

УДК 534.1

УСТОЙЧИВОСТЬ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ ДВУХМАССОВОГО ОСЦИЛЛЯТОРА, ДВИЖУЩЕГОСЯ ПО УПРУГОЙ НАПРАВЛЯЮЩЕЙ

© Светлана Валентиновна Бутова, Сергей Иванович Герасимов,
Владимир Иванович Ерофеев, Ирина Александровна Одзерихо

Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПМ РАН), Нижний Новгород, Россия

erof.vi@yandex.ru

Аннотация. Представлен алгоритм расчета устойчивости движения двухмассового осциллятора, движущегося по рельсовым направляющим. Проведено сравнение с результатами штатных и аварийных опытов.

Ключевые слова: упругая направляющая, движущийся двухмассовый осциллятор, устойчивость.

Работа выполнена в рамках государственного задания на проведение фундаментальных научных исследований на 2013-2020 г.г. по теме № 0035-2014-0402, № госрегистрации 01201458047 и при поддержке РФФИ (Гранты № 17-08-01096, № 18-29-10073).

STABILITY OF TRANSVERSE OSCILLATIONS ON TWO-MASS OSCILLATOR MOVING ALONG AN ELASTIC GUIDE

© S.V. Butova, S.I. Gerasimov, V.I. Erofeev, I.A. Odzerikho

Mechanical Engineering Research Institute of the RAS, Nizhny Novgorod, Russia

erof.vi@yandex.ru

Abstract. The algorithm of calculation of stability for two-mass oscillator moving along elastic guide is presented. Results of computations and test data are compared.

Keywords: elastic guide, moving two-mass oscillator, stability.

Acknowledgements: The work was carried out within the Russian state task for conducting fundamental scientific research for 2013-2020 on the topic No. 0035-2014-0402, state registration number 01201458047 and the work was supported by RFBR (projects 17-08-01096, 18-29-10073).

Ранее был представлен алгоритм расчета вертикальных и горизонтальных колебаний двухопорного объекта, движущегося по рельсовым направляющим [1]. Для выяснения влияния внутренних степеней свободы движущегося объекта на устойчивость его движения рассмотрим наиболее простой из них – двухмассовый осциллятор, равномерно движущийся вдоль направляющей лежащей на упруго-вязком основании (Рис.1). Нижняя масса m осциллятора находится в безотрывном контакте с направляющей. Верхняя масса M соединена с нижней упруго-вязкой связью.

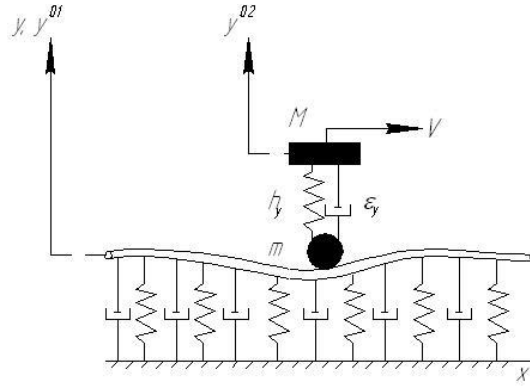


Рис.1. Двухмассовый осциллятор, равномерно движущийся вдоль направляющей, лежащей на упруго-вязком основании.

Уравнение малых вертикальных колебаний двухмассового осциллятора, движущегося по упругой направляющей, имеет вид [2-4]:

$$\left. \begin{aligned} & \rho \cdot F \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - r \cdot G \cdot F \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + r \cdot G \cdot F \frac{\partial \varphi}{\partial x} + H_y \cdot y + v_y \cdot \frac{\partial y}{\partial t} = \\ & -\delta(x-Vt) \left[m \frac{d^2 y^{01}}{dt^2} + h_y \cdot (y^{01} - y^{02}) + \varepsilon_y \cdot \frac{d}{dt} (y^{01} - y^{02}) \right], \\ & \rho \cdot I_z \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - E \cdot I_z \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + r \cdot G \cdot F \cdot \left(\varphi - \frac{\partial y}{\partial x} \right) = 0, \\ & M \frac{d^2 y^{02}}{dt^2} + h_y \cdot (y^{02} - y^{01}) + \varepsilon_y \cdot \frac{d}{dt} (y^{02} - y^{01}) = 0, \\ & y^{01}(t) = y(Vt, t), \quad \lim_{(x-Vt) \rightarrow \infty} y(x, t) = 0, \quad \lim_{(x-Vt) \rightarrow \infty} \varphi(x, t) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где y^{01}, y^{02} – вертикальные отклонения нижней и верхней масс осциллятора; h_y – жесткость пружины осциллятора; ε_y – вязкость демпфера осциллятора.

В движущейся системе отсчета $\{s = x - Vt, t = t\}$ уравнения (1) примут вид [5]:

$$\left. \begin{aligned} & \rho \cdot F \left(\ddot{y} - 2V \cdot \dot{y}' + V^2 \cdot y'' \right) - r \cdot G \cdot F \cdot y'' + H_y \cdot y + v_y \cdot (\dot{y} - V \cdot y') + r \cdot G \cdot F \cdot \varphi' \\ & = -\delta(s) \left[m \frac{d^2}{dt^2} y^{01} + h_y \cdot (y^{01} - y^{02}) + \varepsilon_y \cdot \frac{d}{dt} (y^{01} - y^{02}) \right], \\ & \rho \cdot I_z \left(\ddot{\varphi} - 2V \cdot \dot{\varphi}' + V^2 \cdot \varphi'' \right) - E \cdot I_z \cdot \varphi'' + r \cdot G \cdot F \cdot (\varphi - y') = 0 \\ & M \frac{d^2 y^{02}}{dt^2} + h_y (y^{02} - y^{01}) + \varepsilon_y \cdot \frac{d}{dt} (y^{02} - y^{01}) = 0 \\ & y^{01}(t) = y(0, t), \quad \lim_{(s) \rightarrow \infty} y(s, t) = 0, \quad \lim_{(s) \rightarrow \infty} \varphi(s, t) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Используя процедуры, описанные в [2-8], перейдем от системы дифференциальных уравнений в частных производных к системе алгебраических уравнений

$$\left. \begin{aligned} B_y(k, \Omega) \cdot \tilde{\varphi}_{k,s} + i \cdot r \cdot G \cdot F \cdot k \cdot \tilde{\varphi}_{k,s} &= -(-m \cdot \Omega^2 + h_y + i \cdot \varepsilon_y \cdot \Omega) \tilde{y}_s^{01} + (h_y + i \cdot \varepsilon_y \cdot \Omega) \tilde{y}_s^{02}, \\ A_y(k, \Omega) \cdot \tilde{\varphi}_{k,s} + i \cdot r \cdot G \cdot F \cdot k \cdot \tilde{\varphi}_{k,s} &= 0, \\ (-M \cdot \Omega^2 + h_y + i \cdot \varepsilon_y \cdot \Omega) \tilde{y}_s^{02} + (h_y + i \cdot \varepsilon_y \cdot \Omega) \tilde{y}_s^{01} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где

$$\left. \begin{aligned} B_y(k, \Omega) &= -\rho \cdot F \cdot (\Omega^2 - 2V \cdot \Omega \cdot k + V^2 k^2) + r \cdot G \cdot F \cdot k^2 + H_y + v_y \cdot \Omega \cdot i - v_y \cdot V \cdot k \cdot i, \\ A_y(k, \Omega) &= -\rho \cdot I_z (\Omega^2 - 2V \cdot \Omega \cdot k - V^2 \cdot k^2) + E \cdot I_z \cdot k^2 + r \cdot G \cdot F. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Исключив из системы уравнений (3) $\tilde{\varphi}_{k,s}$, применив к полученной системе обратное преобразование Фурье по переменной k и положив $s=0$, получим:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{y}_s^{01} (-m \cdot \Omega^2 + h_y + i \cdot \varepsilon_y \cdot \Omega + \chi_y(s, V)) - \tilde{y}_s^{02} (h_y + i \cdot \varepsilon_y \cdot \Omega) &= 0, \\ \tilde{y}_s^{02} (-M \cdot \Omega^2 + h_y + i \cdot \varepsilon_y \cdot \Omega) - \tilde{y}_s^{01} (h_y + i \cdot \varepsilon_y \cdot \Omega) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где функция комплексного переменного $\chi_y(\Omega, V)$ определена как

$$\chi_y(\Omega, V) = \left(\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dk}{D_y(k, \Omega)} \right)^{-1}, \quad D_y(k, \Omega) = \frac{A_y(k, \Omega) \cdot B_y(k, \Omega) - (r \cdot G \cdot F)^2 \cdot k^2}{A_y(k, \Omega)}$$

и представляет собой динамическую жесткость направляющей в движущемся контакте в направлении оси Y .

Характеристическое уравнение колебаний в направлении оси Y двухмассового осциллятора, движущегося по упругой направляющей, будет иметь вид:

$$(-m \cdot \Omega^2 + h_y + i \cdot \varepsilon_y \cdot \Omega + \chi_y(\Omega, V)) \cdot (-M \cdot \Omega^2 + h_y + i \cdot \varepsilon_y \cdot \Omega) - (h_y + i \cdot \varepsilon_y \cdot \Omega)^2 = 0. \quad (6)$$

Уравнение малых горизонтальных колебаний двухмассового осциллятора, движущегося по упругой направляющей, имеют вид [2]:

$$\left. \begin{aligned} E \cdot I_y \frac{\partial^4 z}{\partial x^4} + \rho \cdot F \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + H_z \cdot z - y_s \cdot \rho \cdot F \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} + v_z \cdot \frac{\partial z}{\partial t} \\ = -\delta(x - Vt) \left[m \cdot \frac{d^2 z^{01}}{dt^2} + h_z \cdot (z^{01} - z^{02}) + \varepsilon_z \cdot \frac{d}{dt} \cdot (z^{01} - z^{02}) \right], \\ E \cdot I_\psi \frac{\partial^4 \psi}{\partial x^4} - G \cdot I_k \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \rho \cdot I_p \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} + H_\psi \cdot \psi - y_s \cdot \rho \cdot F \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + v_\psi \cdot \frac{\partial \psi}{\partial t} \\ = -\delta(x - Vt) \cdot y_e \cdot \left[m \frac{d^2 z^{01}}{dt^2} + h_z \cdot (z^{01} - z^{02}) + \varepsilon_z \cdot \frac{d}{dt} \cdot (z^{01} - z^{02}) \right], \\ M \frac{d^2 z^{02}}{dt^2} + h_z \cdot (z^{02} - z^{01}) + \varepsilon_z \frac{d}{dt} \cdot (z^{02} - z^{01}) = 0, \\ z^{01}(t) = z(x - Vt, t) + y_e \cdot \psi(x - Vt, t), \quad \lim_{(x-Vt) \rightarrow \infty} z(x, t) = 0, \quad \lim_{(x-Vt) \rightarrow \infty} \Psi(x, t) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

По известной методике [9] перейдем от системы дифференциальных уравнений в частных производных к системе алгебраических уравнений.

$$\left. \begin{aligned} B_z \cdot \tilde{z}_{k,\Omega} + C_z \cdot \tilde{\psi}_{k,\Omega} &= -(-m \cdot \Omega^2 + h_z + i \cdot \varepsilon_z \cdot \Omega) \cdot z_{\Omega}^{01} + (h_z + i \cdot \varepsilon_z \cdot \Omega) \cdot z_{\Omega}^{02}, \\ A_z \cdot \tilde{\psi}_{k,\Omega} + C_z \cdot \tilde{z}_{k,\Omega} &= -y_b (-m \cdot \Omega^2 + h_z + i \cdot \varepsilon_z \cdot \Omega) \cdot z_{\Omega}^{01} + y_b \cdot (h_z + i \cdot \varepsilon_z \cdot \Omega) \cdot z_{\Omega}^{02}, \\ (-M \cdot \Omega^2 + h_z + i \cdot \varepsilon_z \cdot \Omega) \cdot z_{\Omega}^{02} - (h_z + i \cdot \varepsilon_z \cdot \Omega) \cdot z_{\Omega}^{01} &= 0, \\ z_{\Omega}^{01}(\Omega) &= z_{\Omega}^{01}(0, \Omega) + y_b \cdot \psi_{\Omega}(0, \Omega), \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где

$$\left. \begin{aligned} A_z &= E \cdot I_{\psi} \cdot k^4 + G \cdot I_k \cdot k^2 - \rho \cdot I_p (\Omega^2 - 2V \cdot \Omega \cdot k - V^2 \cdot k^2) + H_{\psi} + v_{\beta} \cdot (\Omega - V \cdot k \cdot i), \\ B_z &= E \cdot I_y \cdot k^4 - \rho \cdot F (\Omega^2 - 2V \cdot \Omega \cdot k - V^2 \cdot k^2) + H_z + v_z \cdot (\Omega - V \cdot k \cdot i), \\ C_z &= -y_s \cdot \rho \cdot F \cdot (\Omega^2 - 2V \cdot \Omega \cdot k + V^2 \cdot k^2) \end{aligned} \right\}$$

Из первых двух уравнений системы (8)

$$\tilde{\Psi}_{k,\Omega} = \frac{y_b \cdot B_z - C_z}{A_z - y_b \cdot C_z} \cdot \tilde{z}_{k,\Omega}. \quad (9)$$

Принимая во внимание, что

$$\Psi_{\Omega}(0, \Omega) = \frac{y_b \cdot B_0 - C_0}{A_0 - y_b \cdot C_0} \cdot z_{\Omega}^{01}(0, \Omega),$$

где

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= -\rho \cdot I_p \cdot \Omega^2 + H_{\psi} + i \cdot v_{\psi} \cdot \Omega, \\ B_0 &= -\rho \cdot F \cdot (\Omega^2 - 2V \cdot \Omega \cdot k + V^2 \cdot k^2) + H_z + i \cdot v_z \cdot \Omega, \\ C_0 &= -y_b \cdot \rho \cdot F \cdot \Omega^2, \end{aligned} \right\}$$

исключим из системы уравнений $\tilde{\Psi}_{k,\Omega}$ и, применив к полученной системе обратное преобразование Фурье по переменной k и положив $s = 0$, получим:

$$\left. \begin{aligned} z_{\Omega}^{01} (-m \cdot \Omega^2 + h_z + \varepsilon_z \cdot \Omega \cdot i + \chi_z(\Omega, V)) - z_{\Omega}^{02} (h_z + \varepsilon_z \cdot \Omega \cdot i) &= 0, \\ z_{\Omega}^{02} (-M \cdot \Omega^2 + h_z + \varepsilon_z \cdot \Omega \cdot i) - z_{\Omega}^{01} (h_z + \varepsilon_z \cdot \Omega \cdot i) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где функция комплексного переменного $\chi_z(\Omega, V)$ определена как

$$\chi_z(\Omega, V) = D_0 \cdot \left(\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dk}{D_z(k, \Omega)} \right)^{-1}, \quad (11)$$

и представляет собой динамическую жесткость направляющей в движущемся контакте в направлении оси z .

$$D_z(k, \Omega) = \frac{A_z \cdot B_z - C_z^2}{A_z - y_b \cdot C_z}, \quad D_0 = \frac{A_0 - y_b \cdot C_0}{A_0 + y_b^2 \cdot B_0 - 2y_b \cdot C_0}. \quad (12)$$

Характеристическое уравнение колебаний двухмассового осциллятора в направлении оси z может быть получено из (12):

$$(-m \cdot \Omega^2 + h_z + i \cdot \varepsilon_z \cdot \Omega + \chi_z(\Omega, V)) \cdot (-M \cdot \Omega^2 + h_z + i \cdot \varepsilon_z \cdot \Omega) - (h_z + i \cdot \varepsilon_z \cdot \Omega)^2 = 0. \quad (13)$$

В области, где мнимая составляющая динамической жёсткости направляющей отрицательна, выполняется необходимое условие возникновения неустойчивости. Для выявления его достаточности необходимо проанализировать корни характеристических уравнений (6) и (13). Колебания двухмассового осциллятора будут неустойчивыми, если хотя бы один из

корней будет иметь положительную действительную часть. Однако уравнения (6) и (13) являются интегральными по отношению к переменной Ω , и найти их корни непросто. Поэтому, для исследования корней таких уравнений используют метод D-разбиения [9], идея которого состоит в отображении мнимой оси комплексной плоскости $i\Omega$ на плоскость системного параметра, который временно будет рассматриваться как комплексный. Закон отображения можно определить из характеристического уравнения, выразив выбранный параметр явно.

В работе [9] показано, что в большинстве случаев более простая модель двухмассового осциллятора может быть использована для анализа устойчивости поперечного движения двухопорных объектов. Воспользовавшись этим допущением, проведем анализ устойчивости движения ступеней ракетных поездов (РП). При этом для монорельсовой ступени РП верхнюю массу осциллятора будем считать равной массе ступени без опорных башмаков, нижнюю массу осциллятора – равной суммарной массе двух опорных башмаков и жесткость пружины осциллятора приравняем изгибной жесткости корпуса ступени. Для двухрельсовой ступени РП верхнюю массу будем считать равной половине массы ступени без опорных башмаков, нижнюю массу осциллятора – суммарной массе двух опорных башмаков и жесткость пружины осциллятора приравняем изгибной жесткости двух пилонов, крепящих опорные башмаки к корпусу ступени. Величина коэффициента вязкости осциллятора принималась исходя из демпфирующих свойств корпуса монорельсовой ступени или пилона двухрельсовой ступени.

Наиболее существенное влияние на устойчивость поперечного движения двухмассового осциллятора оказывает жесткость упругой связи между массами h_y и h_z , которую можно явно выразить из уравнений (6) и (13)

$$h_y = \frac{M \cdot \Omega^2 \cdot (m \cdot \Omega^2 - \chi_y)}{(M + m) \cdot \Omega^2 - \chi_y} - \varepsilon_y \cdot \Omega \cdot i, \quad (14)$$

$$h_z = \frac{M \cdot \Omega^2 \cdot (m \cdot \Omega^2 - \chi_z)}{(M + m) \cdot \Omega^2 - \chi_z} - \varepsilon_z \cdot \Omega \cdot i,$$

Используя уравнения (14) как закон отображения, необходимо проварьировать Ω от $-\infty$ до $+\infty$ и построить зависимости $\text{Im} \chi_y(\text{Re} \chi_y)$ и $\text{Im} \chi_z(\text{Re} \chi_z)$. Полученная с помощью данного отображения линия разделяет пространство параметров на области с различным числом корней характеристического уравнения (13), имеющих положительную действительную часть. Взаимное расположение кривых D-разбиения на комплексной плоскости (h_z) показано на Рис.2.

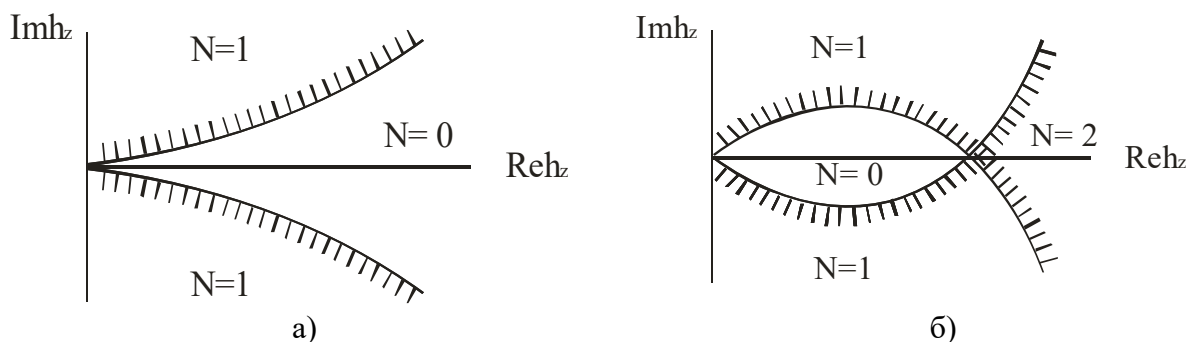


Рис.2. D-разбиение по комплексному параметру h_z : а) – скорость осциллятора не превышает минимальную фазовую скорость волн в направляющей; б) – скорость осциллятора больше минимальной фазовой скорости волн в направляющей

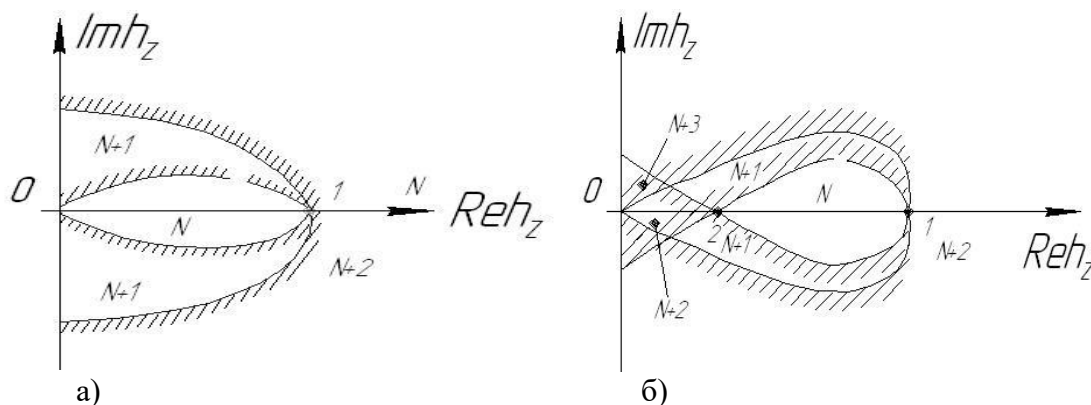


Рис.3. D-разбиение по комплексному параметру h_z , скорость осциллятора больше минимальной фазовой скорости волн в направляющей: а) с увеличением частоты Ω вещественная составляющая жесткости упругой связи между массами осциллятора уходит в область отрицательных значений; б) случай с возвратом в области устойчивости (верхняя граница оказывается ниже нижней).

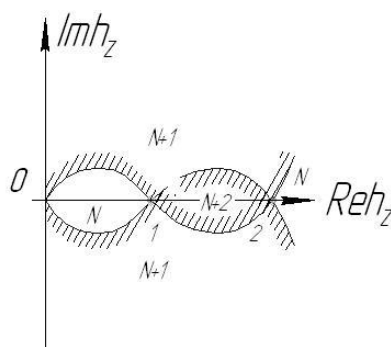


Рис.4. D-разбиение по комплексному параметру h_z – скорость осциллятора превышает минимальную фазовую скорость волн в направляющей (случай с возвратом в область устойчивости – имеются нижняя и верхняя границы области неустойчивости, верхняя граница выше нижней).

Штриховка на линиях D-разбиения показывает направление перехода из одной области комплексной плоскости h_z в другую. При пересечении кривых D-разбиения в направлении штриховки число N корней характеристического уравнения с положительной действительной частью увеличивается на единицу. Число «неустойчивых» корней в полученных областях уточняется с помощью принципа аргумента [10]. При $N=0$ движение объекта устойчиво, при $N>0$ – неустойчиво. Описанные действия выполняются программой для каждого из рассматриваемых значений скорости.

По программе проведены расчеты для четырех типов двухмассовых осцилляторов (таблица 1), моделирующих движение по направляющей ракетного трека монорельсовых высокоскоростных объектов, проведены расчёты в диапазонах скоростей движения 500 – 2000 м/с и круговых частот воздействия ± 6000 1/с.

Таблица 1. Типы осцилляторов [6-8].

№ п/п	Тип осциллятора	Масса, кг	Параметры внутрибаллистических характеристик			Жесткость, Н/м
			осциллятора в сборе	полное время работы, с	средняя тяга, Н	
1	Тип 1	815	1,45	$5,98 \cdot 10^5$	120	$1,19 \cdot 10^8$
2	Тип 2	345	0,6	$5,98 \cdot 10^5$	175	$3,06 \cdot 10^8$
3	Тип 3	49	0,95	$4,42 \cdot 10^4$	160	$3,8 \cdot 10^7$
4	Тип 4	50	0,5	$1,18 \cdot 10^5$	300	$2,5 \cdot 10^6$

По результатам расчётов строятся зависимости $\text{Im } h_z(\text{Re } h_z)$ и определяются точки пересечения кривой $\text{Im } h_z(\text{Re } h_z)$ с осью $\text{Re } h_z$. Точки пересечения кривой при движении в направлении с отрицательной области $\text{Im } h_z$ в положительную являются нижней границей области неустойчивости, точки пересечения при движении в обратном направлении – верхней границей.

По полученным для заданного ряда V_x значениям h_z строятся зависимости нижней границы области неустойчивости $h_{zn}(V_x)$ и верхней границы $h_{zv}(V_x)$.

Аналогичным образом определяются границы области неустойчивости поперечного движения ступени РП в вертикальной плоскости $h_{yn}(V_x)$ и $h_{yv}(V_x)$.

Описанный алгоритм построения границ областей неустойчивости поперечного движения ступени РП реализован в программе.

Для каждого заданного значения скорости в заданном диапазоне частот программа выдаёт одно или ряд значений жёсткости осциллятора с признаком «0» или «1». Признак «0» означает переход из области отрицательных в область положительных значений мнимой составляющей жёсткости $\text{Im } h$, признак «1» – наоборот, переход из области положительных в область отрицательных значений $\text{Im } h$. Если программа выдаёт одиночные значения жёсткости, то признак «0» означает переход из области устойчивости поперечного движения ступени РП в область неустойчивости, признак «1» – наоборот переход из области неустойчивости в область устойчивости. Если программа для конкретного значения скорости выдаёт ряд значений жёсткости, необходимо руководствоваться таблицей 2.

Таблица 2. Определение границ областей устойчивости поперечного движения ступени РП

Признаки	Графическое представление жёсткостей, признаков и числа «неустойчивых» корней	Границы областей	
		устойчивости	неустойчивости
0		$h < h_1$	$h > h_1$
0, 1		$h < h_1; h > h_2$	$h_1 < h < h_2$
0, 0, 1		$h < h_1$	$h > h_1$
0, 1, 0		$h < h_1;$ $h_2 < h < h_3$	$h_1 < h < h_2$ $h > h_3$
0, 1, 1		$h > h_3$	$h < h_3$
0, 1, 0, 1		$h < h_1;$ $h_2 < h < h_3$ $h > h_4$	$h_1 < h < h_2$ $h_3 < h < h_4$
0, 0, 1, 1		$h < h_1; h > h_4$	$h_1 < h < h_4$
0, 0, 0, 1		$h < h_1$	$h > h_1$
0, 1, 1, 1		$h > h_4$	$h < h_4$

По результатам расчётов, построены области неустойчивости двухмассовых осцилляторов, моделирующих ступени ракетных поездов/ Верхние и нижние границы областей неустойчивости в координатах «жёсткость опор – скорость ступени» представлены на Рис.5–14. Там же приведены жёсткости опор ступеней и показано положение максимальных скоростей разгона ступени в зачётных и аварийных опытах. Область неустойчивости располагается выше нижней границы и ниже верхней. Если верхняя граница отсутствует, то область неустойчивости охватывает весь диапазон значений жёсткостей опор ступени РП от нижней границы до бесконечности.

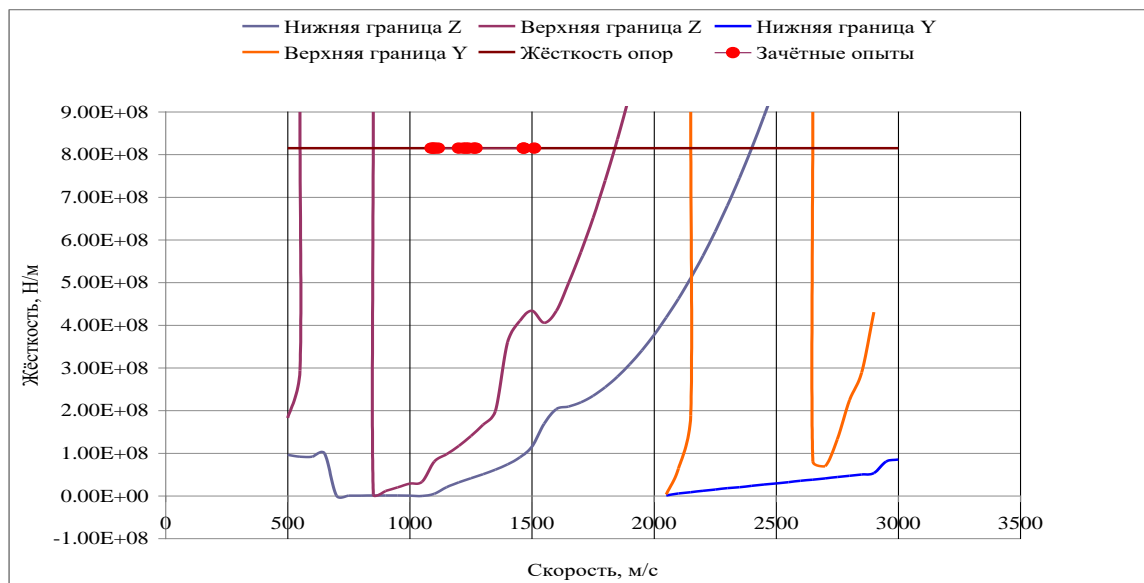


Рис.5. Границы областей неустойчивости поперечного движения в направлении осей Y и Z осциллятора типа З, моделирующего монорельсовую РТ, жёсткость опор ступени и положение опытов на диаграмме.



Рис.6. Границы областей неустойчивости поперечного движения в направлении осей Y и Z осциллятора тип З, моделирующего монорельсовую РТ, жёсткость опор ступени и положение опытов на диаграмме.

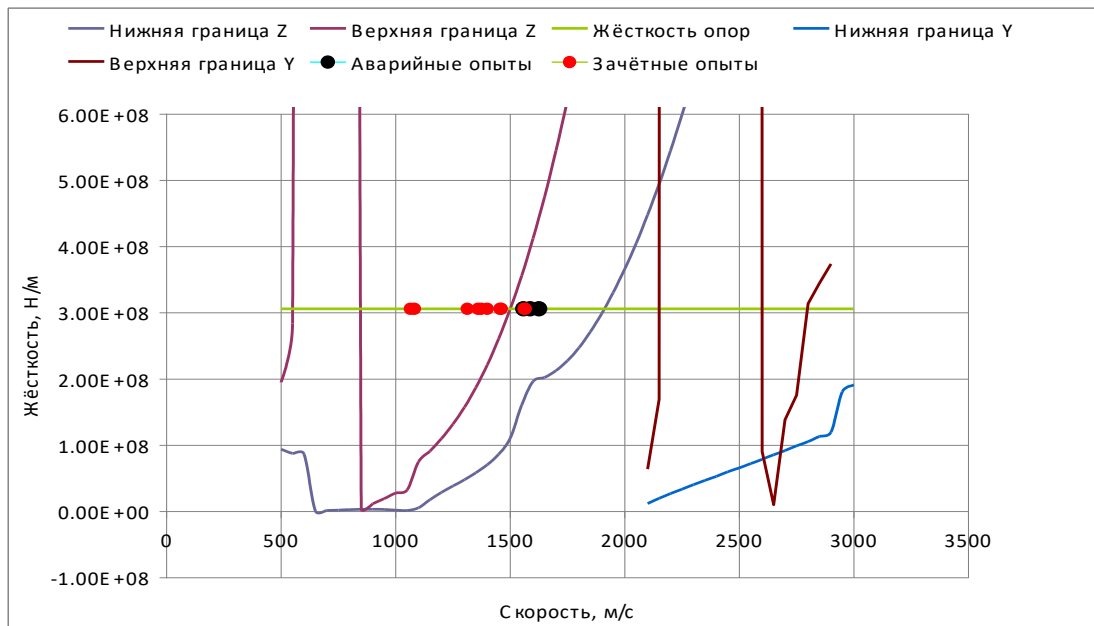


Рис. 7. Границы областей неустойчивости поперечного движения в направлении осей Y и Z осциллятора тип 2, моделирующего монорельсовую РТ, жёсткость опор ступени и положение опытов на диаграмме.

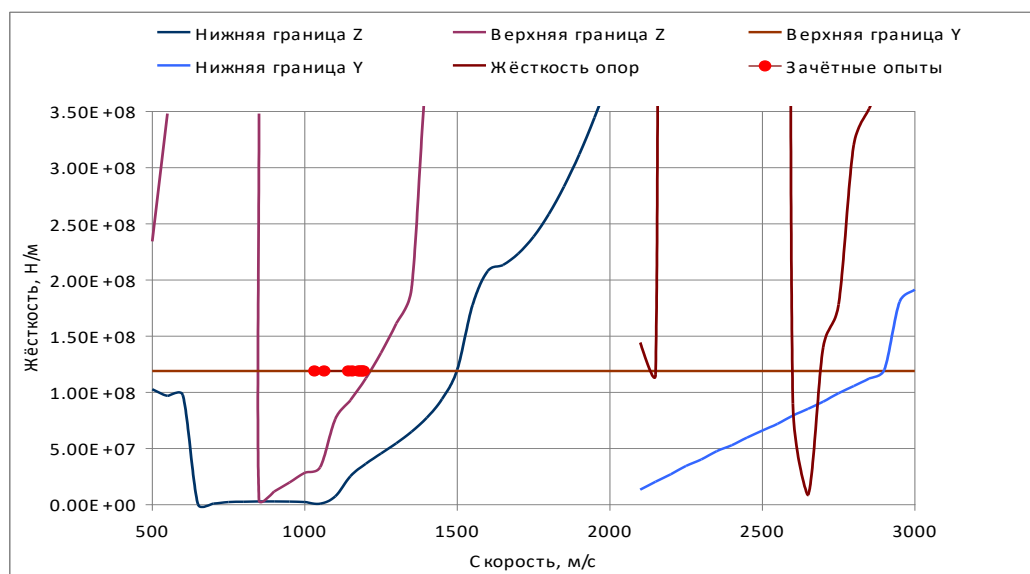


Рис.8. Границы областей неустойчивости поперечного движения в направлении осей Y и Z осциллятора тип 1, моделирующего монорельсовую РТ, жёсткость опор ступени и положение опытов на диаграмме.

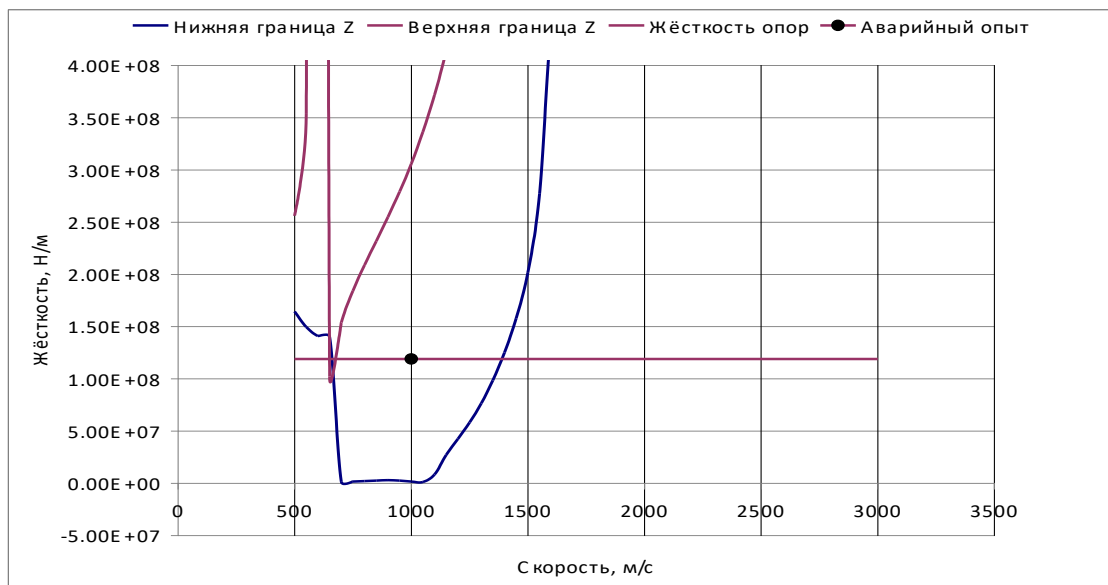


Рис. 9. Границы областей неустойчивости поперечного движения в направлении осей Y и Z осциллятора тип 1, моделирующего монорельсовую РТ, жёсткость опор ступени и положение опыта на диаграмме.

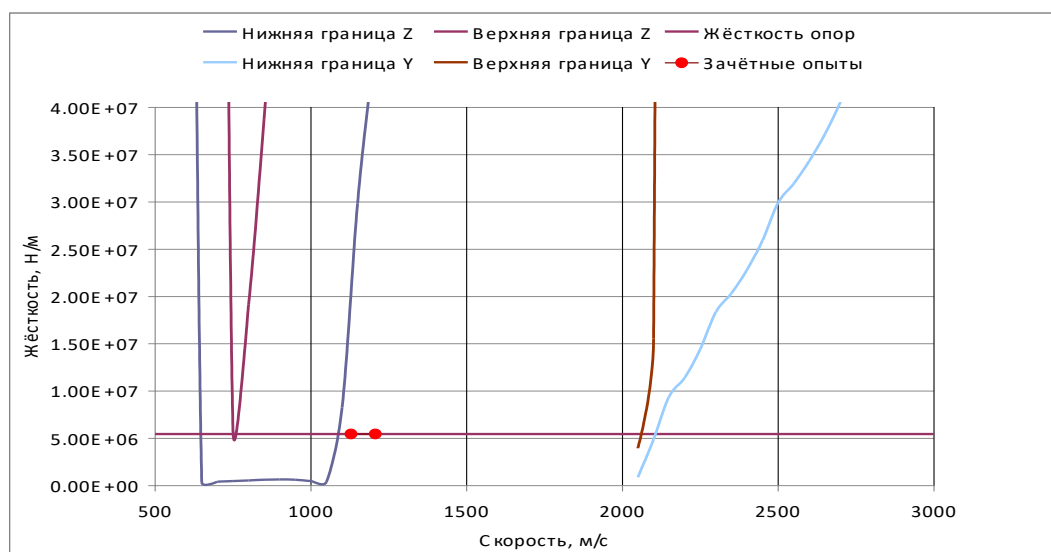


Рис.10. Границы областей неустойчивости поперечного движения в направлении осей Y и Z осциллятора тип 1, моделирующего двухрельсовую РТ, жёсткость опор ступени и положение опытов на диаграмме.

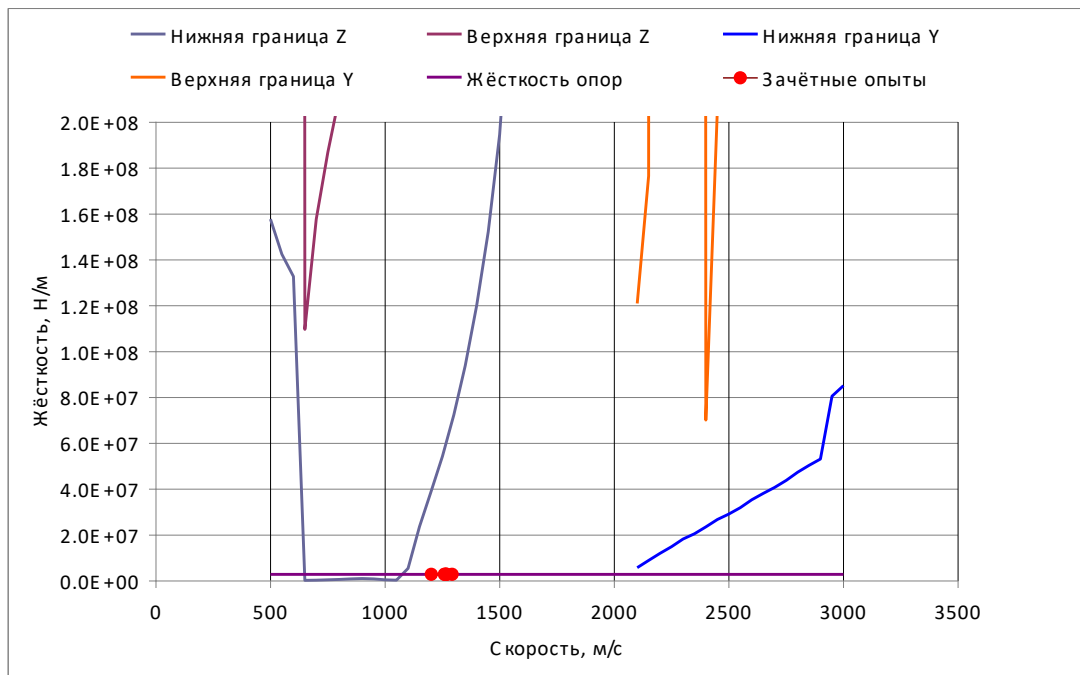


Рис.11. Границы областей неустойчивости поперечного движения в направлении осей Y и Z осциллятора тип 2, моделирующего двухрельсовую РТ, жёсткость опор ступени и положение опытов на диаграмме.

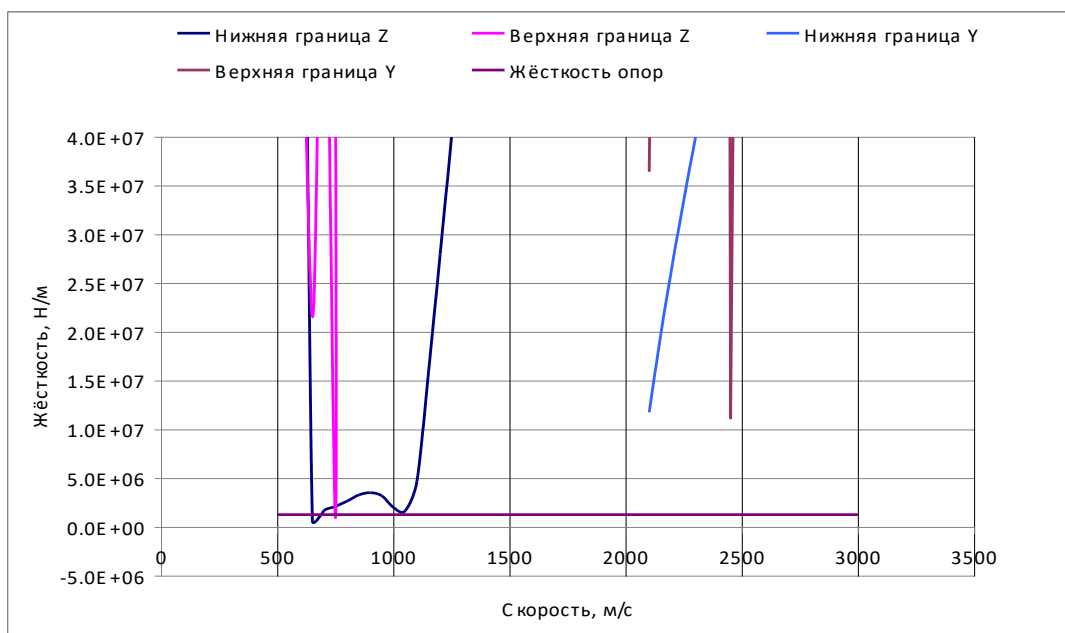


Рис.12. Границы областей неустойчивости поперечного движения в направлении осей Y и Z осциллятора тип 2, моделирующего двухрельсовую РТ, и жёсткость опор ступени.

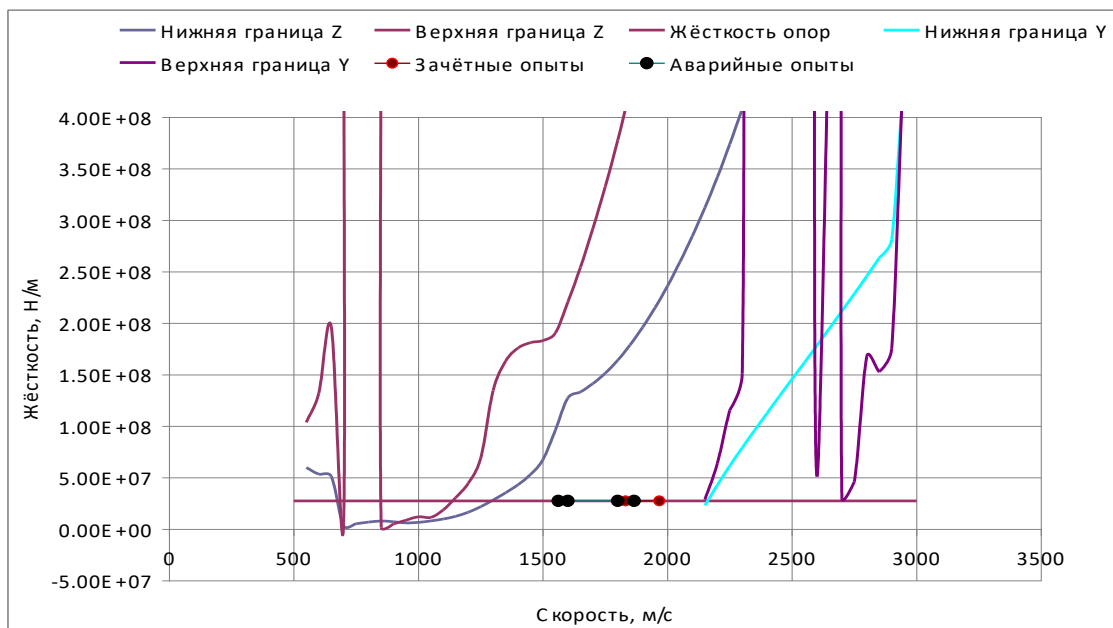


Рис.13. Границы областей неустойчивости поперечного движения в направлении осей Y и Z осциллятора тип 3, моделирующего монорельсовую РТ, жёсткость опор ступени и положение опытов на диаграмме.



Рис.14. Границы областей неустойчивости поперечного движения в направлении осей Y и Z осциллятора тип 4, моделирующего монорельсовую РТ, жёсткость опор ступени и положение опытов на диаграмме.

При анализе устойчивости поперечного движения ступеней РП необходимо иметь в виду, что аварии, как правило, происходят (что следует из практики проведения испытаний): 1) с автономно движущимися ступенями РП; 2) в интервале максимальных скоростей разгона ступени, когда действующая на ступень РП перегрузка вдоль оси X близка к нулю.

На рисунках и показаны границы областей неустойчивости поперечного движения в направлении оси Z осцилляторов, моделирующих высокоскоростные объекты, с которыми были проведены испытания на ракетном треке.

Если значки, отображающие объекты, находятся выше верхней границы или ниже нижней, то движение таких объектов устойчиво, в противном случае – неустойчиво.

На рисунке значки, отображающие эксперименты, расположены выше верхней границы области неустойчивости. Все реальные эксперименты были зачётными, аварийных экспериментов не было.

На рисунке значки, отображающие эксперименты, расположены выше нижней и ниже верхней границ области неустойчивости, то есть в области неустойчивости. Эти эксперименты были аварийные. Сложнее обстоит дело с областью устойчивости, находящейся ниже нижней границы неустойчивости. В этой области, как мы видим, имеются эксперименты, как зачетные, так и аварийные. Возможно, причиной этих аварий является не неустойчивость, а, например, резонанс.

Результаты проведенных исследований устойчивости движения высокоскоростных объектов по упругим направляющим удовлетворительно согласуются с результатами экспериментов, хотя отдельные режимы движения объектов требуют дополнительной проработки.

Список литературы

1. Бутова С.В., Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Кикеев В.А., Одзерихо И.А., Сеницкий И.О. Устойчивость поперечных колебаний двухопорного объекта, движущегося по упругой направляющей // Вестник научно-технического развития. - 2017. - № 12 (124). - С.3-23.
2. Бутова С.В., Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Камчатный В.Г. Устойчивость движения высокоскоростных объектов по направляющим ракетного трека // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2015. - № 1. - С.3-8.
3. Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Камчатный В.Г., Каньгин И.И. Оценка резонансоопасных гармоник при колебаниях упругой направляющей с движущимся по ней двухопорным объектом // Проблемы прочности и пластичности. - 2015. - Т.77, № 4. - С.412-424.
4. Герасимов С.И., Ерофеев В.И. Расчет изгибно-крутильных колебаний рельсовой направляющей ракетного трека // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2016. - № 3. - С.25-27.
5. Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Лисенкова Е.Е. Задачи волновой динамики систем, несущих движущиеся нагрузки, и их приложение к испытаниям на ракетном треке // Сборник трудов III Международной школы-конференции «Нелинейная динамика машин» – School-NDM 2016. - М.: ИМАШ РАН, 2016. - С.45-54.
6. Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Камчатный В.Г., Одзерихо И.А. Термомеханические и деформационные процессы при высокоскоростном скольжении грузов по рельсовым направляющим ракетного трека // Вестник научно-технического развития. - 2017. - № 10 (122). - С.3-7.
7. Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Malkhanov A.O. Problems of wave dynamics of the systems that support moving loads // MATEC Web of Conferences. - 2017. - Vol.129, 06030.- P.1-6.
8. Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Камчатный В.Г., Одзерихо И.А. Условие на скользящем контакте в анализе устойчивости движения ступени на ракетном треке // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2018. - № 3. - С.21-27.
9. Veritchev S.N. Instability of a Vehicle Moving on an Elastic Structure. - Delft Univ. Press. The Netherlands. - 2002. - 192 p.
10. Неймарк Ю.И. Робастная устойчивость и D-разбиение // Автоматика и телемеханика. - 1992. - № 7. - С.10-18.

Дата поступления: 4 ноября 2018 г.