

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Ю. К. ПОНОМАРЁВ, В. С. МЕЛЕНТЬЕВ, А. С. ГВОЗДЕВ

**Проектирование средств виброзащиты
авиационной техники**

Электронное учебное пособие

САМАРА

2011

УДК
ББК

Авторы: Пономерёв Юрий Константинович,
Мелентьев Владимир Сергеевич,
Гвоздев Александр Сергеевич

Пономарёв, Ю.К. Проектирование средств виброзащиты авиационной техники

[Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / Ю. К. Пономарев, В.С. Мелентьев, А.С. Гвоздев. Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (Нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (7,66 Мбайт). - Самара, 2011. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM). - Систем. требования: ПК Pentium; Windows 98 и выше.

Рассмотрены принципы проектирования виброзащитных систем для различных объектов авиационной техники. Учебное пособие предназначено для подготовки специалистов 2 факультета по специальностям 080100.62 "Экономика" (по профилю "Организация производства"); 160301.65 «Авиационные двигатели и энергетические установки», специализирующихся по направлениям «Интегрированные информационные технологии и управление проектами в авиадвигателестроении», «Информационные технологии проектирования и моделирования в авиадвигателестроении», а также, с сокращениями, по направлению «Информационные технологии в инновационном производственном менеджменте» (Государственный образовательный стандарт второго поколения - ГОС-2), и по специальности 160700 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», специалистов и бакалавров по направлениям «Интегрированные информационные технологии и управление проектами в авиадвигателестроении», «Информационные технологии проектирования и моделирования в авиадвигателестроении», а также, с сокращениями, по направлению «Информационные технологии в инновационном производственном менеджменте» (Федеральный Государственный образовательный стандарт третьего поколения - ФГОС-3). Подготовлено на кафедре конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов СГАУ.

Содержание

Введение	4
1. Вопросы для входного контроля	5
2. Перечень индивидуальных заданий	6
3. Создание объёмной модели конструкции	14
4. Расчёт упруго-демпфирующих свойств конструкции	18
5. Расчёт динамического поведения модели виброзащитной системы	28
6. Экспериментальное определение жесткостных и демпфирующих свойств ...	32
7. Вопросы для выходного контроля	37
Заключение.....	38
Список использованных источников.....	39
Приложение. Параметры тросов	40

ВВЕДЕНИЕ

Цель представленной 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.

Данное методическое пособие должно быть роздано студентам до начала работы, с целью ознакомления с теоретическим материалом и подготовки ко входному контролю. Также индивидуально студентами выполняются работы по созданию объемной 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, а также натурный эксперимент по определению упругодемпфирующих свойств виброизолятора.

1. Вопросы для входного контроля

1. Особенности описания характеристик демпфирования при сухом трении и одноосном нагружении.
2. Понятие жесткости и податливости. Размерность этих величин.
3. Что такое гистерезис? Параметры, характеризующие гистерезис.
4. Как жесткость системы влияет на резонансную частоту?
5. Куда девается энергия, определяемая площадью петли гистерезиса?
6. В каких единицах измеряется рассеянная энергия в упруго-демпфирующих системах.
7. Перечислите виды неупругого сопротивления.
8. В чем отличие сухого трения от вязкого?
9. В чем состоит сходство и различие гистерезиса сухого трения и вязкого?
10. Зависит ли жесткость и количество рассеянной энергии от скорости циклического нагружения в демпфере сухого трения?
11. Зависит ли жесткость и количество рассеянной энергии от скорости циклического нагружения в демпфере вязкого трения?
12. Как по графику упругогистерезисной характеристики определить величину рассеянной энергии?
13. Как по графику упругогистерезисной характеристики определить величину жесткости системы? Какие в этом случае есть варианты определения?
14. Что такое динамометр и для чего он нужен?
15. Покажите на схеме экспериментальной установки индикатор перемещения. Для чего он нужен?
16. Какие бывают динамометры и на каких принципах они могут работать?
17. Что такое планиметр?
18. Что такое курвиметр и в чем его принципиальное отличие от планиметра?
19. Какие виды виброизоляторов вы знаете?
20. Что такое материал МР и какие виды виброизоляторов из этого материала вы знаете?
21. Расскажите о конструкциях тросовых виброизоляторов.
22. Виды виброизоляторов вязкого трения.
23. Что такое эффективность виброизоляции?
24. Что такое резонанс механической системы.
25. Расскажите об амплитудно-частотной характеристике механической системы. Какие бывают типы указанных характеристик?

2. 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 одной из систем объёмного моделирования (SolidWorks, «Компас-график 3D», Unigraphics и т.д.) создать 3-х мерные модели деталей заданного средства виброзащиты и общую сборку по предоставленным преподавателем эскизам или схемам устройства. Дать описание конструкции спроектированного устройства.

2. Для конкретных размеров и физических данных с помощью изложенной в работе методики провести исследование нагрузочных характеристик устройства в трех взаимно-перпендикулярных направлениях и построить их. Как правило, эти характеристики являются нелинейными.

3. 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. Получить АЧХ системы в пакете MSC.ADAMS.

4. Выполнить расчёт жесткостных характеристик экспериментального образца, провести эксперимент, обработать результаты и сравнить их с результатами расчёта, определить расхождение и сделать выводы о применимости предложенной методики.

5. Оформить все результаты расчетов, описания конструктивных особенностей спроектированного изделия с иллюстрациями в виде отчёта по лабораторной работе с реализацией требований ЕСКД.

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

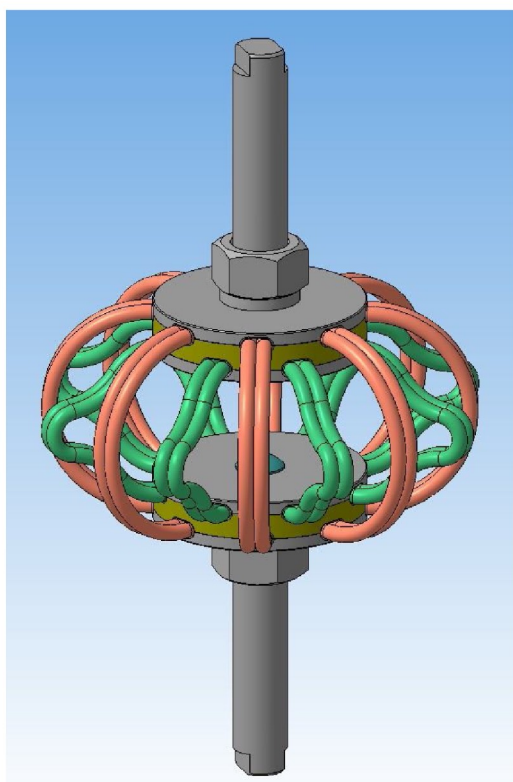


Рис. 1. Прототип виброизолятора

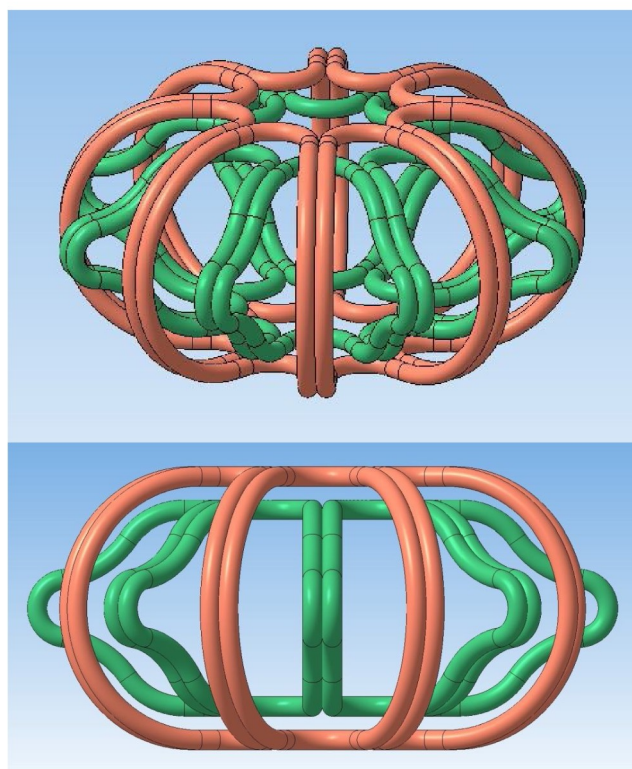


Рис. 2. Форма упруго-демпфирующего элемента виброизолятора



Рис. 3. Схема свивки колец для формирования упругих элементов

Исходные данные:

Число тросовых элементов (колец) $m = 16$; диаметр троса $d = 5$ мм; материал - сталь; $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па; число проволок в каждом элементе $n = 95$. Размеры упругого элемента (см. рис. 4): высоты упругих элементов $h = 75$ мм; $h_1 = 100$ мм; $r_1 = h/6$; $r_2 = h/2$; a (прямолинейный участок троса в оправке) = 10 мм.

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

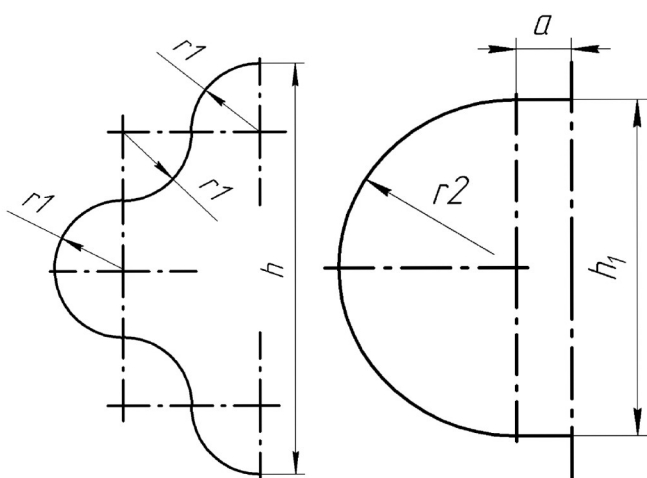


Рис. 4. Параметрическая схема упругого элемента виброизолятора

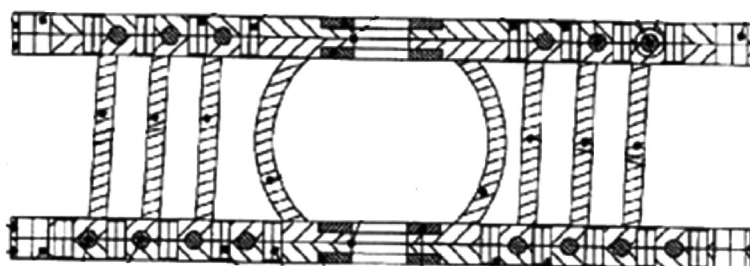
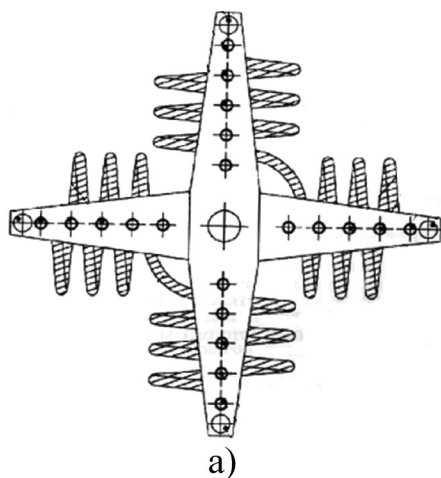
В отличие от прототипа, выполнить наружный ярус с переменной кривизной, а внутренний – с радиусом и прямолинейными горизонтальными участками. Радиус r_2 подобрать из условия равной жесткости с элементами наружного яруса.

Исходные данные:

Число тросовых элементов (колец) $m = 16$; диаметр троса $d = 5$ мм; материал - сталь; $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па; число проволок в каждом элементе $n = 95$.

Размеры упругого элемента (см. рис. 4): высоты упругих элементов $h = 6 \cdot r_1$; $h_1 = 2 \cdot r_2$; $r_1 = 15$ мм; a (прямолинейный участок троса в оправке) = 10 мм.

Задание 3. Тросовый виброизолятор с элементами тройной кривизны.



б)

Рис. 5. Прототип – патент на полезную модель № 50619: а) вид сверху; б) разрез по одной из планок

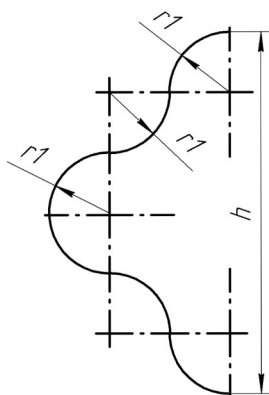


Рис. 6. Схема упругого элемента

Исходные данные:

Диаметр троса $d = 5$ мм;

Материал - сталь; $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па;

Радиус перехода $r_1 = 15$ мм; $h = 6 \cdot r_1$;

Число проволок в каждом элементе $n = 95$.

Задание 4. Тросовый виброизолятор с элементами тройной кривизны.

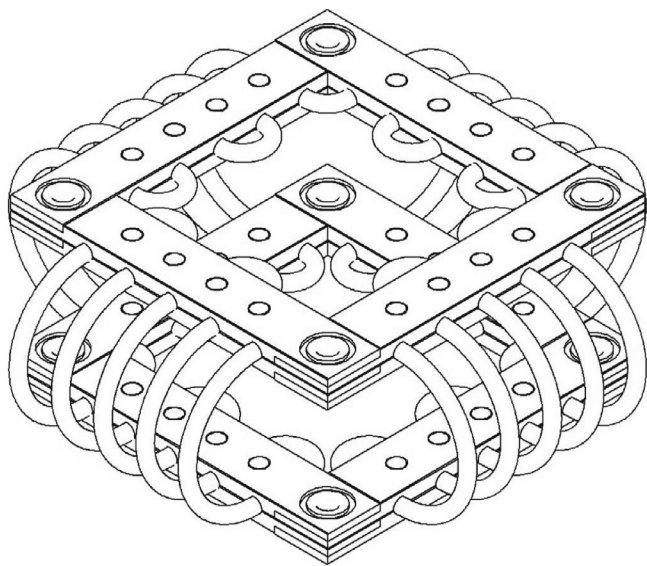


Рис. 7. Прототип виброизолятора

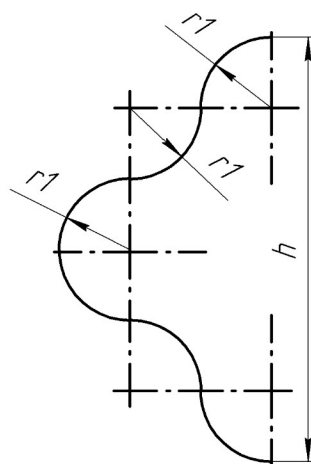


Рис. 8. Схема упругого элемента

Исходные данные:

Диаметр троса $d = 5$ мм;

Материал - сталь; $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па.

Радиус перехода $r_1 = 10$ мм; $h = 6 \cdot r_1$;

Число проволок в элементе $n = 95$.

В отличие от прототипа (рис. 7), выполнить упругий элемент с осевой линией разной кривизны (рис. 8).

Задание 5. Составной виброизолятор из пустотелого троса с шестью прядями.

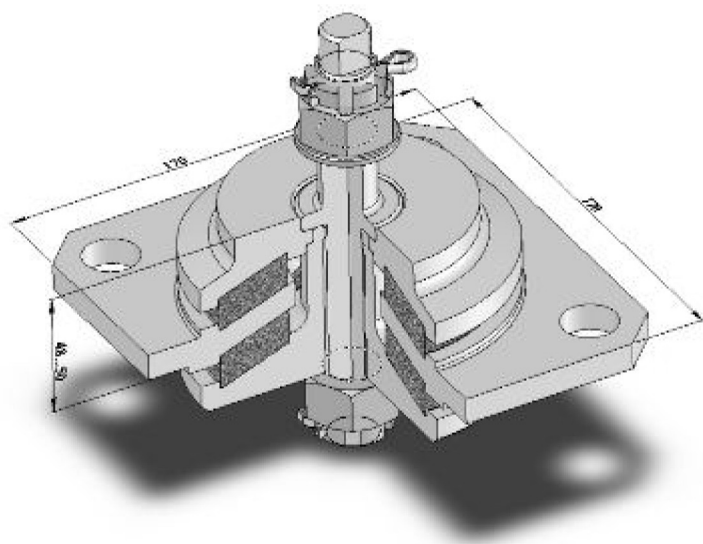


Рис. 13. Прототип виброизолятора

1 - элементы крепления виброизолятора к виброзащищаемому объекту (трубопровод); 2 - центральный стержень виброизолятора, 3 - упругодемпфирующие элементы, 4 - центральный элемент, крепящийся к основанию; 5 - корпус виброизолятора, движущийся совместно с центральным стержнем/

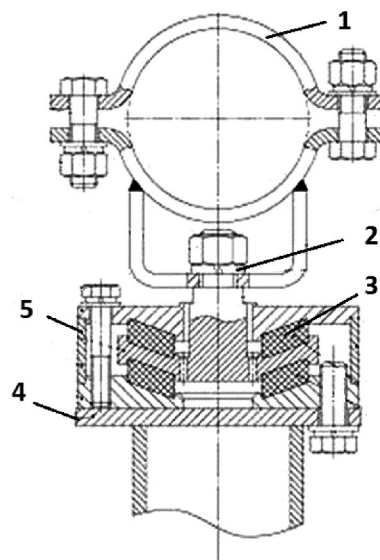


Рис. 14. Внутренне устройство виброизолятора

Исходные данные:

В отличие от прототипа, необходимо выполнить упругий элемент в виде троса

Число кольцевых элементов $m = 4$ мм;

Наружный диаметр $D = 80$ мм;

Количество проволок в тросе $n = 95$;

Материал – сталь, $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па.

Задание 6. Составной виброизолятор из деформированного пустотелого троса с шестью прядями.

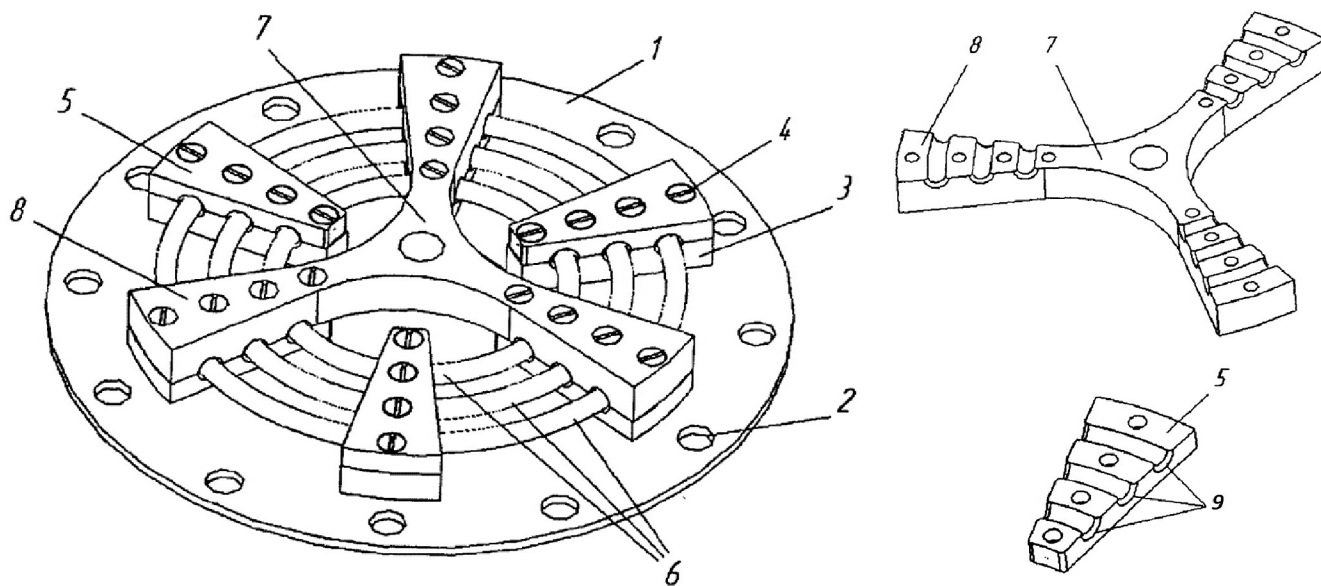


Рис. 12. Прототип виброизолятора

Исходные данные:

Число кольцевых элементов $m = 3$;

Наружный диаметр $D = 80$ мм;

Материал – сталь, $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па.

Выполняется в трёх вариантах

а) Упругий элемент выполнен из троса

Диаметр троса $d = 5$ мм;

Количество проволок в тросе $n = 95$

б) Упругий элемент выполнен из материала МР

Ширина и высота элемента – 5 мм; Эквивалентный модуль упругости $E = 2 \cdot 10^7$ Па

в) Упругий элемент выполнен из лент

Размеры ленты, b (ширина) \times h (высота) – 5 \times 0,2 мм; количество лент в пакете $n = 25$;

коэффициент трения $\mu = 0,3$

1 - основание виброизолятора, 2 - крепёжные отверстия, 3 - нижние планки, 4 - винты, 5 - верхние планки, 6 - упругодемпфирующие тросовые элементы, 7 - крышка, 8 - место крепления троса, 9 - скругления, для уменьшения износа троса

Задание 7. Ленточный виброизолятор.

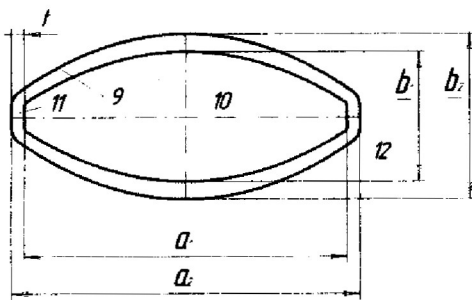


Рис. 9. Развертка одной из лент

Исходные данные:

Число лент в пакете $n = 40$;

Толщина одной ленты $h = 0,2$ мм;

Радиус кривизны пакета средний $R = 25$ мм;

Ширина пакета $b = 8$ мм;

Материал - сталь; $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па.

a_1, a_2 - внутренняя и внешняя длины, b_1, b_2 - внутренняя и внешняя высоты, t - толщина упругодемпфирующего элемента.

$t = n \cdot h$; $b_1 = 2(R-t)$; $b_2 = 2(R+t)$; $a_1 = 2(2R-t)$

$a_2 = 2(2R+t)$

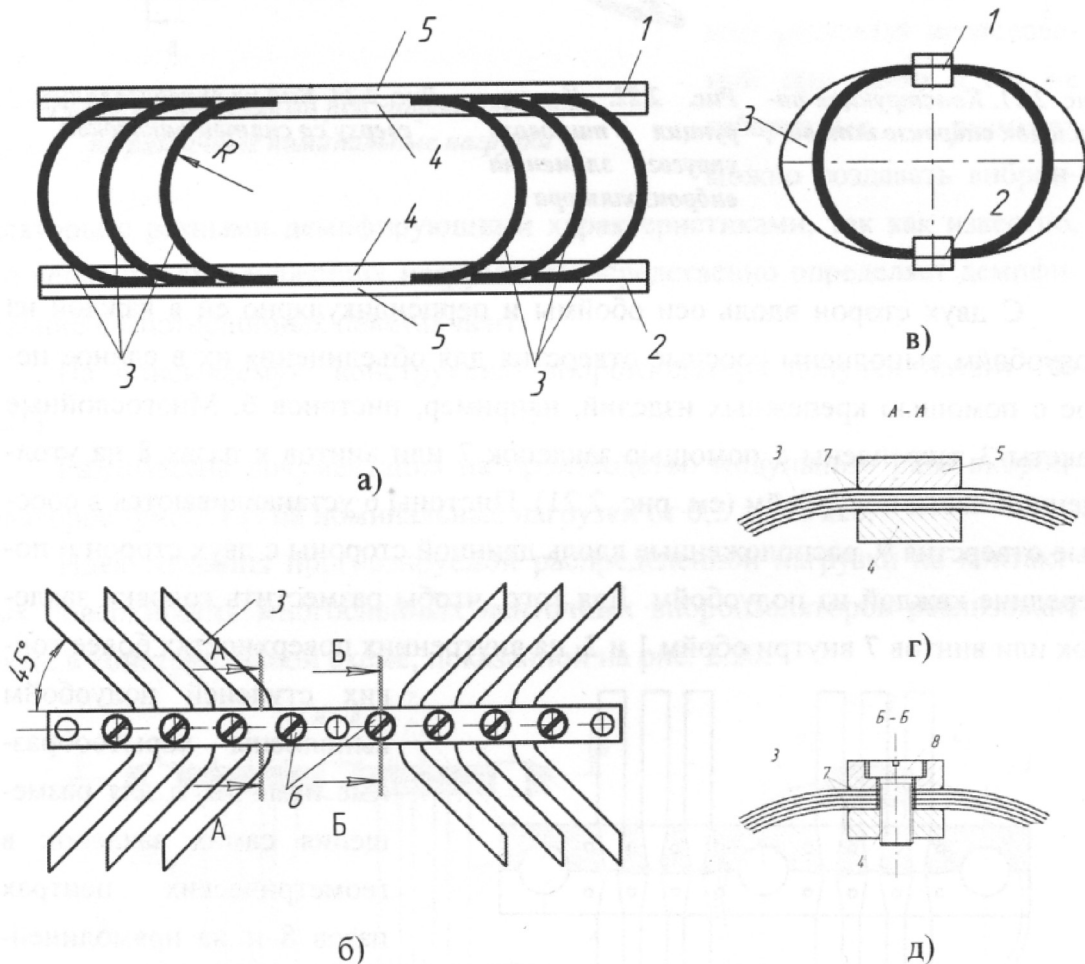


Рис. 10. Прототип виброизолятора

а) фронтальный вид; б) вид сверху; в) вид слева; г) разрез по ленте; д) разрез по болту

1, 2 - верхняя и нижняя оправки; 3 - упругодемпфирующий элемент; 4, 5 - внутренняя и наружная планки; 6 - винты, соединяющие верхнюю и нижнюю планки; 7, 8 - скругления планок для уменьшения износа лент упругодемпфирующего элемента; 9, 10 - радиусные и 11, 12 - прямолинейные части упругодемпфирующего элемента.

Задание 8. Составной виброизолятор из лент и материала МР

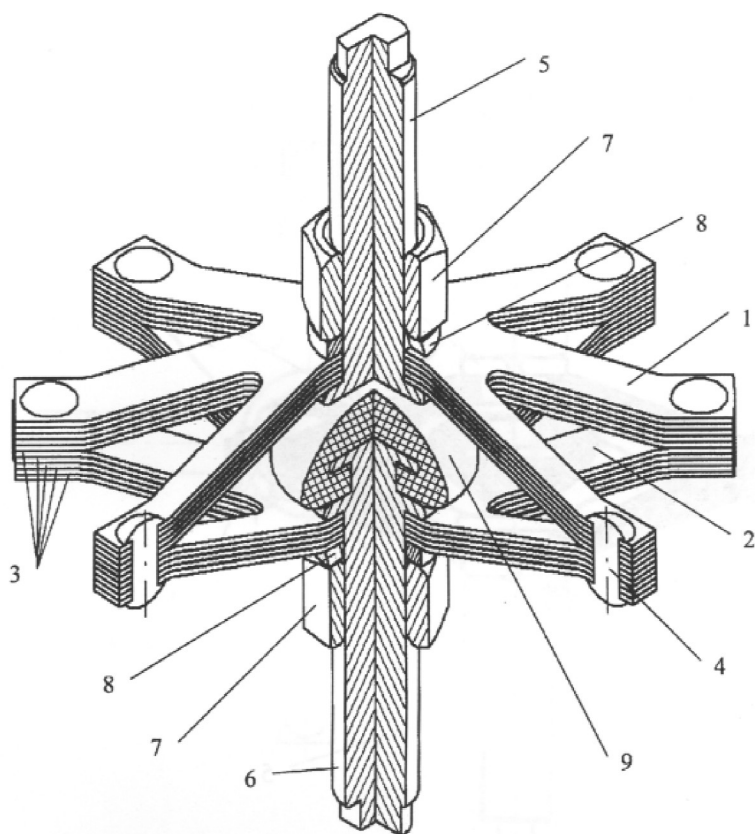


Рис. 10. Прототип виброизолятора

1 - верхний пакет лент, 2 - нижний пакет лент, 3 - ленты пакетов, 4 - соединительные заклёпки, 5,6,7,8 - комплект крепежа, 9 - дополнительный демпфер

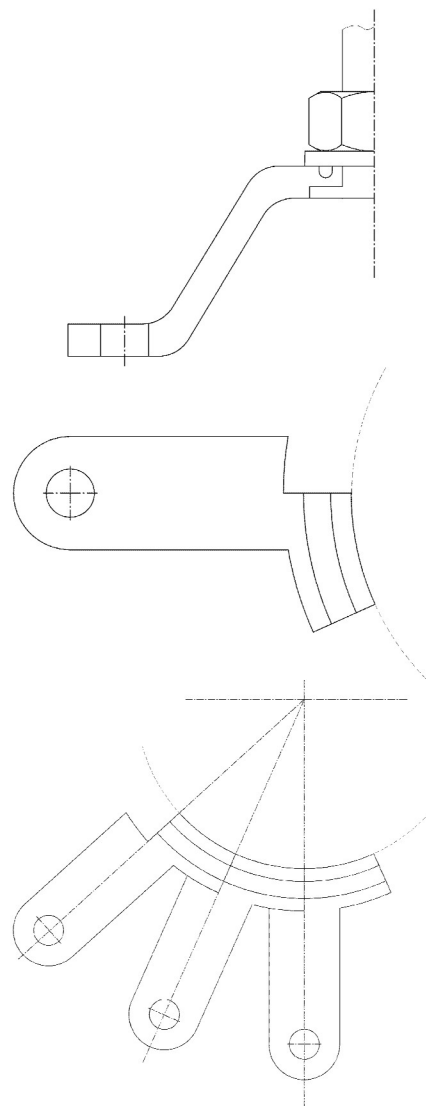


Рис. 11. Схема крепления упругого элемента

Исходные данные:

Число элементов $m = 8$;

Наружный диаметр $D = 80$ мм;

Ширина элемента $b = 10$ мм;

Число лент в пакете $n = 10$;

Толщина одной ленты $h = 0,2$ мм;

Расстояние между верхней и нижней точкой закрепления ленточного упругого элемента $L = 50$ мм;

Ширина пакета $b = 8$ мм;

Материал лент - сталь; $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па.

Материал демпфирующей части (поз. 9 на рис. 10) – металлорезина, $E = 2 \cdot 10^7$ Па.

Задание 9. Многослойный сетчатый виброизолятор.

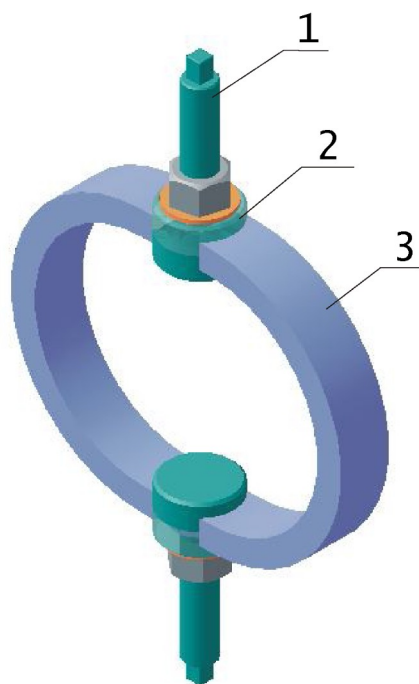


Рис. 15. Внутренне устройство виброизолятора

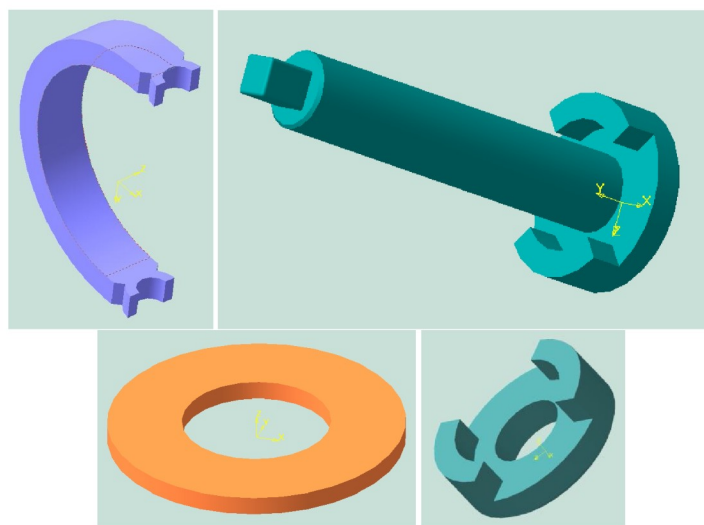


Рис. 16. Внешний вид отдельных элементов виброизолятора

1 - упруго-демпфирующий элемент; 2 - крепёжные обоймы; 3 - стержень для крепления к основанию

Исходные данные:

Число сетчатых полуколец $m - 2 \times 8$; ширина элементов $a = 15$ мм; средний радиус кривизны $R = 25$ мм. Материал проволоки - сталь; $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, размер ячеек b (длина) \times h (ширина) – $1,5 \times 1,5$ мм; толщина проволоки в сетке $d = 0,3$ мм.

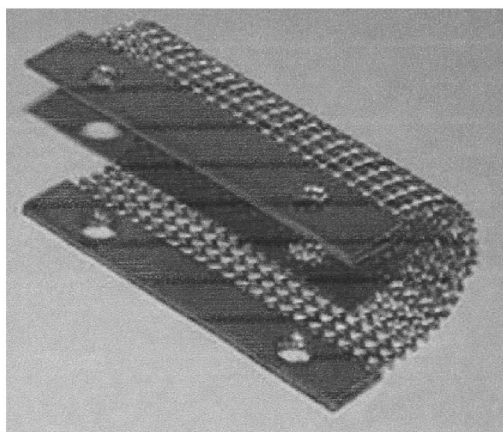


Рис. 17. Прототип –US Patent № 6629688

3. Создание объёмной модели конструкции

Рассмотрим порядок выполнения работы на основе примера. Объект проектирования: виброизолятор тросовый с элементами, работающими на изгиб и кручение (рис. 18).

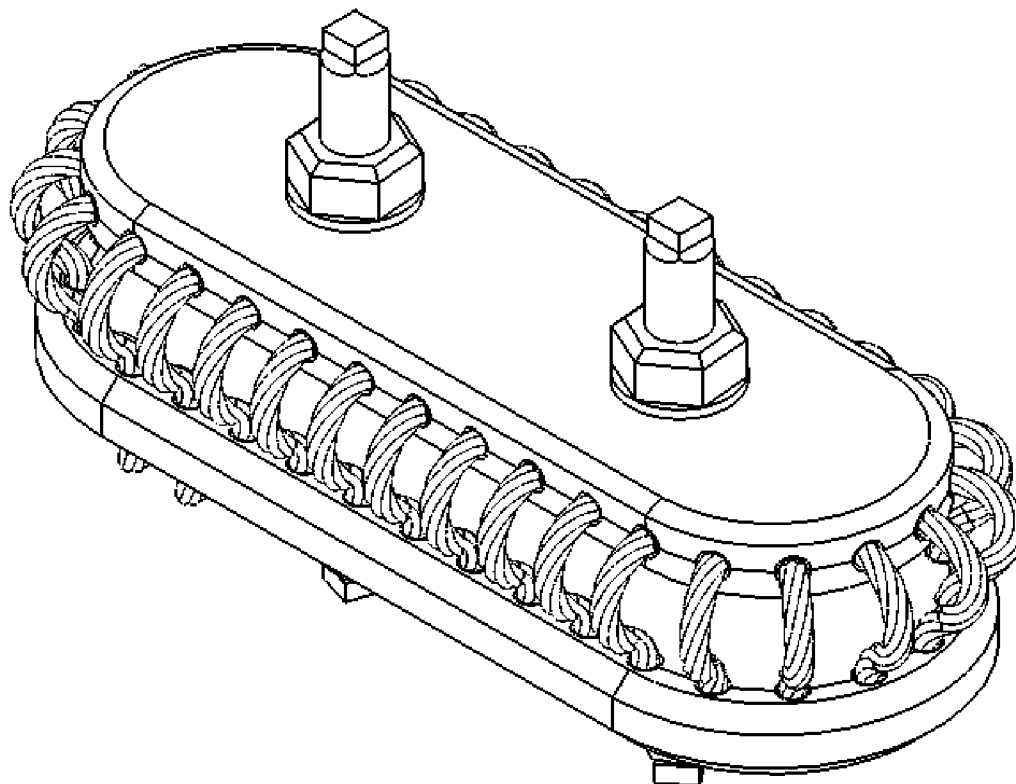


Рис. 18. Общий вид виброизолятора

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.).

Для построения объёмной модели использован пакет SolidWorks, в котором 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 эскизах, которые можно сделать видимыми в графической области.

Виброизолятор (рис. 19) 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.

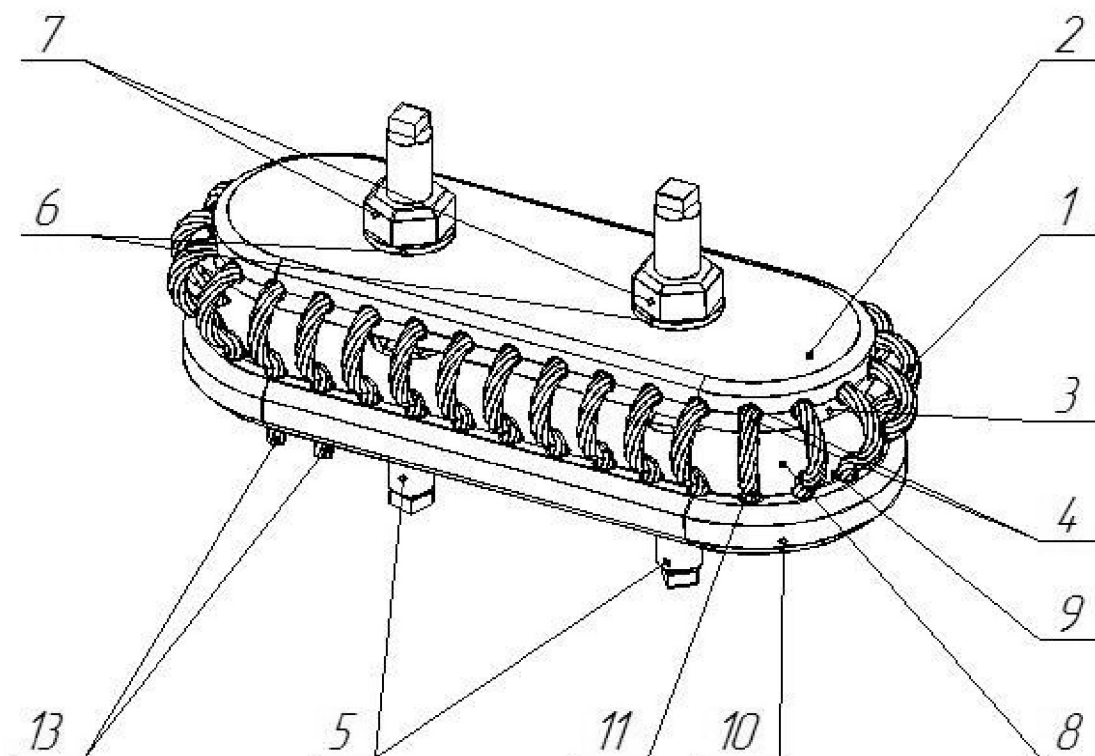


Рис. 19. Общий вид виброизолятора

Упругий тросовый элемент (рис. 20) 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 *b* (витки, заземляемые в обоймах), и рабочие участки *в* (участки, непосредственно выполняющие демпфирующую функцию). Геометрия рабочих участков образована двумя сопряженными дугами разного радиуса (рис. 21). Опорные участки *a* и *b* имеют одинаковую форму петли, но отличаются тем, что участки *a* лежат в плоскости, параллельной плоскости разъема обойм, а участки *b* – в плоскостях, перпендикулярных плоскости разъема обойм. Данные участки показаны на рисунке 21.

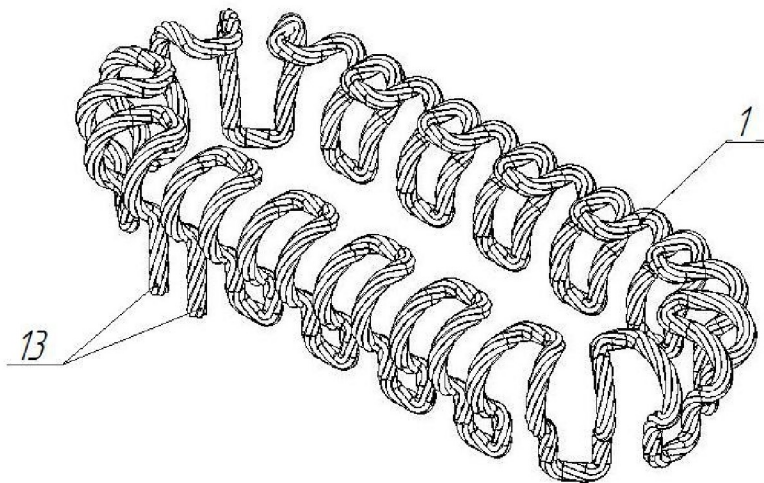


Рис. 20. Упругий элемент

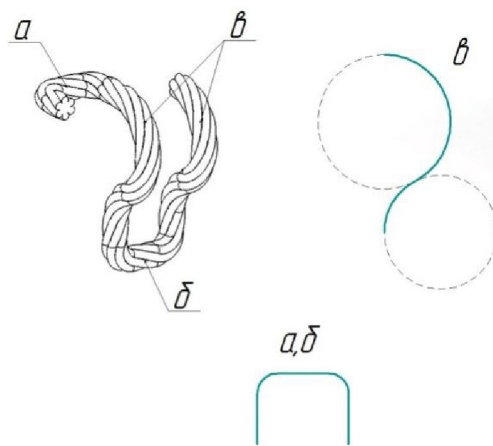


Рис. 21. Рабочие и опорные участки упругого элемента

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

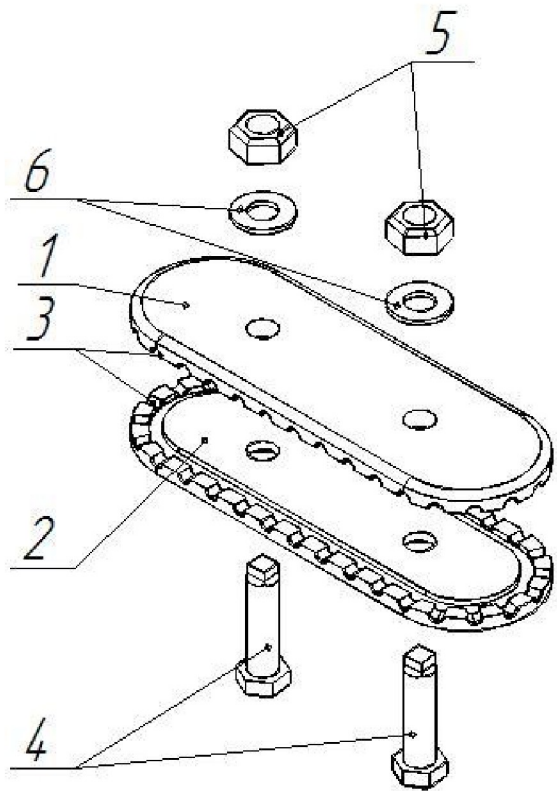


Рис. 22. Верхняя обойма виброизолятора

Верхняя обойма (рис. 22) 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.

Нижняя обойма виброизолятора (рис. 23) 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 б) 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.

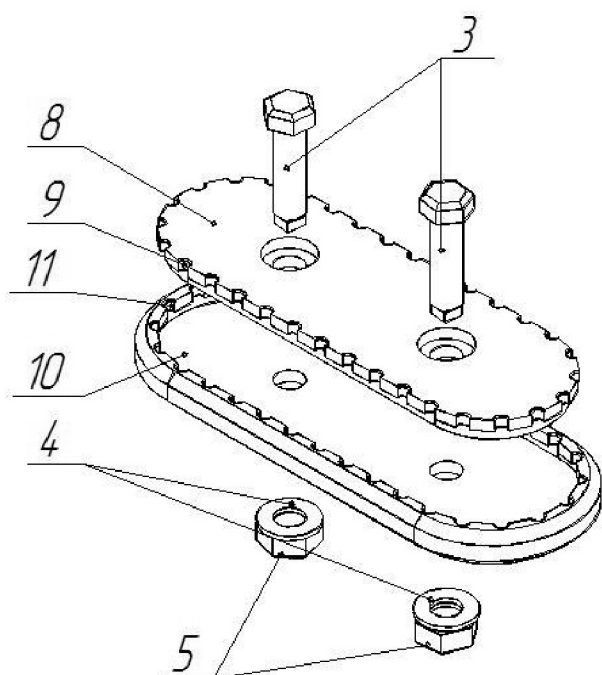


Рис. 23. Нижняя обойма виброизолятора

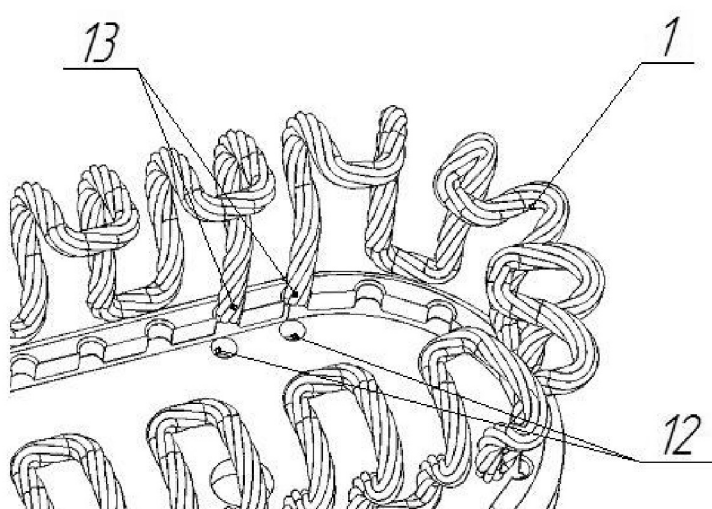


Рис. 24. Отверстия для вывода свободных концов троса

4. Расчёт упруго-демпфирующих свойств конструкции

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

Сначала требуется выбрать тип конечных элементов. В данной задаче используется элементы типа ВЕАМ 4 или ВЕАМ 189 (для расчёта при больших деформациях). Это трёхмерные балочные элементы, хорошо подходящие для описания работы упругого троса.

Далее, необходимо задать значения постоянных величин, а именно площадь поперечного сечения троса и моменты инерций сечения, которые вычисляется по формулам:

$$A = n\pi \frac{d_n^2}{4}, J = n\pi \frac{d_n^4}{64}$$

где n – число проволок в тросе; $d_{\text{п}}$ - диаметр проволоки, а также указать свойства материала. В нашем случае:

Модуль упругости равен $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона равен $\mu = 0,3$.

Затем модель может быть разбита на конечные элементы. При этом один конец данной упругой линии троса жёстко закреплён, а на другом задано перемещение последовательно вдоль каждой из осей x, y, z в положительном и отрицательном направлении. Далее требуется произвести расчет и получить зависимость усилий, действующих на упругий элемент, от перемещений его верхней точки 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 (или Beam 189): **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	A
IZZ	J
IYY	J

> **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			NPT n		
X₁	Y₁	Z₁	X₂	Y₂	Z₂	X_n	Y_n	Z_n

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

2.3. Разбиение упругой линии на конечные элементы: сначала зададим число конечных элементов на каждой линии **Main Menu > Preprocessor > Size Ctrl**

> [Manual Size >] Lines > All Lines > в поле **NDIV** вводим значение от 30 до 100 в зависимости от сложности линии (чем проще форма линии, тем меньше число) > **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 максимума q_{\max} (м), затем в течение одной единицы времени величина прогиба падает, и возникает прогиб в противоположном направлении величиной минимума q_{\min} (м), например, как показано на рис. 25.

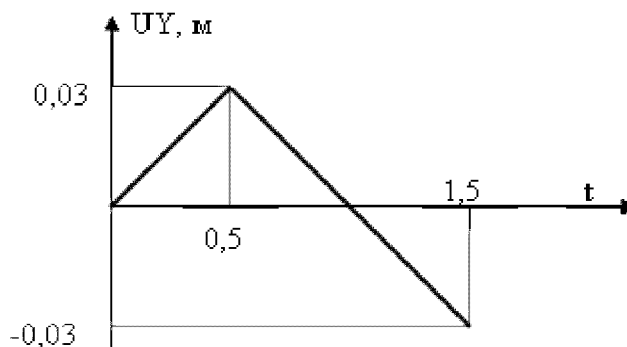


Рис. 25. Диаграмма нагружения

4.3. **Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Keypoints >** отмечаем мышью точку **n > OK >** выбираем для метки **Lab2** значение **UY, constant value**, в поле для **VALUE** вводим q_{\max} – 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 $q_{\max}/5 > OK$.

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 q_{\min} . **Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Keypoints >** отмечаем мышью точку **n > OK**

> выбираем для метки **Lab2** значение **UY, constant value**, в поле для **VALUE** вводим отрицательное значение q_{\min} > **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 **n > 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 **n > 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 **n**: **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 **n**: 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-axis** – **10**. **> OK**.

Результаты расчетов представлены на рисунках 26-34.

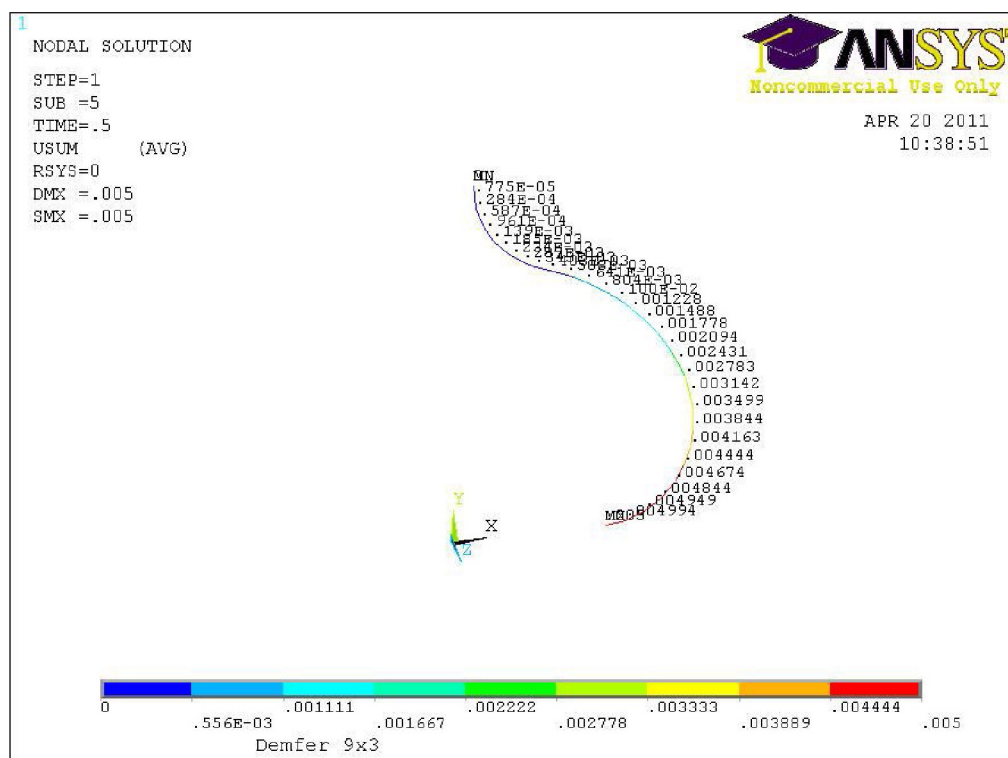


Рис. 26. Перемещение +0,005 м по оси X

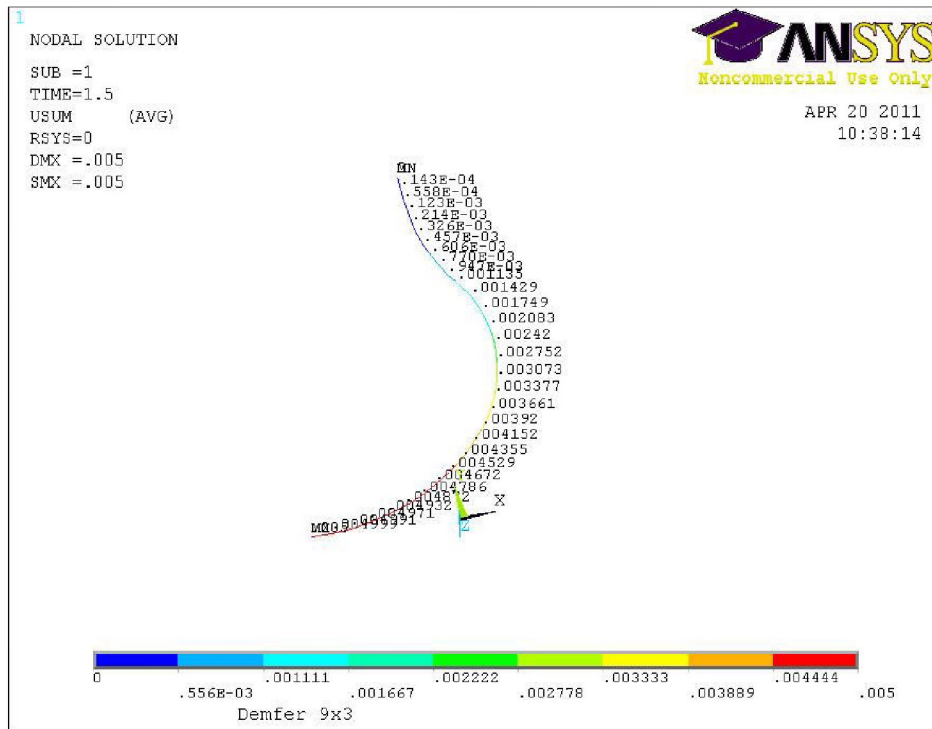


Рис. 27. Перемещение +0,005 м по оси X

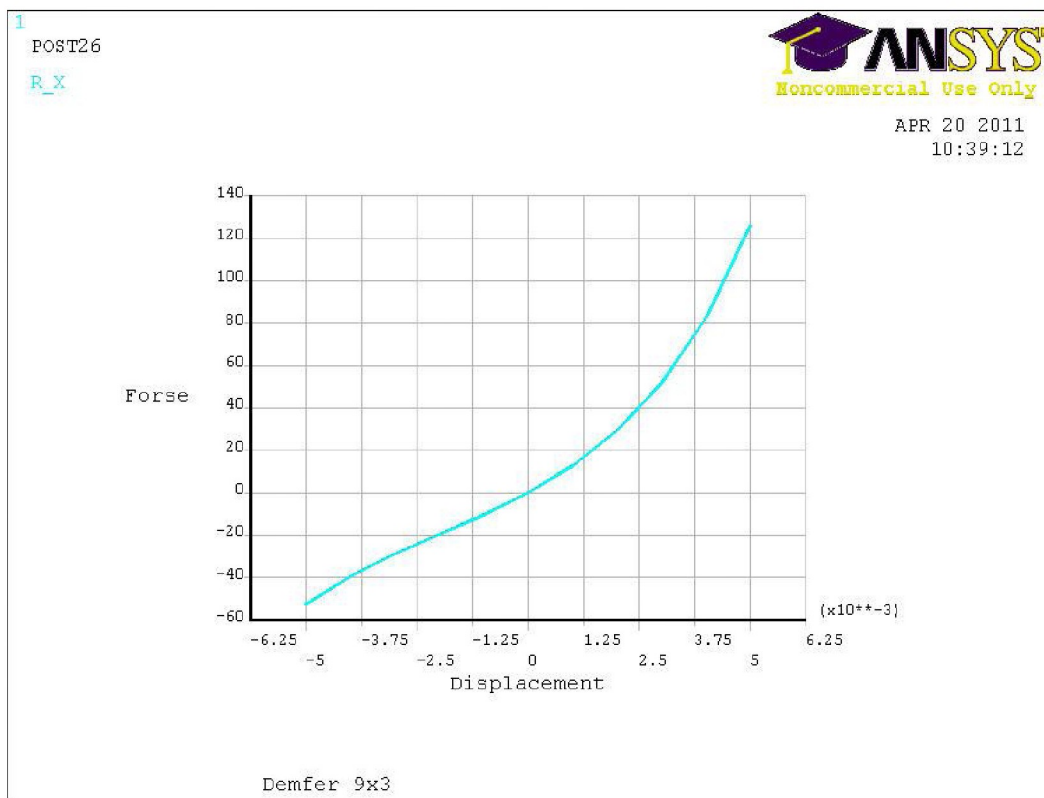


Рис. 28. Зависимость усилий от перемещения по оси X

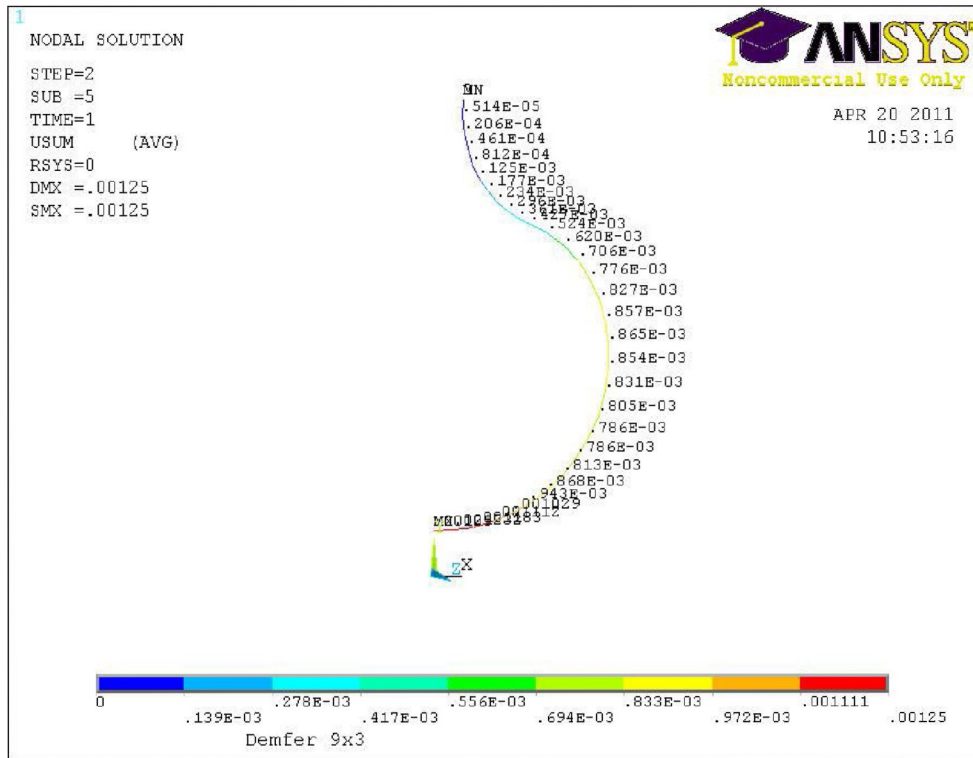


Рис. 29. Перемещение +0,005 м по оси Y

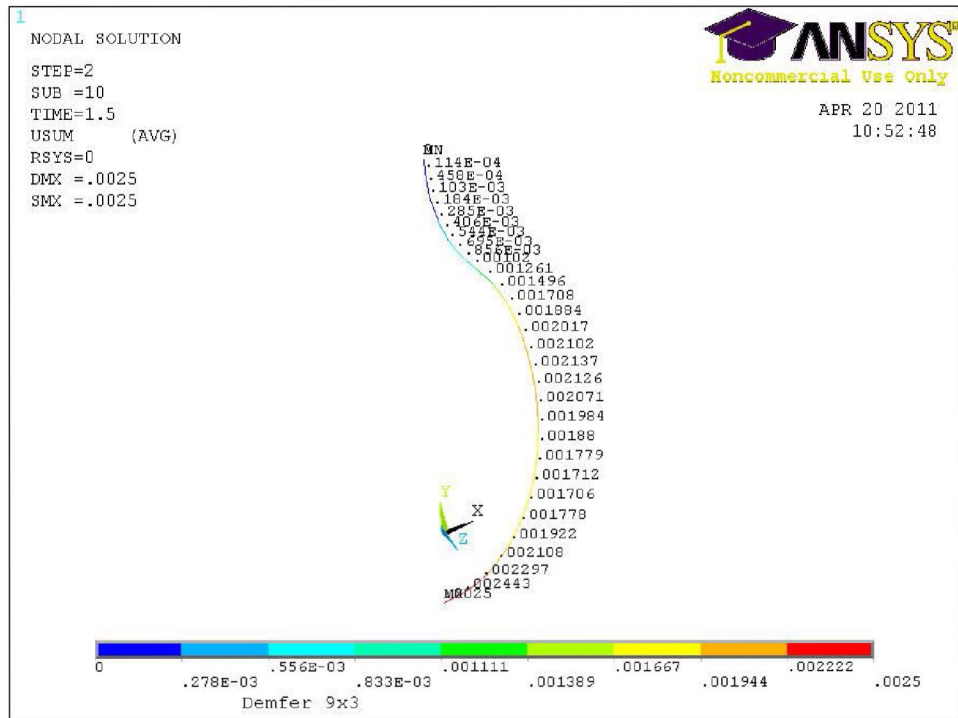


Рис. 30. Перемещение -0,0025 м по оси Y

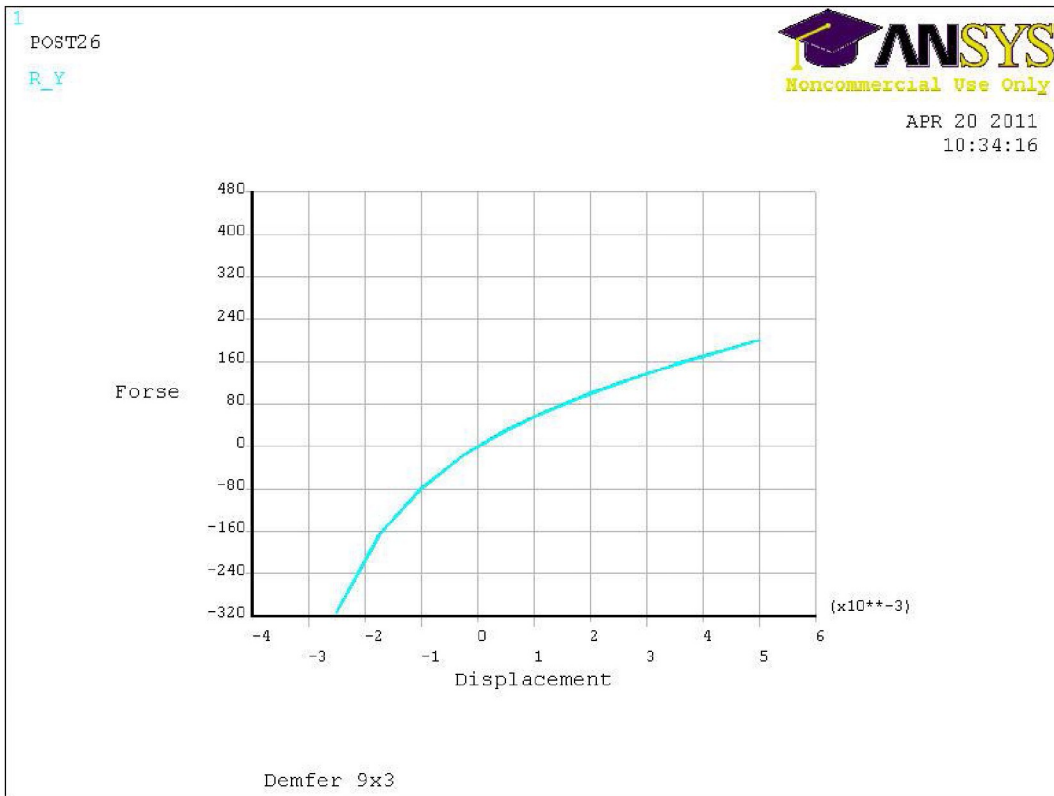


Рис. 31. Зависимость усилий от перемещения по оси Y

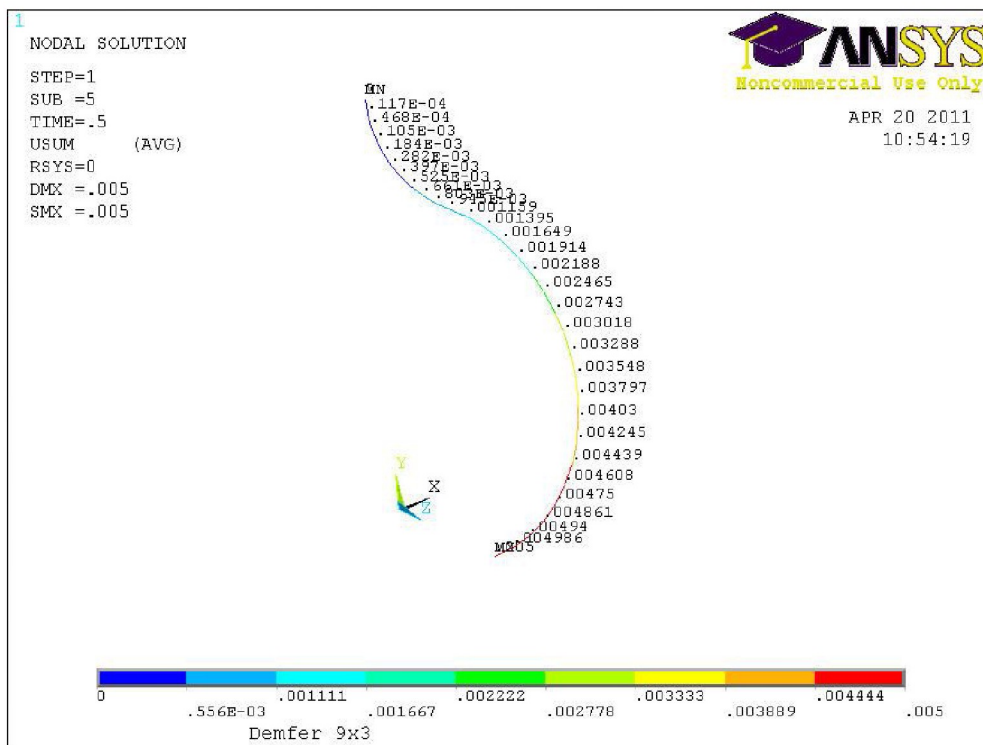


Рис. 32. Перемещение +0,005 м по оси Z

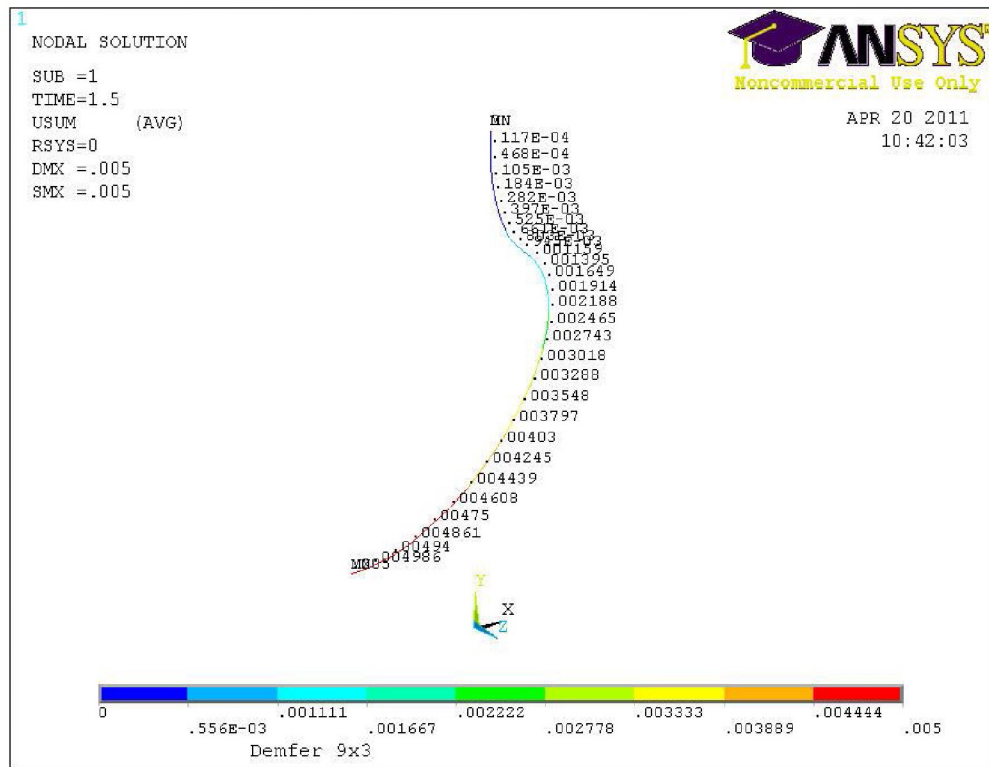


Рис. 33. Перемещение -0,005 м по оси Z

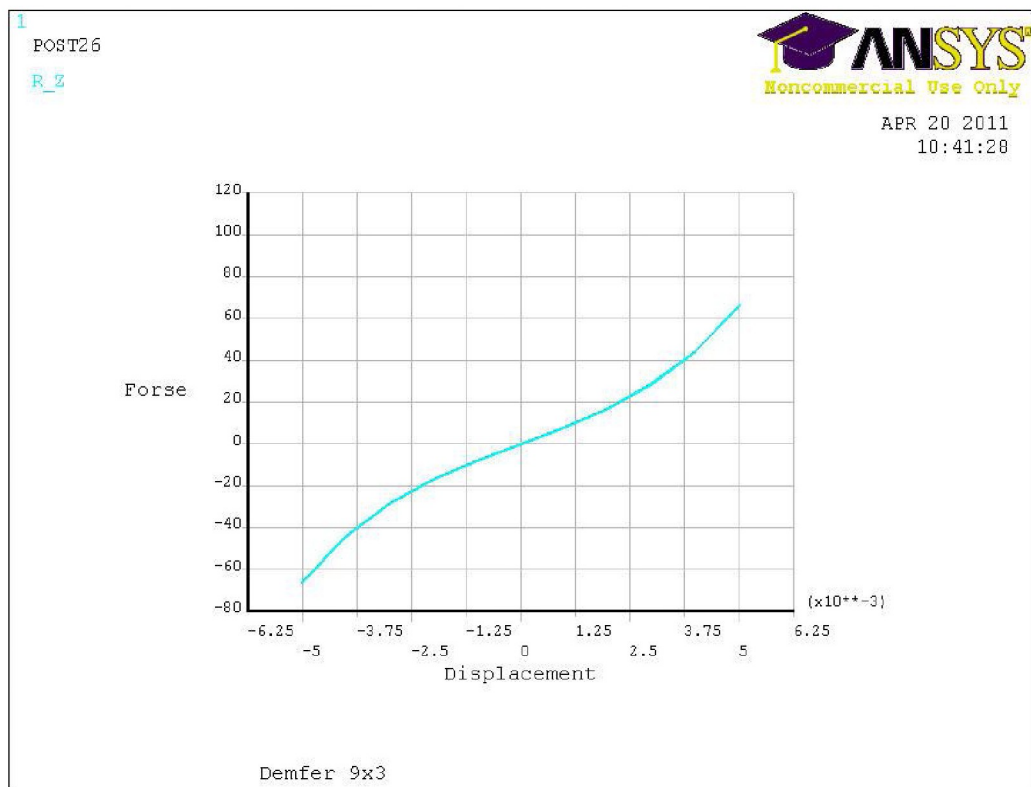


Рис. 34. Зависимость усилий от перемещения по оси Z

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	F _{y1} , Н	F _{y32} , 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	0	0
-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	F _x (1 эл.), Н	F _{x20} (20 эл. по X), Н	F1 (4 эл. №1), Н	F2 (4 эл. №2), Н	F3 (4 эл. №3), Н	F _{x32} , 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
0	0	0	0	0	0	0
-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
0	0	0	0	0	0	0
-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

5. 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 (рис. 36), 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 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.

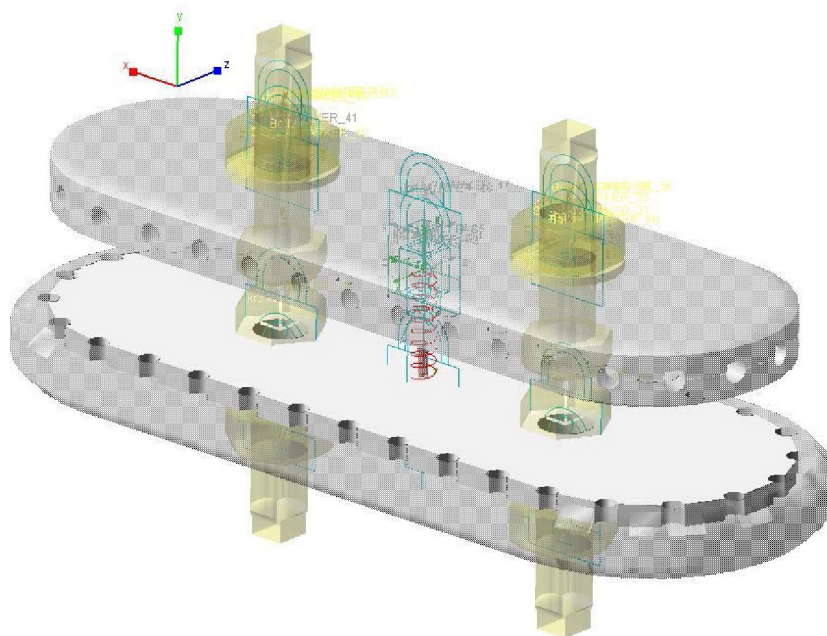


Рис. 35. Модель виброизолятора в MSC.ADAMS

Перенесем нагрузочную характеристику виброизолятора по оси Y в ADAMS. Получится следующий график (рис. 36), 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).

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

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

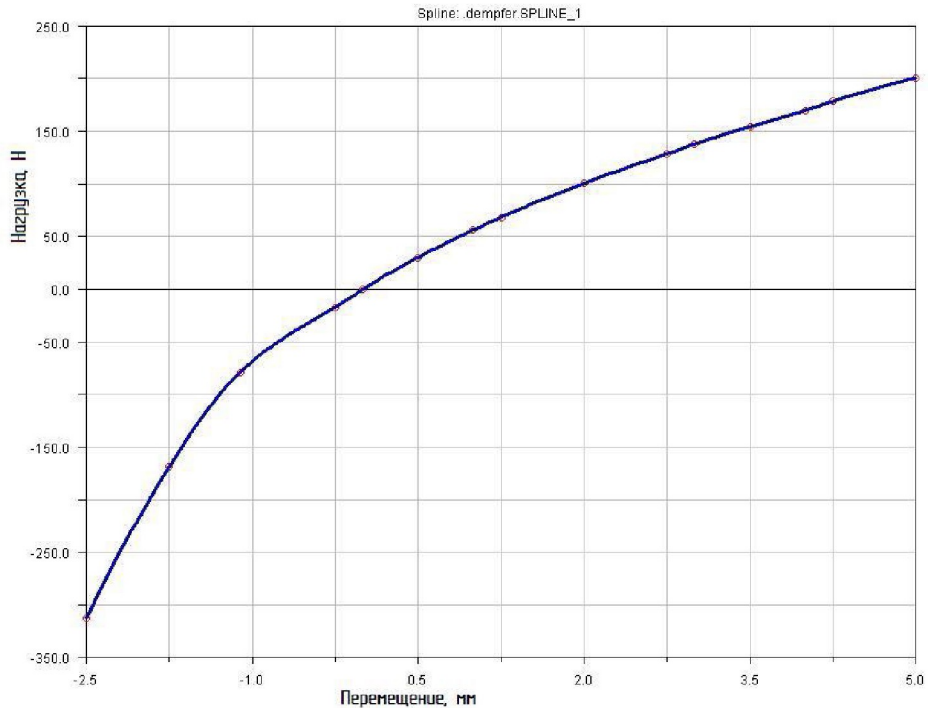


Рис. 36. Задание нагрузочной характеристики виброизолятора по оси Y в виде сплайна

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 резонанс наступил при $\text{time} = 10$ секунд.

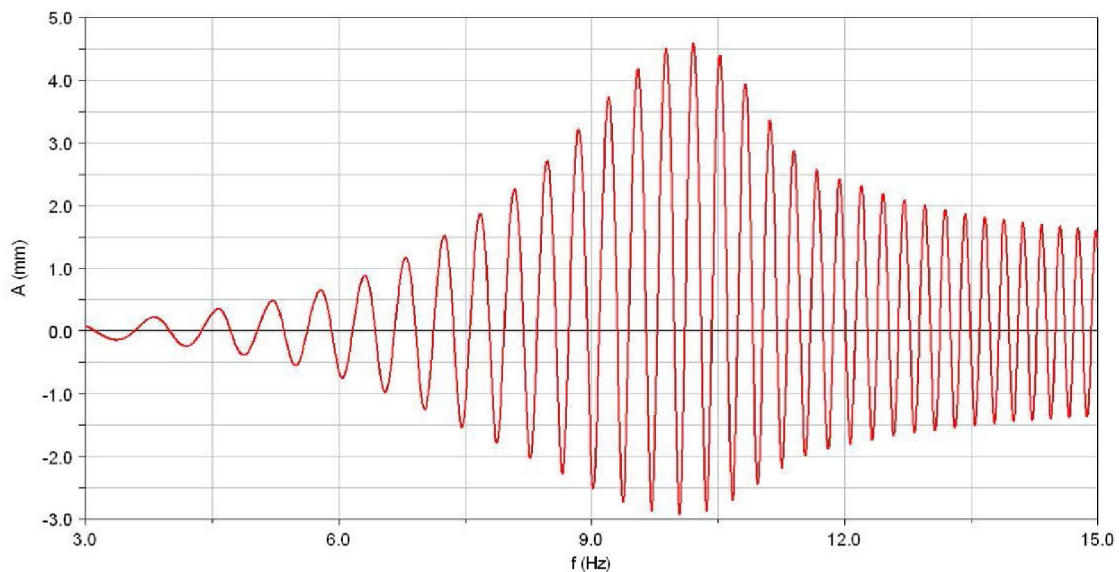


Рис. 37. График виброперемещений груза

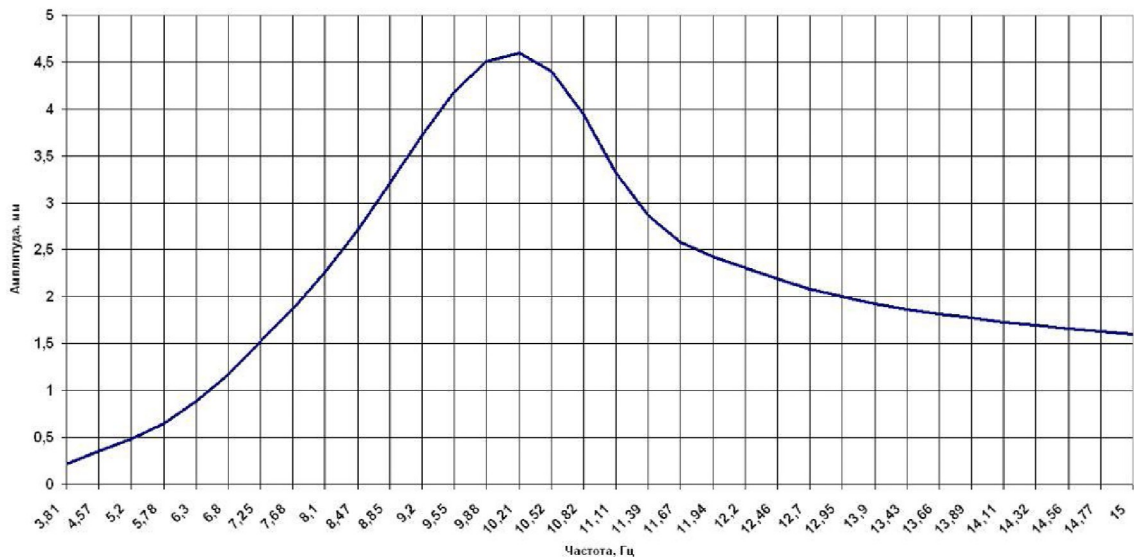


Рис. 38. Амплитудно-частотная характеристика системы груза на виброизоляторе

6. Экспериментальное определение жесткостных и демпфирующих свойств

С целью подтверждения правильности применяемого метода расчёта характеристик, проведём экспериментальное исследование тросового виброизолятора с радиусной формой упругой линии (рис. 39)

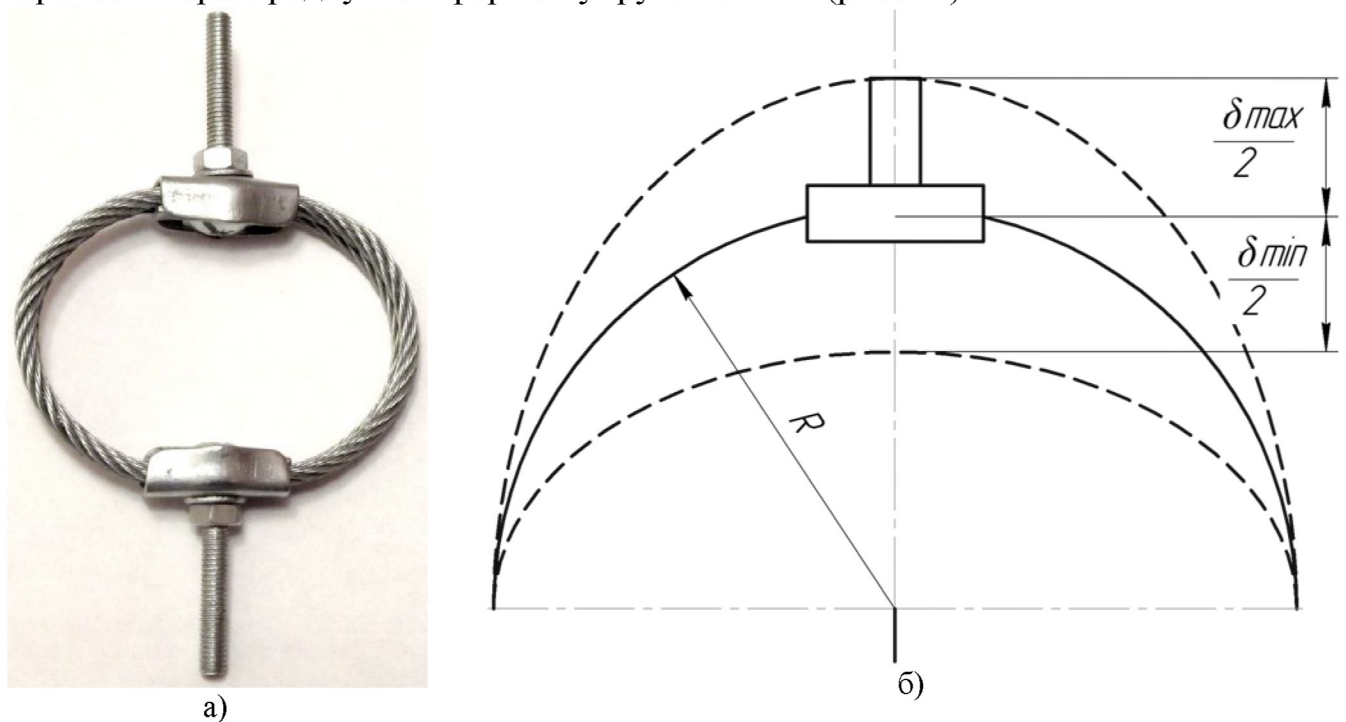


Рис. 39. Опытный образец виброизолятора

а) внешний вид; б) схема

Экспериментальная установка построена на основе весоизмерительного устройства ПВИ-01/03 (см. рис. 40), позволяющего проводить статические испытания экспериментальных образцов из металлов, резин, пластиков на растяжение и сжатие при нормальной температуре окружающей среды. Испытательный стенд (рис. 40) представляет собой вертикальную штангу 1 с

резьбовой рейкой, на которой расположена подвижная платформа 2, оснащенная рукоятью для возможности перемещения строго в вертикальном направлении.

На платформу 2 крепится тензорезистерный датчик силы 3 типа БП-05, предназначенный для измерения статических усилий в образце.

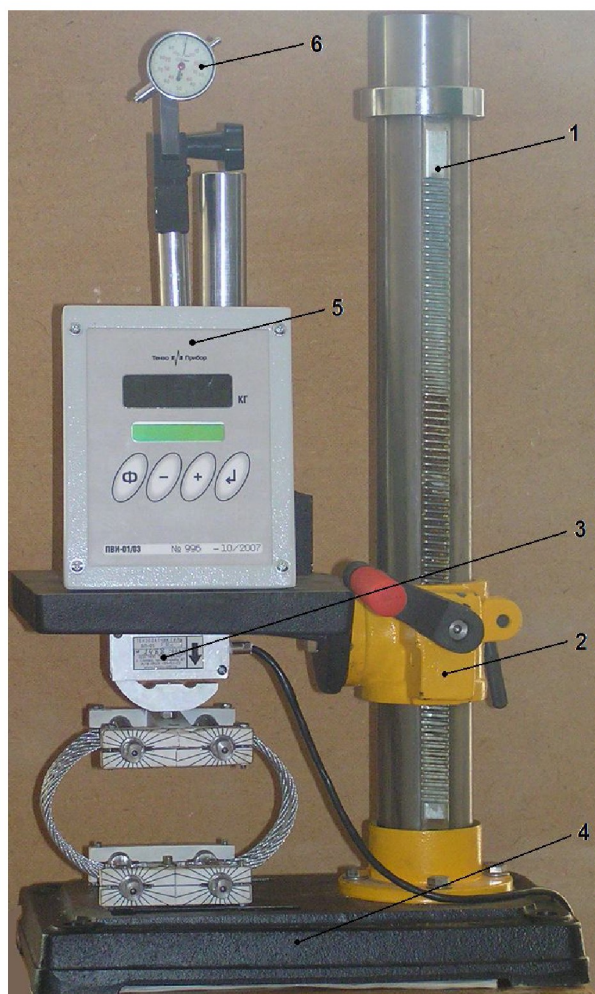


Рис. 40. Испытательный стенд на базе прибора ПВИ-01/03 с установленным экспериментальным образцом

В основании колонны 1 имеется массивная станина 4, на которую крепится экспериментальный образец. Датчик силы 3 подключен к индикационному блоку 5 прибора ПВИ-01/03, который способен отображать и фиксировать показания датчика силы 3 в реальном времени. Для определения величины деформации экспериментального образца используется датчик перемещения ИЧ 10 часового типа 6, который размещается на станине 4. Класс точности тензорезистерного датчика силы типа БП-05 по ГОСТ 30129-96 – С, класс точности датчика перемещения часового типа ИЧ 10 по ГОСТ 577-68 – 1.

Методика проведения эксперимента

Независимым параметром при проведении испытаний является изменение расстояния между точками закрепления троса в обоймах виброизолятора δ , шаг изменения $\Delta\delta = 2$ мм в области растяжения и 4 мм в области сжатия, предельные значения деформации $\delta_{max} = 20$ мм, $\delta_{min} = -12$ мм. Статические испытания включают в себя следующие основные этапы:

1. Установить экспериментальный образец на статический испытательный стенд, как показано на рисунке 40.

2. Нагрузить экспериментальный образец в вертикальном направлении до максимальной деформации $\delta = \delta_{max}$, после чего выставить значение внешней силы на «0» по показаниям динамометра, для достижения исходного ненагруженного состояния образца.

3. Произвести нагружение экспериментального образца на сжатие до значений деформации $\delta = \delta_{min}$ с шагом $\Delta\delta$, с фиксированием значений перемещения на каждом шаге нагружения с помощью штангенциркуля или датчика перемещений. Значения занести в таблицу 4.

$$P_{cp} = P_c - \frac{P_c - P_p}{2},$$

где P_c - сила на линии сжатия (верхняя на рис. 41), а P_p - сила на линии растяжения (нижняя на рис. 41) на одинаковых деформациях δ .

4. Нагрузить образец на растяжение до значений деформации $\delta = \delta_{max}$ с шагом $\Delta\delta$, также с фиксированием значений перемещения на каждом шаге нагружения. Значения занести в таблицу 4.

Таблица 4. Данные для построения нагрузочной характеристики

δ , мм	-12	-10	-8	-6	-4	-2	0	4	8	12	16	20
P_c , Н												
δ , мм	20	16	12	8	4	0	-2	-4	-6	-8	-10	-12
P_p , Н												
P_{cp} , Н						0						

5. После завершения этапов 3 и 4, вернуть экспериментальный образец в исходное ненагруженное состояние ($P = 0$).

6. На заключительном этапе демонтировать экспериментальный образец с испытательного стенда.

На основании чисел из таблицы 4 требуется построить гистерезисную петлю виброизолятора, подобную показанной на рис. 41.

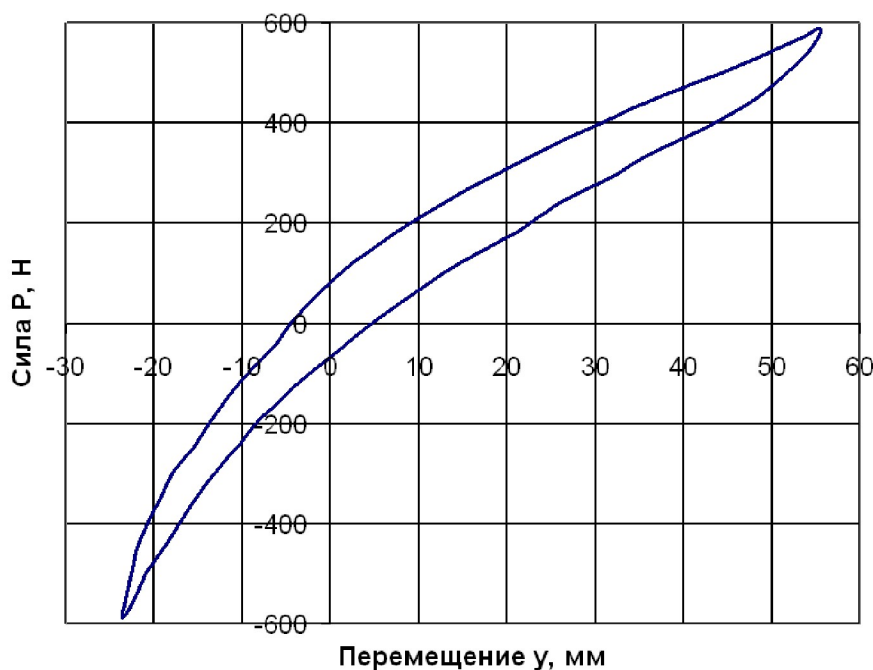


Рис. 41. График гистерезисной петли исследуемого образца

На основе данных, полученных в результате обработки гистерезисной петли и приведенных в таблице 4, требуется построить нагрузочную характеристику виброизолятора, подобную показанной на рис. 42.

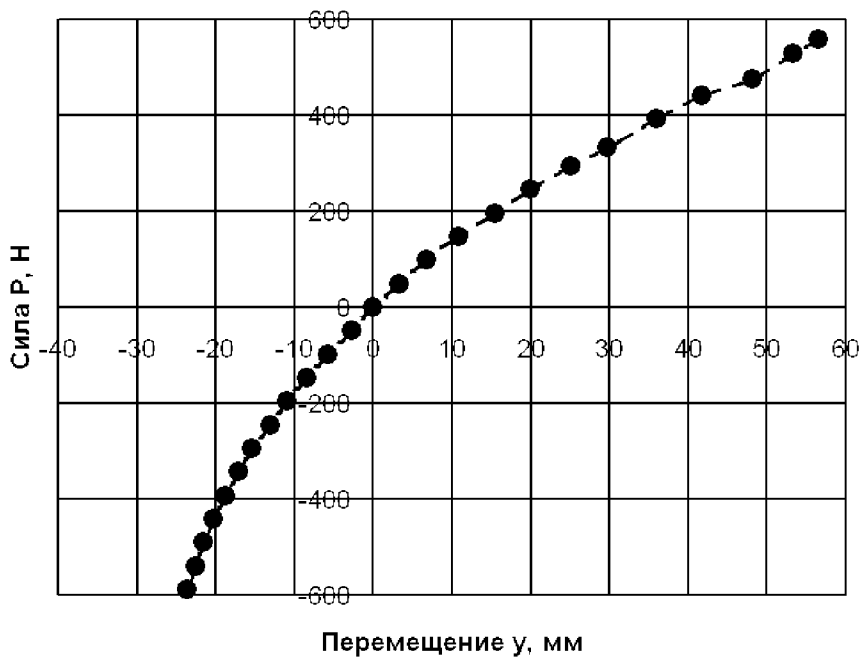


Рис. 42. График нагрузочной характеристики виброизолятора

Далее нагрузочная характеристика должна быть представлена в безразмерном виде (см. рис. 43) с использованием критериев безразмерных силы β и деформации ζ вдоль вертикальной оси y :

$$\beta = \frac{PR^2}{EJ},$$

где P – внешняя сила; R – условный радиус виброизолятора, равный половине расстояния между осями троса в оправках; J – момент инерции поперечного сечения троса; E – модуль упругости материала.

$$\zeta = \frac{\delta}{R},$$

где δ – вертикальная деформация виброизолятора.

$$J = \frac{n\pi d^4}{64},$$

где n - число проволок в тросе, d - средний диаметр проволоки троса.

Теоретическая нагрузочная характеристика однокольцевого тросового виброизолятора может быть записана в виде []

$$\beta_m = \frac{4\pi}{\pi^2 - 8} \zeta + \begin{cases} \Delta_c = \Delta_p = 0, & -0,03 \leq \zeta \leq 0,03, \\ \Delta_c = -0,2440\zeta^4 + 1,6188\zeta^3 - 3,4818\zeta^2 - 0,2712\zeta, & \zeta > 0,03, \\ \Delta_p = -57,9148\zeta^4 - 24,3358\zeta^3 - 10,3906\zeta^2 - 0,237\zeta, & -0,55 \leq \zeta < -0,03, \\ \Delta_p = 74790\zeta^5 + 278752\zeta^4 + 414754\zeta^3 + 307524\zeta^2 + \\ + 113561\zeta + 16700, & -1 \leq \zeta < -0,55, \end{cases}$$

где Δ – нелинейный компонент нагрузочной характеристики (для ветвей сжатия и растяжений).

Поскольку исследуемая в эксперименте конструкция тросового виброизолятора имеет УДЭ, состоящий из двух колец, то для корректного сравнения

опытных данных с графиками необходимо значение теоретической безразмерной силы β_m умножить на два.

Графики безразмерной нагрузочной характеристики, полученные в результате эксперимента и расчетным путем, приведены на рис. 43.

Таблица 5. Данные для построения нагрузочной характеристики в безразмерном виде

ζ	$20/R$	$16/R$	$12/R$	$8/R$	$4/R$	0	$-2/R$	$-4/R$	$-6/R$	$-8/R$	$-10/R$	$-12/R$
β_ε						0						
$2 \cdot \beta_m$						0						

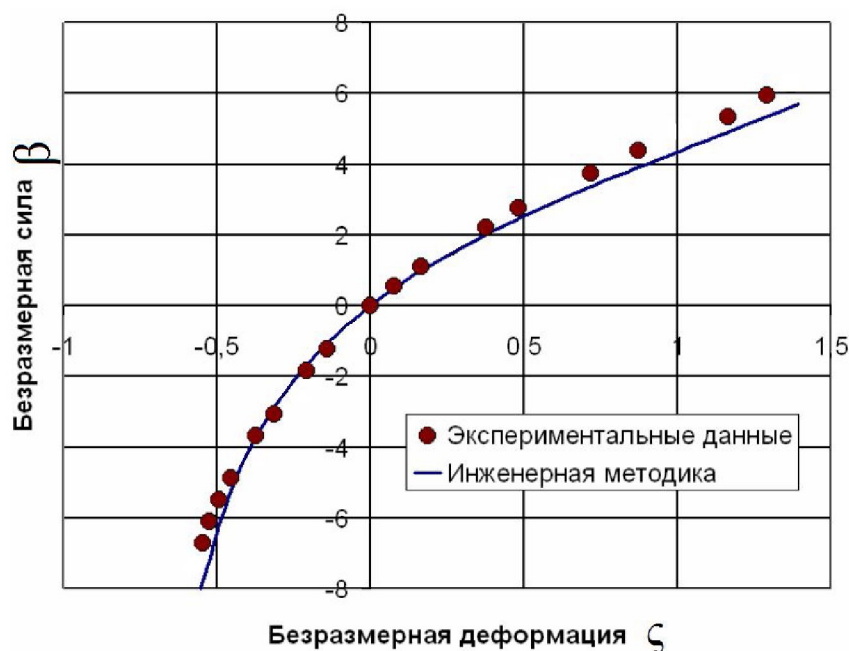


Рис. 43. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными

В завершение работы требуется сделать вывод о совпадении результатов теоретических расчётов и экспериментальных данных. Сравниваются между собой экспериментальная β_ε и теоретическая β_m безразмерные силы на одинаковых безразмерных деформациях ζ (см. таб. 5).

Полученные расхождения вызваны неучетом многих факторов, таких как разомкнутость кольцевого УДЭ в оправках виброизолятора, некоторая свобода троса в заделках (за счет радиусов), перераспределение проволок троса при больших нагрузках и растяжение-сжатие самих проволок.

7. Вопросы для выходного контроля

1. Что произойдет с АЧХ системы, если толщина петли вашего виброизолятора каким-то образом станет более полной?
2. Поясните, что такое жесткость и податливость виброизолятора на полученном вами графике?
3. Расскажите о параметрах, характеризующих гистерезис с помощью полученного вами графика.
4. Как жесткость системы влияет на резонансную частоту?
5. Во что превращается энергия, определяемая площадью петли гистерезиса?
6. В каких единицах измеряется рассеянная энергия в упруго-демпфирующих системах. Чему эта энергия равна на графике?
7. Перечислите виды неупругого сопротивления.
8. В чем отличие сухого трения от вязкого?
9. В чем состоит сходство и различие гистерезиса сухого трения и вязкого?
10. Зависит ли жесткость и количество рассеянной энергии от скорости циклического нагружения в демпфере сухого трения?
11. Зависит ли жесткость и количество рассеянной энергии от скорости циклического нагружения в демпфере вязкого трения?
12. Как по графику упругогистерезисной характеристики определить величину рассеянной энергии?
13. Как по графику упругогистерезисной характеристики определить величину жесткости системы? Какие в этом случае есть варианты определения?
14. Какой тип динамометра применен в экспериментальной установке и для чего он нужен?
15. Покажите на схеме экспериментальной установки индикатор перемещения. Для чего он нужен?
16. Какие бывают динамометры и на каких принципах они могут работать?
17. Какие виды виброизоляторов вы знаете?
18. Что такое материал МР и какие виды виброизоляторов из этого материала вы знаете?
19. Расскажите о конструкциях тросовых виброизоляторов.
20. Что такое эффективность виброизоляции?
21. Что такое резонанс механической системы.
22. Расскажите об амплитудно-частотной характеристике механической системы. Какие бывают типы указанных характеристик?
23. Как вы считаете: характеристика вашего экспериментального виброизолятора является линейной, жесткой или мягкой?
24. Что такое жесткая характеристика?
25. Что такое мягкая характеристика?

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 достигается 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.
6. Пономарев, Ю.К. Инженерная методика расчёта статических характеристик виброизоляторов с прямолинейными и кольцевыми рабочими участками в нелинейной постановке [Текст] / Ю.К. Пономарев, А.М. Уланов, А.С. Гвоздев [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Специальный выпуск «Актуальные проблемы машиностроения». – 2009. – С. 215-221.

Приложение. Параметры тросов

Продолжение табл. 51

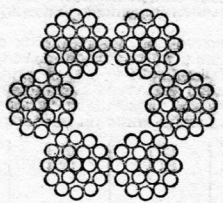
140

Диаметр, мм	проволоки		Расчетная площадь сечения всех проволок, мм ²	Расчетная масса 1000 м смазанного каната, кг	Маркировочная группа по временному сопротивлению разрыву, кгс/мм ²																								
	центральной	в слоях			140					160					180					200					220				
					Расчетное разрывное усилие, кгс, не менее																								
	6	108 (216)			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	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	202,92	1980,0	28 400	24 100	32 450	27 550	36 300	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	2535,0	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	1805	1525	—	—													
5,4	0,26	0,24	10,68	98,1	—	—	—	—	1 810	1 480	2 045	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	4 145	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	6 785	—	—	—	—													
13,5	0,65	0,60	63,05	613,5	—	—	10 050	8 240	11 300	8 960	12 600	9 785	—	—	—	—													
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	2880,0	41 400	33 900	47 300	38 750	53 250	42 200	59 150	45 800	—	—	—	—													

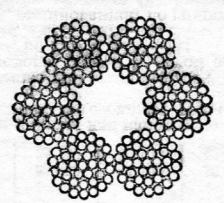
В головке таблицы число 216 в скобках означает количество проволок в слоях для канатов по ГОСТ 3071-74.
 Канаты, разрывное усилие которых указано справа от жирной линии, изготавливают только из светлой проволоки. ГОСТ 3071-74 предусматривает диаметры канатов 33,5—66,5.
 ГОСТ 3070-74 предусматривает группы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

МАТЕРИАЛЫ

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



ГОСТ 3070-74
Конструкция
6x19 (1 + 6 + 12) + 1 о. с.



ГОСТ 3071-74
Конструкция
6x37 (1 + 6 + 12 + 18) + 1 о. с.

Диаметр, мм	проволоки		Расчетная площадь сечения всех проволок, мм ²	Расчетная масса 1000 м смазанного каната, кг	Маркировочная группа по временному сопротивлению разрыву, кгс/мм ²																								
	центральной	в слоях			140					160					180					200					220				
					Расчетное разрывное усилие, кгс, не менее																								
	6	108 (216)			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	суммарное всех проволок в канате	каната в целом	суммарное всех проволок в канате	каната в целом											
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	2 220	1 860	—	—													
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	108,66	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	152,58	1495,0	21 350	18 100	24 400	20 700	27 450	22 700	30 500	24 750	—	—	—	—													

СТАЛИ

159