

МЕЛЕНТЬЕВ Владимир Сергеевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИК РАСЧЕТА
И КОНСТРУКЦИЙ ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ
С РЕГУЛИРУЕМЫМИ
УПРУГОДЕМПФИРУЮЩИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ
НА БАЗЕ КОНСТРУКЦИОННОГО ДЕМПФИРОВАНИЯ**

Специальность 01.02.06 – Динамика,
прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)» на кафедре конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Пономарёв Юрий Константинович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Павлов Валентин Фёдорович
доктор технических наук, профессор
Громаковский Дмитрий Григорьевич

Ведущая организация: ФГУП Государственный научно-
производственный ракетно-космический
центр «ЦСКБ-Прогресс»

Защита состоится 27 декабря 2010 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д.212.215.02, созданного при ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)» по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)»

Автореферат разослан: 26 ноября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., доцент

А.Н. Головин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В технике существуют области, где эксплуатация средств виброзащиты невозможна без периодической подстройки их параметров. Это – виброзащитные кресла машинистов железнодорожного транспорта, операторов горных машин и механизмов, виброзащитные площадки операторов химических производств, домостроительных комбинатов, транспорт по перевозке хрупких грузов, сейсмозащищенные объекты, многорежимное оборудование для аэрокосмической техники и т.д. Нерегулируемые системы виброзащиты приводят к некомфортности рабочих мест и виброболезням персонала, повреждениям грузов. Наибольшее распространение в настоящее время получили регулируемые виброзащитные системы на базе гидропневматических упругодемпфирующих элементов, однако они имеют существенные недостатки – необходимость введения надежных уплотнительных устройств и существенная зависимость параметров от температуры. От этих недостатков свободны системы на базе конструкционного демпфирования (СКД). Таким образом, создание перспективных конструктивных схем виброизоляторов на базе конструкционного демпфирования с возможностью подстройки жесткостных и демпфирующих характеристик под заданные параметры механических систем является актуальной задачей.

Цель работы. Расширение функциональных возможностей и эффективности виброзащитных систем за счет создания методик расчета и конструкций виброизоляторов с регулируемыми упругодемпфирующими характеристиками на основе принципов конструкционного демпфирования.

Задачами исследования являются:

- создание и исследование математических моделей с целью определения рациональных параметров конструкций по соотношению конструктивно-технологических и прочностных параметров, жесткостным и демпфирующим характеристикам;
- разработка методик расчета нагрузочных, жесткостных и демпфирующих характеристик виброизоляторов с регулируемыми свойствами;
- разработка надежных и удобных в эксплуатации конструкций регулируемых виброизоляторов с характеристиками, лучшими, чем у существующих аналогов;
- создание комплекса программ расчета упругодемпфирующих, прочностных и динамических характеристик виброизоляторов и механических систем на базе конструкционного демпфирования;
- выявление новых качеств различных типов регулируемых виброизоляторов (многослойных балочных, кольцевых, Г-образных), позволяющих создавать на их основе виброзащитные системы со свойствами, близкими к предельно возможным.

Методы исследования. Результаты работы получены на основе теоретических исследований и математического моделирования с использованием пакетов Mathcad 14, Table Curve 2D и 3D, ANSYS и др. При этом использовались основные положения теоретической механики, механики твердого

деформируемого тела, теории упругости, триботехники и теории гибких стержней в представлениях Е.П. Попова. Экспериментальные исследования базировались на современных методах теории планирования эксперимента, теории погрешностей и математической статистики.

Достоверность полученных результатов подтверждается:

- использованием хорошо известных и апробированных аналитических методов численного моделирования напряжённо-деформированного состояния упругих систем сложной формы;
- обоснованным выбором основных допущений и ограничений;
- удовлетворительной сходимостью результатов моделирования с экспериментальными данными;
- опытом практического внедрения достигнутых результатов.

Научная новизна работы заключается в:

1. Разработке методик расчета нагрузочных, жесткостных и демпфирующих характеристик регулируемых виброизоляторов с ансамблями прямолинейных и криволинейных упругодемпфирующих элементов изменяемой геометрии, формы и параметров трения контактирующих пар;
2. Создании аналитических моделей деформирования гибких упругих элементов изменяемой геометрии и формы при учете геометрической нелинейности конструктивных элементов виброизоляторов;
3. Теоретическом доказательстве возможности существенного повышения демпфирующих свойств работающих на изгиб многослойных конструкций за счет создания на контактных поверхностях параболического закона распределения сил трения между слоями по высоте;
4. Теоретически найденном новом свойстве деформируемых взаимосвязанных двухкольцевых упругодемпфирующих элементов, заключающемся в наличии на их нагрузочной характеристике регулируемой зоны квазиулевого жесткости, позволяющей существенно повысить эффективность виброзащитных систем транспортной и аэрокосмической техники.
5. Теоретическом и экспериментальном доказательстве эффективности способа регулирования характеристик виброизоляторов с конструкционным демпфированием за счет вариации форм упругодемпфирующих элементов, что задает вектор перспективных направлений проектирования регулируемых виброзащитных систем для транспортной и аэрокосмической техники.

Практическая ценность.

1. Предложен ряд новых конструкций виброизоляторов, позволяющих существенно увеличивать эффективность виброизоляции за счет изменения собственной частоты в десятки раз без демонтажа механической системы.
2. Предложенные методики расчёта регулируемых виброизоляторов позволяют определять оптимальные формы и параметры упругодемпфирующих элементов, диапазоны возможного регулирования свойств и, тем самым, дают возможность существенно сократить сроки разработки виброзащитных систем, решить многие проблемы вибропрочности изделий машиностроения.

Реализация результатов работы. Созданные алгоритмы и программы расчета использованы при разработке систем виброизоляции в компьюте-

ризированных вагонах-лабораториях производства НПЦ ИНФОТРАНС (г. Самара), ООО «Астрон» (г. Самара), в ЗАО «СОК» (г. Самара), а также применяются в учебном процессе СГАУ на кафедре «Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов» в дисциплинах «Основы проектирования и конструирования», «Динамика машин» и «Конструкция авиационных двигателей внутреннего сгорания».

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и были одобрены на международных, всероссийских, региональных, межвузовских научных конференциях: Всероссийской научно-технической конференции «Компьютерные технологии в машиностроении» (г. Тольятти, 2007 г.), Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы динамики и прочности материалов и конструкций: модели, методы, решения» (г. Орел, 2007 г.), Международной молодёжной научной конференции «34 Гагаринские чтения» (г. Москва, 2008 г.), Международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении» (г. Брянск, 2008 г.), Международной конференции молодых учёных «Инновационные технологии в проектировании» (г. Пенза, 2008 г.), Международной научно-практической конференции «Новые материалы и технологии в строительном и дорожном комплексах» (г. Брянск, 2008 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Новые материалы и технологии» (г. Москва, 2008 г.), Международной научно-технической конференции по транспортной и строительно-дорожной технике «Trans & Motauto» (г. София, 2008 г.), Всероссийской молодёжной научной конференции с международным участием «X Королёвские чтения» (г. Самара, 2009 г.), Всероссийской молодёжной научно-технической конференции «Молодёжь, техника, космос» (г. Санкт-Петербург, 2010 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Наука и образование транспорту» (г. Пенза, 2010 г.) и других.

Публикации. По материалам диссертации опубликована 21 печатная работа, включая 2 статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертаций, 14 трудов международных и всероссийских конференций, 5 патентов на полезные модели. Вклад автора в работы, выполненные в соавторстве, состоит в разработке теоретических положений, а также в непосредственном участии во всех этапах прикладных исследований.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Материал изложен на 216 страницах, содержит 163 рисунка и 10 таблиц. Список использованных источников включает 104 позиции.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель, определена практическая значимость полученных результатов.

В первой главе произведен анализ опубликованных работ в области исследования, рассмотрены методы исследования статических и динамиче-

ских характеристик систем на базе конструкционного демпфирования, проанализированы наиболее перспективные конструкции виброизоляторов с регулируруемыми упругодемпфирующими свойствами.

Изучением жесткостных и демпфирующих свойств конструкций занимались отечественные исследователи Антипов В.А., Бабицкий В.И., Баландин П.П., Безводин В.А., Елезов В.Г., Иващенко В.И., Ильинский В.С., Коловский М.З, Кравченко С.В., Крейнин Г.В., Лазуткин Г.В., Мальтеев М.А., Панин Е.А., Пановко Я.Г., Пономарев Ю.К., Страхов Г.И., Тройников А.А., Филекин В.П., Фролов К.В., Чегодаев Д.Е., Эскин И.Д. и зарубежные Й. Мурин, Гудман, Кламц, Пиан, Халловелл, Yamada Yoshikazu, Jeffcott и др.

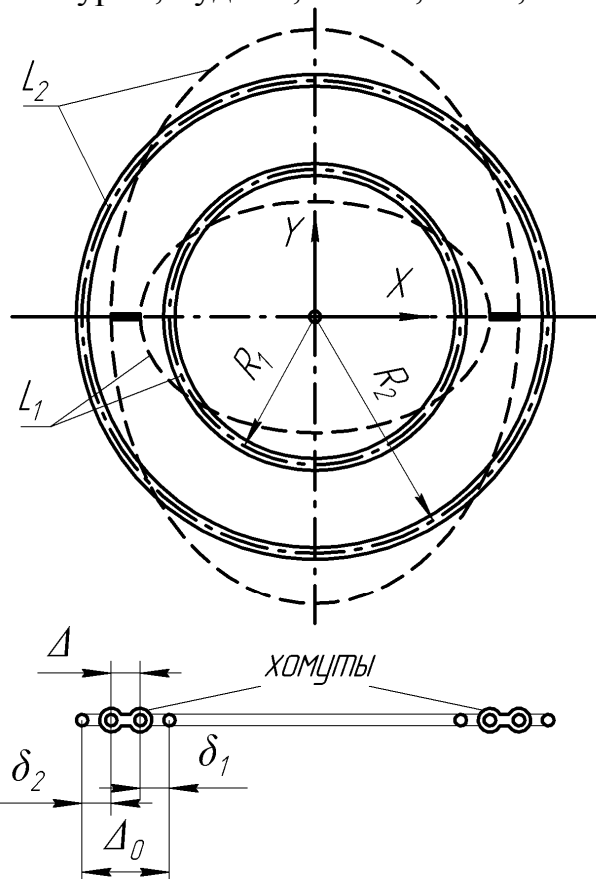


Рис. 1. Схема виброизолятора из двух связанных колец

Из обзора можно сделать вывод, что создание регулируемых виброзащитных систем на принципах конструкционного демпфирования возможно за счет плавного или ступенчатого изменения следующих параметров:

1. Величины и распределения эпюр сдвигивающих нагрузок по ширине, высоте, длине, объему упругодемпфирующих элементов (УДЭ).
2. Коэффициентов трения в контактных парах.
3. Длины, формы упругих элементов и их взаимного геометрического расположения в ансамбле виброизолятора.
4. Размеров и формы поперечных сечений элементов.
5. Числа контактирующих слоев в элементе и числа элементов в ансамбле виброизолятора.
6. Физических параметров материала или окружающей среды.

Остаются невыясненными вопросы влияния методов регулирования на характер нагрузочных характеристик с учетом геометрической нелинейности, особенно формы УДЭ, вопрос подбора рациональных конструктивно-технологических параметров. Исходя из этого сформулированы задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке методик расчета цельнометаллических виброизоляторов регулярной структуры УДЭ с регулируемыми жесткостными и демпфирующими характеристиками с учетом геометрической нелинейности. Разные конструкции позволяют преимущественно регулировать либо жесткостные, либо демпфирующие свойства, либо одновременно оба, что обуславливает некоторые особенности расчета виброизоляторов каждого типа. В качестве допущений принято, что все конструкции работают при изгибе и в зоне упругих деформаций.

Вначале рассмотрена методика расчета жестко-стных характеристик двух-эллипсного виброизолятора (рис. 1), где L_1, L_2 – длины упругих элементов; R_1, R_2 – радиусы упругих элементов до стяжки; δ_1, δ_2 – деформация упругих элементов при стяжке; Δ_0 – расстояние между упругими элементами до стяжки. Изменение формы упругих элементов происходит за счет переменной длины стяжки Δ .

На первом этапе определяются геометрические параметры системы после стяжки.

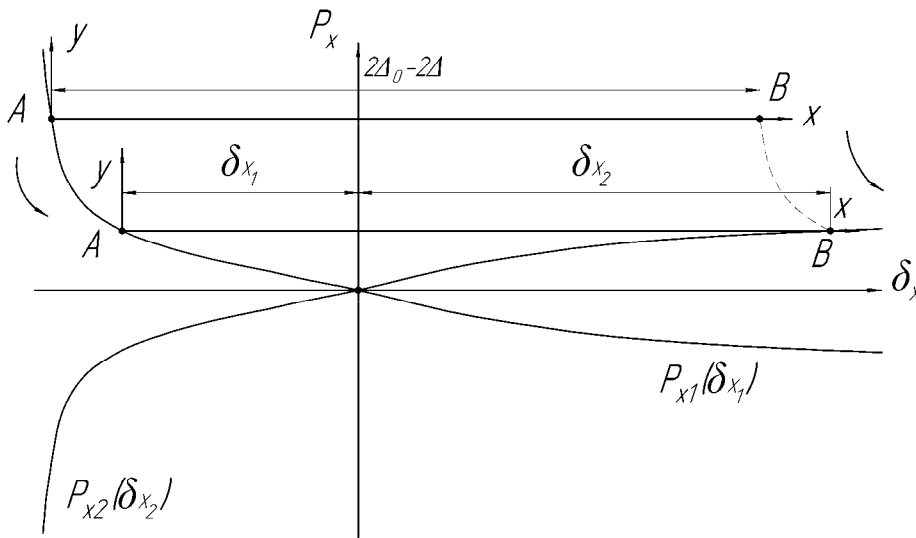


Рис. 3. Определение деформации колец при стяжке

с последующим суммированием их деформаций. Статическая неопределенность раскрывается методом сил, нагрузочная характеристика (рис. 2) определяется методом Мора. Геометрическая нелинейность учитывается по методу Гвоздева А.С. В начальном состоянии УДЭ представляют собой кольца, с нагрузочными характеристиками, показанными на рис.3. Из условий закрепления, характеристика второго кольца зеркальна первой. Показано, что если взять отрезок, равный длине стяжки, и поместить его концы на двух зеркально расположенных нагрузочных характеристиках, то координаты точек концов отрезка и будут искомыми перемещениями колец. Исходя из этого, получены зависимости безразмерных длин полуосей эллипсов от начальных параметров при любых формах а) в линейной постановке

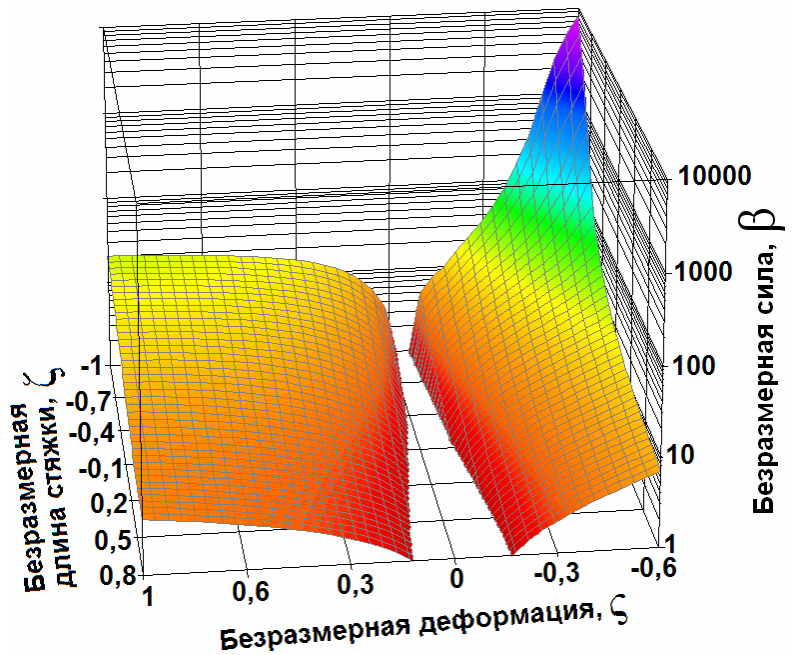


Рис. 2. График зависимости безразмерной силы β (по абсолютной величине) от безразмерной деформации ζ и безразмерной длины стяжки ξ для $\mu=8$

Затем находят нагрузочные характеристики системы на основе гипотезы о её разбиении на две подсистемы: полуэллипс с жёсткими закреплениями в зоне стяжек и два эллипса, деформирующихся совместно, как пакет пружин,

$$\left. \begin{aligned} \zeta_{a1} &= \frac{1}{\lambda-1} + \xi \left(\frac{1}{1 + \frac{\mu}{\lambda^3}} - 1 \right) \\ \zeta_{b2} &= \frac{\lambda}{\lambda-1} + \frac{\xi}{1 + \frac{\mu}{\lambda^3}} \end{aligned} \right\} \xi < 0 \quad \text{или} \quad \left. \begin{aligned} \zeta_{b1} &= \frac{1}{\lambda-1} + \xi \left(\frac{1}{1 + \frac{\mu}{\lambda^3}} - 1 \right) \\ \zeta_{a2} &= \frac{\lambda}{\lambda-1} + \frac{\xi}{1 + \frac{\mu}{\lambda^3}} \end{aligned} \right\} \xi > 0, \quad (1)$$

где ζ_a, ζ_b – безразмерные длины полуосей эллипса, λ – безразмерный радиус, μ – безразмерный момент инерции, ξ – безразмерная длина стяжки, и б) с учетом геометрической нелинейности:

$$\begin{cases} P(\delta_1) = -P(\delta_2), \\ \delta_2 - \delta_1 = 2\Delta_0 - 2\Delta, \end{cases} \quad (2)$$

где $P(\delta)$ – выражения нагрузочной характеристики колец.

Отсюда величины полуосей эллипсов a_1, b_1 и a_2, b_2

$$\begin{cases} a_1 = R_1 - \frac{\delta_1}{2}; b_2 = R_2 - \frac{\delta_2}{2}, \text{ при } \xi < 0, \\ a_2 = R_2 + \frac{\delta_1}{2}; b_1 = R_1 + \frac{\delta_2}{2}, \text{ при } \xi > 0. \end{cases} \quad (3)$$

Рассмотрено два качественно различных случая нагружения: I: $\Delta < \Delta_0$ ($\xi < 0$), II: $\Delta > \Delta_0$ ($\xi > 0$). Выражения для определения нагрузочной характеристики получены в виде:

$$\beta = \frac{8 \cdot E^3(e_2) \cdot \zeta_{y\Sigma}}{\pi^3(1-e_2^2) \cdot \left(K_{5a} + \frac{K_{6a}}{\frac{\gamma^3 K_{7a}}{\mu\sqrt{1-e_1^2}} + 1} \right)}, \xi < 0, \quad \beta = \frac{8 \cdot E^3(e_2) \cdot \zeta_{y\Sigma}}{\pi^3 \cdot \left(K_{5b} + \frac{K_{6b}}{\frac{\gamma^3 K_{7b} \sqrt{1-e_2^2}}{\mu} + 1} \right)}, \xi > 0, \quad (4)$$



Рис. 4. График функции $\beta = f(e_2/e_1, \zeta_y)$ с областью, где жесткость близка к квазиулевой

где коэффициенты K – комплексы геометрических параметров эллипсных колец, найденные из решения эллиптических интегралов.

Анализ графика, приведенного на рис. 2, показал, что использование двухкольцевого виброизолятора с переменной степенью эллипсности колец позволяет получить

существенное различие жесткостных свойств в рамках одной конструкции, которое может достигать двух порядков. Причем, изменение геометрии эллипсов оказывает на порядок большее влияние, чем изменение момента инерции поперечного сечения упругого элемента. Впервые установлено, что на ветви сжатия двухэллипсного виброизолятора существует область (с регулируемой протяженностью и величиной допустимой статической нагрузки), где за счет взаимодействия эллипсов в зоне с переходом от бесперегибной к перегибной форме УДЭ, жесткость близка к нулевой (см. рис. 4), что позволяет добиться эффективности виброизоляции, близкой к 100%.

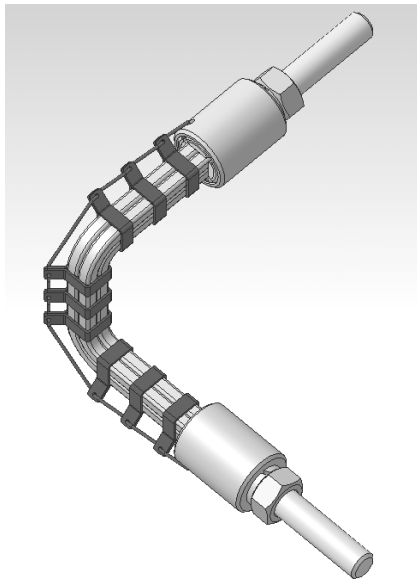


Рис. 5. Конструкция виброизолятора с переменным гистерезисом

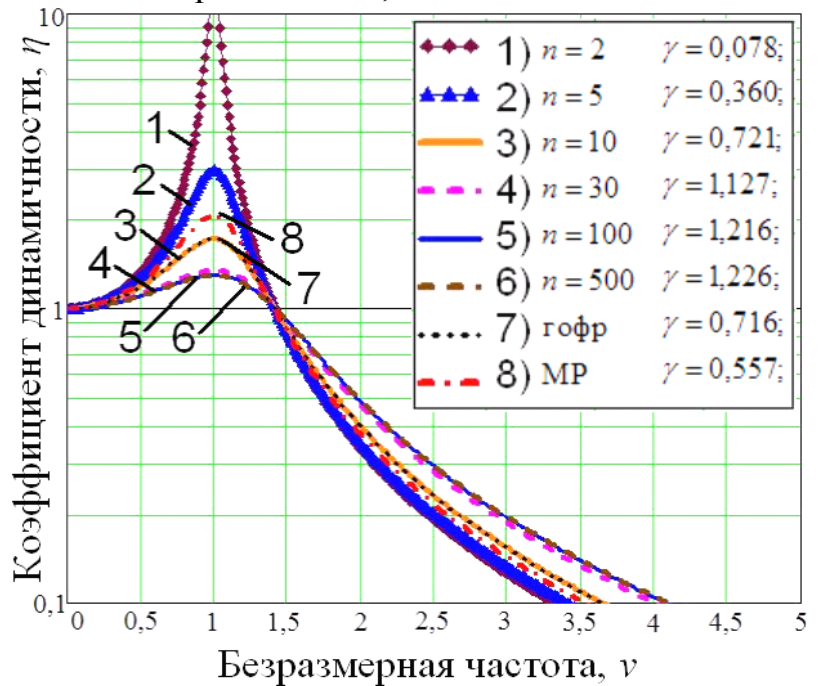


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика виброизолятора с переменным гистерезисом

Расчет демпфирующих характеристик рассмотрен на примере виброизолятора (рис. 5). Способ регулирования заключается в том, что пакет сжат электрострикционными элементами, обеспечивающими равномерную эпюру с регулируемой величиной прижимающей силы.

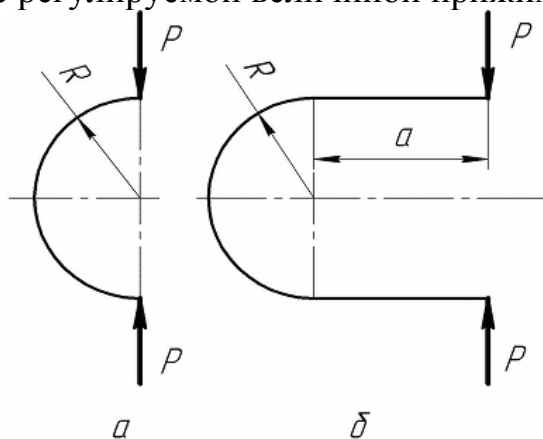


Рис. 7. Схема УДЭ виброизолятора:
а) без прямолинейного участка;
б) с прямолинейным участком.

Автор продолжил исследования Эскина И.Д., Калакутского В.И. и Пономарева Ю.К., т.е. на первом этапе за счёт мгновенного изменения жесткости получена билинейная гистерезисная петля, затем произведен учёт геометрической нелинейности. Наилучшие характеристики многослойного пакета получаются при мгновенном расслоении, что обеспечивается в данной конструкции за счет организации закона распределения коэффициентов трения по слоям, подобного эпюре

касательных напряжений, например, с помощью поверхностного напыления.

Использование регулирования позволяет вплотную приблизиться к теоретически возможному пределу для СКД. Из рис. 6 видно, что при числе слоев 10 и более, данная конструкция обладает лучшими характеристиками, чем, например, материал МР и гофрированные демпферы опор, обеспечивая почти безрезонансный переход критической частоты.

На основе предложенной методики оценено влияние изложенных выше факторов регулирования на нагрузочные характеристики.

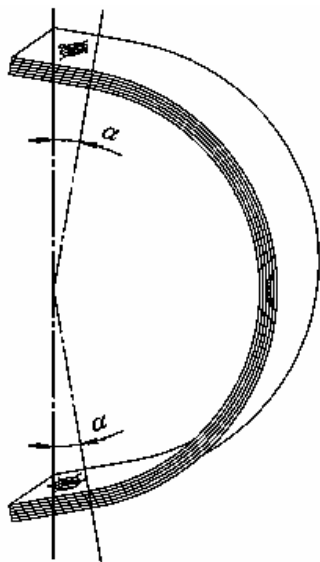


Рис. 8. Внешний вид УДЭ виброизолятора

Схема УДЭ виброизолятора с регулированием за счет изменения длины прямолинейных участков показана на рис. 7. Он характеризуется соотношением $\lambda = a/R$. В диапазоне $\lambda \in [0;5]$ безразмерная жёсткость изменяется в 117 раз, что позволяет сдвигать зону эффективной виброизоляции в нужный диапазон частот, практически полностью подавляя вибрации защищаемых объектов. Например, возможна реализация релейного закона изменения жёсткости вблизи критической частоты, с возвратом к прежней жёсткости после ее перехода.

В качестве одного из вариантов элементов системы виброзащиты беговой дорожки для «Международной космической станции» и в перспективе для программы «Марс-2020», исследован пластинчатый виброизолятор с радиусной формой УДЭ (см. рис. 8, где α – управляющий угол), позволяющий регулировать уровень демпфирующих свойств при неизменной жесткости. Изначально виброизолятор изготавливается с длиной дуги 164° , затем при установке в обоймы дуга длина дуги становится $180^\circ - \alpha$, что изменяет величину прижимающих нагрузок между слоями.

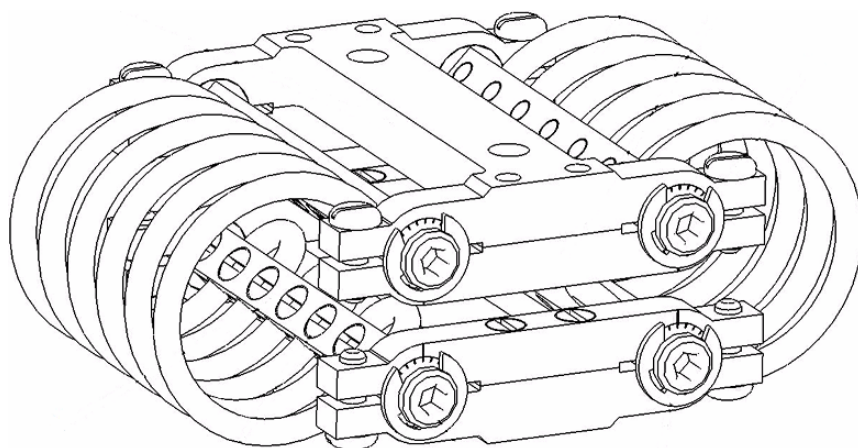


Рис. 9. Виброизолятор с изменяемой формой и углом установки УДЭ

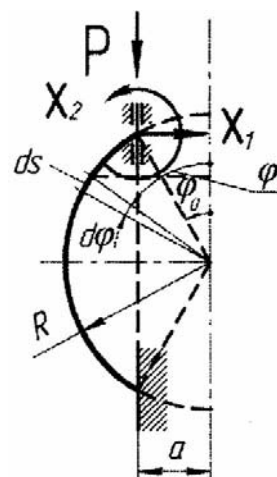


Рис. 10. Расчетная схема

Установлена зависимость между управляющим углом α и толщиной гистерезисной петли T_0 .

$$T_0 = 0,6095 \sum_{i=1}^{n-1} hf \frac{\sum_{j=i+1}^n bhE \left(\frac{\pi \left(\left((\pi - 2\alpha) \frac{R}{\pi} - n \frac{h}{2} \right) + (2i-1) \frac{h}{2} \right)}{(\pi - 2\alpha) \left(R_0 + (2i-1) \frac{h}{2} \right)} - 1 \right)}{\left(\left((\pi - 2\alpha) \frac{R}{\pi} - n \frac{h}{2} \right) + (2i-1) \frac{h}{2} \right) + \frac{h}{2}}, \quad (5)$$

где b и h – ширина и толщина ленты, R – радиус, f – коэффициент трения.

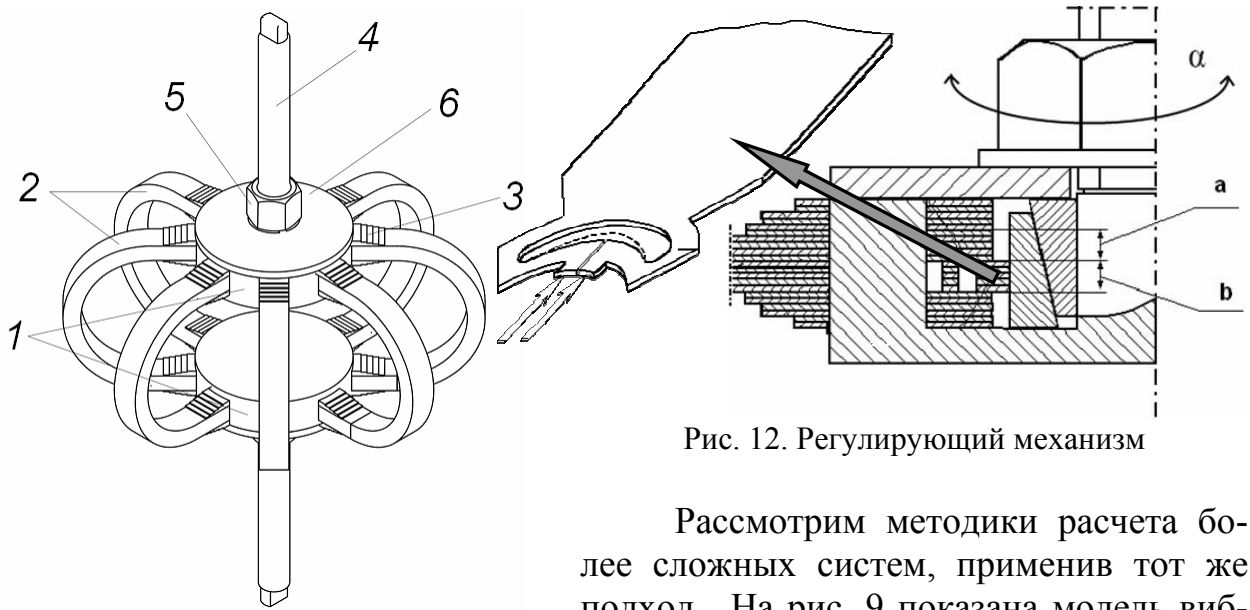


Рис. 11. Внешний вид виброизолятора с подстройкой демпфирования

за счет специально введенных элементов 1 – обоймы; 2 – упругодемпфирующие элементы; 3 – многослойные пакеты-рессоры; 4 – резьбовая ножка; 5 – гайка, перемещающая конусную втулку; 6 – направляющая шайба.

Рис. 12. Регулирующий механизм

Рассмотрим методики расчета более сложных систем, применив тот же подход. На рис. 9 показана модель виброизолятора, позволяющего получать качественно различные нагрузочные характеристики, поскольку регулирование жесткостных и демпфирующих свойств производится за счет изменения формы и угла установки φ_0 УДЭ. На рис. 10 дана его расчетная схема, где P – внешняя сила; R – радиус упругого элемента; φ_0 – начальный угол защемления, ; X_1 и X_2 – реакции в опоре.

Выражение для определения нагрузочной характеристики получено в виде

$$\beta_y = C_\zeta^y \zeta_y, \quad (6)$$

где безразмерную жёсткость, зависящую от φ_0 , можно записать в виде

$$C_\zeta^y = \frac{m(\pi - 2\varphi_0)^3}{\frac{\pi \cos \varphi_0}{2} - \varphi_0 \cos \varphi_0 - 3 \sin \varphi_0 \cos^2 \varphi_0 + \pi \cos \varphi_0 \sin^2 \varphi_0 - 2\varphi_0 \cos \varphi_0 \sin^2 \varphi_0}, \quad (7)$$

где m – число элементов в ансамбле (см. рис. 9).

На основании выражения (6), с использованием метода минимума потенциальной энергии деформаций на базе метода конечных элементов

(МКЭ), были получены расчётные формы УДЭ, проверенные экспериментально, и позволяющие получать качественно различные характеристики.

Используя экспериментально полученные значения коэффициента демпфирования γ , построена амплитудно-частотная характеристика системы виброзащиты. Поскольку для систем конструкционного демпфирования коэффициент демпфирования γ зависит от амплитуды, для корректного сравнения было использовано среднее значение γ_{cp} . Установлено, что коэффициент демпфирования изменяется вследствие *двух противоположных тенденций*:

а) Площадь петли возрастает с уменьшением начального угла φ_0 , а вслед за ней растёт и коэффициент демпфирования γ_{cp} .

б) С другой стороны, с уменьшением начального угла φ_0 возрастает потенциальная энергия деформации, что снижает значение коэффициента демпфирования γ_{cp} .

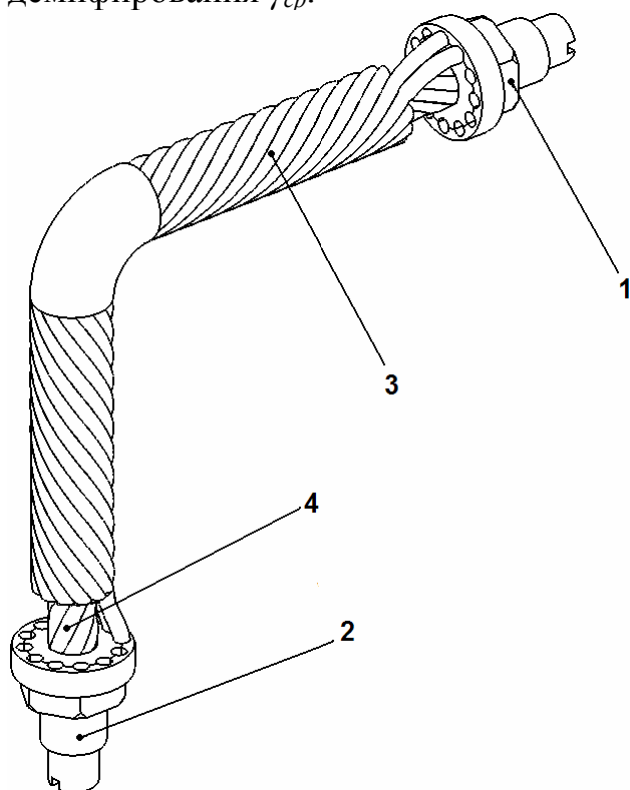


Рис. 13. Регулируемый двуслойный тросовый Г-образный виброизолятор

В многорезонансных системах для повышения эффективности виброизоляции полезно регулирование демпфирующих характеристик. В связи с этим рассмотрен ленточный виброизолятор (см. рис. 11, 12) в котором регулирование величины поджатия слоев происходит за счёт специально введенных элементов. Многослойные элементы выполнены в виде двух пакетов. Внешний пакет жёстко закреплен в фигурных пазах обойм, а внутренний установлен в пазах подвижно и, кроме того, его концевые части выполнены в виде разрезных фигурных упругих балочек, которые при сборке обойм поджимаются ансамблем из двух конусных втулок, установленных в корпусах разъемных обойм, причем втулка, контактирующая с упругими

балочками пакетов, является разрезной. Установлено, что величину безразмерной силы β , поджимающей каждый УДЭ в ансамбле, можно определить из выражения

$$\beta = \frac{\frac{\alpha \nu}{2\pi} \left(\frac{1}{\cos^2 \gamma} - 1 \right)}{\frac{k_1 \lambda^3}{4\mu_1} - \frac{k_2 \lambda^3}{3\mu_2} + \frac{k_2}{3\mu_2} + \frac{k_3}{4}}, \quad (8)$$

где α – управляющий угол, ν – безразмерный шаг резьбы, μ_1, μ_2 – безразмерные моменты инерции поперечных сечений, λ – безразмерный радиус, а значения вычисляемых коэффициентов k_i зависят от геометрии системы.

В качестве примера конструкции с совместным регулированием жесткостных и демпфирующих свойств рассмотрен двухслойный тросовый Г-образный виброизолятор, показанный на рис. 13, где 1 и 2 – верхняя и нижняя обоймы, 3 и 4 – внешний и внутренний слой троса. Управление жесткостью виброизолятора осуществляется за счёт изменения радиуса перехода, а демпфированием – за счёт изменения величины контактных давлений между внешним и внутренними слоями троса. Оба эффекта достигаются поджатием внутреннего троса с торцов резьбовыми пробками на регулируемый угол. Установлено, что данная конструкция позволяет добиться изменения начальной жесткости почти в 9 раз и демпфирования на порядок.

В третьей главе с целью проверки и уточнения зависимости упругих характеристик виброизолятора с регулируемыми жесткостными и демпфирующими свойствами от угла установки и формы УДЭ были проведены исследования модели виброизолятора, фотография которой показана на рис. 14.

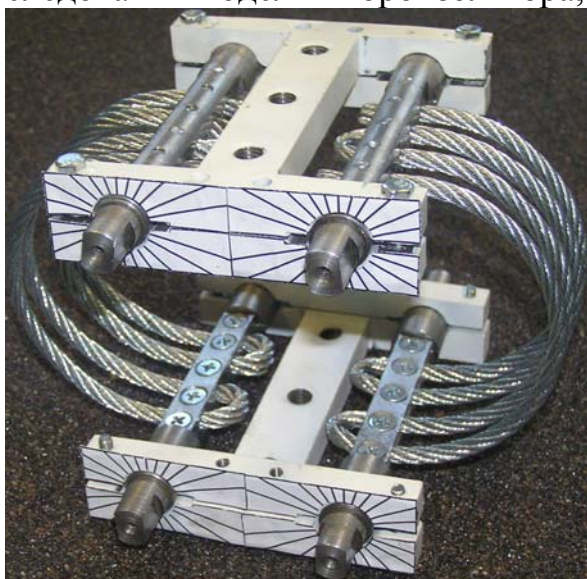


Рис. 14. Экспериментальный образец

Нагружение производилось в вертикальном направлении на обычном стенде для статических испытаний. Установлено, что отличие теоретически определенной жесткости виброизолятора от экспериментальной составляет от 3 до 20% в зависимости от управляющего угла (см. рис. 15).

Установлено, что форма УДЭ виброизолятора, зависящая от угла поворота валиков, весьма близка к полученной расчетным путем за счёт метода минимума потенциальной энергии деформации с наложением очевидных геометрических ограничений.

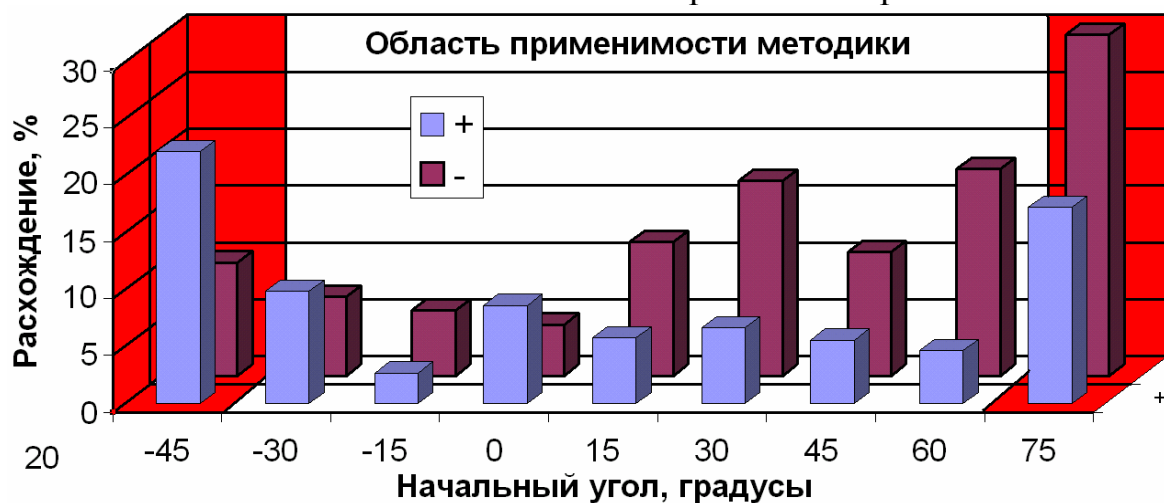


Рис. 15. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными

Установлено, что за счет регулирования начального угла защемления φ_0 можно изменять демпфирование в 2,7 раза и жесткость в 8,5 раз, что подтверждает эффективность предложенного способа управления, поскольку,

учитывая простоту изготовления и эксплуатации виброизолятора, оказывается возможным изменить собственную частоту почти в 3 раза, подняв эффективность виброзащиты $E = (1 - \eta) \cdot 100\%$, где η – коэффициент передачи, до 82% и снизив амплитуду колебаний на резонансе в 7,6 раза.

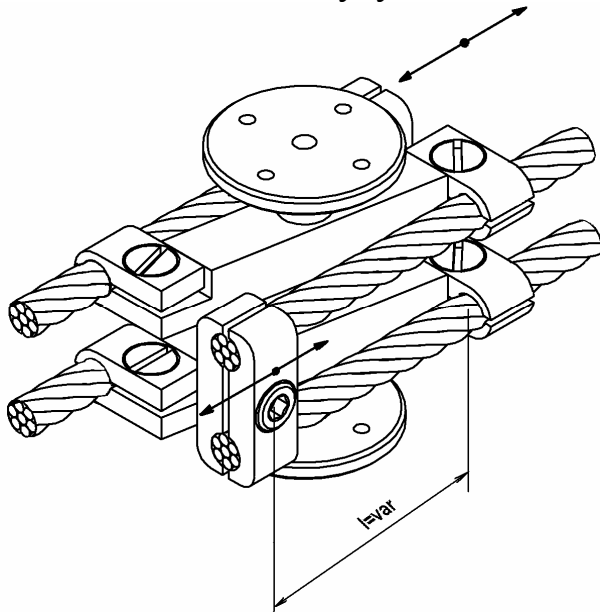


Рис. 16. Регулируемый виброизолятор

В четвертой главе дается подробное описание конструкций и принципов работы виброизоляторов (рис. 1, 7, 8, 9, 11, 13, 16) с регулируемыми за счёт различных факторов (длины, формы, угла установки упругодемпфирующих элементов, эпюры прижимающих нагрузок, коэффициентов трения и т.д.) жесткостными и демпфирующими характеристиками, разработанных автором с целью практического внедрения предложенных расчётных методик, а так же дается краткая характеристика перспективных направлений дальнейших исследований.

В приложении приведены справочные данные, используемые в методе расчёта виброизоляторов, и документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Выполнен комплекс научных исследований, направленных на расширение функциональных возможностей и эффективности виброзащитных систем для изделий машиностроения и аэрокосмической техники за счёт разработки новых методик расчета и высокоэффективных средств виброзащиты с регулируемыми характеристиками на базе упругодемпфирующих элементов конструкционного демпфирования. При этом получены следующие результаты:

1. На базе теории изгиба гибких стержней Е.П. Попова, метода конечных элементов, метода Мора и принципов конструкционного демпфирования разработаны методики расчета нагрузочных, жесткостных и демпфирующих характеристик регулируемых виброизоляторов, реализующие различные способы регулирования, благодаря чему разработан и защищен пятью патентами РФ ряд новых высокоэффективных виброизоляторов на базе конструкционного демпфирования, обеспечивающих эффективность виброизоляции от 82 до 99 %, что позволяет существенно повысить надежность защищаемых приборов и оборудования в условиях многорежимной эксплуатации.

2. Установлено, что с помощью изменения формы криволинейных упругодемпфирующих многослойных элементов можно до 150 раз изменять жесткостные свойства виброизолятора, что позволяет сдвигать зону эффективной виброизоляции в нужный диапазон частот, практически полностью

подавляя вибрации и, при необходимости, подстраивать виброзащитные системы при износе упругих элементов в процессе эксплуатации.

3. На языке MathCAD разработан комплекс программ автоматизированного расчета упругодемпфирующих характеристик регулируемых виброизоляторов, позволивших найти ряд неизвестных ранее свойств систем конструкционного демпфирования. Так, например, впервые теоретически установлено, что в прямолинейных и криволинейных пакетах лент постоянной начальной кривизны возможна реализация параболического закона сил трения по высоте пакета, что обеспечивает максимально возможные демпфирующие свойства виброизолятора, в 1,5...2,0 раза выше, чем у известных ранее. Доказано, что с помощью криволинейных упругодемпфирующих элементов в виде связанных колец с регулируемой степенью эллипсности можно создавать несущие высокоэффективные средства виброзащиты с квазинулевой жесткостью, что позволяет обеспечить почти стопроцентную эффективность виброизоляции.

4. Созданные в ходе исследований конструкции регулируемых виброизоляторов могут быть использованы в качестве быстрого средства вибрационной доводки изделий с фиксацией потребной формы упругодемпфирующего элемента и последующей реализации характеристики, соответствующей зафиксированной форме элемента, в более простых конструкциях пассивных виброизоляторов.

5. Результаты диссертационной работы использованы при разработке систем виброизоляции приборов и оборудования НПЦ ИНФОТРАНС (г. Самара), ООО «Астрон» (г. Самара), в ЗАО «СОК» (г. Самара), а также в СГАУ при доводке разрабатываемой системы виброзащиты беговой дорожки космонавтов и в учебном процессе.

Основные положения диссертационной работы опубликованы

в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Гвоздев, А.С. О возможности управления характеристиками многослойных виброизоляторов с конструкционным демпфированием [Текст] / А.С. Гвоздев, В.С. Мелентьев, Ю.К. Пономарев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. Т. 11 (31), №5. - С. 177-184.

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

в других изданиях:

3. Мелентьев, В.С. Экспериментальное получение и анализ динамических характеристик тросовых виброизоляторов [Текст] / Мелентьев В.С. // Гагаринские чтения: труды XXXIV международной молодежной научной конференции, 2-3 апреля 2008. – М.: МАТИ, 2008. – С. 192-195.

4. Мелентьев, В.С. Проектирование и оценка виброударозащитных характеристик тросового виброизолятора [Текст] / Мелентьев В.С., Гвоздев А.С. // Актуаль-

ные проблемы динамики и прочности материалов и конструкций: модели, методы, решения: материалы международной научно-технической конференции, 28 мая – 1 июня 2007. – Самара-Орел: СамГАПС-ОрелГТУ, 2007. – С. 290 – 292.

5. Ponomarev, U. Modelling all-metal filters for different purposes with elastic element in the form of a cable [Текст] / Ponomarev U., Ermakov A., Melentjev V. [и др.] // Trans & Motauto-2008: материалы XV международной научно-технической конференции, София, Болгария, 18-20 сентября 2008. Sozopol, 2008. – Vol. 2, P. 111-114.

6. Мелентьев, В.С. Управление характеристиками многослойных цельнометаллических виброизоляторов [Текст] / Мелентьев В.С., Пономарев Ю.К. // Молодежь, техника, космос: материалы II общероссийской молодежной научно-технической конференции, 17-19 марта 2009. – С-Пб.: БГТУ, 2009. – С. 141.

7. Спивак, С.Е. Многослойный ленточный виброизолятор цилиндрического типа: особенности проектирования, сборки и расчета методом КЭ [Текст] / Спивак С.Е., Стоша П.Е., Мелентьев В.С. [и др.] // Королевские чтения: материалы X всероссийской молодежной научной конференции с международным участием, 6-8 октября 2009. – Самара: СГАУ, 2009. – С. 15.

8. Семенов, И.Н. Разработка пространственного тросового виброизолятора с ансамблем элементов в виде полуокружности с двумя параллельными горизонтальными участками [Текст] / Семенов И.Н., Ярыгин С.С., Мелентьев В.С. [и др.] // Королевские чтения: материалы X всероссийской молодежной научной конференции с международным участием, 6-8 октября 2009. – Самара: СГАУ, 2009. – С. 141.

9. Мелентьев, В.С. Исследование кольцевого виброизолятора с управляемым изменением радиуса кривизны и угла охвата [Текст] / Мелентьев В.С., Пономарев Ю.К., Малов А.В. // Наука и образование транспорту: материалы III всероссийской научно-практической конференции, 11-12 ноября 2010. – Пенза: ПТЖТ, 2010. – С. 212-214.

в патентных документах:

10. Пат. 78540 РФ, МПК F16F 7/14. Виброизолятор / А.С. Белов, Е.С. Васюков, В.С. Мелентьев [и др.]. - № 2008120897 ; заявлено 26.05.08 ; опубл. 27.11.08. – 8 с.

11. Пат. 83113 РФ, МПК F16F 7/14. Виброизолятор / А.В. Бояров, Е.С. Васюков, В.С. Мелентьев [и др.]. - № 2008120940 ; заявлено 26.05.08 ; опубл. 20.05.09. – 13 с.

12. Пат. 84486 РФ, МПК F16F 7/14. Ленточный виброизолятор / В.С. Мелентьев, Ю.Н. Проничев, А.С. Гвоздев [и др.]. - № 2009105520 ; заявлено 17.02.09 ; опубл. 10.07.09. – 14 с.

13. Пат. 96921 РФ, МПК F16F 7/14. Тросовый виброизолятор / А.С. Гвоздев, В.С. Мелентьев, Ю.К. Пономарев [и др.]. - № 2010114792 ; заявлено 13.04.10 ; опубл. 20.08.10, бюл. № 23. – 9 с.

14. Пат. 83113 РФ, МПК F16F 7/14. Виброизолятор / А.В. Бояров, Е.С. Васюков, В.С. Мелентьев [и др.]. - № 2008120940; заявлено 26.05.08 ; опубл. 20.05.09. – 13 с.

15. Положительное решение Роспатента о выдаче патента по заявке 2010128861/11 РФ, МПК F16F 7/14. Тросовый виброизолятор / Е.С. Васюков, Ю.К. Пономарев, В.С. Мелентьев [и др.]. – заявлено 12.07.10. – 10 с.

Подписано в печать: 25.11.2010 г. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Печать оперативная. Объем: 1 усл.печ.л. Тираж: 100 экз.

Отпечатано в типографии издательства СГАУ

443086, Самара, Московское шоссе, 34.