

УДК 620.22:629.7

## УПРУГОДЕМПФИРУЮЩИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ ИЗ ПРОВОЛОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

© 2014 А.И. Ермаков, Г.В. Лазуткин, Ф.В. Паровай,  
К.В. Бояров, П.В. Бондарчук, Д.П. Давыдов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Цельнометаллические виброизоляторы широко применяются в виброзащитных системах благодаря высокой прочности, большому ресурсу и большому коэффициенту рассеивания энергии. Упругодемпфирующие элементы этих виброизоляторов изготавливаются из прессованных проволочных материалов, таких, как МР (Россия) и Spring Cushion (Германия). Показаны конструкции наиболее распространённых виброизоляторов из материала МР (серии ДКУ и ВВ), а также технология их изготовления. Приведена конструкция виброизолятора фирмы STOP-СНОС. Проведено сравнение несущей способности, коэффициента рассеивания энергии, ресурса, габаритно-массовых и амплитудно-частотных характеристик виброизоляторов, изготовленных из двух материалов. Установлено, что виброизолятор из материала МР по сравнению с виброизолятором из материала Spring Cushion при сходном ресурсе имеет более высокие несущую способность (в 3 – 4 раза) и демпфирующие свойства (в 1.5 – 2 раза). Виброизоляторы из материала МР типов ВВМ-70 и ДКУ-90 по сравнению с виброизолятором из материала Spring Cushion обеспечивают более низкие (в 1.5 – 2 раза) коэффициенты усиления и частоты на резонансных режимах колебаний, что обуславливает более высокие виброзащитные свойства.

*Материал МР, виброизолятор, упругодемпфирующие характеристики, коэффициент рассеяния, амплитудно-частотные характеристики, резонансные режимы.*

Для повышения вибропрочности и надёжности агрегатов и систем авиационных двигателей и другой современной техники в России и за рубежом широко применяются виброизоляторы, изготавливаемые из проволочных материалов [1, 2, 3]: в России - из нетканого материала "металлорезина" (МР), разработанного в КуАИ-СГАУ; за рубежом - из тканого материала Spring Cushion, созданного в Германии. Поэтому оценка эффективности применения тех или иных типов виброизоляторов на базе исследования их упругодемпфирующих и динамических характеристик является актуальной задачей.

В настоящей работе проводилось исследование статических и динамических характеристик трёх виброизоляторов различных типов: ДКУ-90-150/7 (РФ) (рис. 1) и ВВМ-70 (РФ) (рис. 2), созданных на базе материала МР, а также STOP-СНОС V118D-GS (Германия), изготовленного из Spring Cushion (рис. 3), подобранных на одинаковую номинальную

(массовую) нагрузку 700Н в соответствии с данными [2] и каталога [3] (далее по тексту ВВМ-70, ДКУ-90 и STOP-СНОС соответственно).

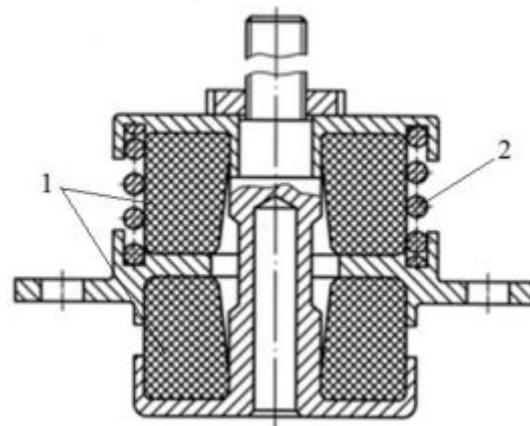


Рис. 1. Виброизолятор ВВМ-70:  
1 - упругодемпфирующий элемент,  
2 - разгрузочная пружина

Материал МР представляет собой пористую волоконную структуру, получаемую холодным прессованием проволочных спиралей в окончательные по

форме и размерам детали [2]. В качестве исходного материала для изготовления МР применяется металлическая проволока различных марок, определяемых условиями работы детали из МР: температурным режимом, наличием агрессивной среды, характером приложения нагрузки и т.п.

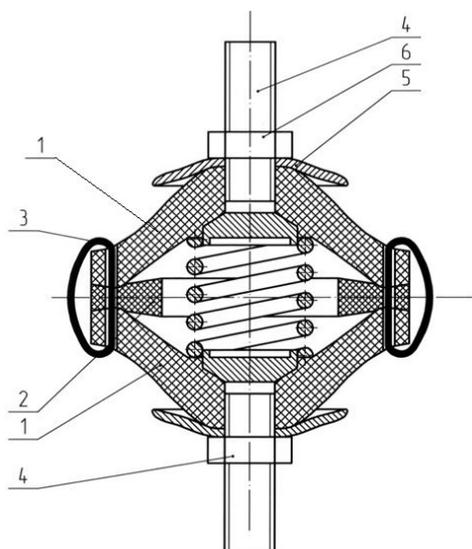


Рис. 2. Виброизолятор ДКУ-90:  
1- упругодемпфирующий элемент;  
2 - проставка; 3 - сшивная проволока;  
4- крепёжные болты;  
5 - ограничивающая шайба; 6- гайка

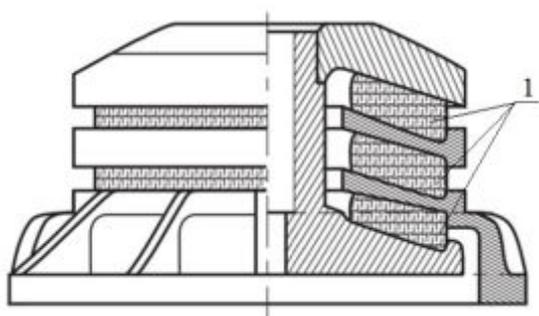


Рис. 3. Виброизолятор STOP-CHOC V118D-GS:  
1- УДЭ

Известно, что технологии производства виброизоляторов, и особенно, их упруго-демпфирующих элементов (УДЭ), являются основными факторами, определяющими их виброзащитные свойства.

Для изготовления деталей из материала МР проволока диаметром от 0,03 до 0,3 мм [1] навивается в спираль (плотно виток к витку), диаметр которой может составлять 5–15 диаметров проволоки.

Технологические процессы изготовления материала МР [2] основаны на навивании спирали, её дозировании, растягивании до шага, равного её диаметру, формировании из растянутой спирали заготовки и прессования в пресс-форме, соответствующей форме готового изделия. Такая технология является наиболее общей для производства упругодемпфирующих элементов различных типов. Так, например, изготовление УДЭ в виде цилиндров, втулок, кубиков, шайб, мембран и т. п. включает в себя следующие основные операции.

Растянутые отрезки спиралей определённым образом укладывают в прямоугольный коврик равномерными слоями, а затем складывают в ленту с нахлёстом (рис. 4).



Рис. 4. Схема формирования ленты из коврика

На следующем этапе производства УДЭ получают его заготовку путём скатывания предзаготовки – ленты - в рулон на технологическом стержне (рис. 5).

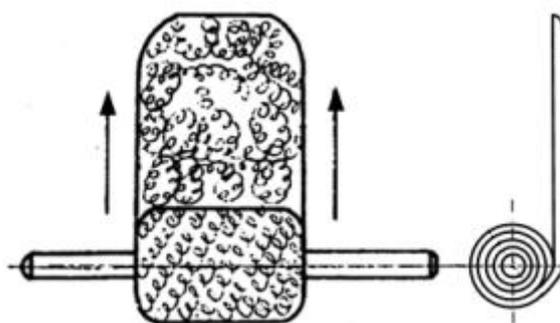


Рис. 5. Процесс скатывания ленты в рулон

На заключительном этапе производства заготовку УДЭ, размещённую в

пресс-форме, подвергают давлению прессования, получая при этом прессовку высотой  $H$  (рис. 6). После этого снижают давление прессования до нуля и извлекают прессовку УДЭ из пресс-формы, получая в результате готовое изделие высотой  $H_c$ , большей, чем высота прессовки, на величину упругого последействия  $\Delta H = H_c - H$  [2]. Эта величина определяет упругие возможности и ресурс при работе виброизоляторов втулочного типа.

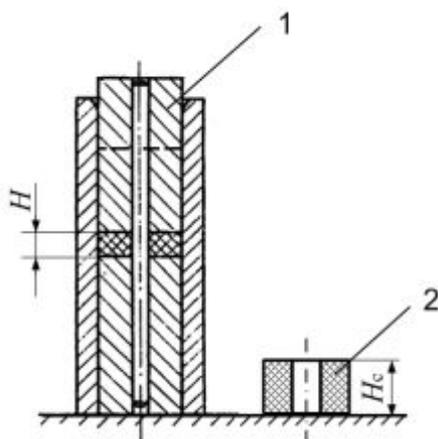


Рис. 6. Процесс прессования втулочного УДЭ: 1 - прессовка; 2 - готовый УДЭ

При изготовлении УДЭ колоколообразной формы дозированную по массе спираль укладывают в клубок шаровидной формы. Шар прокалывают по диаметру иглой и помещают во втулку пресс-формы, которую укомплектовывают пуансоном и матрицей (рис. 7). Затем заготовку прессуют, после чего готовый УДЭ колоколообразной формы извлекают из пресс-формы. Для увеличения статической прочности и повышения демпфирующей способности УДЭ армируют проволочным жгутом (прядью).

В СГАУ разработан универсальный способ армирования УДЭ [2], отличающийся широкими возможностями управления прочностными и демпфирующими характеристиками. Это достигается с помощью включения в массив материала МР высокопрочного армирующего элемента (АЭ), изготовляемого из специального проволочного жгута.

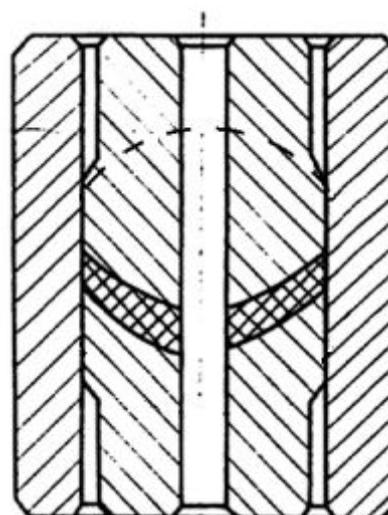


Рис. 7. Процесс прессования УДЭ колоколообразной формы: - - - заготовка УДЭ; — прессовка

Жгут (рис. 8) представляет собой проволочную прядь, обмотанную с натяжением либо спиралью виток к витку (тип 1), либо нитью проволоки (тип 2). Повышенная демпфирующая способность УДЭ обеспечивается за счёт дополнительной диссипации энергии на границах АЭ с массивом материала МР и в самом АЭ. Высокая прочность виброизоляторов достигается путём охвата специальным жгутом всех крепёжных отверстий в УДЭ.



Рис. 8. Типы специальных жгутов: 1 – тип 1; 2 – тип 2

Технологический процесс изготовления армированного УДЭ состоит из трёх основных этапов. На первом этапе из проволочной спирали формируются две колоколообразные заготовки УДЭ (рис. 9). На втором этапе из жгута изготавливается АЭ, который при необходимости можно спрессовать по форме готового. На третьем этапе АЭ заключается в массив проволочных спиралей заготовок УДЭ (рис. 10) и обматывается проволочной спиралью, а затем с помощью холодного прессования (рис. 7) производится окончательное формирование УДЭ (рис. 11).



Рис. 9. Заготовки УДЭ



Рис. 10. Элемент армирующий

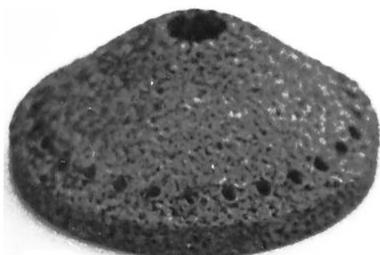


Рис. 11. Элемент упругодемпфирующий

Впоследствии из них изготавливаются виброизоляторы типа ДКУ, которые, как и ВВМ-70, могут снабжаться разгрузочной пружиной и проставкой, увеличивающей упругие возможности конструкции.

Тканый материал Spring Cushion, в отличие от МР, имеет упорядоченную структуру за счёт применения сплетённого определённым образом чулка. При этом получают УДЭ втулочного, конического и других типов, которые применяются в виброизоляторах и демпферах, например, в виброизоляторах STOP-СНОС V118D-GS [3].

Возможность реализации наилучших виброзащитных свойств для различных технологий производства УДЭ и конструкций виброизоляторов осуществлялась при сравнительных испытаниях.

В таблице 1 приведены массовые и габаритные характеристики сравниваемых виброизоляторов.

Таблица 1 - Массовые и габаритные характеристики виброизоляторов

Тип	Масса, кг	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм
ДКУ-90	1,6	102	102	112
STOP-СНОС	2,4	130	130	98
ВВМ-70	0,4	64	64	51

Статические характеристики определялись в виде форм петель гистерезиса при изменяющихся размахах нагрузок относительно центра статического равновесия, получаемого при постоянно действующей массовой нагрузке  $F_p=700\text{Н}$  (рис. 12).

По получаемым при этом петлям гистерезиса определялась демпфирующая способность виброизоляторов в виде зависимостей коэффициента рассеяния  $\psi$  от размахов циклически изменяющихся нагрузок:

$$\psi = \frac{8\Delta W}{W}. \quad (1)$$

При статических испытаниях на установке GALDABINI Quasar 25 образцы первоначально стабилизировались до нагрузки 2100 Н, соответствующей максимально допустимым рабочим усилиям, а затем полностью разгружались. В дальнейшем проводилось испытание по тренировке образца, заключающееся в постепенном уменьшении нагрузки от максимального значения 2100 Н до минимального значения  $F_p = 700\text{ Н}$ , соответствующего центру статического равновесия. При этом на каждом цикле  $i$  деформирования образца размах  $\Delta P_i$  составлял:

$$F_m = F_{\max,i} - F_{\min,i}. \quad (2)$$

В этом выражении  $F_{\max,i}$  и  $F_{\min,i}$  - соответственно максимальная и минимальная нагрузка на образец, равные:

$$F_{\max,i} = 2100 - 0,2 \cdot F_p \cdot i; [\text{Н}], \quad (3)$$

$$F_{\min,i} = 700 + 0,1 \cdot F_p \cdot i; [\text{Н}]. \quad (4)$$

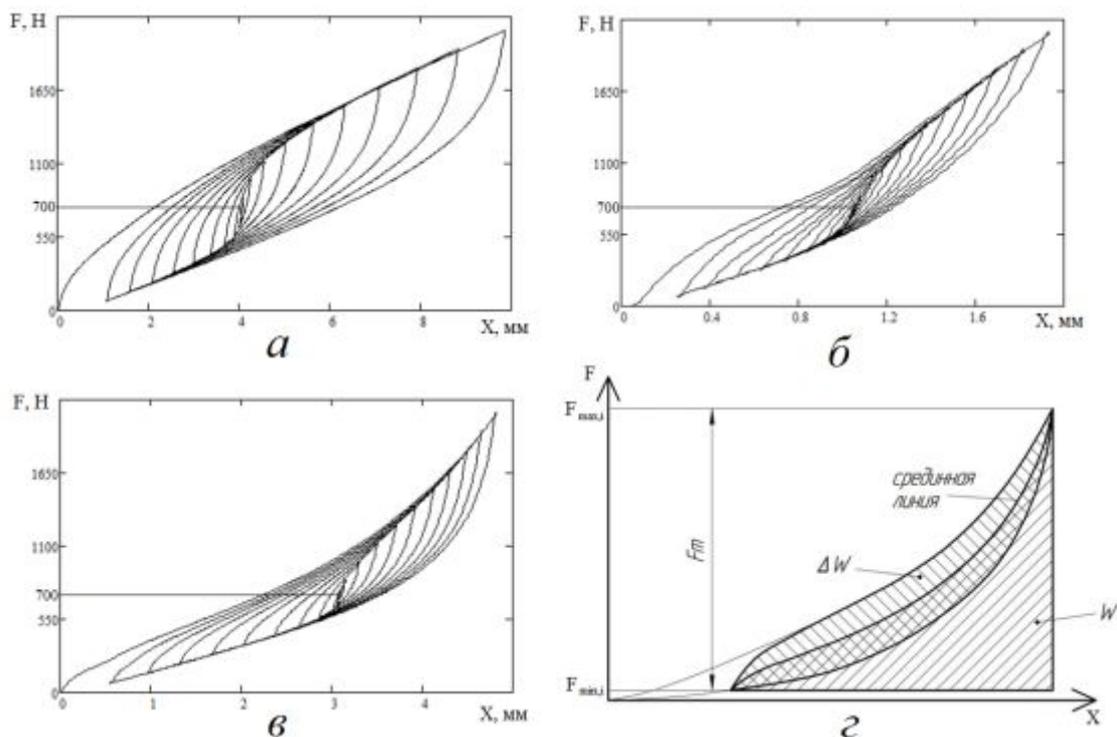


Рис. 12. Процессы деформирования для виброизоляторов: а) ДКУ-90; б) STOP-СНОС; в) ВВМ-70; г) схема к формуле (1)

Впоследствии полученные процессы деформирования приближённо принимались как соответствующие процессы при циклическом деформировании виброизоляторов (рис. 12).

По результатам статических испытаний виброизоляторы (рис. 1, 2, 3) сравнивались по коэффициенту рассеяния энергии  $\psi$  и коэффициенту жёсткости  $C$  в зависимости от размахов по нагрузке:

$$C_i = \frac{\Delta F_i}{X_{i\max} - X_{i\min}}. \quad (5)$$

Значения  $\psi$  для разных значений  $F_m$ , найденные по формулам (1) и (2) соответственно, представлены на рис. 13.

Из графиков видно, что наибольший коэффициент рассеяния имеет виброизолятор ДКУ-90, превосходя аналогичный коэффициент для виброизолятора STOP-СНОС почти в два раза, а для ВВМ-70 - в полтора раза. Отметим, что полученные результаты для виброизоляторов STOP-СНОС и ВВМ-70 достаточно хорошо согласуются с полученными ранее данными для материалов Spring Cushion (Германия) и МР (Россия), приведёнными в работе [1].

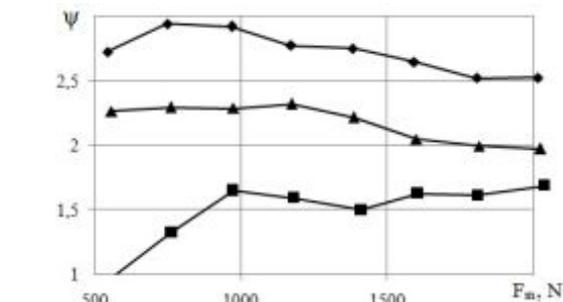


Рис. 13. Зависимость коэффициента рассеяния от размахов нагрузки:

◆ ДКУ-90; ■ STOP-СНОС; ▲ ВВМ-70

При вибрационных испытаниях, которые проводились на вибростенде ВЭДС-1500 с массой величиной 70 кг на виброisolаторе и кинематическом способе гармонического возбуждения колебаний, определялись АЧХ виброизоляторов (рис. 11) в виде зависимости коэффициента усиления  $\mu = A/A_0$  от частоты возбуждения  $f$ .  $A_0$  - амплитуда возбуждающего виброперемещения, измеряемая на столе вибростенда,  $A$  - амплитуда виброперемещения на массе. Также определялась зона, в которой коэффициент усиления  $\mu$  становился меньше единицы.

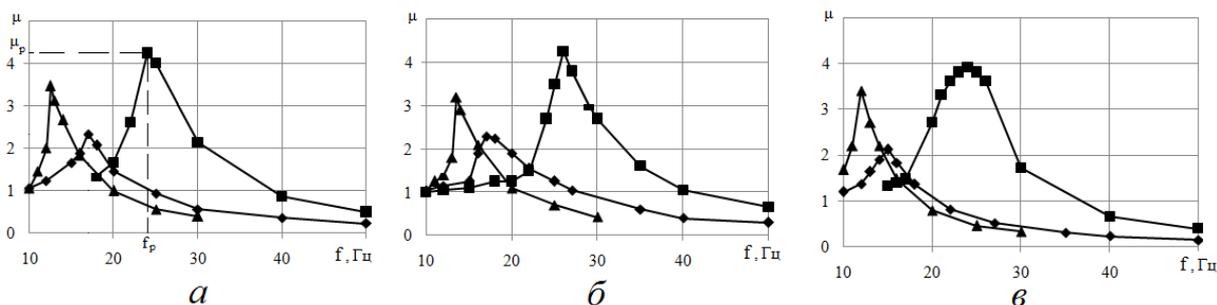


Рис. 14. АЧХ виброизоляторов для различных амплитуд кинематического гармонического возбуждения: а -  $A_0=0,2$  мм; б -  $A_0=0,3$  мм; в -  $A_0=0,5$  мм; ◆ ДКУ-90; ■ STOP-СНОС; ▲ ВВМ-70

Из приведённых на рис. 14 зависимостей АЧХ видно, что виброизолятор STOP-СНОС имеет худший среди трёх изделий коэффициент усиления на резонансе (около 4) по сравнению с российскими аналогами (2,5 для ДКУ-90; 3,5 - для ВВМ-70). Кроме того, зона виброизоляции для виброизолятора STOP-СНОС начинается в районе от 40 Гц и выше, в то время как у ДКУ-90 и ВВМ-70 зона виброизоляции начинается от 20...30 Гц, в зависимости от амплитуды возбуждения.

Был проведён расчёт зависимости жёсткости виброизоляторов от размаха нагрузки. Результат приведён на рис.15.

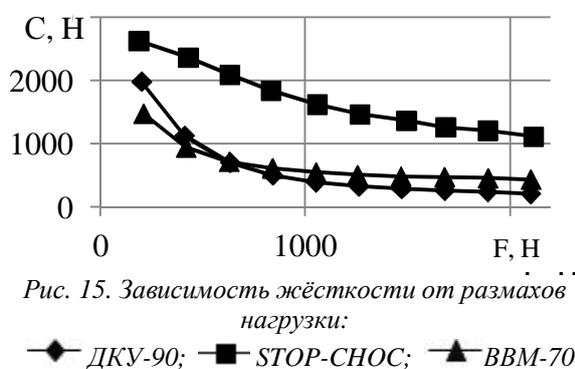


Рис. 15. Зависимость жёсткости от размахов нагрузки: ◆ ДКУ-90; ■ STOP-СНОС; ▲ ВВМ-70

Таким образом, обобщая полученные в работе результаты исследования по сравнению российских и зарубежных виброизоляторов из проволочных материалов (МР и Spring Cushion), а также результаты работы [1], можно сделать следующие выводы:

1. Нетканый материал МР (РФ) по сравнению с материалом Spring Cushion (Германия) имеет более высокую несущую способность (в 3-4 раза) и демпфирующие свойства (в 1,5-2 раза).

2. Виброизоляторы на нагрузку 70 кг, выбранные по каталогам, из материала МР типов ВВМ и ДКУ по сравнению с виброизоляторами фирмы STOP-СНОС обеспечивают более низкие (в 1,5-2 раза соответственно) коэффициенты усиления и частоты на резонансных режимах колебаний систем виброзащиты, что в целом обуславливает более высокие виброзащитные свойства виброизоляторов из материала МР разработки СГАУ.

3. Виброизоляторы, как правило, относятся к продукции двойного назначения, что является мощным ограничивающим фактором применения в России зарубежных виброизоляторов. Указанное обстоятельство приводит к необходимости использования виброизоляторов только российского производства, в частности разработки СГАУ из материала МР, особенно для тяжёлых и экстремальных условий эксплуатации систем виброзащиты современной техники.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления правительства РФ №218 от 09.04.2010.

### Библиографический список

1. Пономарёв Ю.К., Уланов А.М. Сравнение российских и зарубежных виброизоляторов из проволочных демпфирующих материалов // Известия СНЦ РАН. 2009. Т. 11, № 3(1). С. 214-218

2. Лазуткин Г.В. Динамика виброзащитных систем с конструкционным

демпфированием и разработка виброизоляторов из проволочного материала MR. Самара: СамГУПС, 2010. 291 с.

3. Каталог виброизоляторов STOP-CHOC, Elastische Elemente für Rohrleitungen in Anlagen und Schiffen.

### **Информация об авторах**

**Ермаков Александр Иванович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: fdla@ssau.ru. Область научных интересов: динамика и прочность машин.

**Лазуткин Геннадий Васильевич**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: lazutkin.gennadij@mail.ru. Область научных интересов: теория нелинейных колебаний, виброзащита, теория и технология производства упругодемпфирующего материала MR.

**Паровой Фёдор Васильевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: parovai@mail.ru. Область научных инте-

ресов: виброзащита, теория и технология производства упругодемпфирующего материала MR.

**Бояров Константин Владиславович**, магистрант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: konst90@gmail.com. Область научных интересов: виброзащита, физическое и математическое моделирование сложных систем конструкционного демпфирования.

**Бондарчук Пётр Владимирович**, младший научный сотрудник, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: bond\_ssau@mail.ru. Область научных интересов: динамика виброзащитных систем.

**Давыдов Данила Петрович**, младший научный сотрудник, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: dpdavydov@yandex.ru. Область научных интересов: виброзащита, динамика и прочность машин.

## **ELASTIC DAMPING AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF VIBRATION ISOLATORS MADE OF WIRE MATERIALS OF DIFFERENT TYPES**

© 2014 A.I. Yermakov, G.V. Lazutkin, F.V. Parovay,  
K.V. Boyarov, P.V. Bondarchuk, D.P. Davydov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

A technology of manufacturing all-metal vibration insulation elastic-damping elements made of different wire materials (Metal Rubber, MR – Russia, Spring Cushion – Germany) is presented in the paper. Elastic-damping, amplitude-frequency and mass-overall characteristics of three types of Russian and German vibration insulators are obtained and compared. On the basis of these results the main conclusions on different types of vibration insulators are formulated and recommendations for the application of MR vibration insulators in the world practice of vibration protection are given. The results of research and comparison of static, dynamic and mass-overall characteristics of three different types of vibration insulators are presented in the paper.

*MR material (Metal Rubber), Spring Cushion, vibration insulator, elastic-damping characteristics, energy dissipation coefficient, amplitude-frequency characteristics, resonance operating mode.*

### References

1. Ponomaryov Y.K., Ulanov A. M. Comparison of Russian and foreign vibration insulators made of wire damping materials // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2009. V. 11, no. 3(1). P. 214-218. (In Russ.)
2. Lazutkin G. V. *Dinamika vibrozashchitnykh sistem s konstruktsionnym dempfirovaniem i razrabotka vibroizolyatorov iz provolochnogo materiala MR* [Dynamics of vibration protection systems with structural damping and design of vibration insulators made of wire material MR]. Samara: Samara State University of Transport Publ., 2010. 291 p.
3. Catalogue of vibration insulators of STOP-CHOC, *Elastische Elemente für Rohrleitungen in Anlagen und Schiffen*.

### About the authors

**Yermakov Alexander Ivanovich**, Doctor of Science (Engineering), Professor of the of Aircraft and Spacecraft Engine Design Department, Samara State Aerospace University. E-mail: fdla@ssau.ru. Area of Research: dynamics and strength of machines.

**Lazutkin Gennady Vasilyevich**, Doctor of Science, Senior Researcher, Samara State Aerospace University. E-mail: lazutkin.gennadij@mail.ru. Area of Research: theory of non-linear vibration, protection against vibration, theory and technology of producing elastic-damping MR material.

**Parovay Fyodor Vasilyevich**, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the of Aircraft and Spacecraft Engine Design Department, Samara State Aerospace University. E-mail: parovai@mail.ru. Area of Research: protection against vibra-

tion, theory and technology of producing elastic-damping MR material.

**Boyarov Konstantin Vladislavovich**, second-year Master' Degree Student of the Aircraft Engine Department, Samara State Aerospace University. E-mail: konst90@gmail.com. Area of Research: protection against vibration, physical and mathematical modeling of complex dry friction systems.

**Bondarchuk Pyotr Vladimirovich**, Junior Researcher, Samara State Aerospace University. E-mail: bond\_ssau@mail.ru. Area of Research: dynamics of vibration protection systems

**Davydov Danila Petrovich**, Junior Researcher, Samara State Aerospace University. E-mail: dpdavydov@yandex.ru. Area of Research: protection against vibration, dynamics and strength of machines.