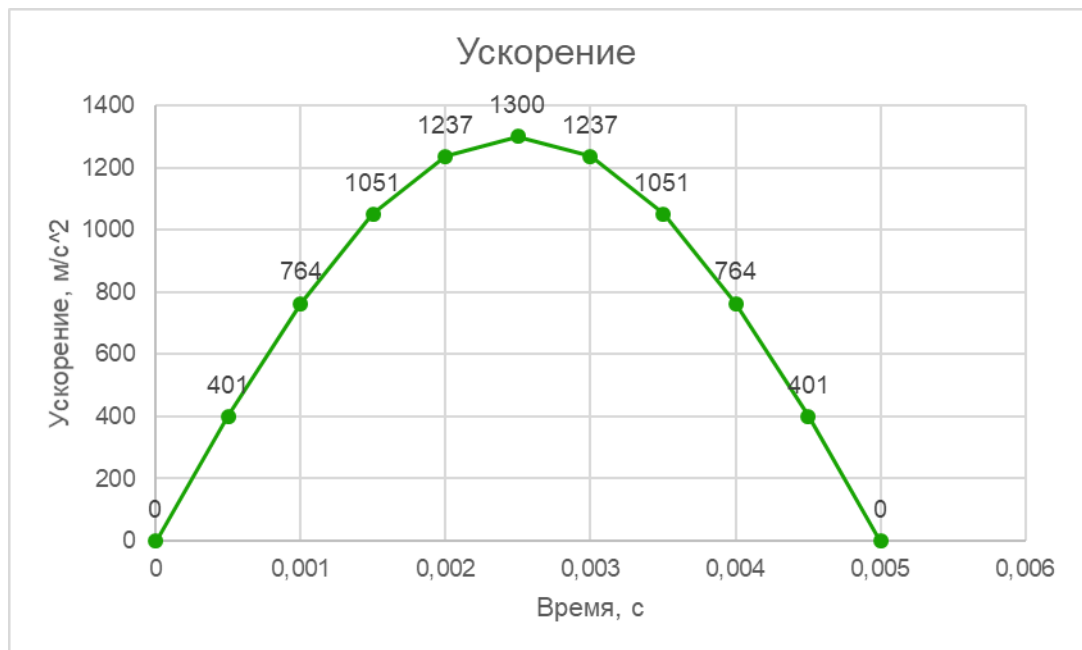


Рис. 31. График ускорения при ударном воздействии амплитудой 130g (Вариант 1)



Рис. 32. График ускорения при ударном воздействии амплитудой 140g (Вариант 2)

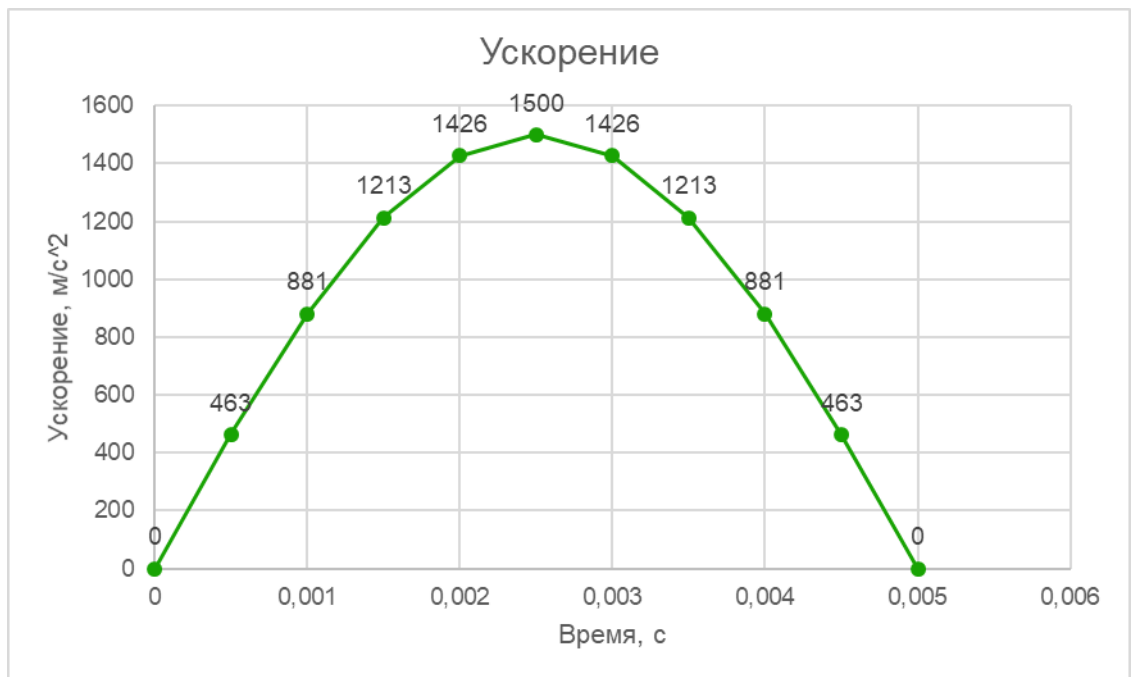


Рис. 33. График ускорения при ударном воздействии амплитудой 150g (Вариант 3)