

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**

Проектирование средств виброзащиты авиационной техники

САМАРА 2011

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ

ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ

ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ

УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА

(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

Ю.К.Пономарев, А.С.Гвоздев, В.С.Мелентьев

Проектирование средств виброзащиты авиационной техники

Утверждено Редакционно-издательским советом университета

в качестве учебного пособия

САМАРА

Издательство СГАУ

2011

УДК: 621.431.75

Рецензент: д-р техн. наук, профессор В.Н.Матвеев

Пономарев Ю.К., Гвоздев А.С., Мелентьев В.С.

Проектирование средств виброзащиты авиационной техники: учебное пособие /
Пономарев Ю.К., Гвоздев А.С., Мелентьев В.С. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та,
2011. – 40 с.: ил.

В учебном пособии изложены теоретические основы проектирования средств виброзащиты.

Предназначено для студентов специальности 160700 при выполнении лабораторных работ по курсу «Доводка АД и ЭУ», а также при курсовом и дипломном проектировании.

Разработано на кафедре КиПДЛА СГАУ.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2011

Работа состоит из следующих частей:

1. Перечень индивидуальных заданий
2. Создание объёмной модели конструкции
3. Расчёт упруго-демпфирующих свойств конструкции
4. Расчёт динамического поведения модели виброзащитной системы

Приложение. Параметры тросов

Часть времени отводится на работу в аудитории по постановке задач исследования, часть расчетов осуществляется студентами индивидуально в компьютерных классах с применением широкого спектра информационных технологий. Все проектные работы, включённые в лабораторную работу, имеют примеры выполнения.

При выполнении лабораторной работы оценка «хорошо» ставится в случае создания объёмной модели и определения упруго-демпфирующих свойств конструкции. На оценку «отлично» могут претендовать студенты, выполнившие работу в полном объёме. При этом в отчёт по работе в обязательном порядке входит ответ на три вопроса из списка вопросов по выходному контролю на выбор преподавателя.

Необходимый набор программного обеспечения: Solid Works, MathCAD, КОМПАС, ANSYS, MSC.ADAMS, набор офисных приложений.

Цель работы: привить учащимся знания по проектированию средств виброзащиты авиационной техники, с использованием современных CAD/CAE-пакетов, от технического задания до выполнения динамического расчёта готовой модели конструкции с моделью виброзащищаемого оборудования.

Данные методические указания должны быть розданы студентам до начала работы, с целью ознакомления с теоретическим материалом и подготовки ко входному контролю. Также индивидуально студентами выполняются работы по созданию объёмной модели. Исследовательская часть работы, состоящая в

исследовании влияния формы упругого элемента на упругие характеристики виброизолятора и подбор числа виброизоляторов на прибор осуществляется самостоятельно при консультациях преподавателя.

В работе присутствуют вычислительные эксперименты на восприятие виброизолятором статической нагрузки и в динамике с установленным прибором.

1. Перечень индивидуальных заданий

Приведённые здесь задания являются примерами формирования заданий по лабораторной работе. По усмотрению преподавателя предлагаемые конструкции могут быть заменены на более перспективные или сложные согласно уровню подготовки студентов.

Общая последовательность выполнения заданий:

1. С применением системы «Компас-график 3D» создать 3-х мерные модели деталей заданного средства виброзащиты по предоставленным преподавателем эскизам или схемам устройства.

2. По созданным моделям выполнить чертежи: сборочный чертеж устройства, детализировки узлов с указанием размеров, чистоты обработки поверхностей, технологических указаний на изготовление, спецификацию устройства. Масштабы выбирать таким образом, чтобы формат чертежей был не более А3 (желательно – А4).

3. Если это необходимо, создать методику расчета нагрузочных характеристик устройства в одном или трех взаимно-перпендикулярных направлениях в системах программирования ANSYS или MathCad.

4. Для конкретных размеров и физических данных с помощью созданной методики провести исследование нагрузочных характеристик устройства в одном или трех взаимно-перпендикулярных направлениях. Как правило, эти характеристики являются нелинейными. Построить эти характеристики .

5. Провести расчет на прочность упругого элемента виброизолятора с указанными преподавателем допущениями.

6. Дать описание конструкции спроектированного устройства.

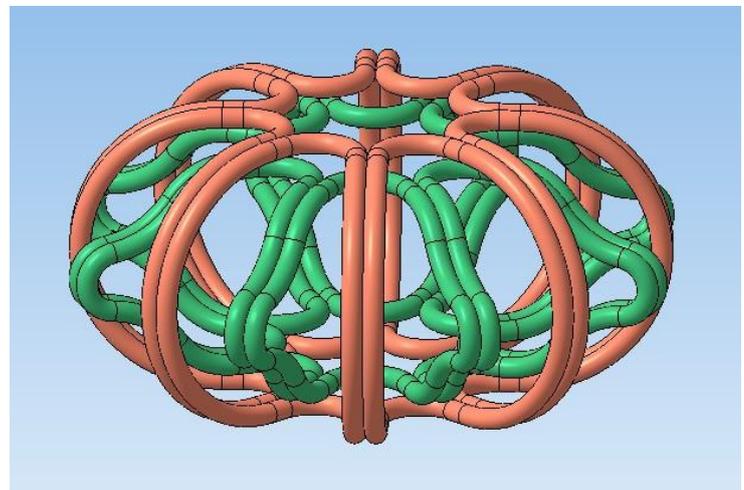
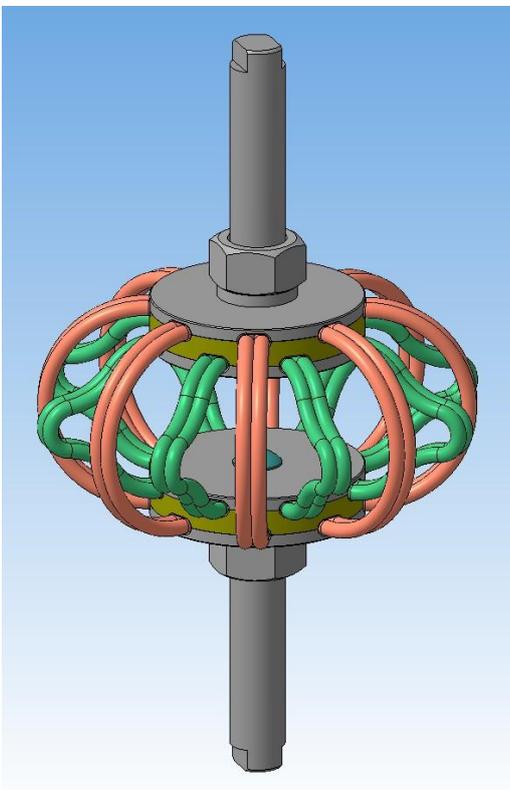
7. С использованием расчетной нагрузочной характеристики устройства рассчитать номинальную нагрузку на виброизолятор, чтобы выполнялось условие

равенства собственной частоты механической системы $\omega_0=10$ Гц. Дать расчетное значение статического прогиба под номинальной нагрузкой и границы деформирования в динамике при 3-кратном увеличении динамических нагрузок по сравнению со статическими. Получить АЧХ системы в пакете MSC.ADAMS.

8. Оформить все расчеты, описания конструктивных особенностей спроектированного изделия с иллюстрациями, технологией изготовления в виде отчёта по лабораторной работе с реализацией требований ЕСКД. Программы расчетов также приложить к пояснительной записке.

Задание 1. Тросовый виброизолятор с двухъярусным расположением элементов и разгрузочной пружиной.

Прототип



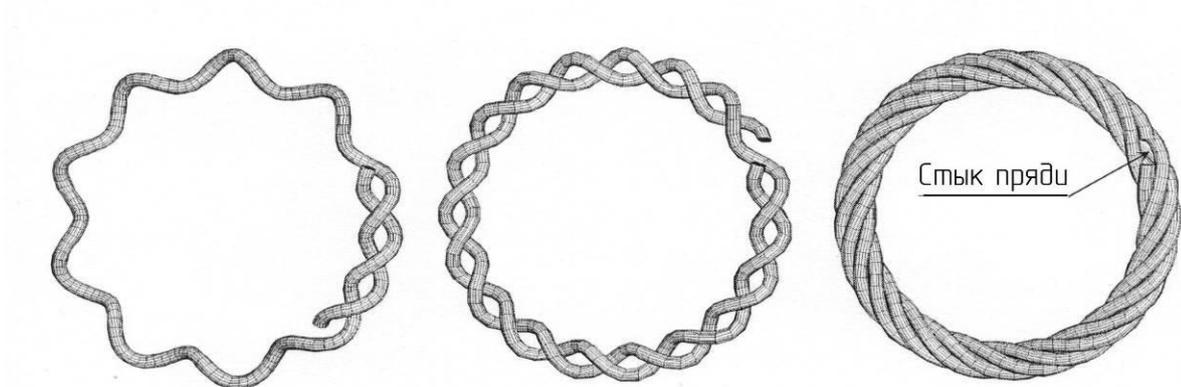
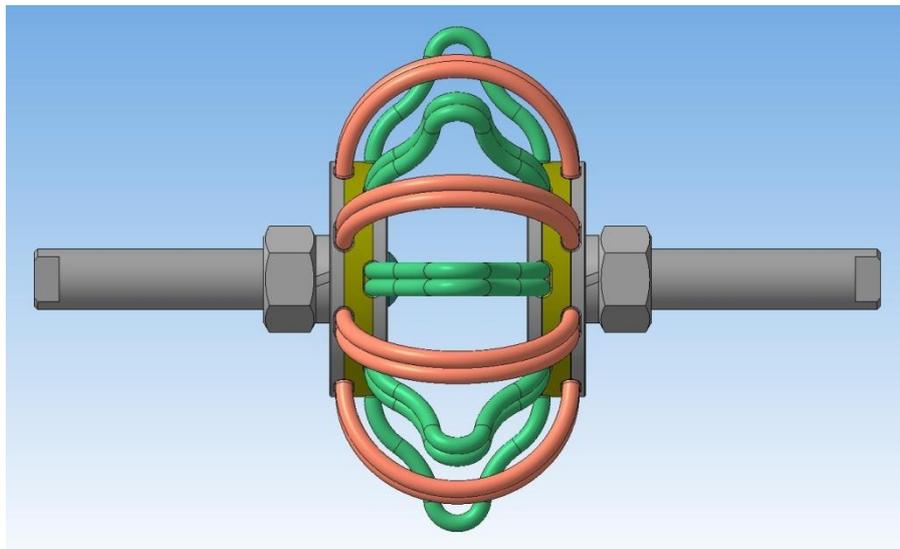


Схема свивки колец для формирования упругих элементов



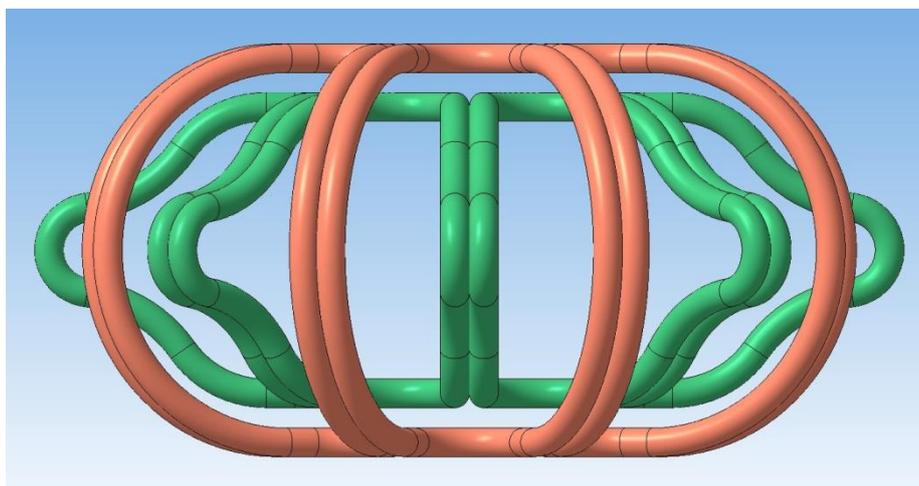


Схема устройства и его элементов

Исходные данные:

Число тросовых элементов (колец) – 16;

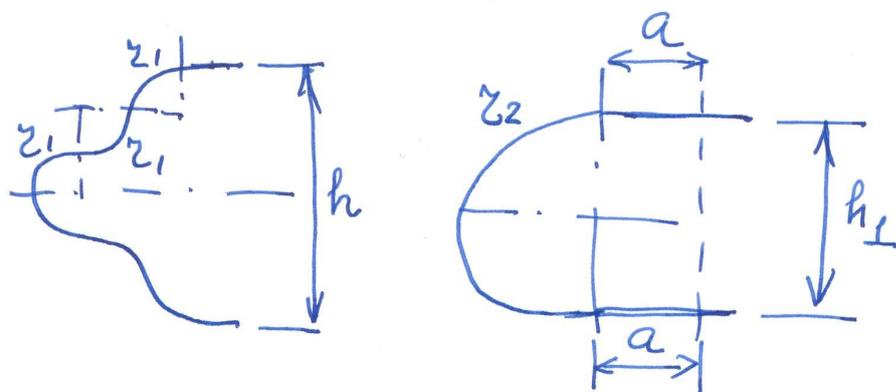
Диаметр троса – 5 мм;

Материал - сталь; $E=210 \text{ кН/мм}^2$.

Число проволок в каждом элементе – 95.

Задание 2. Тросовый виброизолятор с двухъярусным расположением элементов и разгрузочной пружиной.

В отличие от прототипа, выполнить наружный ярус с переменной кривизной, а внутренний – с радиусом и прямолинейными горизонтальными участками. Радиус r_2 подобрать из условия равной жесткости с элементами наружного яруса.



Исходные данные:

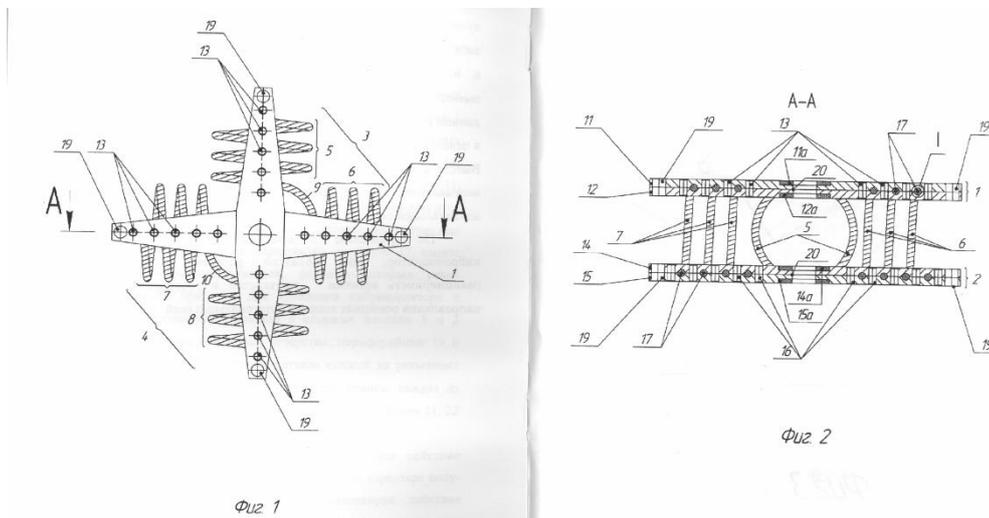
Число тросовых элементов (колец) – 16;

Диаметр троса – 5 мм;

Материал - сталь; $E=210 \text{ кН/мм}^2$.

Число проволок в каждом элементе – 95.

Задание 3. Тросовый виброизолятор с элементами тройной кривизны.



Прототип – патент на полезную модель № 50619

Схема устройства и его элементов

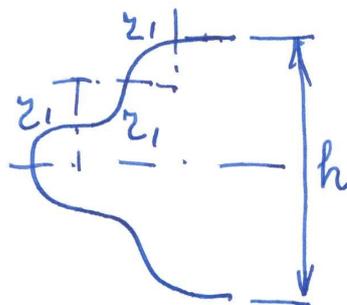


Схема заневоленных тросовых элементов на рабочих участках

Исходные данные:

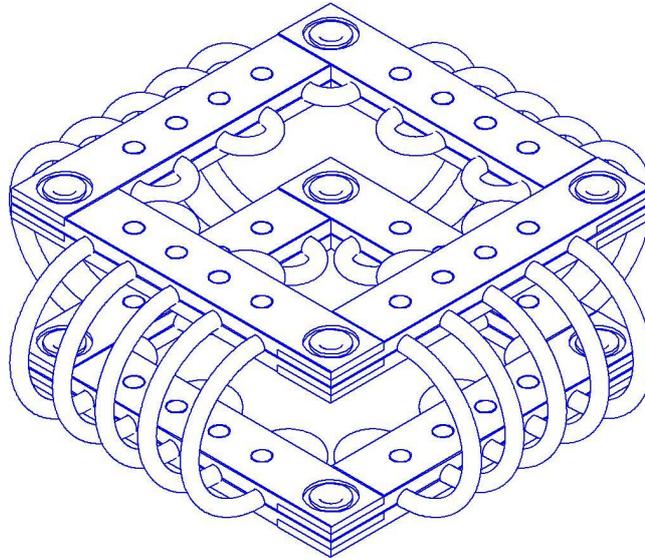
Диаметр троса – 5 мм;

Материал - сталь; $E=210 \text{ кН/мм}^2$.

$r_1=15 \text{ мм}$.

Число проволок в каждом элементе – 95.

Задание 4. Тросовый виброизолятор с элементами тройной кривизны.



Прототип –
Схема устройства и его элементов

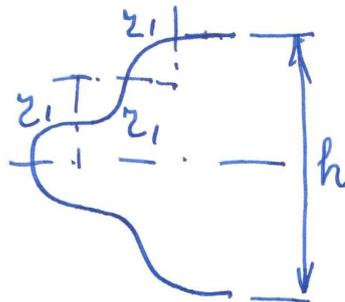


Схема заневоленных тросовых элементов на рабочих участках

Исходные данные:

Диаметр троса – 5 мм;

Материал - сталь; $E=210 \text{ кН/мм}^2$.

$r_1=10 \text{ мм}$.

Число проволок в каждом элементе – 95.

Задание 5. Ленточный виброизолятор.

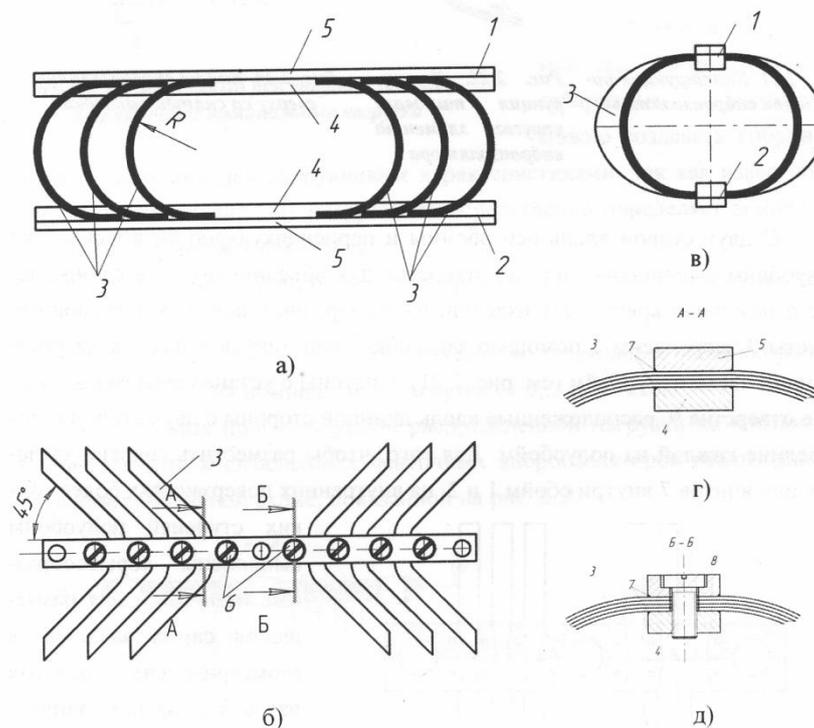
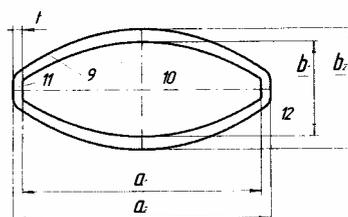


Схема устройства и его элементов



Развертка одной из лент

Исходные данные:

Число лент в пакете – 40 мм;

Толщина одной ленты 0,2 мм;

Радиус кривизны пакета средний -25 мм;

Ширина пакета – 8 мм;

Материал - сталь; $E=210 \text{ кН/мм}^2$.

Задание 6. Составной виброизолятор из материала МР.

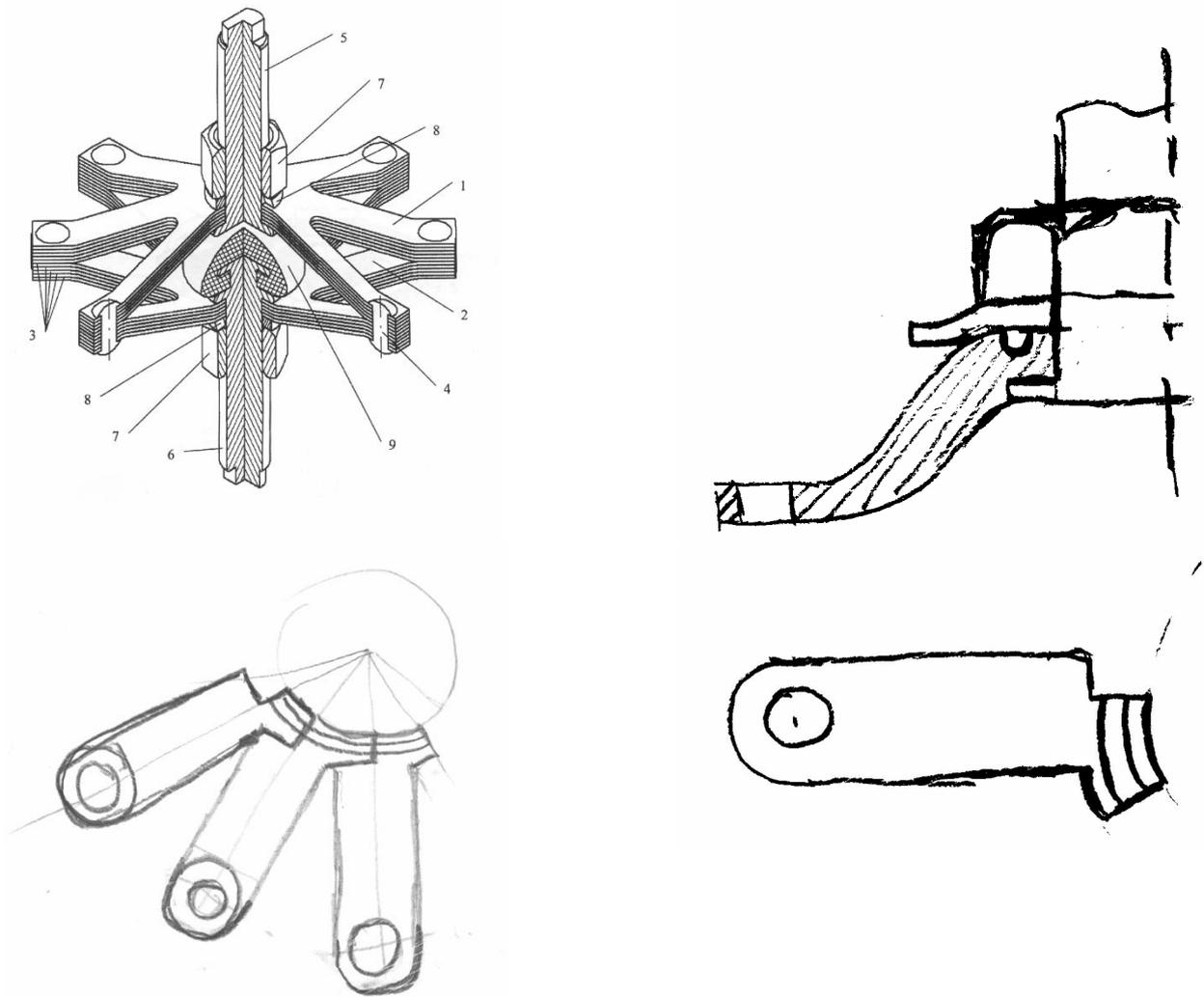


Схема устройства и его элементов

Исходные данные:

Число элементов – 8 мм;

Наружный диаметр 80 мм;

Ширина элемента – 10 мм;

Материал – Металлорезина, $E=20 \text{ Н/мм}^2$.

Задание 7. Составной виброизолятор из деформированного пустотелого троса с шестью прядями.

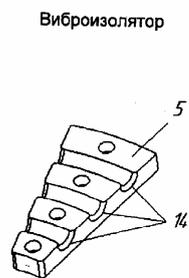
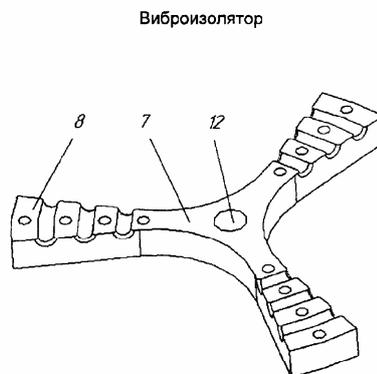
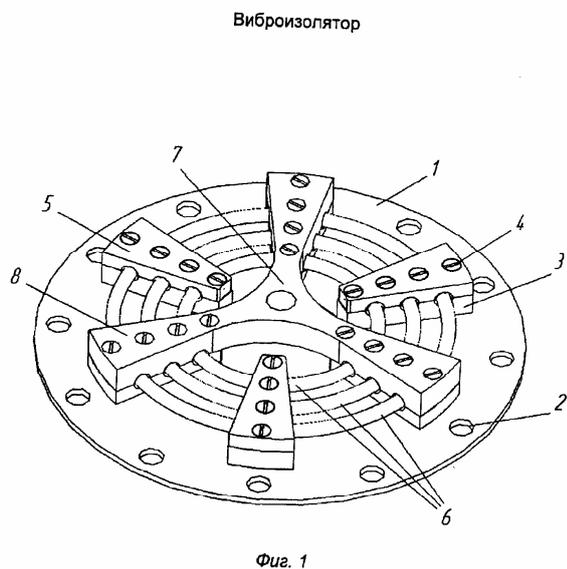


Схема устройства и его элементов

Исходные данные:

Число кольцевых элементов – 3 мм;

Наружный диаметр 80 мм;

Ширина элемента – 5 мм;

Количество проволок в тросе - 95

Материал – Металлорезина, $E=210 \text{ Н/мм}^2$.

Задание 8. Составной виброизолятор из пустотелого троса с шестью прядями.

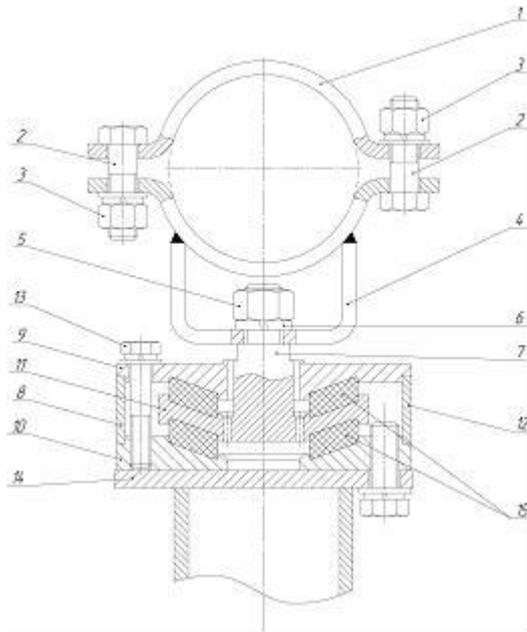
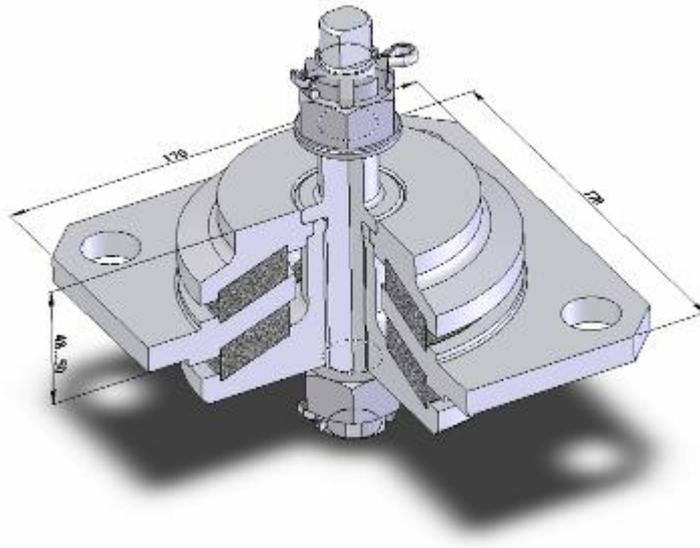


Схема устройств и его элементов

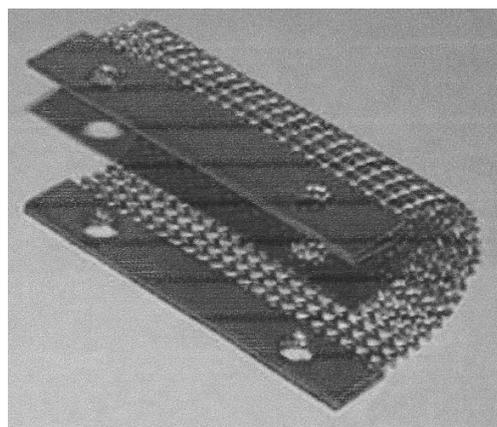
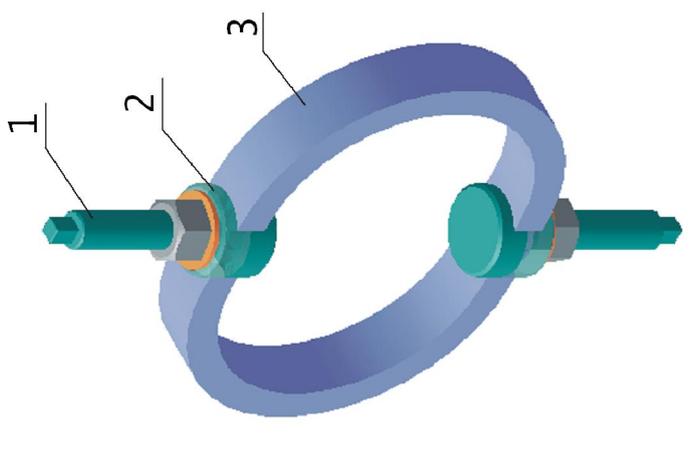
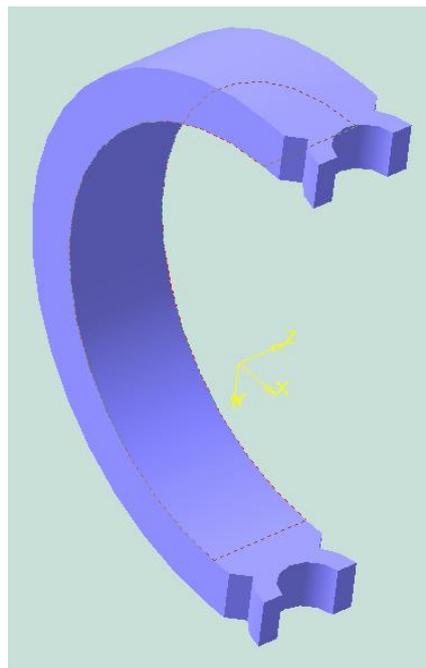
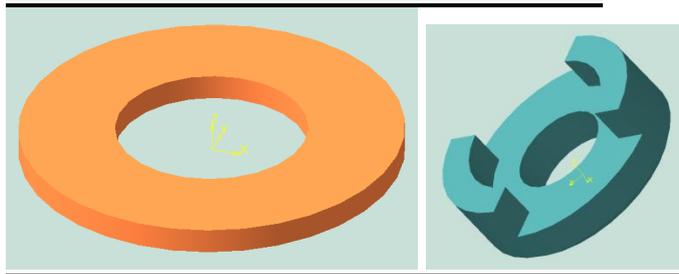
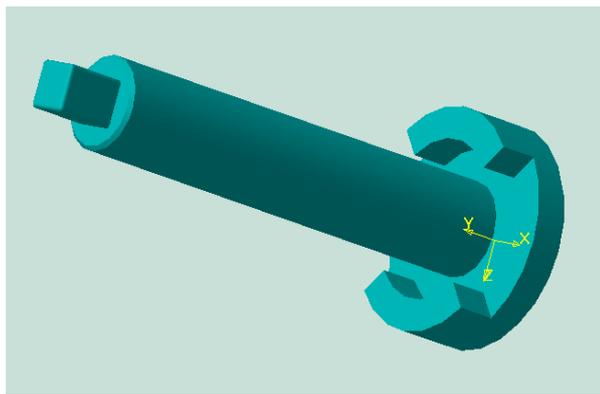
Исходные данные:

Число кольцевых элементов – 4 мм;

Наружный диаметр 80 мм;

Количество проволок в тросе - 95

Задание 9. Многослойный сетчатый виброизолятор.



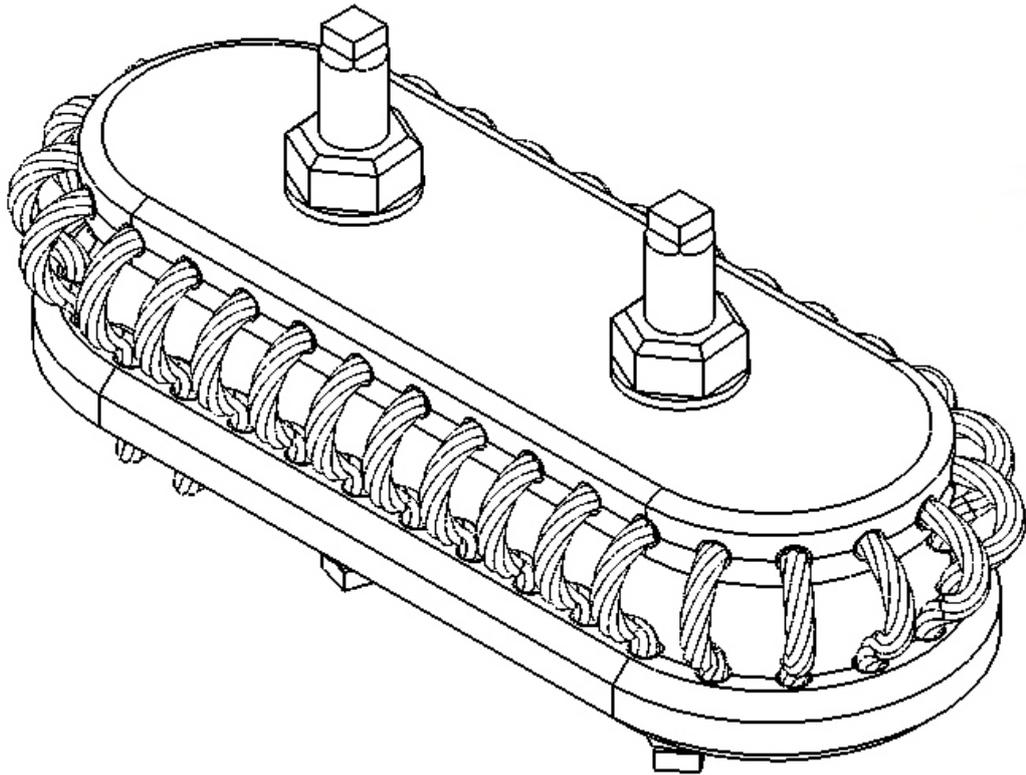
Прототип –US Patent № 6629688

Схема устройства и его элементов

Исходные данные:

Число сетчатых полуколец – 2x8; Ширина элементов – 15 мм; Средний радиус кривизны 25 мм. Материал проволоки - сталь; $E=210 \text{ кН/мм}^2$, размер ячеек – 1,5 мм; Толщина проволоки в сетке – 0,3 мм.

Рассмотрим порядок выполнения работы на основе примера. Объект проектирования: виброизолятор тросовый с элементами, работающими на изгиб и кручение.



Общий вид виброизолятора

2. Создание объёмной модели конструкции

Общепринятым порядком моделирования твердого тела является последовательное выполнение булевых операций (объединения, вычитания и пересечения) над объемными элементами (сферами, призмами, цилиндрами, конусами, пирамидами и т.д.).

В SolidWorks для задания формы объемных элементов выполняется такое перемещение плоской фигуры в пространстве, след от которого определяет форму элемента (например, поворот дуги окружности вокруг оси образует сферу или тор, смещение многоугольника – призму, и т.д.). Плоская фигура, на основе которой образуется тело, называется **эскизом**, а объемная фигура, образованная формообразующим перемещением эскиза по **траектории** – **элементом**.

Эскиз может располагаться в одной из ортогональных плоскостей координат, на плоской грани существующего тела или во вспомогательной плоскости, положение которой задано пользователем, также возможно создание 3D-эскиза, не принадлежащего какой-либо плоскости. Эскиз изображается стандартными средствами чертежно-графического редактора SolidWorks. При этом доступны все команды построения и редактирования изображения, команды параметризации и

сервисные возможности. Единственным исключением является невозможность ввода некоторых технологических обозначений, объектов оформления и таблиц.

Проектирование новой детали начинается с создания эскиза для каждого элемента детали. При построении элементов используются следующие типы операций:

1. Вытянутая бобышка/основание;
2. Повернутая бобышка/основание;
3. Бобышка/основание по траектории – перемещение эскиза вдоль указанной направляющей;
4. Бобышка/основание по сечениям - построение тела по нескольким сечениям-эскизам;
5. Вытянутый вырез;
6. Скругление/фаска;
7. Линейный массив/круговой массив;

Каждая операция имеет дополнительные опции, позволяющие варьировать правила построения тела.

Эскиз может быть построен на плоскости (в том числе на любой плоской грани тела). Для выполнения некоторых операций (например, создания массива по окружности) требуется указание оси (осью может служить и прямолинейное ребро тела).

Если существующих в модели граней, ребер и плоскостей проекций недостаточно для построений, пользователь может создать вспомогательные плоскости и оси, задав их положение одним из предусмотренных системой способов. Применение вспомогательных конструктивных элементов значительно расширяет возможности построения модели. Для создания таких элементов предназначены специальные команды, кнопки вызова которых находятся на Инструментальной панели.

Сборка в SolidWorks – трехмерная модель, объединяющая модели деталей, подборок и стандартных изделий (они называются компонентами сборки), а также информацию о взаимном положении компонентов и зависимостях между параметрами их элементов. Пользователь задает состав сборки, внося в нее новые компоненты или удаляя существующие. Модели компонентов записаны в отдельных файлах на диске. В файле сборки хранятся ссылки на эти компоненты. Пользователь может указать взаимное положение компонентов сборки, задав связи (**условия сопряжения**) между их гранями, ребрами и вершинами (например, совпадение граней двух деталей или соосность втулки и отверстия). Условия сопряжения можно задавать не только непосредственно на элементах, но и в

соответствующих им эскизам, которые можно сделать видимыми в графической области.

Виброизолятор (рисунок 1) содержит две, параллельные друг другу, разъемные обоймы, соединенные между собой с помощью упругого тросового элемента, обвивающего их по периметру. Защемление упругого элемента внутри обойм осуществляется при помощи крепежных элементов.

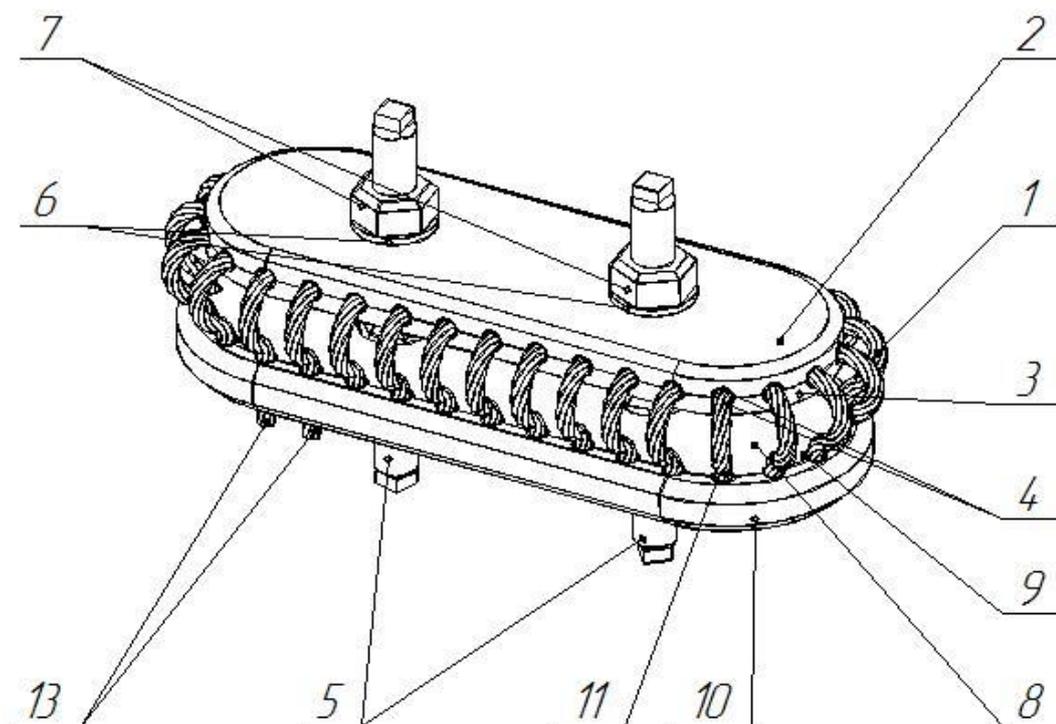


Рисунок 1 – Общий вид виброизолятора

Упругий тросовый элемент (рисунок 2) представляет собой незамкнутый отрезок троса 1, свободные концы 13 которого заземляются в одной из крышек обойм. Трос, согласно ГОСТ 3068-74-7, выполнен из семи прядей, в каждой из которых по семь проволок. В геометрии упругого элемента можно выделить опорные участки *a* и *б* (витки, заземляемые в обоймах), и рабочие участки *в* (участки, непосредственно выполняющие демпфирующую функцию). Геометрия рабочих участков образована двумя сопряженными дугами разного радиуса (рис. 3). Опорные участки *a* и *б* имеют одинаковую форму петли, но отличаются тем, что участки *a* лежат в плоскости, параллельной плоскости разъема обойм, а участки *б* – в плоскостях, перпендикулярных плоскости разъема обойм. Данные участки показаны на рисунке 3.

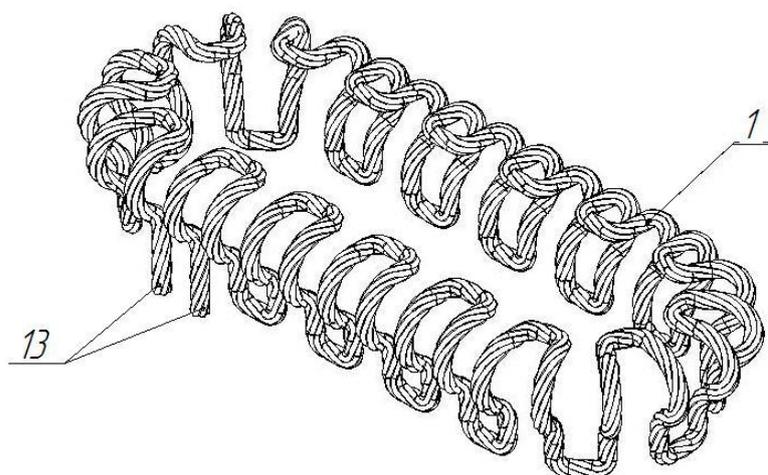


Рисунок 2 – Упругий элемент

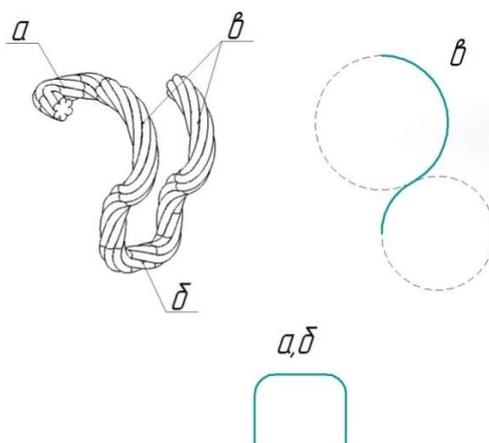


Рисунок 3 – Рабочие и опорные участки упругого элемента

Обоймы имеют в плане форму вытянутых пластин, большие противоположные стороны которых сопряжены полуокружностями, образующими меньшие стороны.

Верхняя обойма (рисунок 4) состоит из двух попарно контактирующих одинаковых крышек 1 и 2. По их периметру расположены полуцилиндрические пазы 3, которые при соединении двух крышек образуют отверстия в обойме для размещения упругого элемента. При этом упругий элемент защемлен в верхней обойме таким образом, что имеет по четыре витка (опорных участка *a*) вдоль каждой из четырех сторон обоймы, причем плоскости расположения витков в обойме совпадают между собой и параллельны разъемной плоскости обоймы. Защемление упругого элемента внутри обоймы осуществляется с помощью пакета крепежных элементов, состоящего из двух болтов 4, имеющих на концах участки под ключ, двух шайб 6 и двух гаек 5.

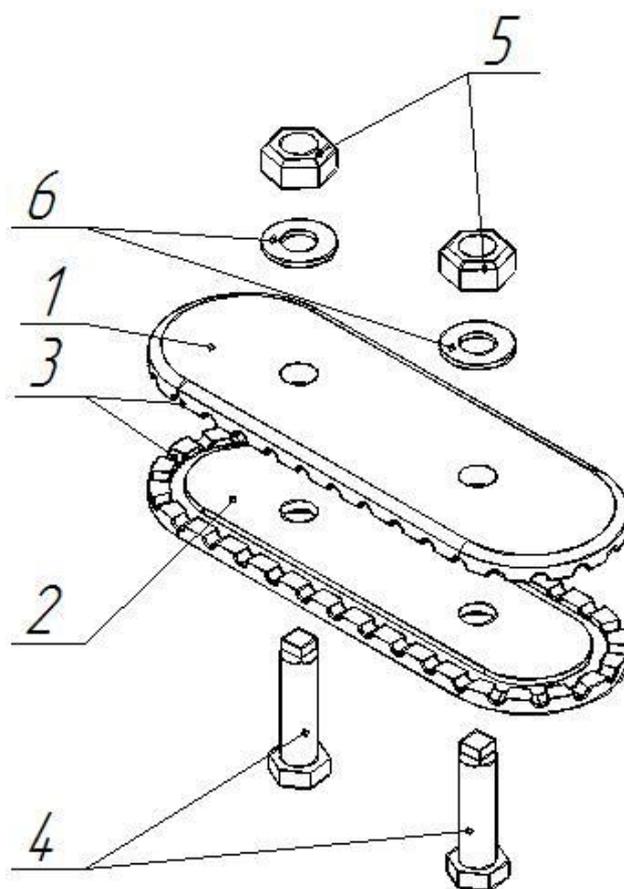


Рисунок 4 – Верхняя обойма виброизолятора

Нижняя обойма виброизолятора (рисунок 5) также состоит из двух крышек. Верхняя крышка нижней обоймы 8 снабжена по периметру полуцилиндрическими вырезами 9 для выхода витков троса и полностью входит в нижнюю крышку 10, которая охватывает верхнюю крышку по периметру и имеет такие же полуцилиндрические вырезы 11. При этом упругий элемент защемлен в нижней обойме таким образом, что имеет по четыре витка (опорные участки \bar{b}) вдоль каждой из четырех сторон обоймы, причем плоскости расположения витков перпендикулярны плоскости разъема обоймы. Для защемления упругого элемента внутри нижней обоймы используется такой же пакет крепежных элементов, что и для верхней обоймы. Кроме того на нижней крышке 10 нижней обоймы имеются два отверстия 12 (рисунок б) для выхода свободных концов троса 13, которые после продевания в них троса пластически деформируются керном.

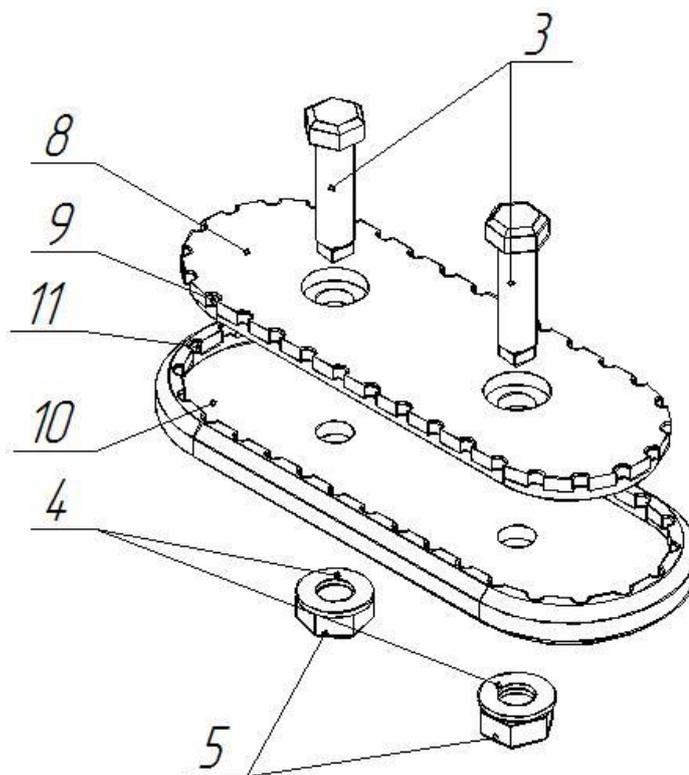


Рисунок 5 – Нижняя обойма виброизолятора

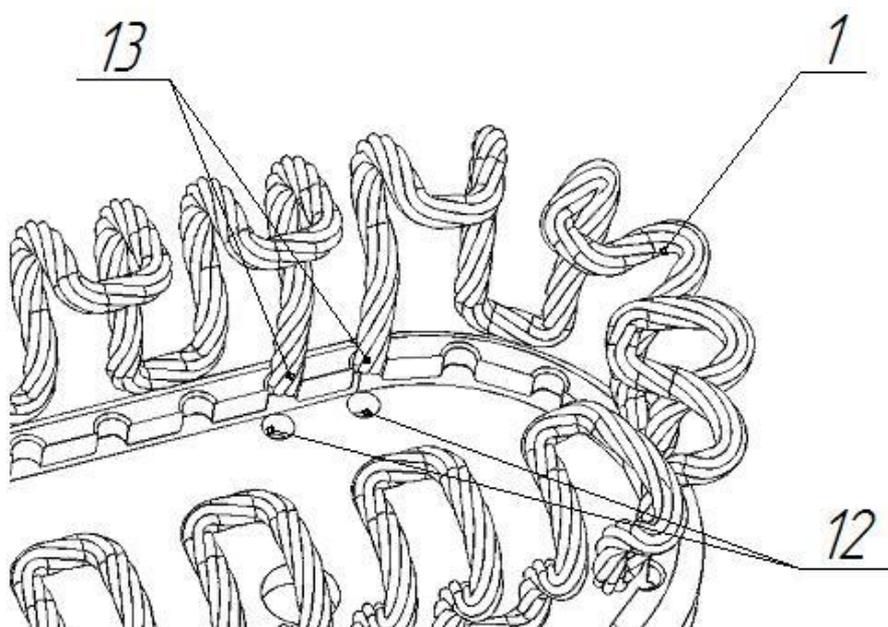


Рисунок 6 – Отверстия для вывода свободных концов троса

3. Расчёт упруго-демпфирующих свойств конструкции

В данном случае целесообразно построить и рассчитать один из 32 рабочих участков троса.

Сначала выбирается тип конечных элементов. В данной задаче используется элемент типа BEAM 4. Это трёхмерный балочный элемент, он хорошо подходит для описания работы упругого троса.

Затем, задаются постоянные, а именно площадь поперечного сечения троса и моменты инерций сечения.

Площадь поперечного сечения и момент инерции троса вычисляется по формулам:

$$A = n\pi \frac{d_{i\partial i\hat{a}}^2}{4}, J = n\pi \frac{d_{i\partial i\hat{a}}^4}{64},$$

где n – число проволок в тросе;

$d_{i\partial i\hat{a}}$ – диаметр проволоки.

Также, необходимо задать свойства материала. В нашем случае:

Модуль упругости равен $E = 210 \hat{e} \hat{l} / \hat{i} \hat{i}^2$, коэффициент Пуассона равен $\mu = 0,3$.

Теперь разбиваем модель на конечные элементы.

Закрепим один конец данного элемента, другому концу зададим перемещение последовательно вдоль каждой из осей x,y,z в положительном и отрицательном направлении. Произведем расчет и получим зависимость усилий, действующих на элемент, от перемещения в нелинейной постановке, взяв в качестве образца для адаптации следующий алгоритм

Построение зависимости нагрузки от заданного перемещения.

1. Определение свойств элементов.

1.1. Все размеры и нагрузки в системе СИ, т.е. геометрические размеры в метрах, силы в ньютонах.

1.2. Используем пространственный балочный элемент Beam 4: **Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete > Add > Structural Mass > Beam > 3D elastic 4 > OK > Close.**

1.3. Зададим набор необходимых в данной задаче реальных постоянных для этого элемента: площадь и моменты инерции поперечного сечения относительно главных осей **Main Menu > Preprocessor > Real constants > Add/Edit/Delete > Add > OK**, затем следует заполнить поля **AREA, IZZ, IYY** заранее рассчитанными значениями, как показано в таблице ниже:

AREA	4.404703e-7
IZZ	1.54554e-14
IYY	1.54554e-14

> **OK** > **Close**.

1.4. Определим материал балки: **Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material models... > Material Models Available > Structural > Linear > Elastic > Isotropic**. Далее в диалоговом окне вводим модуль упругости и коэффициент поперечного расширения при сжатии. Значения для стали приведены в таблице ниже.

EX	2e11
PRXY	0.3

2. Построение геометрии балки.

2.1. Построение начальной и конечной точек балки (Key Points): **Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS...**, затем ввести координаты создаваемых точек как в таблице ниже, подтверждая ввод координат каждой точки нажатием **Apply** или **OK**.

NPT 1			NPT 2		
X	Y	Z	X	Y	Z
0	0	0	0.05	0	0

2.2. Построение линии: **Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > In Active Coord** > отмечаем мышью сначала точку 1, затем точку 2 > **OK**.

2.3. Разбиение линии на элементы: сначала зададим число конечных элементов на каждой линии **Main Menu > Preprocessor > Size Ctrls > [Manual Size >] Lines > All Lines** > в поле **NDIV** вводим значение **50** > **OK**. Теперь разбиваем линии на конечные элементы: **Main Menu > Preprocessor > Mesh > Lines > Pick All**.

3. Определение типа и параметров анализа.

3.1. **Main Menu > Preprocessor > Loads > Analysis Type > New Analysis... > Static** > **OK**.

3.2. **Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > Analysis Options** > включаем учет геометрической нелинейности – выбираем из списка **Large Displacement Static**. В том же окне **Write Items to Results File > Frequency** > выбираем **Write every substep**

4. Закрепления и нагрузки.

4.1. Жёсткое закрепление одного конца балки: **Main Menu > Preprocessor > Loads > Apply > Displacement > On Keypoints** > отмечаем мышью точку 1 > отмечаем **All DOF** > вводим значение **VALUE = 0** > **OK**.

4.2. Пошаговое нагружение. Пусть под действием пока не известной силы прогиб незакрепленного конца балки в течение первых **0,5** условных единиц времени возрастает от **0** до **0,03** м, затем в течение одной единицы времени величина прогиба падает, и возникает прогиб в противоположном направлении величиной **-0,03** м.

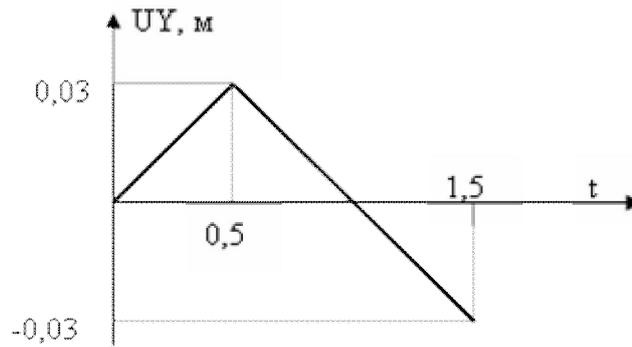


Рисунок к описанию шагов нагружения

- 4.3. Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Keypoints** > отмечаем мышью точку 2 > **OK** > выбираем для метки **Lab2** значение **UY, constant value**, в поле для **VALUE** вводим **0.03** – величина прогиба балки в конце первого шага > **OK**.
- 4.4.** Определяем временные рамки первого шага и число подшагов нагружения: **Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > Time Control > Time at end of loadstep = 0.5**, отмечаем **Time Increment**, затем > **Time step size** и **Maximum time step** > задаем **0.01** > **OK**.
- 4.5.** Записываем нагружение на первом шаге в файл. **Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opt > Write LS File...** > в поле **LSNUM** вводим **1** > **OK**.
- 4.6.** Нагружение на втором шаге. Конечное значение прогиба балки на втором шаге нагружения $-0,03$. **Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Keypoints** > отмечаем мышью точку 2 > **OK** > выбираем для метки **Lab2** значение **UY, constant value**, в поле для **VALUE** вводим отрицательное значение **-0.03** > **OK**.
- 4.7.** Определяем временные рамки второго шага. **Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > Time Control > Time at end of loadstep = 1.5** > **OK**.
- 4.8.** Записываем нагружение на втором шаге в файл. **Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opt > Write LS File...** > в поле **LSNUM** вводим **2** > **OK**.

Примечание. По умолчанию суммарное количество шагов нагружения имеет ограничение – оно не может быть больше 1000. Информация по шагам нагружения записывается в текстовые файлы **jobname.sN** где **jobname** – имя задачи, а **N** – номер шага нагружения (01, 02, 03...). Эти файлы могут быть просмотрены и изменены в любом текстовом редакторе. Так, чтобы изменить величину или направление задаваемого прогиба, следует в строчке

D,2,UY,3.000000000E-02,0.00000000 изменить **UY** на **UX** или **UZ**, а значение **3.000000000E-02** можно поменять на **1.0E-02** или на **5.0E-03**.

5. Запуск задачи на счёт.

5.1. Особенность решения в том, что нагрузки считываются из полученных ранее файлов пошаговых нагрузок: **Main Menu > Solution > Solve > From LS Files > OK.**

LSMIN	1
LSMAX	2
LSINC	1

6. Обработка результатов расчета.

6.1. Создание списка переменных. **Main Menu > TimeHist Postpro > Define Variables... > Add > Nodal DOF Result >** отмечаем мышью точку 2 **> OK >** переменной **Name** присваиваем имя **U_Y** (или любое другое, содержащее менее 8 символов) в поле **Item** отмечаем **Translation UY > OK > Add > Reaction forces >** отмечаем мышью точку 2 **> OK >** переменной **Name** присваиваем имя **R_Y**, в поле **Item** отмечаем **Struct force FY > OK > Close.**

6.2. Создание табличного файла зависимости перемещений **U_Y** и реакций **R_Y** от условного времени нагружения **TIME**. **Main Menu > TimeHist Postpro > List Variables... >** в поле **NVAR1** ставим число 2, а в поле **NVAR2** - 3 **> OK.** В меню **File** открывшегося окна **PVAR Command** со списком выбираем **Save as...** и сохраняем файл под своим именем.

6.3. Просмотр максимальных значений усилий в точке 2: **Main Menu > TimeHist Postpro > List Extremes... >** в поле **NVAR1** ставим число 3 **> OK.**

6.4. Построение графиков зависимости усилия **R_Y** от перемещения **U_Y** в точке 2: Сначала надо выбрать перемещение **U_Y** в качестве оси абсцисс. В командной строке пишем **XVAR,2** и подтверждаем команду нажатием **Enter**. Затем строим график, по оси ординат которого отложены усилия **R_Y** **Main Menu > TimeHist Postpro > Graph Variables... >** в поле **NVAR1** ставим число 3 **> OK.**

6.5. Для подходящего отображения полученных графиков (изменение фона окна для сохранения изображения в файле, рисование масштабной сетки, выбор нужного масштаба и изменение названий осей) можно воспользоваться следующими командами:

6.5.1. Изменение фона окна для сохранения изображения в файле: **Utility Menu > PlotCtrls > Style > Background >** снимаем галочку с **Display Picture Background.**

6.5.2. Рисование масштабной сетки: **Utility Menu > PlotCtrls > Style > Graphs > Modify Grid... >** в поле **Grid Type of Grid** выбираем **X and Y lines.**

6.5.3. Выбор требуемого масштаба и изменение названий осей. **Utility Menu > PlotCtrls > Style > Graphs > Modify Axes... >** в поле **/AXLAB X** заносим **Displacement**, в поле **/AXLAB Y** заносим **Force**, в поле **/GRTYP** выбираем **Single Y axis**, для каждой из осей **X** и **Y** отмечаем **Auto calculated**, значение **NDIV** для **X-axis** возьмём равным 10, для **Y-axes** – 10. **> OK.**

Результаты расчетов представим на рисунках 7-15.

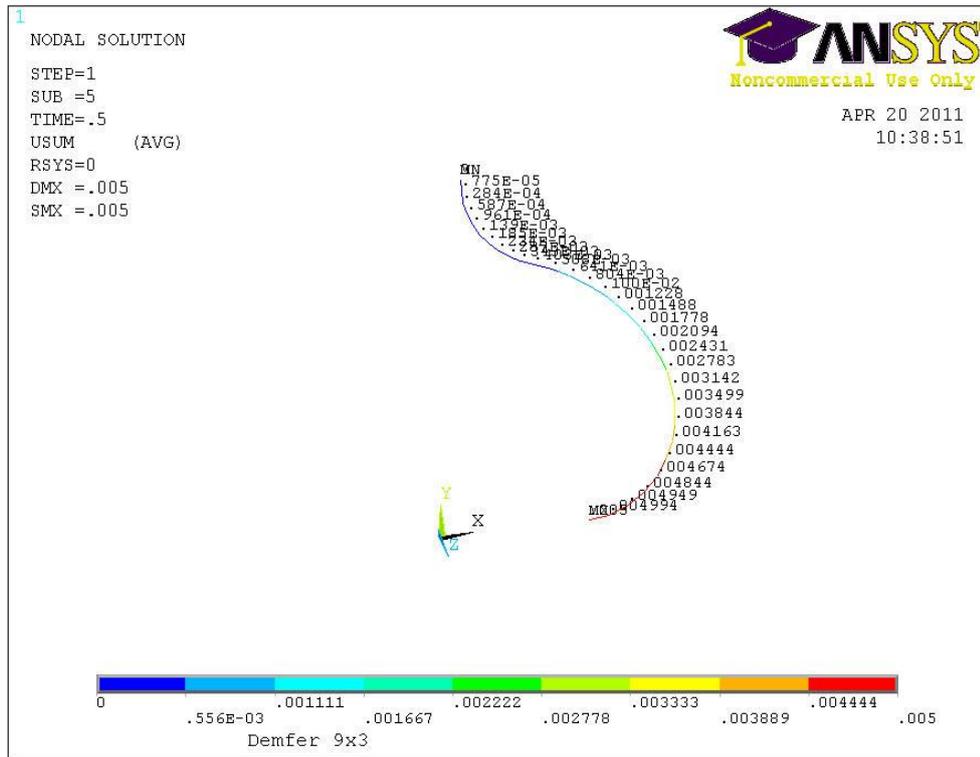


Рисунок 7 – Перемещение +0,005 м по оси X

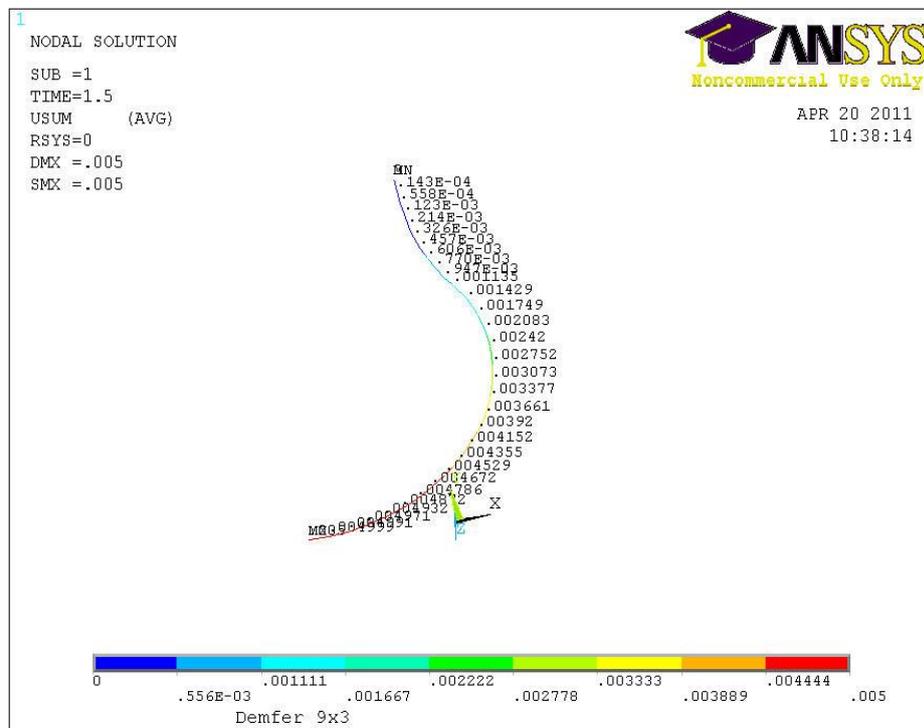


Рисунок 8 – Перемещение +0,005 м по оси X

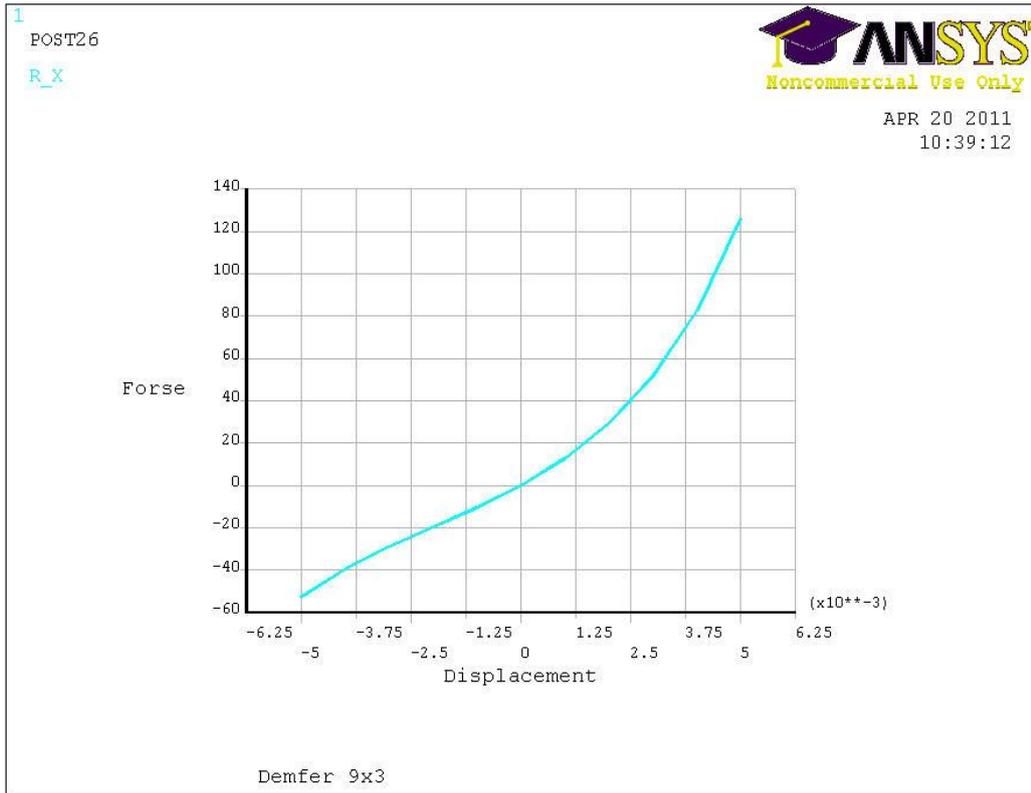


Рисунок 9 – Зависимость усилий от перемещения по оси X

***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	1 UX U_X	1 FX R_X
0.10000	0.100000E-02	12.7803
0.20000	0.200000E-02	29.3980
0.30000	0.300000E-02	51.7492
0.40000	0.400000E-02	82.5404
0.50000	0.500000E-02	126.012
0.60000	0.400000E-02	82.5403
0.70000	0.300000E-02	51.7498
0.80000	0.200000E-02	29.3990
0.90000	0.100000E-02	12.7813
1.0000	0.867362E-18	-0.521579E-08
1.1000	-0.100000E-02	-10.4126
1.2000	-0.200000E-02	-19.6889
1.3000	-0.300000E-02	-28.9746
1.4000	-0.400000E-02	-39.4364
1.5000	-0.500000E-02	-52.4056

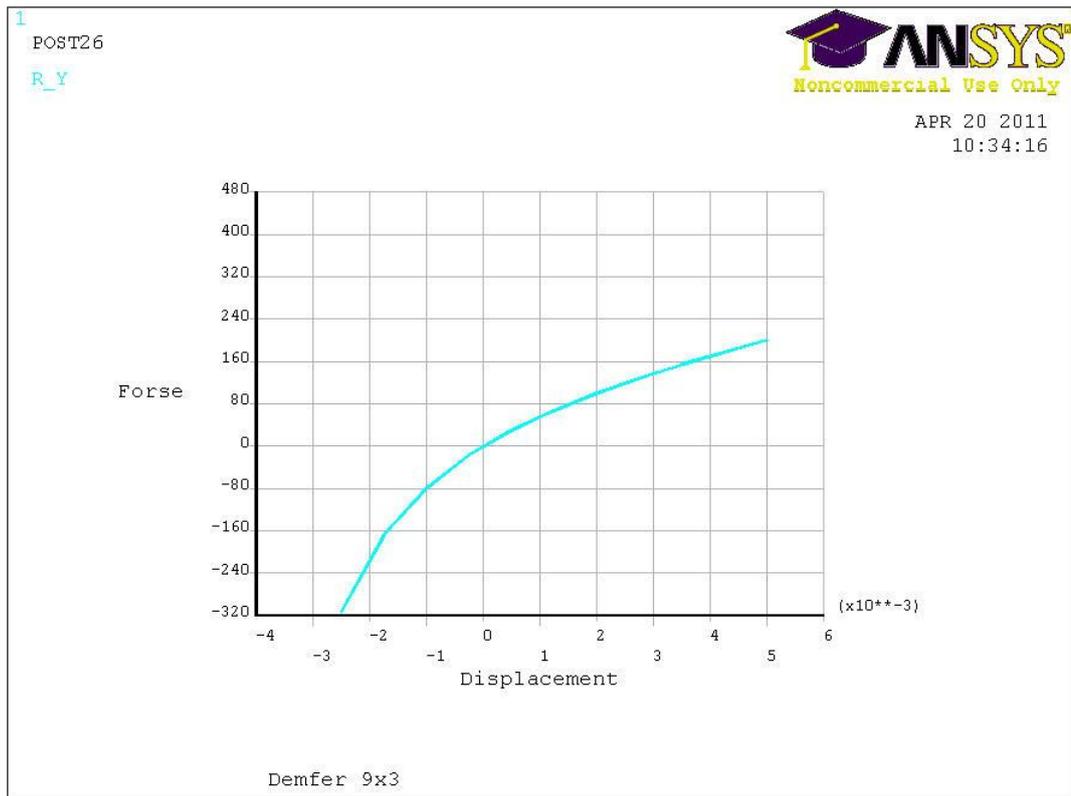


Рисунок 12 – Зависимость усилий от перемещения по оси Y

ANSYS POST26 VARIABLE LISTING

TIME	1UY U_Y	1FY R_Y
0.10000	0.100000E-02	56.3347
0.20000	0.200000E-02	100.544
0.30000	0.300000E-02	137.743
0.40000	0.400000E-02	169.849
0.50000	0.500000E-02	200.651
0.60000	0.425000E-02	178.398
0.70000	0.350000E-02	154.437
0.80000	0.275000E-02	128.642
0.90000	0.200000E-02	100.155
1.0000	0.125000E-02	68.2664
1.1000	0.500000E-03	30.1556
1.2000	-0.250000E-03	-17.0144
1.3000	-0.100000E-02	-79.1213
1.4000	-0.175000E-02	-168.174
1.5000	-0.250000E-02	-312.867

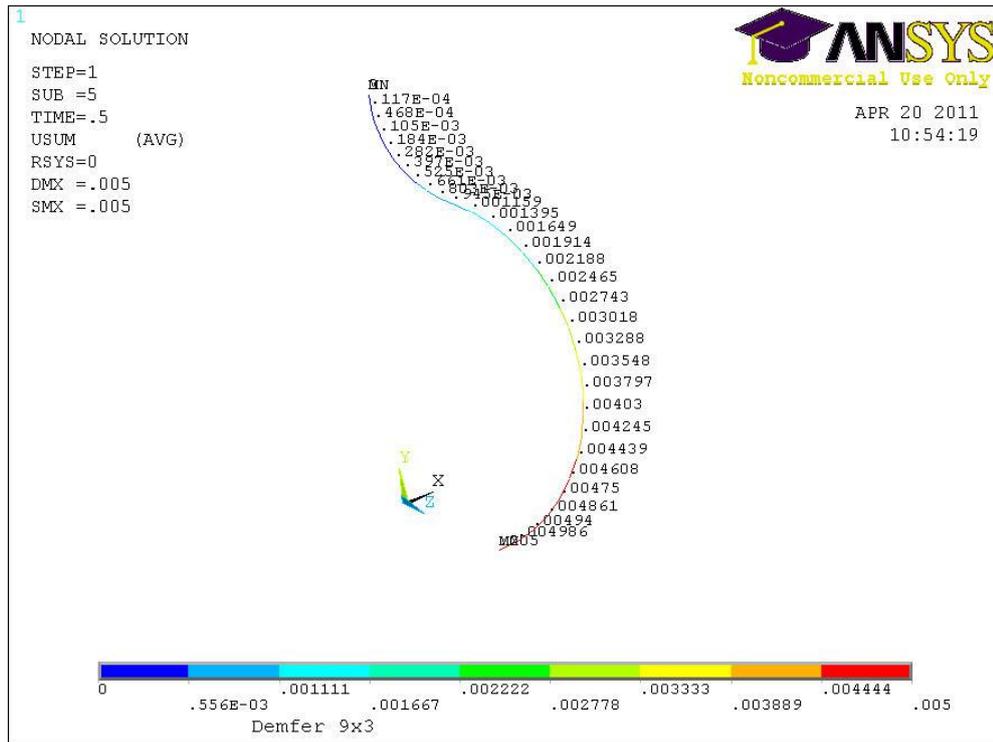


Рисунок 13 - Перемещение +0,005 м по оси Z

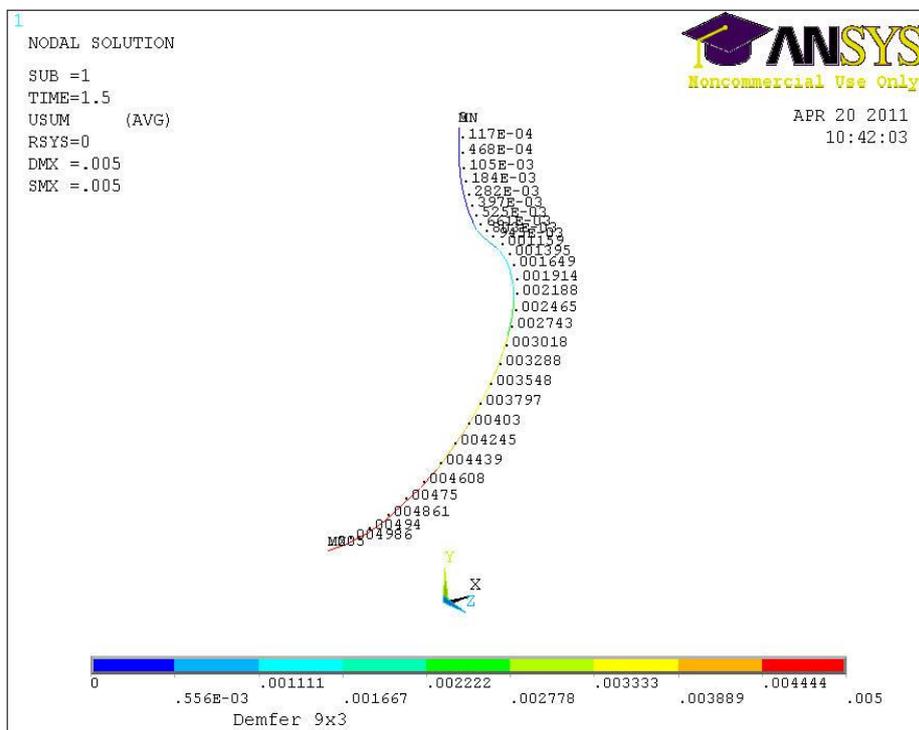


Рисунок 14 - Перемещение -0,005 м по оси Z

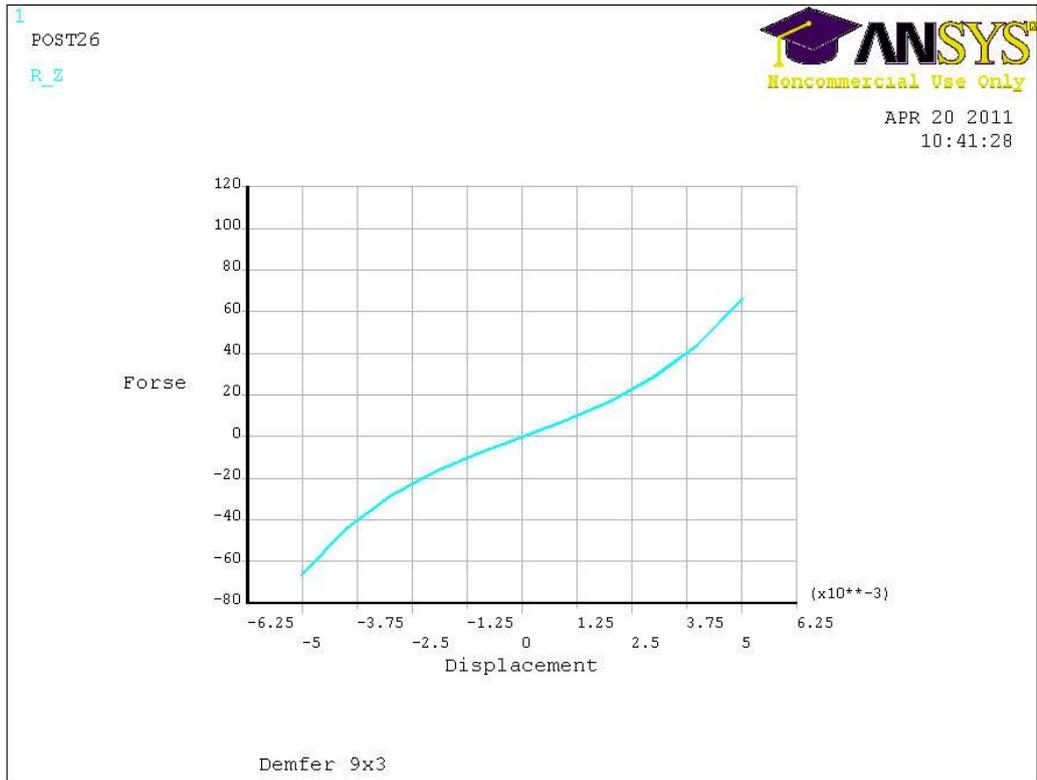


Рисунок 15 – Зависимость усилий от перемещения по оси Z

ANSYS POST26 VARIABLE LISTING

TIME	1 UZ	1 FZ
	U_Z	R_Z
0.10000	0.100000E-02	7.87597
0.20000	0.200000E-02	16.9783
0.30000	0.300000E-02	28.6164
0.40000	0.400000E-02	44.3226
0.50000	0.500000E-02	66.1299
0.60000	0.400000E-02	44.3228
0.70000	0.300000E-02	28.6165
0.80000	0.200000E-02	16.9784
0.90000	0.100000E-02	7.87607
1.0000	0.867362E-18	-0.296189E-09
1.1000	-0.100000E-02	-7.87597
1.2000	-0.200000E-02	-16.9783
1.3000	-0.300000E-02	-28.6164
1.4000	-0.400000E-02	-44.3226
1.5000	-0.500000E-02	-66.1299

Чтобы получить значения усилий для всего виброизолятора, то есть для 32 элементов, просуммируем значения проекций усилий всех элементов на каждую ось и полученные результаты занесем в таблицы 1, 2, 3.

Таблица 1

Перемещения и усилия для элемента и виброизолятора в направлении Y

Y, м	Fy1, Н	Fy32, Н
0,001	56,3347	1802,71
0,002	100,544	3217,408
0,003	137,743	4407,776
0,004	169,849	5435,168
0,005	200,651	6420,832
0,00425	178,398	5708,736
0,0035	154,437	4941,984
0,00275	128,642	4116,544
0,002	100,155	3204,96
0,00125	68,2664	2184,525
0,0005	30,1556	964,9792
-0,00025	-17,0144	-544,461
-0,001	-79,1213	-2531,88
-0,00175	-168,174	-5381,57
-0,0025	-312,867	-10011,7

Таблица 2

Перемещения и усилия для элемента и виброизолятора в направлении X

X, м	Fx(1 эл.), Н	Fx20 (20 эл. по X), Н	F1 (4 эл. №1), Н	F2 (4 эл. №2), Н	F3 (4 эл. №3), Н	Fx32, Н
0,001	12,78	255,606	46,0586	31,874	11,376	344,914
0,002	29,398	587,96	105,947	73,317	26,167	793,391
0,003	51,749	1034,984	186,498	129,06	46,061	1396,6
0,004	82,54	1650,808	297,465	205,85	73,468	2227,59
0,005	126,01	2520,24	454,132	314,27	112,16	3400,8
0,004	82,54	1650,806	297,465	205,85	73,468	2227,59
0,003	51,75	1034,996	186,5	129,06	46,062	1396,62
0,002	29,399	587,98	105,95	73,32	26,168	793,418
0,001	12,781	255,626	46,0622	31,876	11,376	344,941
8,674E-19	-5E-09	-1,04316E-07	-2E-08	-1E-08	-5E-09	-1E-07
-0,001	-10,413	-208,252	-37,526	-25,97	-9,2681	-281,01
-0,002	-19,689	-393,778	-70,956	-49,1	-17,525	-531,36
-0,003	-28,975	-579,492	-104,42	-72,26	-25,79	-781,96
-0,004	-39,436	-788,728	-142,12	-98,35	-35,102	-1064,3
-0,005	-52,406	-1048,112	-188,86	-130,7	-46,645	-1414,3

Таблица 3

Перемещения и усилия для элемента и виброизолятора в направлении Z

Z, м	Fz (1 эл.), Н	Fz20 (20 эл. по X), Н	F1 (4 эл. №1), Н	F2 (4 эл. №2), Н	F3 (4 эл. №3), Н	Fz32, Н
0,001	7,87597	157,5194	13,669	24,631	30,714	226,533
0,002	16,9783	339,566	29,4664	53,097	66,21	488,34
0,003	28,6164	572,328	49,6648	89,493	111,6	823,081
0,004	44,3226	886,452	76,9234	138,61	172,85	1274,83
0,005	66,1299	1322,598	114,771	206,81	257,89	1902,07
0,004	44,3228	886,456	76,9238	138,61	172,85	1274,84
0,003	28,6165	572,33	49,6649	89,493	111,6	823,084
0,002	16,9784	339,568	29,4666	53,097	66,211	488,342
0,001	7,87607	157,5214	13,6692	24,631	30,714	226,536
8,674E-19	-2,96189E-10	-5,92378E-09	-5E-10	-9E-10	-1E-09	-9E-09
-0,001	-7,87597	-157,5194	-13,669	-24,63	-30,714	-226,53
-0,002	-16,9783	-339,566	-29,466	-53,1	-66,21	-488,34
-0,003	-28,6164	-572,328	-49,665	-89,49	-111,6	-823,08
-0,004	-44,3226	-886,452	-76,923	-138,6	-172,85	-1274,8
-0,005	-66,1299	-1322,598	-114,77	-206,8	-257,89	-1902,1

4. Расчёт динамического поведения модели виброзащитной системы

Для оценки эффективности спроектированного изделия проведем кинематико-динамическое исследование системы. Для этого импортируем построенную в SolidWorks модель виброизолятора в формате Parasolid в программную среду комплекса ADAMS, заменив рабочие участки троса на нелинейный упругодемпфирующий элемент (Spring), обладающий их интегральной нагрузочной характеристикой в направлении оси Y (рисунок ...), соединяющий верхнюю и нижнюю обоймы.

Алгоритм импорта модели из CAD-пакетов в ADAMS

1. Сохранить сборку модели в формате Parasolid (*.xmt_txt).

При этом геометрия и взаимное положение деталей сборки сохраняется. Названия частей и связи теряются. Если заданы плотности материалов деталей, то они сохраняются.

2. Импортировать геометрию модели в ADAMS

При импорте нужно указать название модели, куда будет импортирована геометрия.

3. Переименовать детали и задать материалы деталей, если они не импортировались вместе с моделью Parasolid. Учесть, что разделителем в

названии детали в ADAMS является точка (например, .model_1.part_2). Судить о наложении на деталь массово-инерционных свойств можно по наличию у нее маркера центра масс.

Изменить свойства деталей можно с помощью команды Modify. Можно задать плотность материала Density или выбрать один из стандартных материалов, например Steel. Также можно создать материал с нужными плотностью, модулем упругости и коэффициентом Пуассона.

4. Продумать схему размещения и оснастить модель кинематическими граничными условиями – шарнирами Joints. Шарниры можно прикладывать или к маркерам центра масс деталей, или к их характерным точкам (например, центр окружности или вершины). Если в месте приложения шарнира отсутствует маркер, то его можно создать через Main Toolbox. Если в названии маркера заменить «ground» на название части, то маркер будет принадлежать данной точке. При необходимости нужно построить упрощенную стержневую модель, которую можно параметризовать с помощью Points, и проверить схему размещения шарниров на ней. При этом желательно, чтобы в модели не было паразитных связей (Redundant Constraint), т.е. число ограничений не превышало число степеней свободы, поскольку ADAMS работает только со статически определимыми конструкциями. Проверить правильность построения модели можно с помощью инструмента Verify. Также важно соблюдать цепочку связей: первое тело крепится к земле, второе к первому и т.д. Это позволит решателю построить более простую систему уравнений и избежать возможных ошибок.
5. Задать динамические граничные условия – силы Force, Torque и деформируемые связи Spring, Bushing, Beam и т.д. Или специальные силы, такие как Контактная и Силы трения. Деформируемые связи позволяют задать нелинейные жесткости и демпфирование.
6. Задать генераторы движения Motion, если это требуется в модели. Для задания граничных условий можно использовать встроенный в пакет ADAMS редактор функций Function Builder. Для задания условий удобно использовать функцию IF, для задания кусочных функций – STEP. В качестве независимых переменных может выступать не только модельное время Time, но и параметры модели, такие как Перемещение, Скорость, Реакции и т.д.
7. Преобразовать выбранные тела в деформируемые, если это требуется в модели.

Преобразование осуществляется с помощью плагина AutoFlex, который загружается в меню Tools. Данный модуль поддерживает только треугольные и пирамидальные КЭ в линейной постановке, но позволяет размещать дополнительные узлы на ребрах КЭ (параболические КЭ). При этом программа позволяет в автоматическом порядке найти маркеры присоединения Attachment Point. Готовые КЭ-модели можно импортировать из КЭ-пакетов, например ANSYS.

8. При расчете необходимо, чтобы число шагов Steps было достаточным, так, например, при задании вращения валов рекомендуется брать не менее 1 шага на градус. Также можно сменить решатель Setting – Solver - Dynamics – Integrator. По умолчанию стоит GSTIFF – самый быстрый, решатель WSTIFF лучше подходит для задач с резкими перепадами параметров и мертвыми точками. ADAMS позволяет также использовать расчет с помощью скриптов. Следовательно, позволяет изменять параметры модели (например, деактивировать элементы) на разных этапах расчета.

Объект виброзащиты смоделируем в виде точечного груза, расположенного в узле крепления верхней обоймы виброизолятора. Разрешим перемещение обойм виброизолятора только по оси Y. Для моделирования виброизолятора данный используется нелинейный демпфирующий элемент (Spring), поскольку мы имеем дело с нагрузкой вдоль одной оси. В ADAMS имеется специальный элемент, имеющий жесткости и коэффициенты демпфирования по трем осям координат (Bushing), который можно применять при сложной нагрузке на виброизолятор и который более соответствует естественным условиям нагружения виброизолятора, однако позволяет моделировать только линейные характеристики.

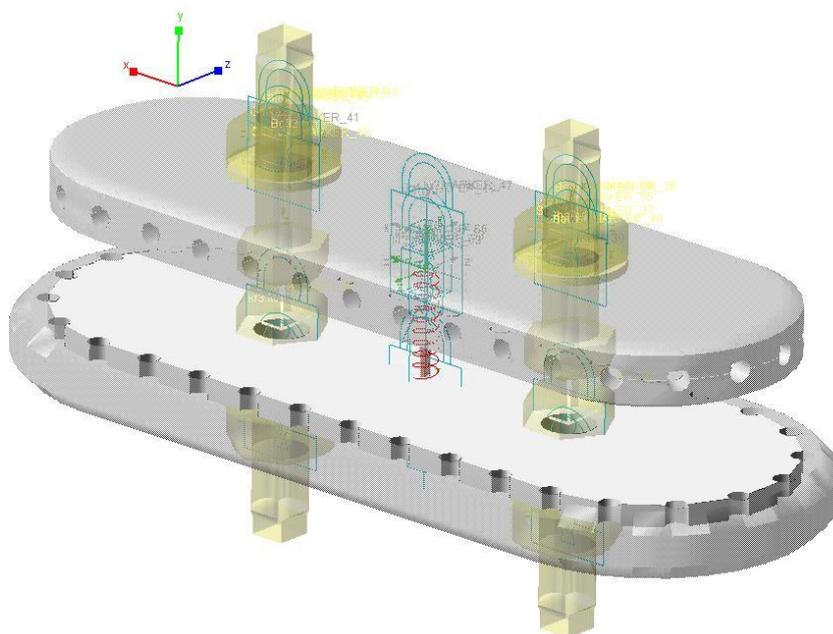


Рисунок 6 – Модель виброизолятора в MSC.ADAMS

Перенесем нагрузочную характеристику виброизолятора по оси Y в ADAMS. Получится следующий график, где по оси X отложена деформация упругого элемента в мм, а по оси Y сила в Н. Причём, в качестве положительного направления для оси деформации выбрано направление сжатия элемента (Spring).

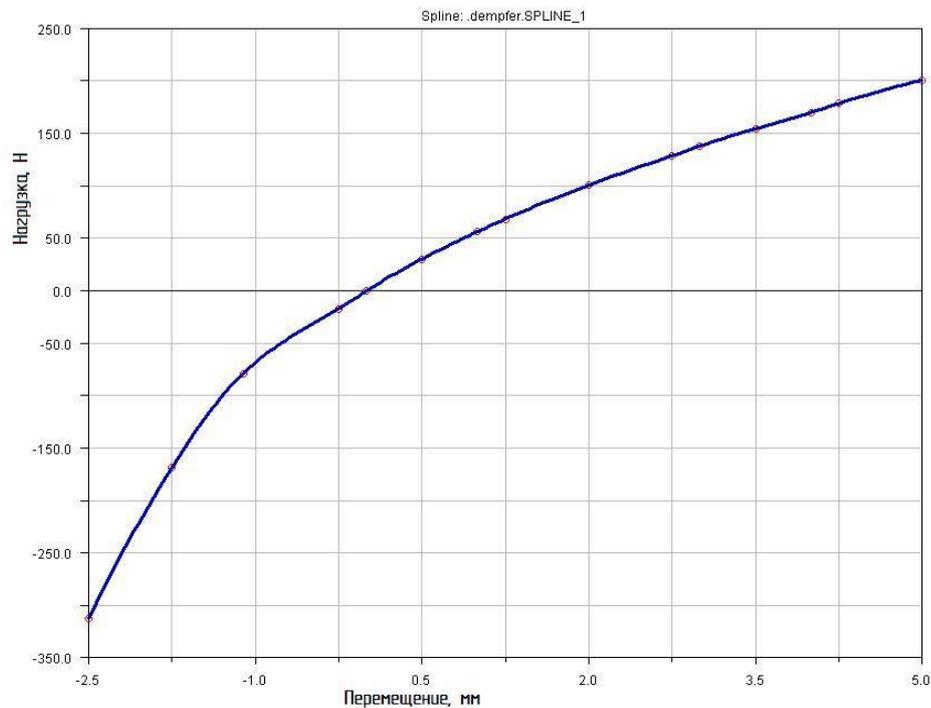


Рисунок 7 – Задание нагрузочной характеристики виброизолятора по оси Y в виде сплайна в пакете ADAMS

Построим амплитудно-частотную характеристику и определим массу виброзащищаемого прибора. Масса прибора (чаще характеристика ВИ при заданной массе прибора) подбирается исходя из обеспечения собственной частоты системы 10 Гц, согласно Мороз-5. Применим метод кинематического возбуждения. Для этого зададим синусоидальный закон вертикального перемещения нижней обоймы с линейно возрастающей частотой по закону

$$F=A*\sin (\text{time}^2)$$

Проведем расчет в течение 15 секунд и определим момент, когда система откликнется на внешнюю силу. Для избежания бесконечной силы в области резонанса, присвоим элементу некий коэффициент демпфирования, например 5.9E-002 (newton-sec/mm). Из графика легко видно, что это произошло при time = 10 секунд. Найденная масса прибора:

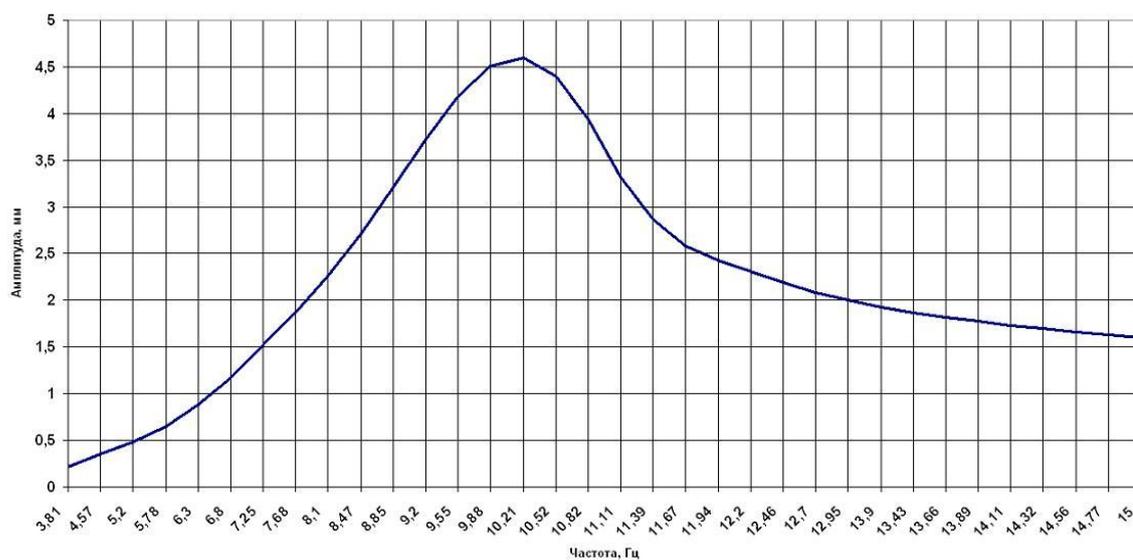
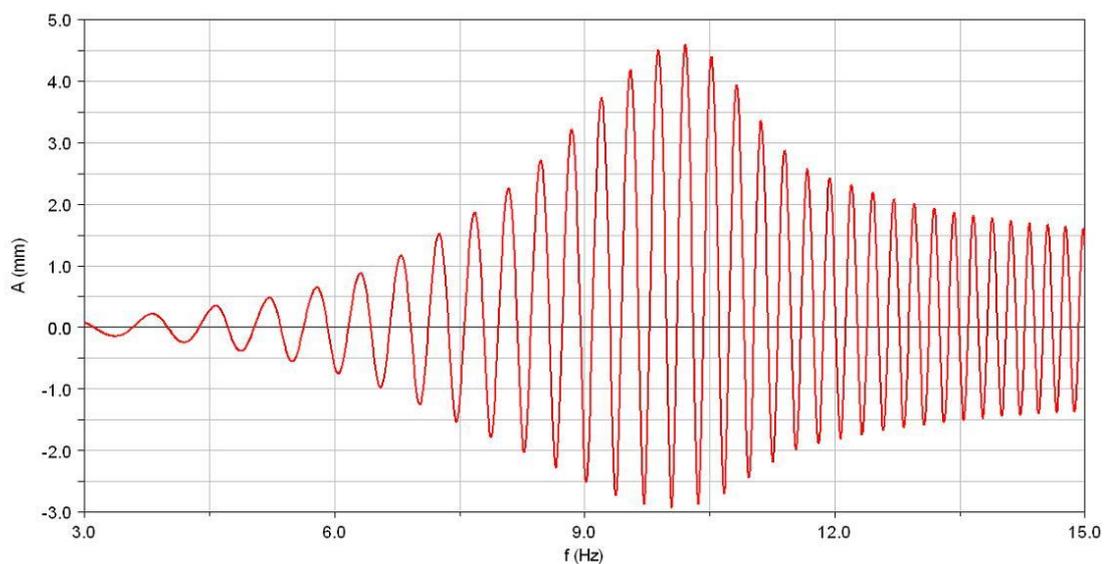


Рисунок 12 – Амплитудно-частотная характеристика системы виброизолятора с грузом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен комплекс работ по основам проектирования изделия на примере виброизолятора с упругим элементом в виде змеевика из цельного отрезка троса. При проектировании использован опыт проектирования подобных изделий на кафедре КиПДЛА и в лаборатории ОНИЛ-1.

С применением системы SolidWorks созданы 3D-модели деталей, образующих виброизолятор. В качестве основных приемов создания 3D-моделей деталей виброизолятора использованы операции выдавливания, перемещение эскиза вдоль направляющей, выдавливания отверстий. Для создания рабочих чертежей устройства и его сборочного чертежа использованы приемы создания заготовки чертежа по трехмерным моделям.

Средствами программного пакета ANSYS выполнен расчет нагрузочной характеристики виброизолятора. С помощью программного комплекса MSC.ADAMS получена амплитудно-частотная характеристика виброизолятора и оценена его эффективность.

Таким образом, в результате выполненной работы был спроектирован тросовый виброизолятор с упругим элементом в виде змеевика из цельного отрезка троса, который способен обеспечить заданный уровень стабильности характеристик, а конструкция обладает надлежащей устойчивостью и в целом способна обеспечивать поддержание этих характеристик в неизменном состоянии в процессе работы. Этим доказывается достижение высокой надёжности виброударозащиты и получение равножесткостной линейной характеристики по трем взаимно перпендикулярным направлениям, позволяющей исключить возникновение суб- и супергармонических резонансов в рабочей зоне частот виброзащитной системы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мелентьев, В.С. ADAMS/View, ADAMS/Postprocessor: Краткий справочник пользователя: учеб. пособие. / В.С. Мелентьев, А.С. Гвоздев. – Самара: Изд-во СГАУ, 2006. – 30 с.: ил.
2. Патент 2044190 РФ, МПК F16F 7/14. Тросовый виброизолятор / Пономарев Ю.К., Крайнов В.И., Мальтеев М.А. [и др.]. Заявка №5022195/28. Заявл. 23.12.1991. Опубл. 20.09.1995.
3. Пономарев, Ю.К. Многослойные цельнометаллические виброизоляторы с упругими элементами регулярной структуры. / Ю.К. Пономарев, В.И. Калакутский. – Самара: Изд-во СГАУ, 2003. – 198 с.
4. Чегодаев, Д.Е. Демпфирование / Чегодаев, Д.Е., Пономарев, Ю.К. – Самара: Изд-во СГАУ, 1997. – 334 с.: ил.
5. Чигарев, А.В. ANSYS для инженеров: справ. пособие. / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. - М.: Машиностроение-1, 2004. – 512 с.

Приложение. Параметры тросов

Продолжение табл. 51

150

Диаметр, мм			Расчетная площадь сечения всех проволок, мм ²	Расчетная масса 1000 м стального каната, кг	Маркировочная группа по временному сопротивлению разрыву, кгс/мм ²										
проволоки		6 проволочек			108 (216) проволочек	140	160	180	200	220	Расчетное разрывное усилие, кгс, не менее				
центральной	в слоях					суммарное всех проволок в канате	каната в целом	суммарное всех проволок в канате	каната в целом	суммарное всех проволок в канате	каната в целом	суммарное всех проволок в канате	каната в целом	суммарное всех проволок в канате	каната в целом
22,5	1,50	1,40	176,86	1735,0	24 750	21 000	28 250	24 000	31 800	26 300	35 350	28 700	—	—	
24,0	1,60	1,50	202,82	1990,0	28 400	24 100	32 450	27 550	36 500	30 200	40 550	32 900	—	—	
25,5	1,70	1,60	230,76	2265,0	32 300	27 450	36 900	31 350	41 500	34 300	46 150	37 450	—	—	
27,0	1,80	1,70	260,41	2555,0	36 450	30 950	41 650	35 400	46 850	38 750	52 050	42 250	—	—	
Канаты стальные по ГОСТ 3071-74															
5,0	0,24	0,22	8,48	82,5	—	—	—	—	1 525	1 250	1 695	1 385	1865	1525	
5,4	0,26	0,24	10,08	98,1	—	—	—	—	1 810	1 480	2 115	1 650	2215	1815	
5,8	0,28	0,26	11,84	115,5	—	—	—	—	2 130	1 745	2 365	1 935	2600	2130	
6,3	0,30	0,28	13,73	134,0	—	—	—	—	2 470	2 025	2 745	2 250	3020	2390	
6,7	0,32	0,30	15,75	153,5	—	—	—	—	2 835	2 320	3 150	2 580	3465	2745	
7,6	0,36	0,34	20,22	197,0	—	—	3 235	2 650	3 635	2 980	4 040	3 200	4445	3440	
8,5	0,40	0,38	25,25	246,0	—	—	4 040	3 310	4 545	3 725	5 050	4 000	5555	4305	
9,0	0,45	0,40	28,10	273,5	—	—	4 495	3 685	5 055	4 155	5 620	4 455	6180	4785	
11,5	0,55	0,50	43,85	427,0	—	—	7 015	5 750	7 890	6 255	8 770	6 795	—	—	
13,5	0,65	0,60	63,05	613,5	—	—	10 050	8 240	11 300	8 960	12 600	9 765	—	—	
15,5	0,75	0,70	85,77	834,5	12 000	9 840	13 700	11 200	15 400	12 200	17 150	13 250	—	—	
22,5	1,05	1,00	174,84	1705,0	24 450	20 000	27 950	22 900	31 450	24 900	34 950	27 050	—	—	
24,5	1,15	1,10	211,50	2060,0	29 600	24 250	33 800	27 700	38 050	30 150	42 300	32 750	—	—	
27,0	1,30	1,20	252,26	2455,0	35 300	28 900	40 350	33 050	45 400	36 000	50 450	39 050	—	—	
29,0	1,40	1,30	295,93	2850,0	41 400	33 900	47 300	38 750	53 250	42 200	59 150	45 800	—	—	

В головке таблицы число 216 в скобках означает количество проволок в слоях для канатов по ГОСТ 3071-74.
 Канаты, разрывное усилие которых указано справа от жирной линии, изготовляют только из светлой проволоки. ГОСТ 3071-74 предусматривает диаметры канатов 33,5—66,5.
 ГОСТ 3070-74 предусматривает группы по временному сопротивлению 240 и 260 кгс/мм².
 Пример обозначения каната диаметром 13,0 мм, из светлой проволоки марки I, левой односторонней свивки, нераскручивающегося, с маркировкой по временному сопротивлению разрыву 180 кгс/мм², по ГОСТ 3070-74:
Канат 13-1-I-O-II-180 ГОСТ 3070-74
 Пример обозначения каната диаметром 11,5 мм из проволоки марки I, оцинкованной по группе СС, левой односторонней свивки, раскручивающегося, с маркировочной группой по временному сопротивлению разрыву 160 кгс/мм², по ГОСТ 3071-74:
Канат 11-5-I-CC-L-O-P-160 ГОСТ 3071-74

МАТЕРИАЛЫ

51. Размеры и параметры канатов по ГОСТ 3070-74 и 3071-74

Диаметр, мм			Расчетная площадь сечения всех проволок, мм ²	Расчетная масса 1000 м стального каната, кг	Маркировочная группа по временному сопротивлению разрыву, кгс/мм ²										
проволоки		6 проволочек			108 (216) проволочек	140	160	180	200	220	Расчетное разрывное усилие, кгс, не менее				
центральной	в слоях					суммарное всех проволок в канате	каната в целом	суммарное всех проволок в канате	каната в целом	суммарное всех проволок в канате	каната в целом	суммарное всех проволок в канате	каната в целом	суммарное всех проволок в канате	каната в целом
Канаты стальные по ГОСТ 3070-74															
3,3	0,22	0,20	3,62	35,5	—	—	—	—	651	553	724	615	796	676	
3,6	0,24	0,22	4,38	42,9	—	—	—	—	788	669	876	744	963	818	
3,9	0,26	0,24	5,20	51,0	—	—	—	—	936	795	1 040	884	1 140	969	
4,2	0,28	0,26	6,10	59,8	—	—	—	—	1 095	930	1 220	1 035	1 340	1 135	
4,5	0,30	0,28	7,07	69,3	—	—	—	—	1 270	1 075	1 410	1 195	1 555	1 285	
4,8	0,32	0,30	8,12	79,6	—	—	—	—	1 460	1 240	1 620	1 375	1 785	1 475	
5,5	0,36	0,34	10,42	102,6	—	—	1 665	1 415	1 875	1 590	2 080	1 720	2230	1860	
5,8	0,38	0,36	11,67	114,5	—	—	1 865	1 585	2 100	1 785	2 330	1 925	2565	2080	
6,5	0,45	0,40	14,53	142,0	—	—	1 320	1 970	2 615	2 220	2 905	2 400	3195	2595	
8,1	0,55	0,50	22,64	222,0	—	—	3 620	3 075	4 075	3 370	4 525	3 675	—	—	
9,7	0,65	0,60	32,52	319,0	—	—	5 200	4 420	5 850	4 840	6 500	5 280	—	—	
13,0	0,85	0,80	57,70	565,5	8 075	6 860	9 230	7 845	10 350	8 560	11 500	9 340	—	—	
14,5	0,95	0,90	72,96	715,0	10 200	8 670	11 650	9 900	13 100	10 800	14 550	11 800	—	—	
16,0	1,05	1,00	90,02	882,5	12 600	10 700	14 400	12 200	16 200	13 400	18 000	14 600	—	—	
17,5	1,15	1,10	108,56	1070,0	15 200	12 900	17 400	14 750	19 550	16 150	21 750	17 650	—	—	
19,5	1,30	1,20	130,11	1275,0	18 200	15 450	20 800	17 650	23 400	19 350	26 000	21 100	—	—	
21,0	1,40	1,30	152,38	1495,0	21 350	18 100	24 400	20 700	27 450	22 700	30 500	24 750	—	—	

СТАЛИ

159