

УДК 629.7

## РАСЧЁТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРУЖИННЫХ РАЗГРУЗОЧНЫХ И ПРОТИВОУДАРНЫХ УСТРОЙСТВ ЦЕЛЬНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛА МР

©2011 Г. В. Лазуткин<sup>1</sup>, Ф. В. Паровай<sup>2</sup>, М.А. Петухова<sup>1</sup>, А. А. Тройников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный университет путей сообщения

<sup>2</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Рассмотрены основные принципы конструирования и вопросы проектирования пружинных разгрузочных и противоударных устройств цельнометаллических многокомпонентных виброизоляторов на основе материала МР.

*Многокомпонентный виброизолятор, расчётная схема, пружинное разгрузочное устройство, противоударное устройство, материал МР, упругая характеристика.*

Анализ различных конструкций многокомпонентных виброизоляторов с применением материала МР [1,2] показывает, что пружинные разгрузочные устройства (ПРУ), выполненные на основе цилиндрических пружин, обеспечивают разгрузку упругодемпфирующих устройств (УДЭ) от излишней нагрузки, вызываемой весом ВС. Это позволяет при одинаковой конструкции УДЭ существенно повысить грузоподъемность виброизолятора в целом и, как следствие, понизить резонансную частоту и улучшить его виброзащитные характеристики. Использование пружин конического типа (рис. 1,а,б) в некоторой степени формирует грузоподъ-

емность виброизолятора, но их главная функция заключается в повышении энергоёмкости виброизолятора при его больших прогибах за счет увеличивающейся при этом жесткости конической пружины [1]. Аналогичную функцию выполняют противоударные элементы (рис. 1,в), вводимые в виброизоляторы как упругие ограничители хода. При этом методы расчета конструктивных параметров таких устройств неразрывно связаны с обеспечением ими выполнения заданных требований по статическим и динамическим нагрузкам, воздействующим на конструкцию виброизолятора в целом.

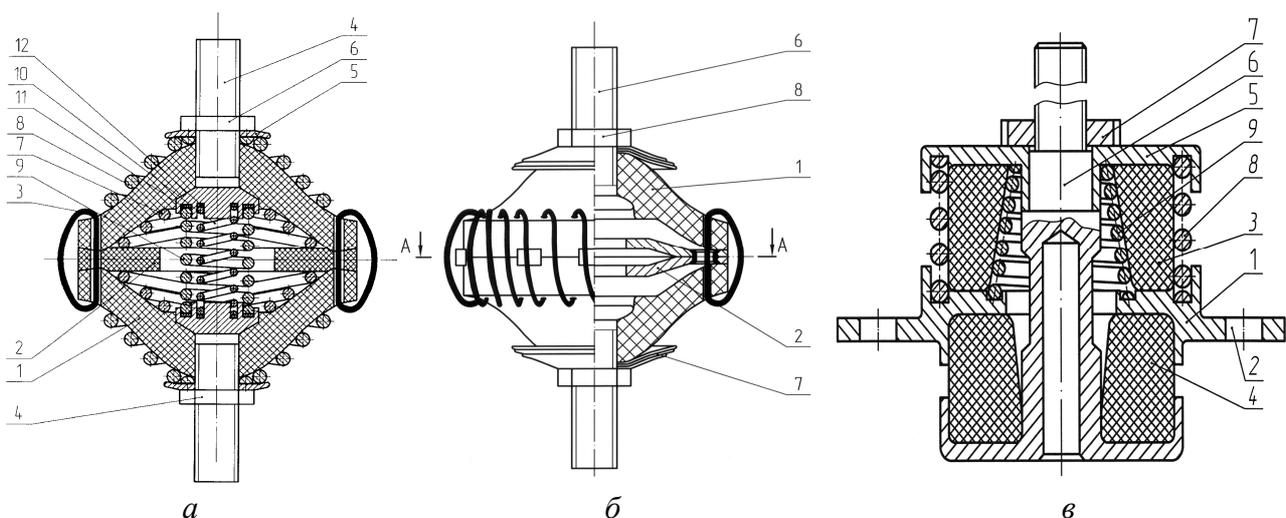


Рис. 1. Перспективные конструкции многокомпонентных виброизоляторов из материала МР

Опираясь на общую расчетную схему многокомпонентных виброизоляторов (см.

рис. 2), сформулируем основные конструктивные требования, предъявляемые к ПРУ:

- обеспечение требуемой несущей способности ПРУ (грузоподъемности или величины предварительного поджатия  $G_{пр} = K_p G$ , где  $K_p$  – коэффициент недогрузки ПРУ;  $G = G_{пр} + G_b$ , где  $G_b$  – часть

весовой нагрузки  $G$ , воспринимаемой виброизолятором - прототипом);

- обеспечение работоспособности ПРУ в пределах допускаемых прогибов  $x_{с,н}^*$  и  $x_{с,р}^*$ .

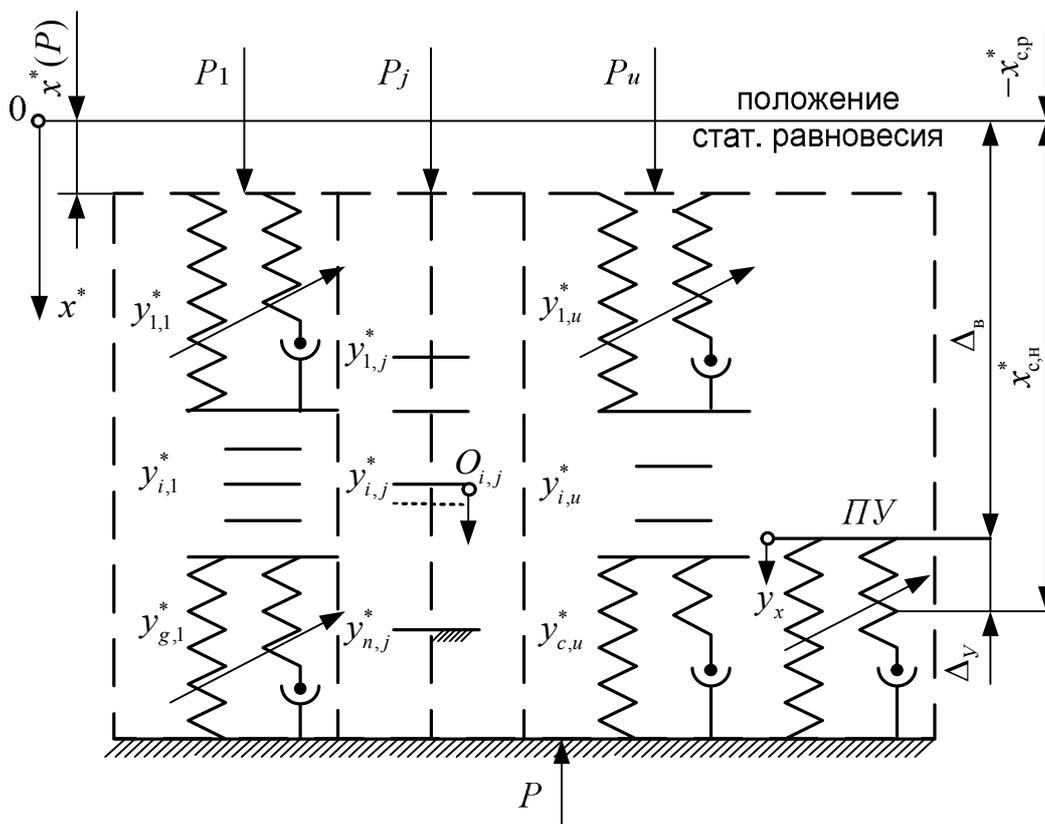


Рис. 2. Принципиальная схема многокомпонентных виброизоляторов:

$[x_{с,н}^*; x_{с,р}^*]$  - диапазон допустимых деформаций;  $(\Delta_B + x_{с,р}^*)$  - свободный ход;  $\Delta_y$  - деформация ПУ

Другая часть требований вызвана условиями конструктивной совместимости виброизоляторов - прототипов, ПРУ и других компонент проектируемых виброизоляторов:

- высотой  $H_{сж}$  полностью сжатой пружины и в свободном состоянии -  $H_{св} = H_{сж} + H_y$ ,  $H_y = K_{зп}(x_{с,н}^* + x_{с,р}^*)$  – допустимая величина прогиба пружины ПРУ;  $K_{зп} - 1,2 \div 1,4$  – коэффициент запаса на пространственный характер прогибов ПРУ;

- наружным  $D_n$  и внутренним  $D_b$  диаметром пружины, в зависимости от конструкции виброизолятора-прототипа;

- приближенным или неполным геометрическим подобием основных форм виброизоляторов - прототипов и других компонент, сопрягаемых с ПРУ.

Требования к основным конструктивным параметрам пружин ПРУ определяются из найденных потребных УГХ ( $T_n^{(M)}$  и  $a_n^{(M)}$ ) проектируемых виброизоляторов и связанных с ними величин  $x_{с,н}^*$ ,  $x_{с,р}^*$ ,  $\Delta_B$ ,  $\Delta_y$  (см. рис. 1,2) для прототипов, а также грузоподъемностью и ограничениями по габаритно-массовым характеристикам создаваемых конструкций.

Как известно, расчет конструктивных параметров пружины можно осуществлять на основе величин потребных жесткости пружины  $C_{пр}$  и допустимого прогиба  $H_y$  из условия обеспечения ее прочности и несущей способности  $G_n$ . При этом необходимо рассмотреть как возможные реализации

конструкции ПРУ два варианта расчета пружин, основанных на выборе допускаемого упругого прогиба  $H_y = K_{зп}(x_{с,н}^* + x_{с,р}^*)$  и  $H_y \gg x_{с,н}^*$ .

Воспользуемся существующими методиками расчета пружин [3], с помощью которых определяют конструктивные параметры: толщина проволоки  $d_0$ , число рабочих  $n_p$  и опорных  $n_{оп}$  витков пружины. Тогда, исходя из вышеизложенных условий, рассмотрим один из методов расчета конструктивных параметров пружины для случая  $H_y = K_{зп}(x_{с,н}^* + x_{с,р}^*)$ .

В этом случае потребная жесткость пружины  $C_{пр}$  и диаметр проволоки, из которой она свита, будет определяться соотношениями

$$C_{пр} = \frac{G_M d_0^4}{8D_c^3 n_p}; \quad d_0 = 1,37 \sqrt[3]{\frac{K P_{py} D_c}{[\tau]}};$$

$$K = \frac{4\bar{D}_c + 2}{4D_c - 3}; \quad \bar{D}_c = \frac{D_c}{d_0}, \quad (1)$$

где  $G_M$  - модуль упругости;  $[\tau]$  - допускаемое напряжение, причем максимальная нагрузка на ПРУ составит

$$P_{py} = K_p G + K_{зп} C_{пр} x_{с,н}^*;$$

$$D_c = D_{нв} + (-1)^m d_0;$$

$$m = \begin{cases} 1, \forall D_{нв} \in \{D_H\} \\ 2, \forall D_{нв} \in \{D_B\} \end{cases}. \quad (2)$$

С помощью выражений (1) и (2) можно получить уравнение, связывающее в неявном виде величины  $C_{пр}$ ,  $n_p$  и  $d_0$ , соответственно при заданных или известных значениях  $G_M$ ,  $[\tau]$ ,  $D_H$  или  $D_B$

$$\Phi(C_{пр}, n_p, d_0, G_M, [\tau], D_{н,в}) = 0 \quad (3)$$

Разрешим уравнение (3) относительно указанных величин с учетом условий совместности ПРУ с прототипом. Выражение для потребной жесткости  $C_{пр}$  можно записать в виде

$$C_{пр} = \frac{P_{py}}{K_{зп}(x_{с,р}^* + x_{с,н}^*)} = \frac{K_p G}{K_{зп} x_{с,р}^*}. \quad (4)$$

Тогда выражение для определения диаметра  $d_0$  проволоки примет вид

$$d_0 = \left( 1 + (-1)^m \frac{d_0^*}{3D_{нв}} \right), \quad (5)$$

$$\text{где } d_0^* = 1,37 \sqrt[3]{\frac{K \cdot K_p G D_{нв} \left( 1 + \frac{x_{с,н}^*}{x_{с,р}^*} \right)}{[\tau]}}$$

$$K \approx 1,12.$$

При этом из выражения для определений потребной жесткости (1) и (4) запишем соотношение для потребного числа рабочих витков

$$n_p \cong \frac{K_{зп} G_M d_0^{*4} \left( 1 + (-1)^m \frac{4d_0^*}{3D_{нв}} \right)}{8K_p G \left( 1 + (-1)^m \frac{d_0^*}{D_{нв}} \right)^3 D_{нв}^3} \quad (6)$$

и высоты

$$H_{сж} = 1,12 d_0 (n_p + n_{оп} - 1). \quad (7)$$

При свободной установке опорных витков цилиндрической пружины на крышке и в корпус минимальное количество  $n_{оп} > 1$ . При резьбовом типе закрепления опорных витков в крышке и в корпусе  $n_{оп} > 2$ . Учитывая зависимость величины  $\Delta \bar{H}$  от технологических параметров изготовления УДЭ, получаем уравнения не только конструкционной (6) и (7), но и технологической совместности УДЭ и пружины

$$H_c = \begin{cases} \frac{1,12 d_0}{1 - \Delta \bar{H}} n_p, n_{оп} = 1; \\ \frac{1,12 d_0}{1 - \Delta \bar{H}} (n_p + 1), n_{оп} = 2; \end{cases} \quad (8)$$

Полученное уравнение вместе с условием совместности внутреннего диаметра пружины  $D_{в,пр}$  наружным диаметром УДЭ -  $D_{н,УДЭ}$

$$D_{в,пр} \cong D_{н,УДЭ}$$

являются основой при проектировании виброизоляторов втулочного типа с разгрузочной пружинкой и различными способами её закрепления при минимально возможных габаритах УДЭ. Последнее обеспечивается также существующими рекомендациями по выбору числа рабочих витков [3]  $n_p \geq 3$ .

С учетом изложенного и выражения (7) получаем

$$H_c \geq \begin{cases} \frac{3,36d_0}{1-\Delta\bar{H}}, & n_{on} = 1; \\ \frac{4,48d_0}{1-\Delta\bar{H}}, & n_{on} = 2; \end{cases} \quad (9)$$

Подобный подход, вместе с рассмотренным выше для виброизоляторов ДК, основывающиеся на анализе работоспособности конструкции прототипов с ПРУ, является достаточно общим, что позволяет вырабатывать с помощью выражений (8) и (9) основные принципы конструирования многокомпонентных виброизоляторов, включая и создание наиболее рациональных технологических процессов производства УДЭ из материала МР.

Обеспечение противоударной защиты ВС с помощью виброизоляторов общего применения является зачастую нерешаемой задачей из-за высокой энергии ударных нагрузок и сравнительно малой энергоёмкости виброизоляторов. Вместе с тем требования по виброизоляции защищаемых машин и их агрегатов, как правило, противоречивы с требованиями по противоударной защите. Поэтому поиск компромиссных решений по требуемым УГХ виброизоляторов возможен лишь для ограниченного круга задач вибро- и ударозащиты, осуществляемых с помощью специальных противоударных устройств (ПУ) (см. рис. 1,б и 2) с высокой энергоёмкостью.

Определение параметров упругой характеристики виброизолятора, обеспечивающей выполнение заданных требований по противоударной защите ВС, обычно решают в два этапа.

На первом этапе проводят предварительную оценку противоударных характеристик для виброизоляторов с конструкционным демпфированием, обеспечивающих выполнение требований по виброзащите ВС массой  $M$  (весом  $G$ ). При этом используются:

- заданные требования по воздействию ударным ускорениям  $J(t)$  с длительностью  $\tau_y$  и пиковой перегрузкой  $J_y$  ограничения по перемещениям ВС (допускаемым прогибам виброизоляторов  $x_\delta^{(TP)}$ ), коэффициент передачи удара  $\mu_\delta^{(TP)}$  и др.;

- линейная теория ударного нагружения ВС с помощью замены реальных форм ударного импульса эквивалентным прямоугольным с пиковой возбуждающей нагрузкой  $\beta_y = \bar{G}J_y$  и упругогистерезисной характеристикой (УГХ) виброизолятора в форме  $\eta = \xi + \sigma$ , где  $\eta, \xi$  - безразмерные нагрузка и деформация соответственно,  $\sigma$  - знак скорости  $\dot{\xi}$  [1,4].

В этом случае максимальный прогиб виброизолятора  $\xi_{m1}$  всегда реализуется на первом этапе движения ВС независимо от длительности удара. Последнее позволяет получить решение задачи о противоударной защите ВС из решения нелинейного дифференциального уравнения второго порядка в виде [4]

$$\xi_{m1} = \begin{cases} 2\sqrt{\beta_y(\beta_y - 1)\sin^2\frac{\theta_y}{2} + 0,25} - 1, & \theta_y < \theta_1; \\ 2(\beta_y - 1); & \theta_y > \theta_1 \end{cases} \quad (10)$$

где  $\theta_y = \tau_y \omega_\delta$ ;  $\theta_1 = \tau_1 \omega_\delta$  - соответственно безразмерные длительности удара и время завершения первого подэтапа движения ВС  $\tau_1$ , когда первый раз выполнится условие

$$\dot{\xi}(\theta_1) = 0; \quad \omega_\delta^2 = \frac{T_n^{(M)}}{a_n^{(M)}M}; \quad T_n^{(M)}, a_n^{(M)} - \text{коэф-}$$

фициенты подобных преобразований для УГХ виброизоляторов соответственно по

нагрузке и прогибам;  $\xi_{m1} = \frac{x_{m1}}{a_n^{(M)}}$  - безраз-

мерная максимальная деформация  $x_{m1}$ , соответствующая условию  $\dot{\xi}(\theta) = 0$ .

С помощью ранее найденных множества пар значений

$$\{T_{n,i}^{(M)}; a_{n,i}^{(M)}\} \forall i \in [1, 2 \dots N]$$

определим множество значений величин  $\{\beta_{y,i}\} \in \{J_{y,i} \cdot \bar{G}_i\}$ ,

а затем множество  $\{\theta_{y,i}\} \in \{\tau_y \cdot \omega_{\delta,i}\}$ . Эти

множества значений с помощью выражения (4.71) позволяют определить множество

$$\{\xi_{m,1}^{(i)}\}$$

и соответствующее ему множество

$$\{x_{m,1}^{(i)}\} \in \{\xi_{m,1}^{(i)} \cdot a_{n,i}^{(M)}\}$$

размерных прогибов виброизоляторов, а также множество

$\{\mu_{y,i}\} \in \left\{ \frac{\xi_{m,1}^{(i)} + 1}{\beta_{\varepsilon,i}} \right\}$ . Если внутри множеств

$\{x_{m,1}^{(i)}\}$  и  $\{\mu_{y,1}\}$  существует подмножество

$\{x_{m,1}^{(j)}\}$  и  $\{\mu_{y,j}\}$ ,  $\forall j \{m, m+1, \dots, n\}$ ,  $N \geq m \geq 1$ ,

для которых  $x_{m,1}^{(j)} \leq x_{\delta}^{(тт)}$  и  $\mu_{m,1}^{(j)} \leq \mu_{\delta}^{(тт)}$ , то

задача обеспечения противоударных характеристик виброизоляторов может быть решена. В противном случае заданные требования по противоударной защите не выполнимы. Однако если при этом внутри

подмножества  $\mu_{y,i}$  существует еще одно подмножество значений  $\mu_y \in \{\mu_{y,k}\}$

$\mu_{y,k} \ll \mu_y^{(тт)}$ , то технически оправданным

становится применение в виброизоляторах противоударных устройств. Тогда на втором этапе рассматривается задача выбора параметров упругих характеристик ПУ.

Как следует из проведенного анализа введение ПУ в конструкцию виброизолятора целесообразно при высокой энергии возбуждающих ударных импульсов  $J(t)$  с большим пиковым ускорением, но малой длительностью удара  $\tau_y \ll \frac{\pi}{\omega_{\delta}}$ . В этом случае на ос-

новании закона сохранения количества движения для первого подэтапа движения ВС можно записать

$$\int_0^{\tau_y} J(t) dt = \sqrt{\frac{2}{M} \int_0^{x_{m,1}^{(k)}} F_1(x) dx}, \quad (11)$$

где  $F_1(x)$  - реакция виброизолятора на первом подэтапе.

Оценивая диссипативные возможности виброизолятора-прототипа и ПУ коэффициентом восстановления удара  $K_{уд}$  и считая его  $K_{уд} \ll 1$ , можно воспользоваться при проектировочных расчетах, как и выше, рассмотрением только первого подэтапа движения.

Отметим, что при больших значениях  $\beta_3$  выражение (10) приобретает вид

$$\xi_{m,1} \approx \begin{cases} 2\beta_3 \sin \frac{\theta_y}{2}, & \theta_y < \theta_1; \\ 2\beta_3; & \theta_y > \theta_1 \end{cases}$$

Т.е. сила сухого трения практически не оказывает влияния на величину  $\xi_{m,1}$ , определяемую как обычно для линейной системы без демпфирования.

С учетом изложенного представим упругую характеристику виброизолятора как билинейную в размерном виде

$$R = \begin{cases} \frac{T_n^{(m)}}{a_n^{(m)}} \cdot x, \forall x \in [0, \Delta_B] \\ C_p \Delta_B + C_{\Sigma} (x - \Delta_B), \forall x \in [\Delta_B, x_{c,н}^*] \end{cases} \quad (12)$$

где  $\Delta_B \approx (2 \div 3) A_p$ ,  $C_{\Sigma} = C_p + C_{пу}$ , где  $C_{пу}$  - потребная жесткость ПУ.

Тогда, воспользовавшись соотношениями (11) и (12), а также обозначениями, приведенными на схеме рис. 2, получим наименьшие величины для  $C_{пу}$

$$C_{пу} = \frac{M}{\Delta_y^2} \left[ \left( \int_0^{\tau_y} J(t) dt \right)^2 - \frac{T_n^{(m)}}{a_n^{(m)}} x_{c,н}^* \left( \frac{2x_{c,н}^*}{\Delta_y^2} - \Delta_B \right) \right] \quad (13)$$

и для коэффициента передачи удара

$$\mu_y = \frac{\frac{T_n^{(m)}}{a_n^{(m)}} \Delta_B + C_{\Sigma} \Delta_y}{MJ_y} = \frac{C_p \Delta_B + C_{пу} \Delta_y}{MJ_y}. \quad (14)$$

При этом величины  $C_{пу}$  (13) и  $\mu_y$  (14) могут регулироваться парами расчетных значений  $T_{n,k}^{(m)}$  и  $a_{n,k}^{(m)}$  из  $k$ -го подмножества (см. выше).

### Выводы

Разработанный метод расчета параметров пружинных разгрузочных устройств основывается на обеспечении требуемой несущей способности и работоспособности их цилиндрических пружин в совокупности с конструкторской совместимостью виброизоляторов-прототипов. Полученные расчетные зависимости для параметров охватывает полный комплекс вопросов создания качественных ПРУ, обладающих заданной грузоподъемностью, прочностью и возможностью оптимизации конструктивных параметров пружин и вспомогательных УДЭ.

Предложен подход к выбору билинейной упругой характеристики противоударного устройства, основанный на установлении баланса энергетических возможностей ПУ и виброизоляторов с энергоёмкостью ударной нагрузки, что позволяет обеспечивать наименьшее значение коэффициента

передачи удара в пределах допустимого прогиба конструкции.

### **Библиографический список**

1. Лазуткин, Г.В. Совершенствование конструкций и методов расчёта виброизоляторов на основе проволочного материала [Текст] / Г.В. Лазуткин, В.А. Антипов, А.Л. Рябков. – Самара: СамГУПС, 2008. – 200с.

2. Лазуткин, Г.В. Создание многокомпонентных цельнометаллических виброизоляторов и разработка их математической модели [Текст] / Г.В. Лазуткин // Вестн. Самар.

гос. ун-та путей сообщения. 2010. – №4. - С. 179-188.

3. Орлов, П.И. Основы конструирования [Текст]: 2 кн. / П.И. Орлов; под ред. И.Н. Учаева. – 3-е изд., исправл. – М.: Машиностроение, 1988. – Кн.2; Основы конструирования. – 544 с.

4. Лазуткин, Г.В. Динамика виброзащитных систем с конструкционным демпфированием и разработка виброизоляторов из проволочного материала МР [Текст] / Г.В. Лазуткин. – Самара: СамГУПС. – 2010. – 291 с.

## **CALCULATION OF BASIC PARAMETERS OF SPRING UNLOADING AND SHOCK-PROOF DEVICES OF ALL-METAL MULTICOMPONENT DAMPERS ON MATERIAL MR BASIS**

©2011 G. V. Lazutkin<sup>1</sup>, F. V. Parovay<sup>2</sup>, M.A. Petukhova<sup>1</sup>, A. A. Troynikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara State University of Transport

<sup>2</sup>Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov  
(National Research University)

Basic principles of designing and questions of engineering of spring unloading and shock-proof devices of all-metal multicomponent dampers on material MR basis are considered.

*Multicomponent damper, settlement scheme, spring unloading device, the shock-proof device, material MR, the elastic characteristic.*

### **Информация об авторах**

**Лазуткин Геннадий Васильевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная графика», Самарский государственный университет путей сообщения. Тел.: 8-927-604-56-70. E-mail: [ig@samiit.ru](mailto:ig@samiit.ru). Область научных интересов: механика.

**Паровой Фёдор Васильевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 334-43-23. E-mail: [parovai@mail.ru](mailto:parovai@mail.ru). Область научных интересов: конструирование и производство виброизоляторов из материала МР.

**Петухова Мария Александровна**, аспирант кафедры «Инженерная графика», Самарский государственный университет путей сообщения. Тел.: 8-927-696-60-56. E-mail: [ig@samiit.ru](mailto:ig@samiit.ru). Область научных интересов: конструирование виброизоляторов из материала МР.

**Тройников Александр Александрович**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отраслевой лаборатории «Вибрационная прочность и надёжность авиационных изделий», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-46-84. E-mail: [vibro-mr@mail.ru](mailto:vibro-mr@mail.ru). Область научных интересов: конструирование виброизоляторов из материала МР, характеристики материала МР.

**Lazutkin Gennadiy Vasilievich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Samara State University of Transport. Phone: 8-927-604-56-70. E-mail: [ig@samiit.ru](mailto:ig@samiit.ru). Area of research: Mechanics.

**Parovay Fedor Vasilievich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 334-43-23. E-mail: [parovai@mail.ru](mailto:parovai@mail.ru). Area of Research: designing and manufacture of dampers from MR material.

**Petukhova Maria Alexandrovna**, postgraduate of the department «Engineering Drawing» of Samara State University of Transport. Phone: 8-927-696-60-56. E-mail: [ig@samiit.ru](mailto:ig@samiit.ru). Area of Research: designing and manufacture of dampers from MR material.

**Troynikov Alexander Alexandrovich**, Candidate of Technical Sciences, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 334-43-23. E-mail: [vibro-mr@mail.ru](mailto:vibro-mr@mail.ru). Area of Research: designing and manufacture of dampers from MR material, characteristics of MR material.