

УДК 62-752.2

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ С ПОДСТРАИВАЕМЫМИ УПРУГОДЕМПФИРУЮЩИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

© 2010 В.С. Мелентьев<sup>1</sup>, А.В. Малов<sup>1,2</sup>, Ю.К. Пономарев<sup>1</sup>, О.Б. Симаков<sup>1</sup>,  
И.К. Михалкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет  
<sup>2</sup> ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

Поступила в редакцию 02.12.2010

В статье приводятся результаты расчета нескольких виброизоляторов с управляемыми характеристиками, направления внедрения виброизоляторов и соответствующие выводы.

Ключевые слова: *демпфирование, виброизолятор, метод конечных элементов, триботехника, статическая характеристика*

На практике при разработке демпфирующих устройств не всегда удается достичь гашения вибраций в большом диапазоне частот, т.е. выбирается наиболее характерный участок и по нему определяют характеристики демпфера. Это не в полной мере решает проблему, поэтому для наиболее ценных объектов, например в автомобильной промышленности, применяют регулируемую подвеску автомобилей, которая, связанная с бортовым компьютером, изменяет свои характеристики в соответствии с дорожным покрытием. В данной статье приводятся математические модели расчета виброизоляторов с управляемыми характеристиками и прототипы виброизоляторов, которые можно будет применять в технике для виброзащиты объектов.

Разработанные модели разделены на три большие группы: с прямолинейным УДЭ (упругодемпфирующий элемент), с УДЭ в виде колец, со сложной структурой УДЭ. Рассмотрим виброизолятор с участком прямолинейным участком УДЭ, представленный на рис. 1.

Упругий элемент данного виброизолятора состоит из радиусного и двух прямолинейных участков, как показано на рис. 1г. Длина участка  $a$  может изменяться в процессе колебаний за счет втягивания троса в обойму. На

рис. 1в показан предельный случай, когда длина прямолинейного участка  $a$  равна нулю. Получена формула нагрузочной характеристики данного вида виброизолятора в безразмерном виде:

$$\beta = \frac{\zeta_y}{\frac{2\lambda^3}{3} + \pi\lambda^2 + 4\lambda + \frac{\pi}{2}}. \quad (1)$$

Построим график выражения (1) с целью определить влияние управляющего параметра  $a$  на жесткостные характеристики виброизолятора (см. рис. 2). При этом для безразмерной длины участка примем  $\lambda \in [0;5]$ , для безразмерной деформации  $\zeta_y = [-1;2]$ , причем положительным будем считать перемещение, ведущее к сближению обойм виброизолятора. График на рис. 2а построен при использовании гипотезы о неизменной упругой линии в процессе деформации – классической гипотезы теории упругости [4], применимой в области малых деформаций, однако исследуемый объект является виброизолятором, т.е. работает при больших перемещениях, соизмеримых с размером упругого элемента. Поэтому, используя метод конечных элементов (МКЭ), определяется влияние на результат геометрической нелинейности в процессе деформации. Согласно рекомендациям [3], для расчета МКЭ использованы элементы балочного типа BEAM189; точность построения сетки конечных элементов – один конечный элемент на градус дуги окружности.

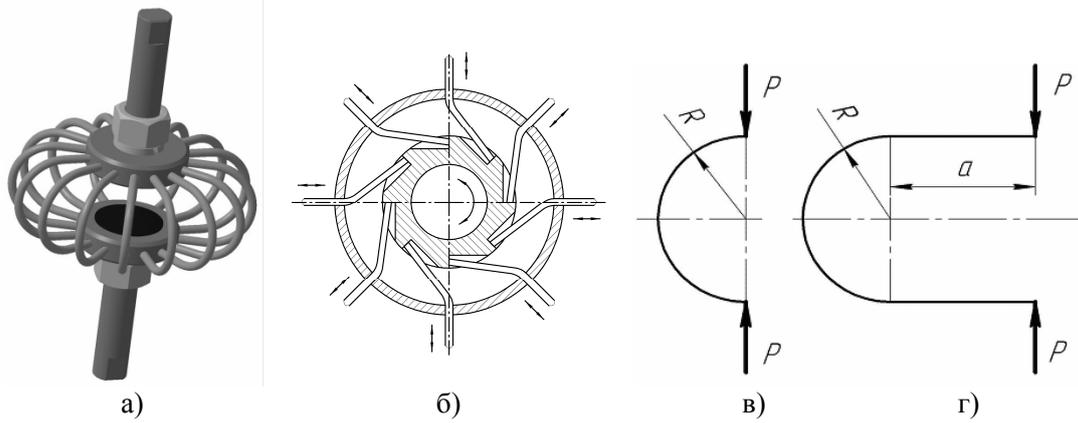
Мелентьев Владимир Сергеевич, аспирант. E-mail: vladamgenja@mail.ru

Малов Антон Викторович, начальник отдела. E-mail: ant12\_mail@mail.ru

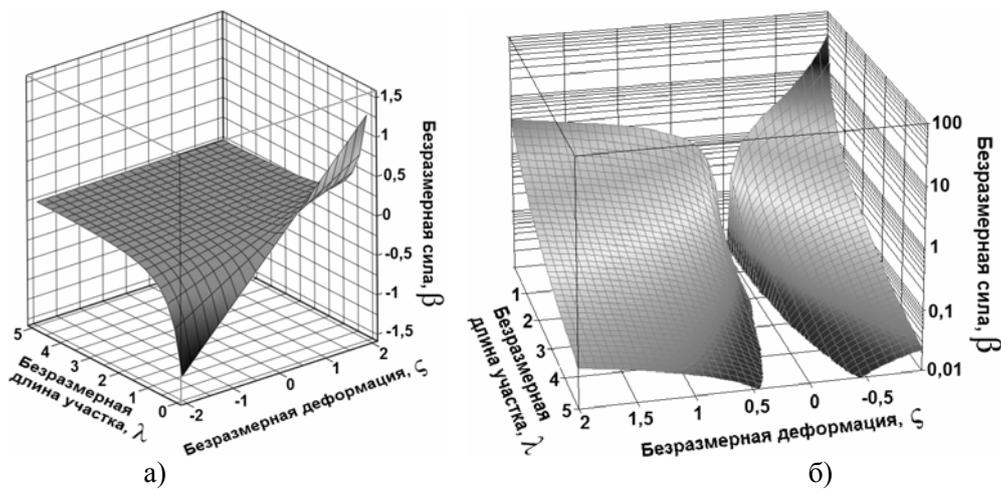
Пonomarev Юрий Константинович, доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование и проектирование двигателей летательных аппаратов». E-mail: ponomarev-ssau@yandex.ru

Симаков Олег Борисович, аспирант. E-mail: simakov@infotrans-logistic.ru

Михалкин Игорь Константинович, аспирант. E-mail: office@infotrans-logistic.ru



**Рис. 1.** Виброизолятор с управляемыми жесткостными характеристиками: а) внешний вид; б) вариант управления длиной УДЭ; в) схема упругого элемента без прямолинейного участка; г) схема упругого элемента с прямолинейным участком



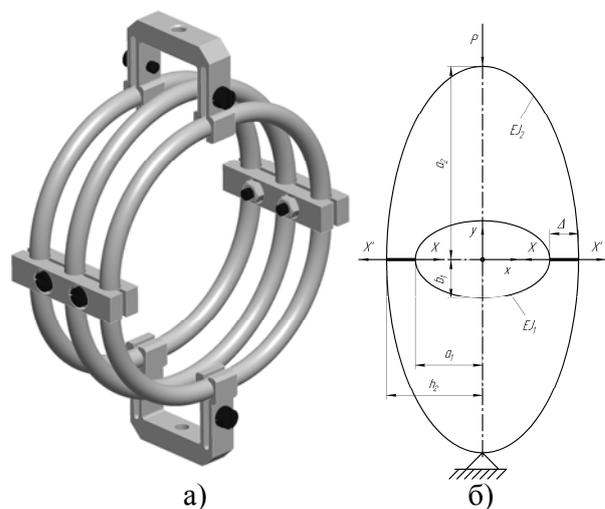
**Рис. 2.** Графики зависимости безразмерной силы  $\beta$  от безразмерной деформации  $\zeta$  и безразмерной длины участка  $\lambda$ : а) без учета геометрической нелинейности, б) с учетом геометрической нелинейности

Данный график можно аппроксимировать следующей функцией

$$\beta = \frac{k_1 + k_2 \zeta_y + k_3 \zeta_y^2 + k_4 \zeta_y^3 + k_5 \lambda + k_6 \lambda^2}{1 + k_7 \zeta_y + k_8 \lambda + k_9 \lambda^2 + k_{10} \lambda^4} \quad (2)$$

Таким образом, область значений управляющего параметра делится на два участка с разными свойствами виброизолятора, что позволяет создавать как виброизоляторы, работающие на каком-то из этих участков, так и виброизоляторы, работающие с переходом с одного участка на другой, в которых жесткость меняется в зависимости от направления деформации. Из анализа графиков (см. рис. 2) видно, что безразмерная длина участка  $\lambda$  позволяет регулировать жесткость виброизолятора в значительных пределах. Так, в диапазоне  $\lambda \in [0; 5]$  безразмерная жесткость изменяется в 117 раз, при этом градиент изменения падает с ростом  $\lambda$  (максимальный градиент  $\approx 1,5$ ). Это позволяет увеличить относительную частоту в

10,8 раз, добившись эффективности виброизоляции  $E$  [2] виброзащищаемого объекта на уровне 99,2%.



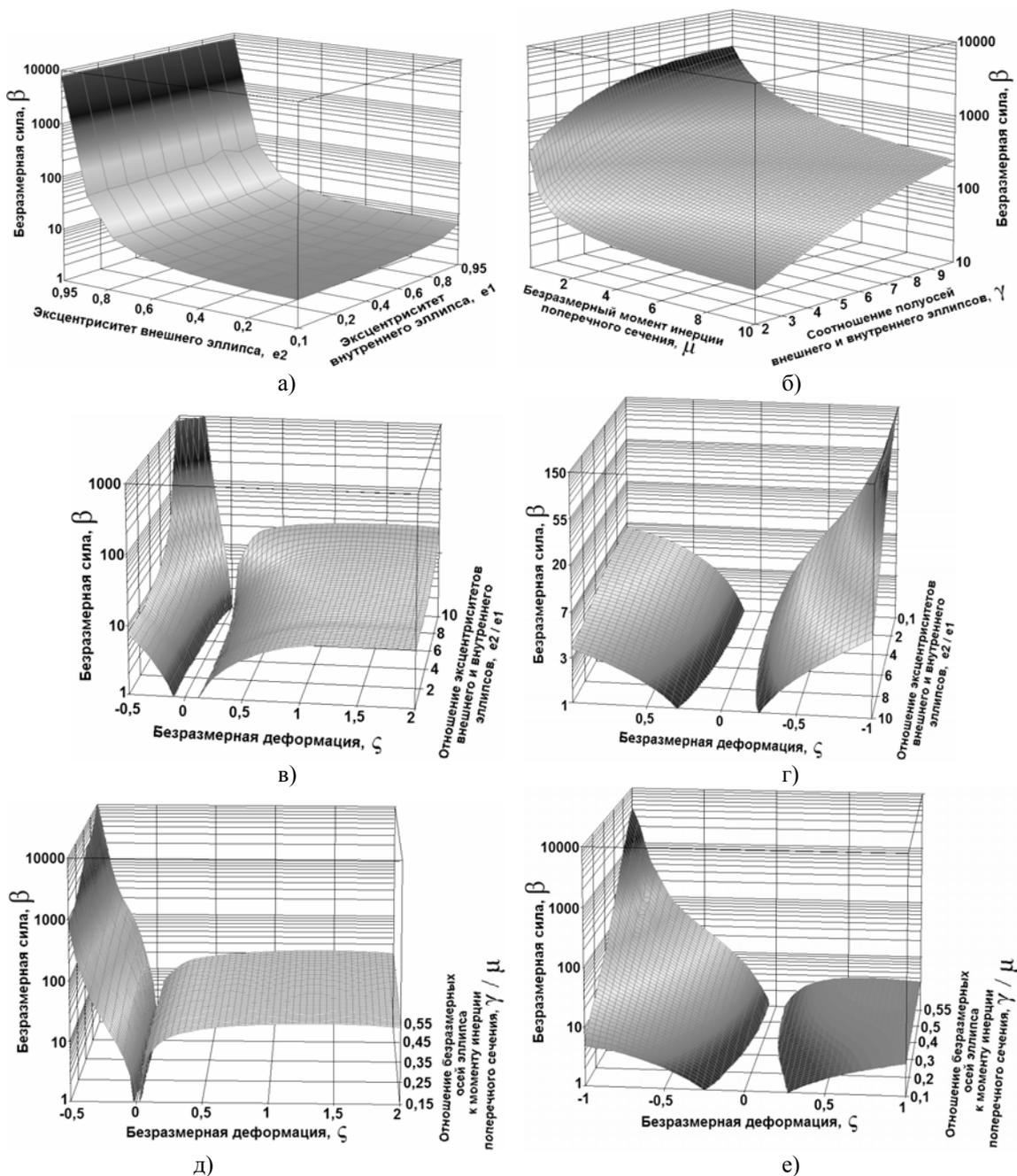
**Рис. 3.** Двухэллипсный виброизолятор: а) внешний вид, б) схема расчетная

Рассмотрим случай, когда виброизолятор, состоящий из двух колец стянут абсолютно жесткими стяжками длиной  $\Delta$ . В этом случае кольца деформируются и становятся эллипсами, как показано на рис. 3б, причем соотношение полуосей эллипсов зависит от величины  $\Delta$ . Необходимо определить нагрузочную характеристику этой системы в нелинейной постановке. Обозначим параметры упругих элементов:  $R1$  – радиус внутреннего кольца до стяжки;  $R2$  – радиус внешнего кольца до стяжки;  $a1$  – большая полуось внутреннего эллипса;  $b1$  – малая полуось внутреннего эллипса;  $a2$  – большая полуось внешнего эллипса;  $b2$  – малая полуось внешнего эллипса;  $J1$  – момент инерции поперечного сечения внутреннего эллипса;  $J2$  – момент инерции поперечного

сечения внешнего эллипса;  $E$  – модуль упругости материала. Используя математическое программное обеспечение, данные легко аппроксимируются функциональными выражениями в нужной пользователю области и с требуемой точностью. Для примера рассмотрим график на рис. 4, который может быть аппроксимирован одним выражением во всей исследованной области:

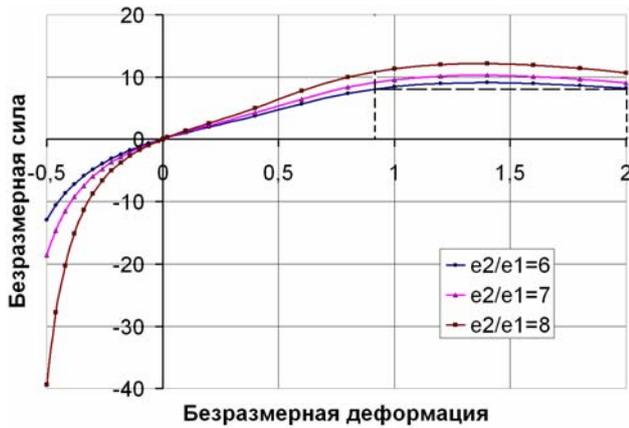
$$\beta = \frac{k_1 + k_2 \ln \mu + k_3 \ln \gamma + k_4 \ln^2 \mu + k_5 \ln^2 \gamma + k_6 \ln \mu \cdot \ln \gamma}{1 + k_7 \ln \mu + k_8 \ln \gamma + k_9 \ln^2 \mu + k_{10} \ln^2 \gamma + k_{11} \ln \mu \cdot \ln \gamma} \quad (3)$$

Величина достоверности аппроксимации данного выражения  $R2=99,994\%$ .



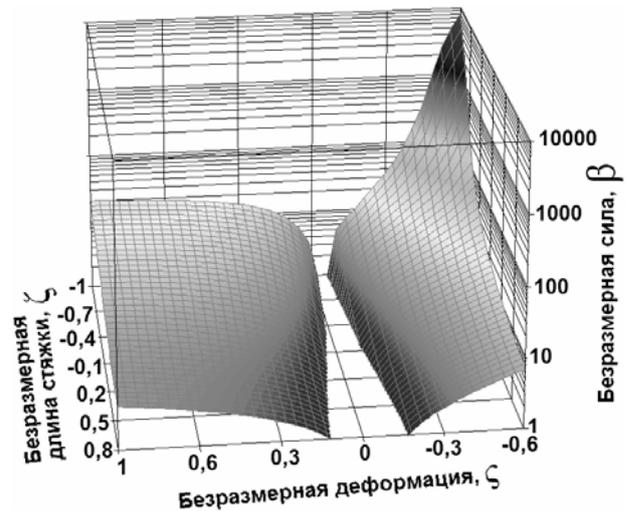
**Рис. 4.** График зависимости безразмерной силы  $\beta$  от безразмерных критериев:

а) от эксцентриситетов внешнего  $e_2$  и внутреннего  $e_1$  эллипсов для  $P||a$  при безразмерной деформации  $\zeta = -0,28$ ; б) от безразмерного момента инерции поперечного сечения  $\mu$  и соотношения полуосей внешнего и внутреннего эллипсов  $\gamma$  для  $P||a$  при безразмерной деформации  $\zeta = -0,28$ ; в) от соотношения эксцентриситетов внешнего и внутреннего эллипсов  $e_2/e_1$  и безразмерной деформации  $\zeta$  для  $P||a$ ; г) от соотношения эксцентриситетов внешнего и внутреннего эллипсов  $e_2/e_1$  и безразмерной деформации  $\zeta$  для  $P||b$ ; д) от соотношения безразмерных полуоси эллипса и момента инерции поперечного сечения  $\gamma/\mu$  и безразмерной деформации  $\zeta$  для  $P||a$ ; е) от соотношения безразмерных полуоси эллипса и момента инерции поперечного сечения  $\gamma/\mu$  и безразмерной деформации  $\zeta$  для  $P||b$



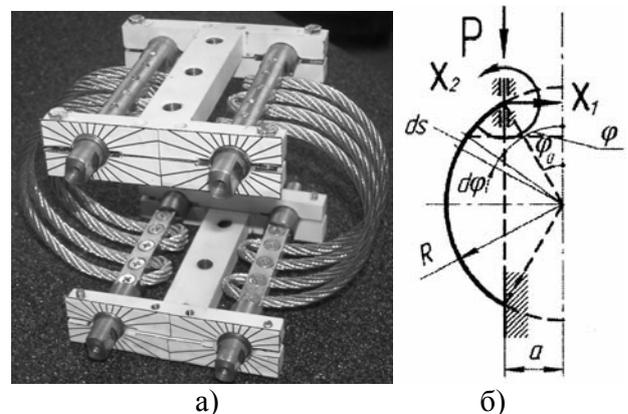
**Рис. 5.** График зависимости  $\beta = f(e_2/e_1, \zeta)$  с областью, где жесткость близка к квазиулевым

Из анализа графиков, приведенных на рис. 4, 5 можно сделать вывод о большом диапазоне изменения характеристик двухкольцевого виброизолятора. Так, изменяя только параметр эллипсности колец, можно добиться изменения жесткости почти в 1000 раз, а изменение соотношения  $\gamma/\mu$  в диапазоне от 0,15 до 0,55 позволяет изменять жесткость почти в 300 раз, и все это без существенного изменения габаритов виброизолятора, что позволяет добиться эффективности виброизоляции  $E$  [2], близкой к 100%. Данная особенность делает рассматриваемый виброизолятор весьма интересным объектом, для создания на его базе управляемых виброзащитных систем. Построим график зависимости (см. рис. 5) безразмерных нагрузочных характеристик системы от безразмерной длины стяжки  $\beta = f(\zeta, \xi)$ . Предполагается, что в начальный момент эллипсные при работе кольца, являются радиусными. Рассмотрим случай, когда начальные кольца имеют равные жесткости ( $\mu=8$ ). Из графика на рис. 6 видно, что изменением длины стяжки можно изменять жесткость виброизолятора в области сжатия в 5 раз, в области растяжения в 370 раз, что составляет примерно треть от теоретических возможностей виброизолятора, рассмотренных выше, но, тем не менее, является хорошим результатом на фоне других конструкций.



**Рис. 6.** График зависимости безразмерной силы  $\beta$  от безразмерной деформации  $\zeta$  и безразмерной длины стяжки  $\xi$  для  $\mu=8$

Рассмотрим виброизолятор, показанный на рис. 7. Виброизолятор представляет собой две разъемные обоймы, между обоймами которых осуществляется защемление возвратных петель тросового элемента, выполненного в виде непрерывного пространственного змеевика. Докажем, что изменением формы упругой линии и углом охвата упругого элемента кольцевого виброизолятора можно достаточно просто и в широких пределах регулировать его жесткостные характеристики.



**Рис. 7.** Виброизолятор с изменяемыми формами УДЭ: а) внешний вид, б) расчетная схема

На рис. 7б показана расчетная схема УДЭ исследуемого виброизолятора, представляющая собой сегмент окружности с закрепленными концами. Верхний конец, к которому приложена внешняя сила  $P$ , имеет возможность перемещения в вертикальном направлении. Для наглядности полученные значения коэффициентов демпфирования  $\gamma_{cp}$  сравниваются с предельными для материала МР и гофрированных пластинчатых виброизоляторов (см. рис. 8). Поскольку никаких специальных мер для увеличения демпфирования предпринято не было, средний коэффициент демпфирования  $\gamma_{cp}$  исследуемого виброизолятора уступает им, но, тем не менее, оказывается вполне достаточным для обеспечения коэффициента динамичности  $\eta$  на резонансе менее трех.

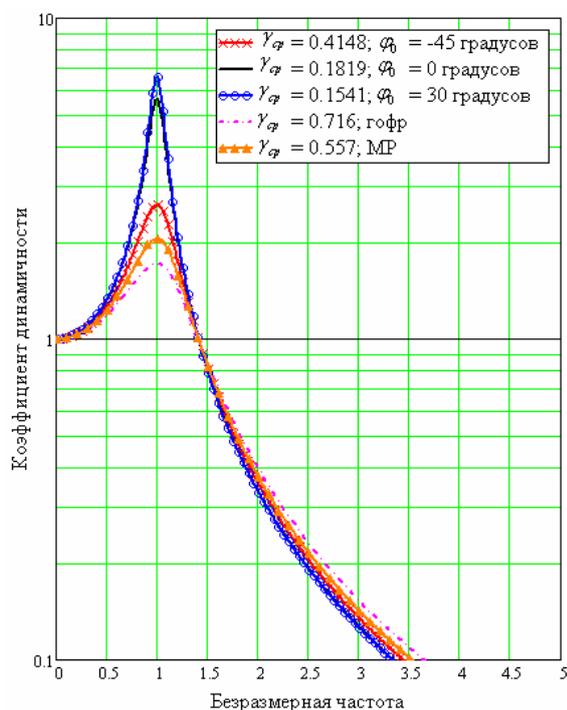


Рис. 8. График амплитудно-частотной характеристики

Установлено, что коэффициент демпфирования изменяется вследствие двух противоположных тенденций:

- а) площадь петли возрастает с уменьшением начального угла  $\varphi_0$ , а вслед за ней растет и коэффициент демпфирования  $\gamma_{cp}$ ;
- б) с уменьшением начального угла  $\varphi_0$  падает жесткость виброизолятора, что снижает значение коэффициента демпфирования  $\gamma_{cp}$ . Именно поэтому при больших положительных углах  $\varphi_0$  коэффициент демпфирования  $\gamma_{cp}$  несколько возрастает, создавая минимум при значении начального угла заземления  $\varphi_0=30^\circ$ .

Итак, исследуемый виброизолятор имеет приемлемые демпфирующие характеристики, относительно прост конструктивно, может изменять за счет управления в процессе колебаний величиной начального угла  $\varphi_0$ , свои жесткостные характеристики более чем в 20 раз, а демпфирующие почти в 3 раза, и таким образом демонстрирует преимущества управляемых виброизоляторов, основанных исключительно на конструкционном демпфировании.

Помимо управления жесткостью виброизоляторов с целью обеспечения нормальной работы оборудования в зарезонансном режиме, существуют методы управления демпфированием, влияющего, прежде всего, на амплитуду колебаний системы на резонансе. Условно можно разделить данные методы на такие, которые обеспечивают изменение демпфирования с сохранением неизменной жесткости и с совместным изменением жесткости и демпфирования. В свою очередь, по способу изменения характеристик можно выделить такие конструкции, в которых эффект достигается за счет свойств и способов закрепления самого упругого элемента и таких, где используются специальные преобразующие механизмы. Рассмотрим демпфер, показанный на рис. 9. Данный демпфер рассматривался как один из вариантов элементов системы виброзащиты беговой дорожки для «Международной космической станции (МКС)» и в перспективе для программы «Марс-2020».

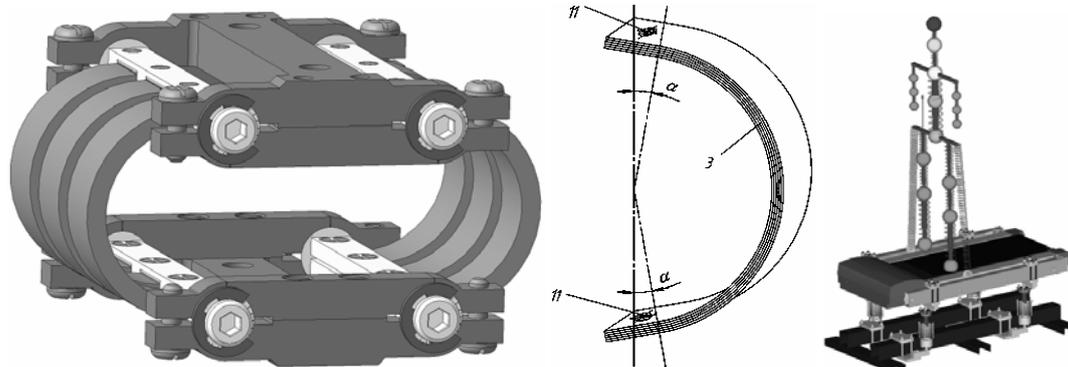


Рис. 9. Управляемый ленточный виброизолятор и вариант его применения: а) внешний вид виброизолятора; б) УДЭ демпфера, где  $\alpha$  – управляющий угол; 3 – пакет лент; 11 – крепежные отверстия; в) модель человека в условиях невесомости на беговой дорожке с исследуемыми демпферами

Построим нагрузочную характеристику демпфера в безразмерном виде, используя данные из работы [1]

$$\beta = \left( \frac{4\pi}{\pi^2 - 8} \right) \cdot \zeta_y + \sum_{j=0}^5 a_{jm} \cdot \zeta_y^j, \quad (4)$$

где  $\zeta_y = \frac{\delta_y}{R_m}$ . (5)



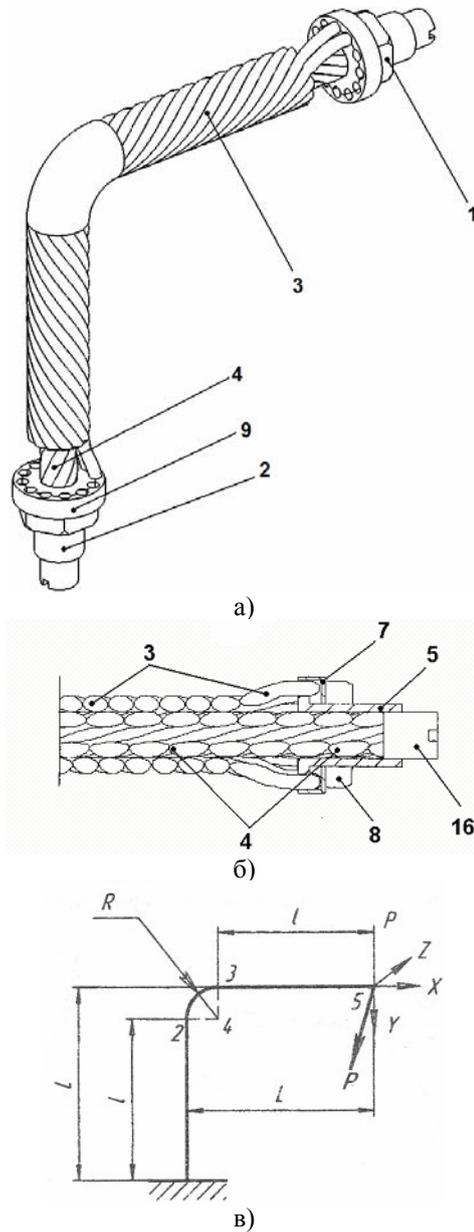
**Рис. 10.** График нагрузочной характеристики демпфера в безразмерном виде

Хотя количество лент и выше, чем у балочного виброизолятора с параболическим законом распределения коэффициента трения между слоями, в данном виброизоляторе поджатие слоев осуществляется за счет свойств самого упругого элемента, что делает рассматриваемый демпфер простым, надежным и компактным и позволяет получить огромный диапазон рассеяния энергии: от работы в режиме практически без трения – «чистая упругость», до режима, когда упругость демпфера пренебрежимо мала в сравнении с силой трения – «чистый демпфер», и все это без изменения его жесткостных и габаритных характеристик.

Рассмотрим конструкцию и работу виброизолятора, в котором управляющий параметр осуществляет одновременно изменение как жесткостных, так и демпфирующих свойств. Внешний вид такого виброизолятора приведен на рис. 11а. Предлагаемая конструкция виброизолятора подразумевает возможность регулирования жесткостных и демпфирующих характеристик путем торцевого поджатия внутреннего троса 4 с помощью резьбовых регулировочных пробок 16 их вращением по/против часовой стрелки на требуемый угол.

Точной зависимости толщины гистерезисной петли T0 от угла поворота пробки  $\alpha$  пока не получено и включено в одно из направлений дальнейших научных исследований, однако, по аналогии с двумя представленными выше демпферами, можно ожидать достаточно высоких величин сил трения и предельного коэффициента рассеяния энергии  $\psi$

не ниже четырех. При этом радиус R и толщина гистерезисной петли T0 при регулировании изменяются в одном направлении. Данный виброизолятор прост конструктивно и технологически, дешев, имеет простую и проверенную модель расчета жесткостных свойств, при этом обеспечивает возможность совместного управления жесткостью и демпфированием.



**Рис. 11.** Управляемый двуслойный тросовый Г-образный виброизолятор:

а) внешний вид; б) разрез УДЭ с обоймой; в) расчетная схема, где L – полная высота упругого элемента; l – длина прямолинейного участка; R – радиус скругления; P – внешняя сила

С целью подтверждения состоятельности теоретического исследования возможности управления демпфирующими характеристиками цельнометаллических виброизоляторов, был спроектирован и запатентован ленточный

виброизолятор (см. рис. 12а), состоящий из двух разъемных обойм в виде тел вращения упруго соединенных между собой равномерно распределенными по окружности пакетами лент радиусного очертания. Пакеты лент включают в себя три различных набора лент. Один из наборов выполнен в виде волнистых по окружности шайб с выступами разной длины, второй набор лент выполнен в виде изогнутого по радиусу пакета лент, имеющих с двух концов фигурные выступы типа «ласточкин хвост» и жестко заземленных в обоймах виброизолятора, а третий из пакетов выполнен, как и предыдущий, с радиусным очертанием осевой линии, и установлен внутри второго. При этом на его концевых участках выполнены рамные упругие элементы в виде

совпадающих по контуру с фигурными выступами второго набора очертаниями. Упругие выступы имеют возможность деформироваться с помощью набора из двух конических шайб, сопрягаемых по конусным поверхностям. Внешняя конусная втулка имеет разрез по вертикальной образующей, а ее цилиндрическая поверхность контактирует с выступами третьего набора, что дает возможность перемещения в радиальном направлении за счет того, что они закладываются в пазы обойм с зазорами (см. рис. 12б). Представленный ленточный виброизолятор, обеспечивающий регулируемое прижатие слоев пакета друг к другу и стабильность демпфирующих свойств виброизолятора при его длительной работе.

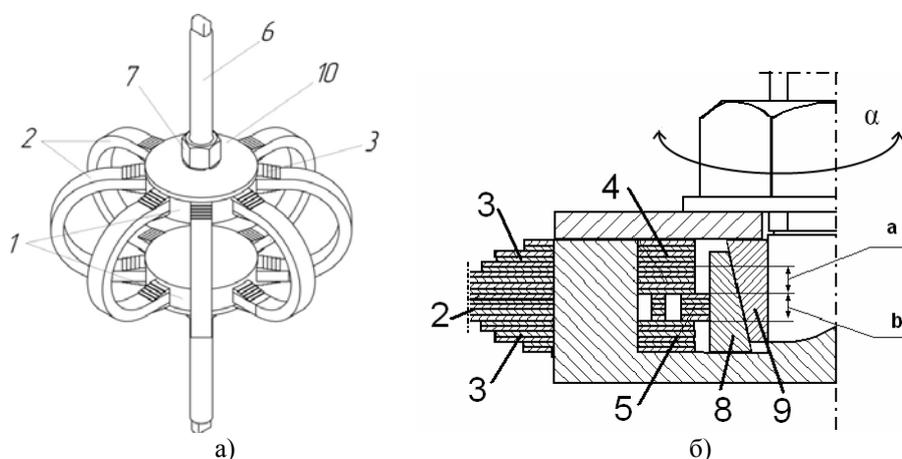


Рис. 12. Виброизолятор с возможностью управления характеристиками:  
а) виброизолятор в сборе; б) УДЭ виброизолятора в виде пакетов-рессор с разрезом

#### Выводы:

1. Разработан ряд конструкций управляемых виброизоляторов на базе конструкционного демпфирования, с характеристиками, обеспечивающие эффективность виброизоляции на уровне от 82 до 99% и выше.

2. Доказано, что организация параболического закона распределения трения в многослойной балке позволяет получить значения коэффициента рассеяния энергии  $\psi$ , близкие к теоретически возможным.

3. В результате исследования математической модели многослойного ленточного упругодемпфирующего элемента с управлением свойствами за счет угла его установки в зажимных обоймах установлено, что данная конструкция позволяет получить огромный диапазон рассеяния энергии: от работы в режиме практически без трения – «чистая упругость», до режима, когда упругость демпфера пренебрежимо мала в сравнении с силой трения – «чистый демпфер», без изменения его жесткостных и габаритных характеристик.

4. Установлено, что в системе, состоящей из двух упругодемпфирующих элементов эллипсоидной формы, связанных стяжками переменной длины, на нагрузочных характеристиках можно получить области с жесткостью, близкой к квазиулевой, что открывает новые перспективы по разработке высокоэффективных средств виброзащиты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Прудников, А.П. Интегралы и ряды. Элементарные функции / А.П. Прудников, Ю.А. Брычков, А.И. Маричев. – М.: Наука, Главное издательство физико-математической литературы, 1981. 801 с.
2. Пановко, Я.Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем. – М.: Физматгиз, 1960. 196 с.
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. Тимошенко, А. Сопротивление материалов. Элементарная теория и задачи. Пер. с англ. Н.А. Шошина. – М.: Изд-во Гостехиздат, 1945-1946. Т. 1. С. 317-321.

## DEVELOPMENT AND RESEARCH OF VIBROISOLATORS WITH SET UP ELASTIC DAMPING CHARACTERISTICS

© 2010 V.S. Melentyev<sup>1</sup>, A.V. Malov<sup>2</sup>, Yu. K. Ponomarev<sup>1</sup>, O.B. Simakov<sup>1</sup>,  
I.K. Mihalkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Samara State Aerospace University

<sup>2</sup> “TSSKB-PROGRESS”, Samara

In paper results of calculation the several vibroisplators with operated characteristics, directions of vibroisolators introduction and corresponding outputs are resulted.

Key words: *damping, vibroisolator, finite element method, tribotechnics, static characteristic*

---

Vkadimir Melentyev, Post-graduate Student. E-mail: vladamgenja@mail.ru  
Anton Malov, Chief of the Department. E-mail: ant12\_mail@mail.ru  
Yuriy Ponomarev, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department  
“Constructing and Designing the Drives of Flying Devices”. E-mail:  
ponomarev-ssau@yandex.ru  
Oleg Simakov, Post-graduate Student. E-mail: simakov@infotrans-logistic.ru  
Igor Mihalkin, Post-graduate Student. E-mail: office@infotrans-logistic.ru