

На правах рукописи

Гвоздев Александр Сергеевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИК РАСЧЁТА И КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ
ТРОСОВЫХ ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ
С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ВОСПРИЯТИЕМ НАГРУЗКИ**

Специальность 01.02.06 – Динамика,
прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Самара – 2010

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: Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс»

Защита состоится 27 декабря 2010 г. в 10 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 «Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)»

Автореферат разослан: 26 ноября 2010 г.

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

А.Н. Головин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Доля разрушений объектов техники, вызванных вибрацией, в их общем количестве по-прежнему достаточно велика. В настоящее время для защиты от вибраций широко применяются пассивные системы виброзащиты (ВЗС), обеспечивающие наибольшую результативность лишь на конкретном режиме работы. Частично многорежимность обеспечивается применением систем, построенных в виде параметрического ряда. Тросовые виброизоляторы обладают колоссальным потенциалом для создания высокоэффективных (по величине рассеяния энергии, надёжности и технологичности) ВЗС, за счёт вариации форм упругой линии тросового элемента – прямолинейной, радиусной или пространственной. В то же время до сих пор не существует единых методик, сочетающих в себе точность, эффективность, универсальность и простоту, которые позволили бы получить стройные математические модели таких систем, пригодные для создания параметрических рядов. Таким образом, разработка эффективных параметризованных средств виброзащиты на базе создания более совершенных методик расчёта и конструктивных схем тросовых виброизоляторов является актуальной, поскольку позволит разрабатывать ВЗС для нового поколения машин, приборов и аппаратуры.

Цель работы. Расширение качественных и количественных возможностей виброзащитных систем за счёт создания новых конструктивных схем и уточнённых методик расчёта упругодемпфирующих характеристик параметрических рядов виброизоляторов с варьируемой формой гибких тросовых элементов.

Задачи исследования:

- создать новые технологически простые в производстве и надёжные в эксплуатации конструктивные схемы виброизоляторов на базе металлических канатов (тросов) с пространственным восприятием нагрузки;
- создать методики расчёта нагрузочных, жесткостных и демпфирующих характеристик тросовых виброизоляторов с различными формами упругодемпфирующих элементов (УДЭ) и выявить функциональные связи между их определяющими и определяемыми критериальными параметрами;
- разработать принципы проектирования параметрических рядов тросовых виброизоляторов с различными формами УДЭ;
- создать ряды типоразмеров виброизоляторов тросового типа, обладающие признаками подобия по упругодемпфирующим свойствам, обеспечивающие идентичность статических и динамических свойств механических систем, существенно удешевляющих и упрощающих технологии проектирования средств виброзащиты;
- выявить новые качества систем вибрационной защиты, определяемые новыми конструктивными решениями и усовершенствованными математическими моделями деформирования их УДЭ.

Методы исследования основаны на использовании математического моделирования, теории аппроксимации, системного анализа, сопротивления

материалов, теоретической механики, теории подобия, механики деформирования твердого тела, а также классической теории упругости и теории деформируемых стержней в изложении Е.П. Попова. Применены вычислительные программные комплексы ANSYS, MSC.ADAMS, MathCAD, STATISTICA и др. Экспериментальные исследования базируются на основе теории планирования эксперимента и математической статистики.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью постановки задач исследования, применением апробированных методов математического моделирования упругих систем в процессе их деформирования, использованием научно обоснованных расчетных схем, сходимостью теоретических результатов с экспериментальными, в том числе и полученными другими исследователями, в пределах допустимых погрешностей, положительной оценкой внедрения итогов исследований на практике.

Научная новизна работы состоит в:

1. Создании усовершенствованных математических моделей и методик расчёта тросовых виброизоляторов с пространственным восприятием нагрузки, учитывающих геометрическую нелинейность элементов с прямолинейной, радиусной и пространственной формами осевых линий, позволяющих формировать параметрические ряды виброизоляторов данных типов с заданными видами нагрузочных характеристик;

2. Разработке ряда новых конструктивных решений тросовых виброизоляторов с многоярусной компоновкой плоских и пространственных УДЭ, защищенных патентами РФ, и обладающих широкими возможностями по качественному влиянию формы элементов на вид нагрузочных характеристик;

3. Выявлении на основе созданных математических моделей новых свойств систем вибрационной защиты, заключающихся в наличии областей квазиулевой жесткости, определяемых новыми конструктивными решениями, существенно улучшающими эффективность виброизоляции машин, приборов и аппаратуры.

4. Теоретически доказано, что при определенном выборе критериев подобия, составленных из геометрических размеров упругого элемента в виде комбинации прямолинейных и радиусных участков, возможна реализация линейных нагрузочных характеристик в трех взаимно-перпендикулярных направлениях при воздействии на виброизолятор парой сходящихся или расходящихся сил.

Практическая ценность. На основе предложенных методик расчёта тросовых виброизоляторов с различными формами упругих элементов разработаны параметрические ряды ВЗС на базе наиболее эффективных конструкций виброизоляторов, значительно сокращающие сроки проектирования систем виброзащиты и обеспечивающие высокие эксплуатационные показатели.

Реализация результатов работы. Разработанные алгоритмы расчёта и программы использованы при проектировании защитных систем оборудования и аппаратуры ООО «Астрон» (г. Самара), НПЦ «ИНФОТРАНС» (г. Самара), НИЦ «Путеец» (г. Новосибирск), а также применяются в учебном процессе СГАУ на кафедре «Конструкция и проектирование двигателей ле-

тательных аппаратов» в дисциплинах «Основы проектирования и конструирования», «Динамика машин» и «Надежность авиационных ДВС».

Апробация работы. Основные теоретические и экспериментальные результаты работы обсуждались и получили высокую оценку на многих международных, всероссийских и региональных научно-технических конференциях: на Всероссийской научно-технической Интернет-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 молодежной научной конференции «34 Гагаринские чтения» (г. Москва, 2008 г.), Международной научно-технической интернет-конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении» (г. Брянск, 2008 г.), Международной заочной конференции молодых ученых, студентов и специалистов «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, строительно-дорожной и подъемно-транспортной техники и технологии «Trans & Motauto» (г. София, 2008 г.), Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием «X Королевские чтения» (г. Самара, 2009 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы развития науки, техники и технологии» (г. Москва, 2009 г.), Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь, 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 опубликовано 24 печатные работы, включая 2 статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов исследований, 14 трудов международных и всероссийских конференций, 8 патентов на полезные модели. Вклад автора диссертации в работы, выполненные в соавторстве, состоит в разработке теоретических положений расчета тросовых виброизоляторов с пространственным восприятием нагрузки, 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 252 страницах, содержит 195 рисунков и 24 таблицы. Список использованных источников включает 118 позиций.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована цель работы, показана ее актуальность и научная новизна, определена практическая значимость полученных результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ опубликованных работ в предметной

области исследования, рассмотрены современные методы оценки жесткостных и демпфирующих свойств средств вибрационной защиты, проанализированы типовые конструкции виброизоляторов на основе тросов, применяемые в современном машиностроении, раскрыта роль формы УДЭ при проектировании виброизолятора. Наиболее ценный вклад в раскрытии предметной области внесли работы В.А. Безводина, В.С. Ильинского, В.И. Калакутского, Я.Г. Пановко, Ю.К. Пономарева, Е.П. Попова, В.А. Светлицкого, Е.С. Сорокина, С.П. Тимошенко, К.В. Фролова, Л. Гудмана, К. Камосси и др.

Выяснено, что в настоящее время в тросовых виброизоляторах применяются три формы УДЭ: прямолинейная, радиусная или пространственная; научные исследования, касающиеся параметризации конструкций тросовых виброизоляторов, не носят систематического характера; не существует единых методик расчёта, сочетающих в себе точность, эффективность и простоту, пригодных для создания параметрических рядов виброизоляторов указанных типов.

Исходя из этого, сформулированы задачи исследования, перечисленные выше.

Вторая глава посвящена разработке методик расчёта и созданию параметрических рядов виброизоляторов тросового типа с учётом геометрической нелинейности перемещений. В зависимости от формы УДЭ (прямолинейной, радиусной или пространственной), методики имеют свои особенности. Основными допущениями методик являются: 1) УДЭ работают на изгиб или изгиб с кручением; 2) проволоки в тросе имеют возможность полного проскальзывания; 3) все УДЭ цельнометаллические; 4) материал проволок работает в зоне упругих деформаций; 5) не учитывается внутреннее трение в материале УДЭ.

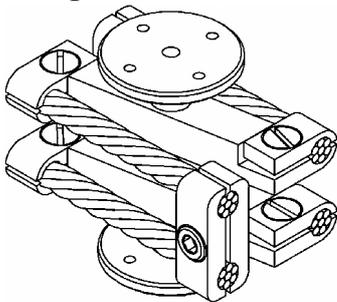


Рис. 1. Виброизолятор с прямолинейной формой УДЭ

Для тросовых виброизоляторов с прямолинейной формой упругих элементов (рис. 1) предложена новая методика расчёта нагрузочных характеристик, построенная с учетом геометрической нелинейности конструкции и с использованием критериальных параметров безразмерной силы и перемещения:

$$\beta = Pl^2/EJ; \quad \zeta = \delta/l, \quad (1)$$

где P – внешняя нагрузка; l – длина УДЭ; δ – перемещение точки приложения силы P ; E – модуль упругости материала проволок троса; J – момент инерции

поперечного сечения упругого элемента. При построении математической модели балки с учётом геометрической нелинейности использована качественная структура известной формулы Л. Эйлера, дополненная найденным в работе нелинейным членом, полученным с использованием методики расчёта гибких стержней на основании численного решения эллиптических интегралов, предложенной Е.П. Поповым (рис. 2):

$$\beta = \frac{6\zeta_y}{2 - 0,3374|\zeta_y| + 0,347\zeta_y^2 - 5,0913|\zeta_y^3| + 2,8832\zeta_y^4}, \quad (2)$$

где ζ_y – безразмерное перемещение вдоль вертикальной оси y (рис. 2).

Использовать формулу Л.Эйлера в области больших перемещений без модификации оказалось невозможно в связи с возникновением разрыва функции II рода. Демпфирующие характеристики виброизолятора (рис. 1) определены экспериментально по методу Пономарева-Калакутского.

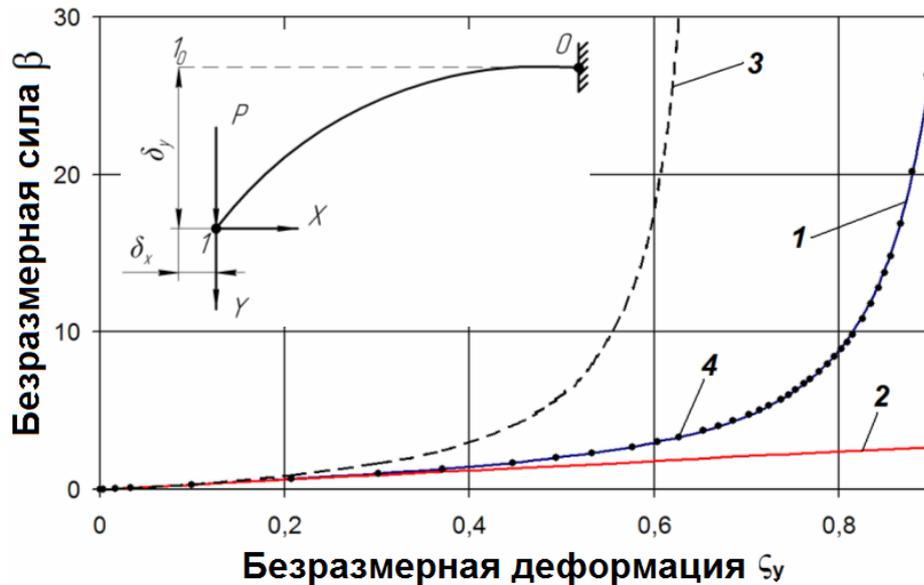


Рис.2. Расчётная схема и графики нагрузочных характеристик: 1 – по Е.П. Попову и предложенной методике (2) (графики совпадают); 2 – линейная; 3 – по Л. Эйлеру; 4 – эксперимент

Из анализа литературы, посвященной исследованию характеристик радиусных виброизоляторов, автором было выяснено о существенной нелинейности их свойств, присущих только этому типу упругих элементов. Снизить нелинейность, а тем более получить линейную нагрузочную характеристику в таких системах принципиально невозможно.

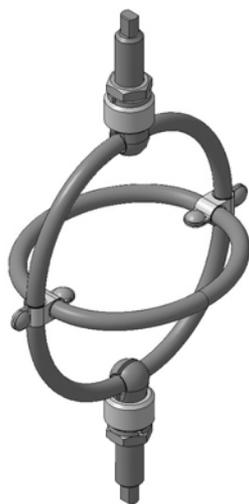


Рис. 3. Тросовый виброизолятор с УДЭ в виде набора колец

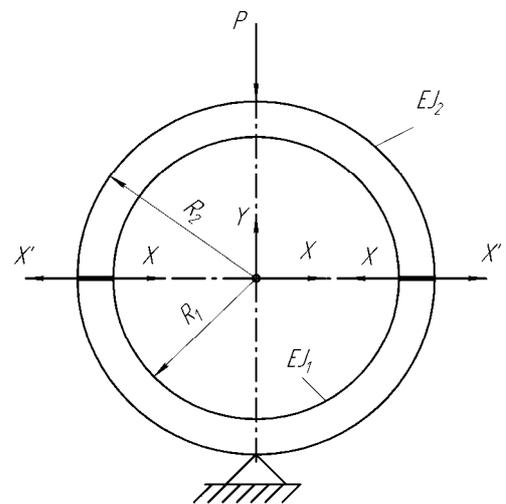


Рис. 4. Схема двухкольцевого виброизолятора

Для решения этой проблемы автором была высказана идея разместить внутри одного радиусного упругого элемента еще один, или несколько подобных

элементов, конструктивно заставив их работать в противофазе друг с другом (рис. 3). На базе новой схемы (рис. 4), создана методика расчёта характеристик виброизолятора. Методика базируется на раскрытии статической неопределимости системы методом сил с применением интегралов Мора.

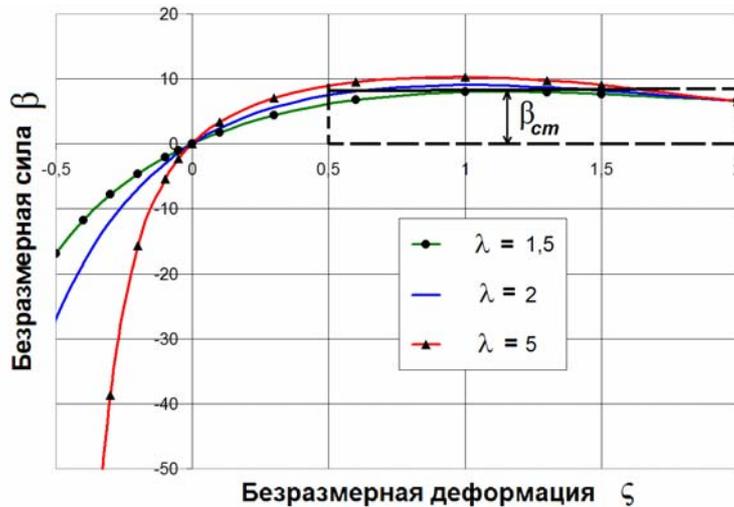


Рис. 5. График нагрузочной характеристики виброизолятора с зоной квазиулевого жесткости

Получено выражение нагрузочной характеристики виброизолятора (рис.3) в вертикальном направлении (ось y на рис. 4) в безразмерном виде:

$$\beta = \frac{\zeta}{\left(\frac{3\pi-8}{\pi^2-8} - \frac{\pi}{4}\right) + \frac{\left(1-\frac{4}{\pi}\right) \cdot \frac{4-\pi}{\pi^2-8}}{\lambda^3/\mu+1}} + f(\zeta, \lambda, \mu), \quad (3)$$

где функция $f(\zeta, \lambda, \mu)$ дана в табличном виде в приложении к работе, а отношения радиусов и моментов инерции колец представлены в виде симплексов λ и μ :

$$\lambda = R_2/R_1, \quad \mu = J_2/J_1. \quad (4)$$

Аналогичные выражения получены для осей x и z . Далее изложенный метод обобщен для расчета характеристик многокольцевых виброизоляторов. Выражение для безразмерной нагрузочной характеристики вдоль вертикальной оси виброизолятора в линейной постановке приведено в виде

$$\beta = \frac{\zeta}{\left(\frac{3\pi-8}{\pi^2-8} - \frac{\pi}{4}\right) \cdot \sum_{i=2}^n \frac{\mu_i}{\lambda_i^2} \left(\frac{\frac{2}{\pi} - \frac{1}{2}}{\frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi}} \cdot \left(\frac{4-\pi}{\pi^2-8}\right)\right)^{n-i} + \frac{\left(\frac{4}{\pi} - 1\right) \cdot \frac{4-\pi}{\pi^2-8}}{1 + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\lambda_i^3}{\mu_i}}}. \quad (5)$$

Под действием нагрузки или за счет предварительной деформации радиусные УДЭ приобретают форму эллипсов. В работе приведен вывод выражений для построения нагрузочных характеристик виброизоляторов с УДЭ эллипсной формы (см. рис. 6, 7, 8). Для случая, когда перемещение происходит вдоль большей полуоси a (рис. 7) безразмерная нагрузочная характеристика в линейной постановке имеет вид

$$\beta = \frac{8E^3(e) \cdot \zeta_{ia}}{\sqrt{1-e^2} \cdot \pi^3 \cdot K_{j\zeta}}, \quad (6)$$

Когда перемещение происходит вдоль меньшей полуоси b (рис. 7):

$$\beta = \frac{8E^3(e) \cdot \zeta_{ib}}{\pi^3 K_{j\zeta}}, \quad (7)$$

где e – эксцентриситет эллипса, $E(e)$ – полный нормальный эллиптический интеграл Лежандра II рода, $i=1,2$ – случай нагружения: $i=1$ – нагрузка вдоль большей полуоси эллипса ($P||a$), $i=2$ – нагрузка вдоль меньшей полуоси эллипса ($P||b$); $j=1,2$ – случай деформирования: $j=1$ – перемещения вдоль a , $j=2$ – перемещения вдоль b .

Выражение для определения нагрузочной характеристики вдоль вертикальной оси виброизолятора в нелинейной постановке получено в виде:

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

где β_y , ζ_y – безразмерные сила и деформация вдоль оси y (рис. 7); Δ – нелинейный компонент нагрузочной характеристики (для ветвей сжатия (Δ_c) и растяжения (Δ_p)).

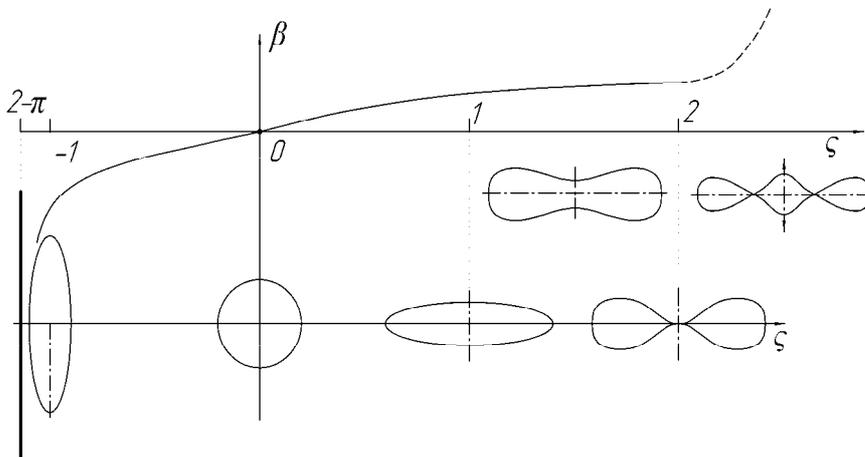


Рис. 6. Изменение формы радиусного УДЭ при деформировании

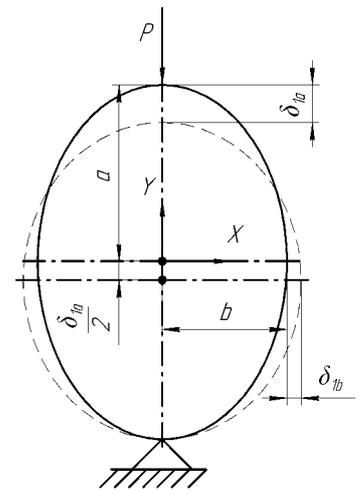


Рис. 7. Расчётная схема эллипсного УДЭ

Установлено, что в первом приближении нагрузочную характеристику для упругого элемента эллипсной формы можно получить сдвигом нагрузочной характеристики кольцевого УДЭ с учетом геометрической нелинейности. В зоне 15% безразмерной деформации расхождение не превышает 3%. Выполнено исследование кольцевых виброизоляторов в динамике. Анализ графиков, отражающих результаты исследований эллипсной формы УДЭ (рис. 7), показал широкие возможности по созданию параметрических рядов виброизоляторов одного размера с большим диапазоном подбора жесткостных характеристик.

Подробные исследования математических моделей виброизоляторов с прямолинейными и радиусно-эллипсными очертаниями форм их упругих элементов привели автора к суждению о недостаточной палитре управления видом нагрузочных характеристик для реализации требуемых динамических характеристик оборудования.

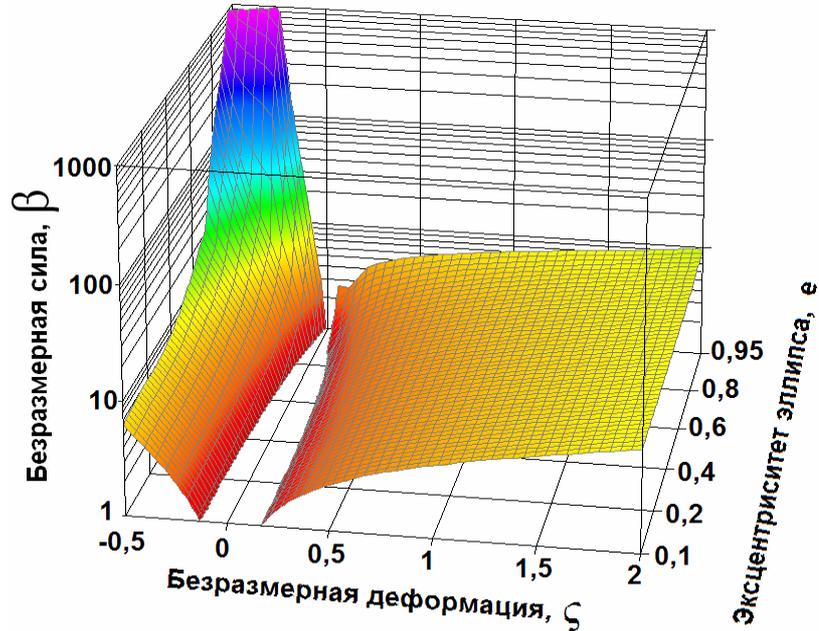


Рис.8. График зависимости безразмерной силы β от эксцентриситета эллипса e и безразмерной деформации ζ для $P \parallel a$ в вертикальном направлении деформирования

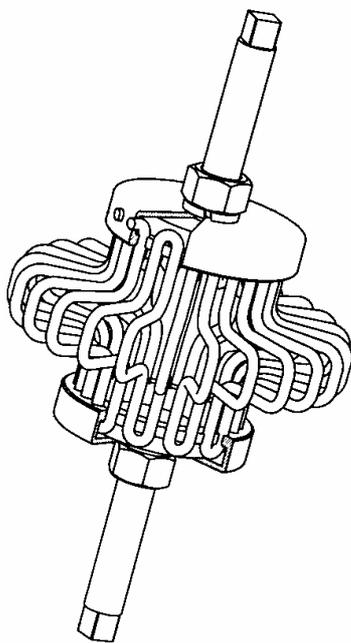


Рис. 9. Внешний вид виброизолятора

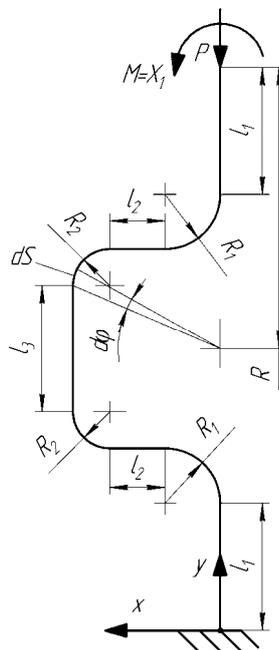


Рис. 10. Расчётная схема упругого элемента

Была рассмотрена схема упругого элемента с чередованием прямолинейных и радиусных участков (рис. 10) и сформированный на базе этого элемента виброизолятор (рис. 9). Построение математической модели деформирования данного виброизолятора осуществлено с использованием уже описанных средств и гипотез. Найденное выражение, связывающее силу сопротивления виброизолятора и его осадку (смещение верхней обоймы относительно нижней)

анализировалось с помощью π -теоремы, вводился набор критериев, полностью описывающих упругие характеристики системы. После чего выражение нагрузочной характеристики вдоль вертикальной оси виброизолятора (ось y на рис. 10) удалось записать в безразмерном виде

$$\beta = \frac{m\zeta}{2K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4} + f(\zeta, K_i), \quad (9)$$

где m – число элементов в ансамбле виброизолятора, а коэффициенты – параметры; функция $f(\zeta, K_i)$ дана в табличном виде в приложении к работе; K_i – зависят от безразмерных критериев подобия, составленных из геометрических и физических величин, описывающих материал, геометрию осевых линий и поперечных сечений троса.

В качестве примера на рис. 11 показаны результаты расчёта безразмерной нагрузочной характеристики виброизолятора (рис. 9) в зависимости от безразмерной осадки (деформирования) и безразмерной длины первого участка $\lambda_1 = l_1/R$ (рис. 10). Ветвь растяжения взята по модулю. Установлено, что форма УДЭ существенно влияет на характеристики, и её подбором можно обеспечить нужные свойства параметрического ряда виброизоляторов.

Учёт геометрической нелинейности виброизолятора при большой осадке, соизмеримой с величиной базового параметра R (рис. 10), осуществлён с применением программного комплекса ANSYS и последующей аппроксимации большого числа расчётных данных, приведенных в работе.

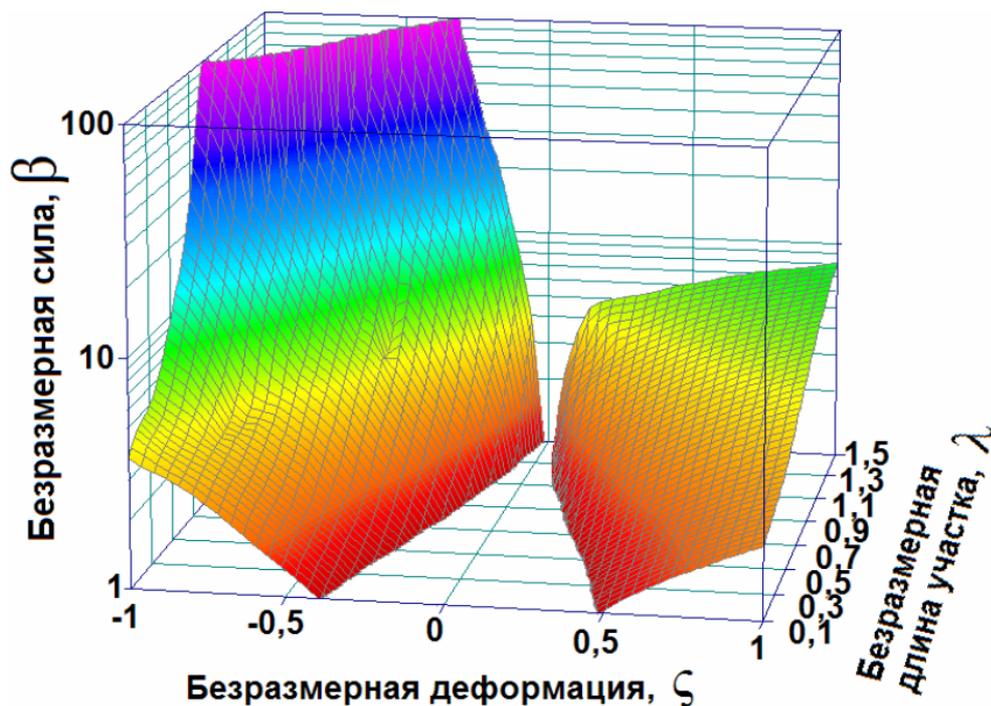


Рис. 11. График зависимости безразмерной силы β от безразмерной деформации ζ безразмерной длины первого участка λ вдоль вертикальной оси виброизолятора (рис. 10)

Для расчёта виброизолятора с пространственной формой УДЭ применялся метод минимума потенциальной энергии, реализованный на базе метода конечных элементов.

Методика расчёта характеристик виброизоляторов с пространственной формой упругих элементов для малых типоразмеров известна. Она была разработана в монографии Ю.К.Пономарева и В.И.Калакутского и базировалась на представлении совпадения осевых линий ансамбля элементов с поверхно-

стью шара радиуса R . При тщательном исследовании модели было установлено, что при больших габаритных размерах форма осевых линий отличается от указанной выше. Кроме того, на точность расчётов начинает влиять винтообразность прядей и проволок в прядях. В связи с этим известная методика расчёта характеристик виброизоляторов (рис. 12) модернизирована с учетом коррекции осевых линий элементов и эллипсности проволок в сечениях тросовых УДЭ. Сущность модернизированной методики расчёта заключается в поэтапном моделировании деформирования упругого элемента с применением средств конечно-элементного моделирования и включением опции нелинейного анализа.

Для нахождения момента инерции сечения УДЭ с учетом винтообразности проволок в расчёт введена формула в виде:

$$J = \frac{n \cdot \pi}{64} (6 \cdot d_2^3 \cdot c + d_1^4), \quad (10)$$

где $c = d_2 / \cos \alpha$ – большая полуось эллипса в сечении проволоки троса, d_1 – диаметр центральной проволоки троса, d_2 – диаметр винтовой проволоки, n – число прядей троса в УДЭ, α – угол навивки.

С использованием разработанных методик расчёта созданы параметрические ряды тросовых виброизоляторов для нагрузок от 0,1 до 100 кг с прямолинейной, радиусной и пространственной формами упругих линий. Диапазон нагрузок разбит на области по закону геометрической прогрессии. Внутри каждой области оптимальные нагрузки подобраны по закону арифметической прогрессии. Жесткость виброизоляторов определялась из условия обеспечения собственной частоты системы 10 Гц, согласно рекомендациям для приборов и оборудования аэрокосмической техники. Использовались стандартные компоновки поперечных сечений тросов. Определение геометрических размеров и физических характеристик виброизоляторов производилось на базе полученных критериальных выражений, в которых значения безразмерных критериев подбирались из условий обеспечения надежности, технологичности, минимальных массово-габаритных параметров.

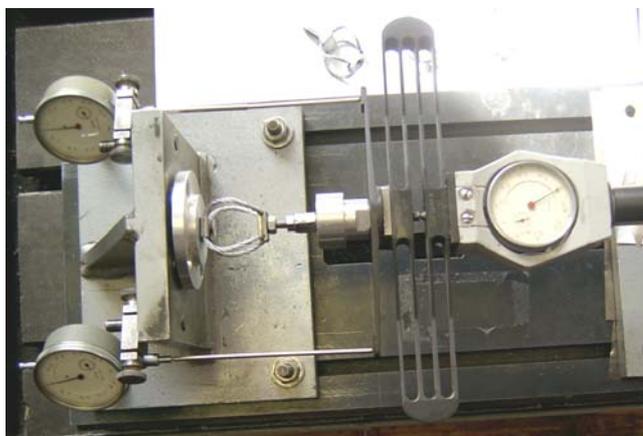


Рис. 12. Один из экспериментальных образцов и стенд для испытаний тросового виброизолятора

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований по определению упругодемпфирующих характеристик виброизолято-

ров с радиусной и пространственной формой УДЭ. При этом, последний испытан в составе ВЗС беговой дорожки космонавтов для Международной космической станции. Эксперименты с образцами (рис. 12, 13) производились на ряде стендов для статических и динамических испытаний: «WTW TCD-C», установке ПВИ-01/03 и др. Для виброизолятора с радиусной формой УДЭ максимальное расхождение теоретической и экспериментальной нагрузочной характеристики не превышает 10% (рис. 14). Для виброизоляторов с пространственной формой УДЭ получены поля гистерезисных петель при испытании вдоль осей x, y, z. Безразмерные нагрузочные характеристики виброизоляторов параметрического ряда вдоль каждой из осей близки между собой, что позволило аппроксимировать их выражением

$$\beta = 4,5882\zeta^3 - 10,0945\zeta^2 + 11,7259\zeta \quad (11)$$



Рис. 13. Один из экспериментальных образцов тросового виброизолятора с радиусной формой УДЭ



Рис. 14. Сравнение результатов расчёта характеристик образца (рис. 13) с экспериментальными данными

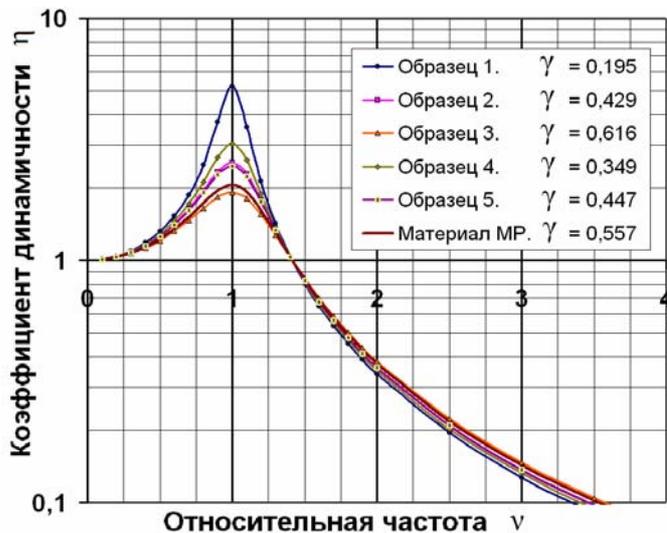


Рис. 15. АЧХ исследуемых виброизоляторов, тип которых показан на рис. 12

Изучение колебаний виброизоляторов (рис. 12) производилось как теоретически, так и экспериментально на динамическом стенде с кинематическим возбуждением «VS-300-2». На основании проведенных расчётов и испытаний была построена серия амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) виброизоляторов с использованием средних коэффициентов демпфирования (рис. 15). Установлено, что исследованные виброизоляторы обеспечивают значения коэффициента динамичности на резонансе, соизмеримые с лучшими образцами материала МР и пакетов лент. Нагрузочные характеристики, рассчитанные по предложенной

на резонансе, соизмеримые с лучшими образцами материала МР и пакетов лент. Нагрузочные характеристики, рассчитанные по предложенной

методике, лучше согласуются с экспериментом, чем полученные на базе известных способов. Максимальное расхождение не превышает 10% .

В четвертой главе дано описание конструкций, особенностей и принципов работы виброизоляторов с прямолинейными, радиусными и пространственными формами упругой линии, созданных и проработанных автором или с его участием в процессе исследований, с целью практического применения предложенных методик расчёта характеристик и построенных параметрических рядов.

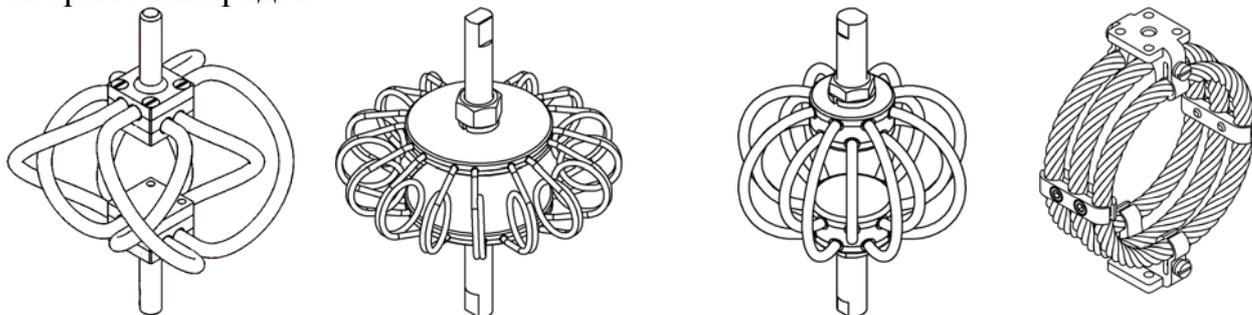


Рис. 16. Конструктивные схемы предложенных автором новых пространственных виброизоляторов

Сформулированы основные направления дальнейших исследований в данной области.

В приложении приведены справочные данные, используемые в методиках расчёта виброизоляторов, построения их параметрических рядов и документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Выполнен научно обоснованный комплекс теоретико-экспериментальных исследований, направленных на расширение качественных и количественных возможностей виброзащитных систем за счёт создания новых конструктивных схем и уточнённых методик расчета упругодемпфирующих характеристик параметрических рядов виброизоляторов с варьируемой формой гибких тросовых элементов. При этом получены следующие результаты:

1. На базе теорий подобия и изгиба гибких стержней Е.П. Попова, методов конечных элементов, Мора и конструкционного демпфирования разработаны методики расчёта нагрузочных, жесткостных и демпфирующих характеристик тросовых виброизоляторов пространственного нагружения, с прямолинейными, радиусными и пространственно ориентированными участками, учитывающие соизмеримые с геометрией элементов перемещения точек приложения деформирующих сил. Теоретически установлена и экспериментально доказана целесообразность их применения в расчётах, что позволило обеспечить минимальный коэффициент динамичности механической системы при переходе через резонанс (2,0...2,5) и высокую степень эффективности виброизоляции (85...99)%.

2. С использованием результатов математического исследования созданы ряды типоразмеров виброизоляторов, подобные по упругодемпфирую-

щим свойствам и обеспечивающие идентичность динамических свойств механических систем, существенно удешевляя и упрощая технологии их проектирования.

3. При исследовании УДЭ из нескольких связанных колец выявлено новое свойство конструктивной схемы такого типа: наличие области квази-нулевой жесткости на нагрузочной характеристике. Обоснована целесообразность создания несущих высокоэффективных тросовых виброизоляторов с квазиинулевой жесткостью, что позволяет обеспечить почти стопроцентную эффективность виброизоляции. Разработан параметрический ряд тросовых виброизоляторов с квазиинулевой жесткостью на номинальные массовые нагрузки от 0,1 до 100 кг, использование которого существенно снижает сроки проектирования систем виброзащиты.

4. На базе метода минимума потенциальной энергии создана уточненная методика расчёта упругодемпфирующих характеристик тросового виброизолятора (патент РФ № 2199683) с пространственной формой элементов. Новая методика учитывает изменение формы УДЭ в зависимости от размеров крепежных обойм, а также эллипсность поперечных сечений проволок троса. Это дало возможность внедрить технологию сборки и методику расчёта характеристик виброизолятора, в серийное производство НПЦ «ИНФОТРАНС» (г. Самара).

5. Результаты диссертации использованы при разработке систем виброизоляции приборов и оборудования в ООО «Астрон» (г. Самара), НПЦ «ИНФОТРАНС» (г. Самара), НИЦ «Путеец» (г. Новосибирск), а также в СГАУ: при доводке ВЗС разрабатываемой беговой дорожки космонавтов и в учебном процессе. На большинство рассмотренных в работе и внедренных средств виброзащиты получены патенты Российской Федерации: патенты №№ 78540, 83113, 84486, 85594, 96921, положительные решения Роспатента о выдачи патентов на полезную модель по заявкам №№ 2010120075/11, 2010120146/11, 2010128861/11.

Основные положения диссертационной работы опубликованы:

- в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. 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.

2. 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.

- в других изданиях:

3. Гвоздев, А.С. Экспериментальное получение и анализ статических характеристик тросовых виброизоляторов [Текст] / А.С. Гвоздев // Гагаринские чтения: труды XXXIV международной молодежной научной конференции, 2-3 апреля 2008. – М.: МАТИ, 2008. – С. 74-76.

4. Мелентьев, В.С. Разработка и экспериментальное подтверждение математической модели тросовых виброизоляторов [Текст] / В.С. Мелентьев, А.С. Гвоздев, Ю.К. Пономарев // Новые материалы и технологии в машиностроении: труды VIII международной научно-технической интернет-конференции, 1 мая – 31 мая 2008. – Брянск: БГИТА, 2008. - С. 47-51.

5. Гвоздев, А.С. Анализ динамических характеристик тросовых виброизоляторов [Текст] / А.С. Гвоздев// Инновационные технологии в проектировании: материалы международной заочной конференции молодых ученых, студентов и специалистов, 10-15 мая 2008. – Пенза: ПГУ, 2008. – С. 42-43

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

7. Гвоздев, А.С. Анализ и алгоритм расчёта тросовых виброизоляторов [Текст] / А.С. Гвоздев, В.С. Мелентьев, Ю.К. Пономарев // Новые материалы и технологии – НМТ-2008: труды всероссийской научно-технической конференции, 11-12 ноября 2008. – М.: МАТИ, 2008. – С. 57-58.

8. Гвоздев, А.С. Перспективная методика расчёта пространственных тросовых виброизоляторов [Текст] / А.С. Гвоздев, Ю.К. Пономарев // Молодежь, техника, космос: материалы II общероссийской молодежной научно-технической конференции, 17-19 марта 2009. – С-Пб.: БГТУ, 2009. – С. 141.

9. Малов, А.В. Исследование характеристик виброизолятора с упругими элементами, имеющих несколько точек перегиба [Текст] / А.В. Малов, А.С. Гвоздев, В.С. Мелентьев // Королевские чтения: материалы X всероссийской молодежной научной конференции с международным участием, 6-8 октября 2009. – Самара: СГАУ, 2009. – С. 137.

10. Глебов, А.Ю. Проектирование тросового виброизолятора с ансамблем пространственно ориентированных упругодемпфирующих элементов [Текст] / Глебов А.Ю., Казаков А.С., Гвоздев А.С. // Королевские чтения: материалы X всероссийской молодежной научной конференции с международным участием, 6-8 октября 2009. – Самара: СГАУ, 2009. – С. 132.

11. Гвоздев, А.С. Разработка параметрического ряда тросовых виброизоляторов с П-образной формой упругого элемента [Текст] / А.С. Гвоздев, Ю.К. Пономарев // Наука и образование транспорту: материалы III всероссийской научно-практической конференции, 11-12 ноября 2010. – Пенза: ПТЖТ, 2010. – С. 214-216.

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.