

## **ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИЗМЕРЕНИЙ**

***Валерик Сергеевич Айрапетян***

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, зав. кафедрой специальных устройств инноватики и метрологии, тел. (383)361-07-31, e-mail: v.s.ayrapetyan@sgga.ru

***Георгий Алексеевич Куриленко***

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, доктор технических наук, профессор кафедры прочности летательных аппаратов, e-mail: teormech@ngs.ru

В работе рассмотрен способ виброизоляции оптических приборов, существенно улучшающий точность измерений. Представлен разработанный термографический метод определения характеристик статической трещиностойкости металлов, позволяющий повысить их достоверность на 30% и тем самым надежность работы оптических систем при проведении измерений.

**Ключевые слова:** защита от вибрации, достоверность измерений, термографический метод, трещиностойкость.

## **INCREASE OF ACCURACY AND SAFETY SECURING OF OPTOMECHANICAL DEVICES WHEN MEASURING**

***Valerik S. Ayrapetyan***

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plahotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Head of Department of Special Devices for Innovation and Metrology, phone: (383)361-07-31, e-mail: v.s.ayrapetyan@sgga.ru

***Georgy A. Kurylenko***

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, D. Sc., Professor, Department of Strength of Aircraft, e-mail: teormech@ngs.ru

This article examines the vibration-proof devices, essentially improving accuracy of measuring. A new thermographic method for definition of static crack resistance characteristics of material is offered. This method allows define these characteristics more precisely and quickly, increasing the reliable of optomechanical devices.

**Key words:** vibration protection, reliability of measuring, thermographic method, crack resistance.

Современные оптические экспериментальные исследования предъявляют высокие требования к оптико-механическим системам, которые должны обладать достаточной точностью, надежностью и стабильностью работы для обеспечения высокоточных пространственно-временных измерений. Эта проблема особенно актуальна при проведении лидарных измерений в открытой атмосфере.

ре, когда лазерный источник и все оптические элементы располагаются либо на подвижной платформе, либо на летательном аппарате. В этом случае оптико-механические приборы и лазеры, используемые для метрологических измерений, эксплуатируются в экстремальных условиях при значительных внешних нагрузках и предъявляемые к ним требования не снижаются.

Решение этой проблемы следует рассматривать в двух аспектах.

Первый аспект – технологический, требующий виброзащиты оптической системы при производстве от фоновой вибрации производственных и лабораторных помещений.

Второй аспект – эксплуатационный, требующий, с одной стороны, обеспечения прочностной надежности отдельных узлов и в целом оптической системы, а с другой стороны, достаточной точности проводимых измерений в условиях вибрационных и других воздействий при их эксплуатации.

В настоящее время разработано множество различных конструкций виброзащитных устройств, каждое из которых имеет свою область применения [1–3]. Об универсальном устройстве пока говорить рано, но, как отмечают практически все авторы, самой актуальной остается проблема повышения качества виброзащиты.

В [1, 2] разработана виброзащитная платформа с упругим элементом (рис. 1), позволяющая получить существенное продвижение в решении этой проблемы.

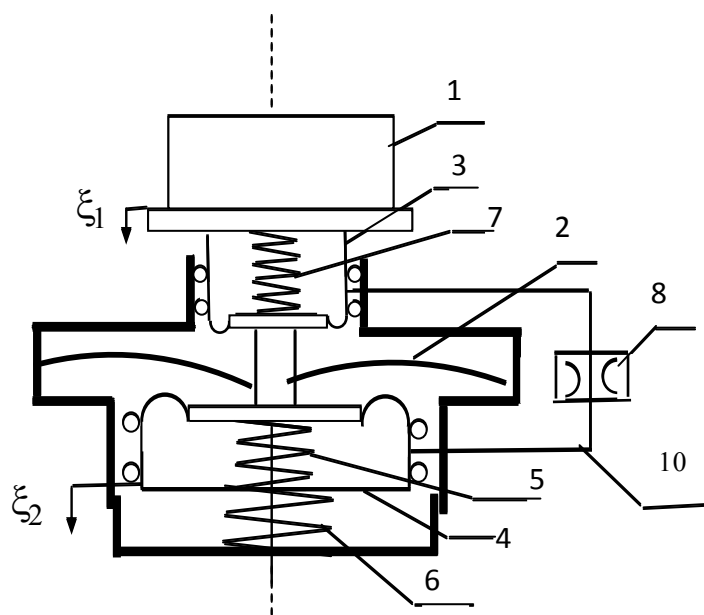


Рис. 1. Виброзащитная платформа

Защищаемый прибор 1 опирается на подвес 2 в виде продольно-сжатой балки (рессоры) квазиулевого жесткости и пружину 6 через гидроцилиндры 3 и 4. Полости этих гидроцилиндров соединяются каналом 10 со встроенным дроссе-

лем 8. Цилиндро-поршневые пары 3 и 4 содержат также упругие элементы 7 и 5 вспомогательного нагружения. Расчетное положение прибора (рабочую точку) устанавливают для создания распорного усилия в рессоре 2, при котором она будет иметь квазинулевою жесткость. Достигается это варьированием натяга пружины 6.

Платформа работает следующим образом. При увеличении, например, веса прибора 1 повышается давление в гидроцилиндре 3, и начинается переток жидкости в гидроцилиндр 4, в результате чего увеличивается натяг пружины 6. Благодаря этому рабочую точку подвеса 2 можно удерживать на прежнем уровне. Время перетекания жидкости при этом должно быть существенно больше периода колебаний прибора 1 на подвесе 2 и регулируется величиной проходного сечения канала дросселя 8 [4].

В качестве обобщенной координаты выберем координату  $\xi_1$ , отсчитываемую от положения равновесия защищаемого прибора 1 с массой  $m$ .  $\xi_2$  – координата, определяющая положение цилиндра 4.

Рассмотрим свободные колебания системы с нелинейной упругой характеристикой рессоры. Для первоначальной настройки рабочей точки к массе  $m$  присоединяем груз массой  $m_1$ . Тогда уравнение движения объекта 1 запишется так [5]

$$(m + m_1)\ddot{\xi}_1 = -k_1\xi_m - k_3\xi_m^3 - c_3\xi_2 + m_1g, \quad (1)$$

где  $k_1, k_3$  – коэффициенты упругой характеристики рессоры 2,

$\xi_m$  – ее максимальный прогиб,

$c_3$  – коэффициент жесткости пружины 6.

Учтем также перемещение цилиндра 4 отдельно и этого цилиндра вместе с поршнем при условии, что массой поршней и цилиндров пренебрегаем:

$$\left. \begin{aligned} P_2 S_2 &= c_3 \xi_2 + c_2 (\xi_2 - \xi_m) \\ P_1 S_1 &= k_1 \xi_m + c_3 \xi_2 - c_1 (\xi_1 - \xi_2), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $c_1, c_2$  коэффициенты жесткости вспомогательных пружин 7 и 5;

$S_1, S_2$  – соответственно площади верхнего, нижнего цилиндров;

$P_1, P_2$  – соответственно давления жидкости в верхнем и нижнем цилиндрах.

Одним из важных показателей данной виброзащитной системы является время возвращения рабочей точки рессоры в начальное положение. Из решения уравнений (1) и (2) на рис. 2 показан процесс затухания свободных колебаний объекта и рессоры при использовании в качестве жидкости керосина, у которого динамический коэффициент вязкости  $\mu = 1,5 \cdot 10^{-3}$  Пас.

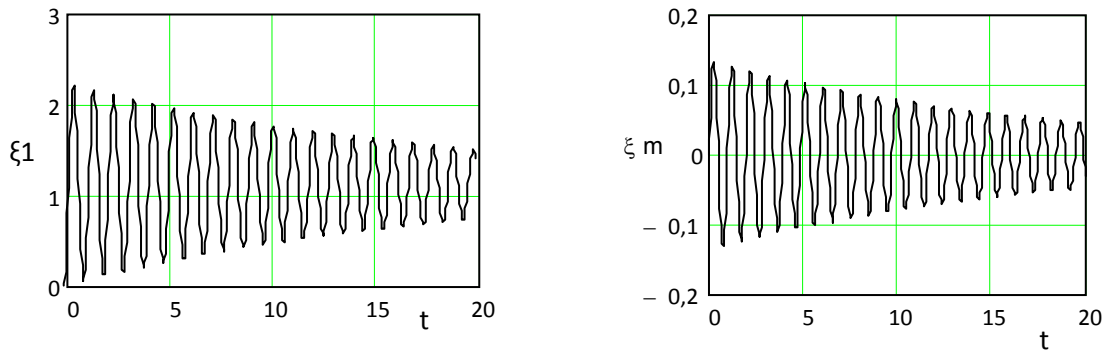


Рис. 2. Затухание свободных колебаний (керосин)

Параметры системы:

$$S_2/S_1 = 5, \quad c_3 = 22 \cdot 10^3 \text{ н/м}, \quad k_1 = -17 \cdot 10^3 \text{ н/м}, \quad m = 100 \text{ кг}, \quad m_1 = 5 \text{ кг}.$$

Из рис. 2 видно, что колебательный процесс объекта и рессоры около равновесного положения длится более 20 сек. В первые секунды объект отклоняется от своего нового начального положения около 1 см. В это же время рессора получает небольшое перемещение около 0,1 см, так как процесс перетекания жидкости начинается сразу.

Затухание колебаний можно ускорить если увеличить коэффициент вязкости. На рис. 3 показан затухающий процесс свободных колебаний, где в качестве жидкости взят скайдрол (авиационная рабочая жидкость) с коэффициентом вязкости  $\mu = 1,16 \cdot 10^{-2}$  Пас.

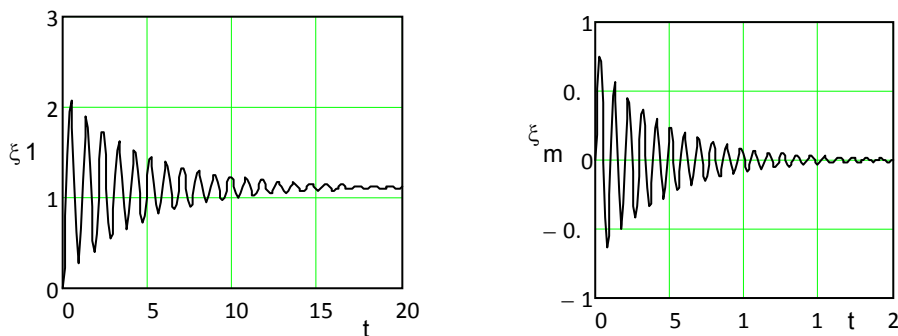


Рис. 3. Свободные колебания (скайдрол)

Из рис. 3 видно, что процесс возвращения рабочей точки рессоры носит также колебательный характер, но затухает около 15 сек. При этом первое отклонение объекта почти не изменилось, а рессора получает больший прогиб в сравнении с предыдущим, около 0,6 см.

Исследовано также затухание свободных колебаний при использовании в качестве рабочих жидкостей трансформаторного и оливкового масел. Показано, что с увеличением коэффициента вязкости время возвращения рессоры в начальное положение возрастает и начальная амплитуда объекта практически не меняется.

Для исследования вынужденных колебаний данной системы придадим уравнению (1) вид

$$\ddot{\xi}_1 = -c_{11}\xi_m - c_{12}\xi_1 - c_{13}\xi_m^3 - 2n\xi_1 - A_e\omega^2\sin(\omega t), \quad (3)$$

где  $c_{11} = \frac{k_1+c_3(1-\frac{S_1}{S_2})}{m+m_1}$ ,  $c_{12} = \frac{c_3S_1}{S_2(m+m_1)}$ ,  $c_{13} = \frac{k_3}{m}$ .

В уравнении (3) учитывается нелинейность упругой характеристики рессоры и дополнительное вязкое демпфирование, в котором учитывается нелинейность упругой характеристики рессоры и дополнительное вязкое демпфирование.

Рассматривается кинематическое воздействие с амплитудой основания  $A_e$  и частотой  $\omega$ . Расчет проведен при амплитуде колебаний основания  $A_e = 2 \cdot 10^{-2} м$  и коэффициентах  $n = 2,5 \frac{1}{с}$ ,  $k_3 = 2 \cdot 10^7 \frac{Н}{м^3}$ . На рис. 4 показан рассчитанный график зависимости коэффициента передачи (КП) от частоты колебаний основания  $\nu$ , из которого видно, что для КП получены вполне приемлемые значения. Так при резонансной частоте  $\nu = 1 Гц$  КП = 1,6, а при  $\nu > 5 Гц$  перетекания жидкости нет и цилиндры 3 и 4 вместе с объектом будут двигаться как одно целое.

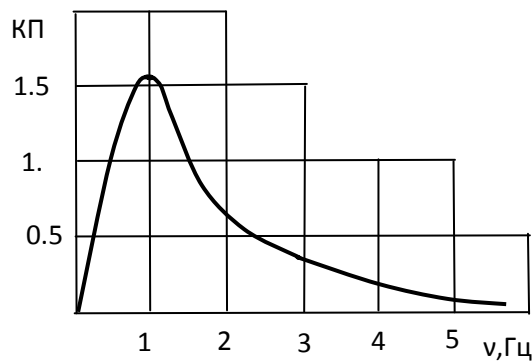


Рис. 4. Коэффициент передачи при кинематическом воздействии

Рассмотрим весьма актуальный случай – ударную нагрузку. Пусть, по основанию нанесен удар силой  $F_0 = 290 Нс$  длительностью  $T = 0,1$  сек. Уравнение (3) этом случае запишется так

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{\xi}_1 &= -k_1\xi_m - k_3\xi_m^3 - c_3\xi_2 - b\xi_1 + F_0 \cdot \sin \frac{\pi T}{t}, \quad \text{при } t < T \\ m\ddot{\xi}_1 &= -k_1\xi_m - k_3\xi_m^3 - c_3\xi_2 - b\xi_1, \quad \text{при } t \geq T, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Из рис. 5 видно, что в этом случае колебания затухают практически за один период. Движение объекта и рессоры почти синхронно.

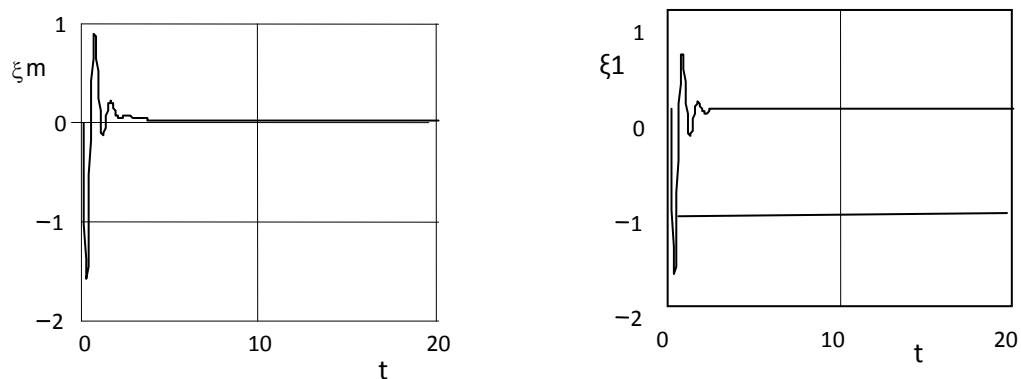


Рис. 5. Затухание колебаний при ударе

Определенный интерес представляет аналогичное исследование виброзащитной подвески с электромеханическими элементами управления.

На рис. 6 показана такая подвеска, где 1 – защищаемый объект, 2 – нелинейно-упругий элемент, 3 – регулировочная пружина с постоянной жесткостью  $C_2$ , натягом которой можно компенсировать изменение веса объекта. Для этого конец пружины перемещают механизированным приводом 4, используя показания датчика положения объекта.

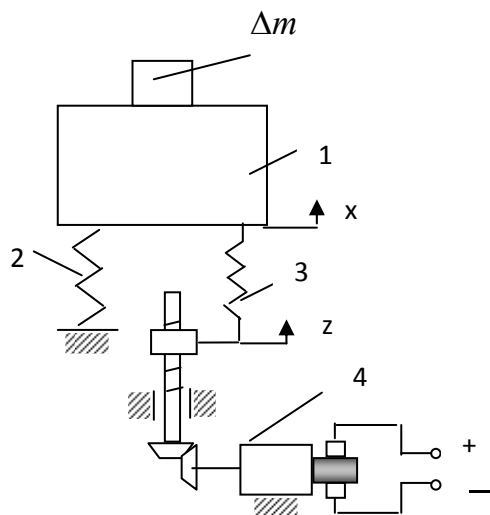


Рис. 6. Схема виброзащитной подвески с электромеханическим управлением

Рассмотрим уравнение вынужденных колебаний объекта массы  $m$ , например, при увеличении его массы на  $\Delta m$  и перемещении конца пружины 3 по закону  $z = v \cdot t$  ( $v$  – скорость перемещения).

$$\ddot{x} + k_1^2 x + k_3 x^3 + k_2 z + 2n\dot{x} - G = A_e \omega^2 \sin \omega t \quad (5)$$

где  $k_1, k_3$  – коэффициенты нелинейной упругой характеристики,  
 $k_2$  – коэффициент упругой характеристики регулировочной пружины,  
 $n$  – коэффициент демпфирования,

$$G = \Delta mg / (m + \Delta m).$$

Интегрируем (5) при:

$$k_1 = 6,28 \text{ с}^{-1}, k_2 = 181,1 \text{ с}^{-2}, k_3 = 3,96 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-2}, n = 3 \text{ с}^{-1},$$

$$m = 100 \text{ кг}, \Delta m = 20 \text{ кг}, A_e = 2 \text{ см}, \omega = 2 \cdot \pi \cdot \nu = 3,142 \text{ с}^{-1}, \nu = 0,4 \text{ см/с}.$$

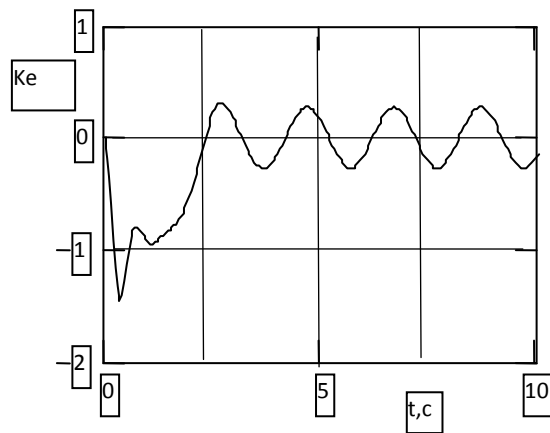


Рис. 7. Зависимость относительного перемещения объекта с добавочной массой от времени

На рис. 7 показана зависимость относительного перемещения  $K_e$  объекта с добавочной массой от времени. Процесс возвращения рабочей в номинальное состояние в данном случае занял около 3 с. Конец регулировочной пружины достаточно было переместить на 0,92 см.

### Заключение

Подводя итог, следует отметить, что описанные виброзащитные устройства с автоматическим поддержанием рабочей точки подвеса на заданном уровне апробованы в лабораторных условиях [6] и показали достаточно высокую эффективность защиты без энергопотребления в системе управления.

Считаем, что эти устройства могут существенно улучшить виброизоляцию оптических систем, используемых для проведения метрологических измерений, и тем самым повысить точность измерений.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kurilenko G.A., Yur'ev G.S., Rykov A.A. Synthesis of an Active Vibrational Protection System // Russian Engineering Research. 2014. №7. P. 440-443.
2. Kurilenko G.A., Ayrapetyan V.S. Determination of the Fracture Toughness of Optomechanical Devices // OpticsandPhotonicsJournal.2016. №6. P 298-304.
3. ХелланК. Введение в механику разрушения. Пер. с англ. / Под ред. Морозова Е.М. М., 1988. 364 с.
4. Ковчик С.В., Морозов Е.М. Механика разрушения и прочность материалов. Справочное пособие. / Под.ред. Панасюка В.В. Киев: Наукова думка, 1988. Т.3. 435 с.
5. ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическомнагружении // – М: Изд. стандартов, 1985. 61 с.
6. Куриленко Г.А., Пшеничный А.Б. Способ определения трещиностойкости материалов // А.с. № 1820278. Бюл. изобр.1990. №21. С. 72.
7. Базаров И.П.Термодинамика. – М.: Высшая школа, 1983. 344 с.

© В. С. Айрапетян, Г. А. Куриленко, 2019