

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ПЕРЕХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗГРУЗОЧНЫХ УСТРОЙСТВ ВИБРОСТЕНДОВ

Самсонов В.Н.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

При проведении наземных динамических испытаний летательных аппаратов и их систем в составе стендов используются устройства вывешивания изделий и стабилизации их положения (так называемые разгрузочные устройства). Основное назначение разгрузочных устройств (РУ) — обеспечение точного уровня позиционирования установочной платформы на вибростенде и поддержание его в течение определенного временного цикла испытаний, а также устранение влияния внешних нагрузок на динамическое состояние изделия и повышение за счет этого достоверности контролируемых параметров.

Для современных изделий некоторыми характерными особенностями режимов проведения стендовых испытаний являются следующие:

- масса изделий - до 50 тн;
- частотный диапазон вибратора 2 - 2500 Гц;
- частотный диапазон внешних возмущений - 0,1 - 50 Гц;
- амплитудный диапазон вибратора и внешних нагрузок до 5 мм;
- максимальные перегрузки - до 50 g;
- радиальные габариты изделий - до 15 м.

В ряде случаев, например при испытаниях высокоточных оптических приборов, требуется полное устранение внешних динамических воздействий на испытываемые изделия.

Для выполнения названных функций РУ должны иметь в своей структуре упругие, демпфирующие элементы, системы контроля, оценки и регулирования параметров, в том числе те, которые формируют дополнительные силовые воздействия, способствующие стабилизации подвижной массы в статическом и динамическом режимах. Необходимо также знать способы управления характеристиками РУ и системы "вибратор-РУ-изделие" в процессе работы. Разгрузочные устройства должны обладать регулируемыми демпфирующими характеристиками для обеспечения большего затухания в системе при действии внешних нагрузок и ударов.

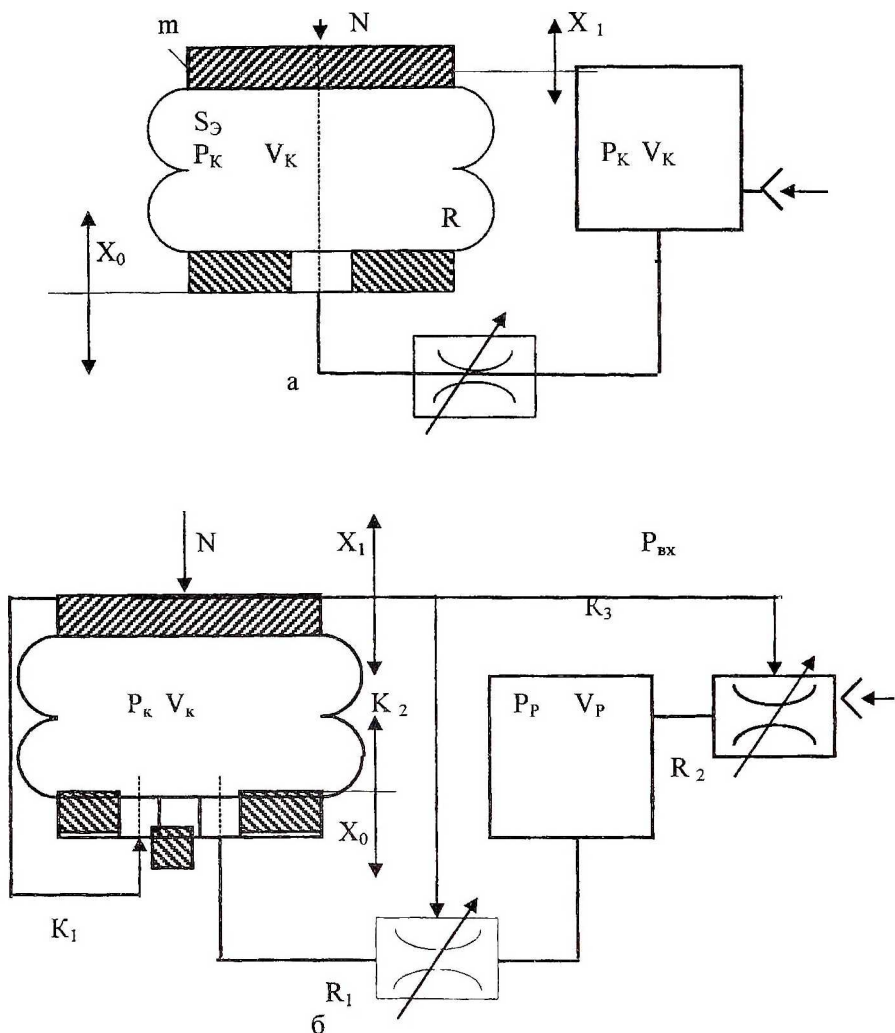


Рис.1. Схемы опорных узлов разгрузочных устройств

Различные виды испытаний требуют особых способов установки и закрепления изделий, определения направления и характера силового возбуждения. Наиболее распространенная и типовая схема вывешивания изделия при испытаниях в вертикальном направлении может быть представлена в виде массы, установленной на нескольких РУ, возбуждение осуществляется в вертикальном направлении вибратором. Если необходимо устранить возможные перемещения

объекта по другим координатам, используются специальные направляющие.

Различные схемы пневмоопор, которые могут быть использованы в РУ, описаны в работе [1]. Рассмотрим две основные схемы, которые в дальнейшем могут быть приняты за исходные для сравнения характеристик при усовершенствовании конструкций. На рис.1,а приведена схема опоры на основе замкнутого газового объема V_k , соединенного магистралью с дополнительной емкостью V_p . Опора закреплена на основании массой m_0 . Внешнее возбуждение x_0 через основание и опору передается на объект в вертикальном направлении x_1 .

Регулирование уровня установки объекта массой m_1 обеспечивается изменением давлением газа в рабочей и демпферной камерах. Вторая схема (рис.1,б) имеет систему автоматического поддержания уровня. Она включает измерительные цепи (например, с коэффициентами усиления k_1, k_2, k_3) и исполнительные устройства, регулирующие подачу воздуха в камеры при изменении массы или рабочего объема. Демпфирование в такой подвеске может меняться параметрами дросселирующих элементов и цепи управления.

При отсутствии управления в статическом режиме жесткость опоры в общем виде запишется в виде: $c = dF/dx$, где F - нагрузка на днище, x - его смещение.

Уравнение состояния рабочего тела (воздух $n=1,4$), записанное для пневмоопоры, имеет вид

$$FV^n / S_0 = p_i V_i^n,$$

где S_0 - эффективная площадь,

$$V = V_i - S_0 x, \quad V_i - \text{среднее значение газового объема}$$

Жесткость подвески

$$c = \frac{dp_k}{dx} = \frac{np_i S_0^2}{V_i} \left(\frac{1}{1 - (S_0 / V_i) x} \right)^{n+1}$$

для случаев, когда $S_0 x \leq V_i$, равна $c = p_i S_0^2 / V_{i\Sigma}$.

Здесь $V_{i\Sigma}$ суммарный объем присоединенных магистралей и демпферного объема ($V_{i\Sigma} = V_k + V_T + V_p$).

В дальнейшем необходимо знать влияние гидродинамических сопротивлений (межкамерных дросселей) на жесткостные характеристики подвески при изменении положения опорной поверхности. Расход воздуха через дроссель при перемещениях основания определяется из уравнения изменения энтальпии газа H

$$\frac{dH}{dt} = W_R c_p T_0 = \frac{du}{dt} + \frac{dE}{dt} \quad (1)$$

Уравнение изменения внутренней энергии секундного массового расхода воздуха при течении через дросселирующий канал

$$\frac{du}{dt} = W_R c_v T_0 = \frac{q c_v}{R} \frac{d}{dt} (pV)$$

и уравнение энергии давления газа позволяют получить исходное уравнение для расчета давления в рабочей камере p_k и давления в ресивере p_p

$$W_R c_p T_0 = \frac{q c_v}{R} \frac{d}{dt} (p_k V_k) + q p_k \frac{dV_k}{dt} \quad (2)$$

Учитывая, что $\frac{1}{c_p} + \frac{1}{nR} = \frac{1}{R}$, получим уравнение изменения

расхода газа через межкамерный дроссель

$$W_R = \frac{q}{RT_0} \left(\frac{V_k}{n} \frac{dp_k}{dt} + p_k \frac{dV_k}{dt} \right) \quad (3)$$

Изменение массового расхода газа W_R определяется также давлением в ресивере

$$W_R = \frac{q V_p}{n R T_0} \frac{dp_p}{dt} \quad (4)$$

С другой стороны, уравнение расхода газа с учетом сжимаемости имеет вид

$$W_R = \frac{q c_r}{2 R T_0} (p_k^2 - p_p^2), \quad (5)$$

где $c_r = \frac{\pi d^3}{12 \mu l}$, d диаметр, l длина цилиндрического канала дросселя R .

Из уравнения (5) при введении осредненного значения давления газа p_i получаем

$$W_R = \frac{P_{iq} C_r}{RT_i} (P_k - P_p). \quad (6)$$

Изменение объема рабочей камеры определяется через изменение координаты днища относительно центрального положения, соответствующего объему камеры V_c :

$$\begin{aligned} V_k &= V_c + S_3 x; \\ \frac{dV_k}{dt} &= S_3 \frac{dx}{dt} \end{aligned} \quad (7)$$

С учетом (7) уравнение (3) запишется

$$W_R = \frac{q}{RT_0} \left[\left(\frac{V_c}{n} + \frac{S_3 x}{m} \right) \frac{dp_k}{dt} + p_k S_3 \frac{dx}{dt} \right]. \quad (8)$$

Из зависимостей (6) и (4) получаем

$$P_p = P_k \frac{1}{1 + \frac{V_p S}{P_i C_r n}}, \quad (9)$$

где $s = d/dt$, $T_{lp} = V_p / P_i C_r n$ параметр, характеризующий процессы в межкамерном дросселе.

С другой стороны, при малых линейных изменениях давлений и перемещений основания изменение массового расхода в магистрали определяется уравнением

$$W_p = a \delta x + b_1 \delta p_k + b_2 \delta p_p, \quad (10)$$

$$\text{где } a = \frac{\partial W_R}{\partial x} \delta x; b_1 = \frac{\partial W_R}{\partial p_k} \delta p_k; b_2 = \frac{\partial W_R}{\partial p_p} \delta p_p.$$

Приравнявая зависимости (8) и (10) и проведя необходимые преобразования, получим выражение в операторной форме для определения динамической реакции газового объема, которая представляет собой отношение приращения давления в рабочей камере к приращению смещения платформы в виде

$$c_{\text{дин}}(s) = \frac{T_{ip} S_3 n s^2 + \left(S_3 n + a \frac{T_{ip} n}{\rho_k} \right) s + \frac{a n}{\rho_k}}{\frac{V_k T_{lp}}{P_k} s^2 + \left(\frac{b_1 n}{\rho_k} T_{lp} - \frac{V_k}{P_k} + \frac{V_p \rho_p}{P_p \rho_k} \right) s + \frac{n}{\rho_k} (b_1 + b_2)}. \quad (11)$$

Выражение (11) можно представить в общем виде

$$c_{\text{дин}}(s) = c \frac{T_3^2 s^2 + T_1 s + 1}{T_4^2 s^2 + T_2 s + 1}, \quad (12)$$

где c ; T_i - параметры, зависящие от конструктивных размеров элементов РУ

При наличии в системе активных цепей (рис.1,б) в зависимости (12) появляются дополнительные передаточные функции каналов управления по давлению в рабочей камере и смещению подвижной массы $W_P(s)$; $W_x(s)$

$$c_{дин}(s) = c \frac{T_3^2 s^2 + T_1 s + 1 + W_x(s)}{T_4^2 s^2 + T_2 s + 1 + W_P(s)}, \quad (13)$$

Найденные значения динамической реакции используем при составлении уравнения движения системы в операторной форме при кинематическом возбуждении

$$\begin{cases} m s^2 x + c_{дин}(s)(x - x_0) = 0 \\ m_0 s^2 x_0 + G_0(s)(x_0 - x) = 0, \end{cases} \quad (14)$$

где $G_0(s)$ динамическая податливость основания; x, x_0 - изображения координат смещения изделия и основания.

Оценим переходные характеристики установленной на РУ массы при кинематическом возбуждении. Передаточные функции системы в замкнутом состоянии [2] для рассматриваемых опорных узлов разгрузочных устройств можно представить в общем виде

$$W_1(s) = \frac{x_1(s)}{x_0(s)} = \frac{\left(1 - \frac{m_0 s^2}{G_0(s)}\right) c_{дин}(s)}{m_1 s^2 + G_{1K}(s)},$$

где G_{1K} - оператор динамической податливости, учитывающий упругие и демпфирующие свойства подвески, в частности, определяющий динамическую жесткость опоры.

Для РУ с управлением по смещению с законом регулирования W_{1P} передаточная функция равна

$$W_2(s) = \frac{1 - \frac{m_0 s^2}{G_0(s)} [G_{1K}(s) - W_P(s)]}{m_1 s^2 + G_{1K}(s) - W_P(s)}.$$

Используя преобразование найденных передаточных функций при ступенчатом внешнем воздействии [3], получаем переходные характеристики системы с учетом изменения некоторых основных параметров (рисунки 2,3).

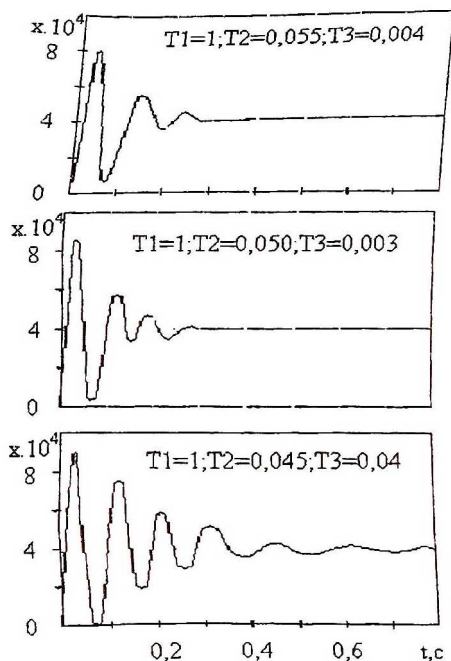


Рис. 2. Влияние величин объемов рабочей и демпферной камер на переходные характеристики системы

К конструктивным параметрам, влияющим на состояние системы отнесены эффективная площадь, геометрические размеры элементов, расходные характеристики дросселей и элементов управления, соотношение объемов рабочей и демпферной камер. Так, увеличение объема рабочей камеры в 1,15 раза при сохранении других параметров приводит к увеличению времени стабилизации массы в 2,5 раза (рис. 2). В этой связи необходимо использование в РУ дополнительных демпфирующих элементов или управляющих воздействий.

Основными эксплуатационными параметрами разгрузочных устройств являются несущая способность опорных узлов или статическая жесткость, давление в рабочих камерах, частотный и амплитудный диапазоны внешних воздействий, масса изделий, податливость элементов, быстродействие, период стабилизации (время

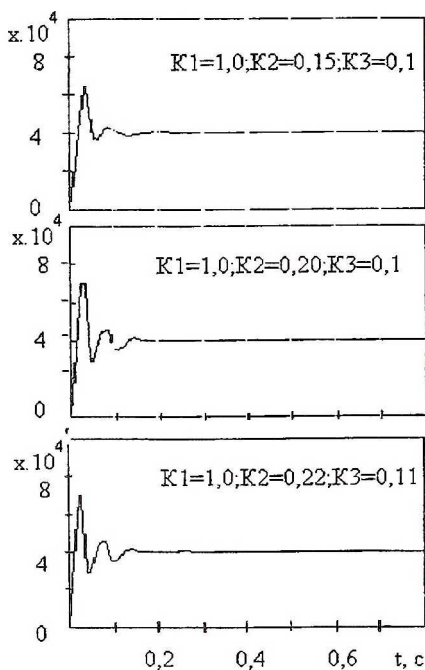


Рис. 3. Переходные характеристики опорных систем с активными связями

переходного процесса), реализуемые законы управления и др. На рис.3 показано влияние регулятора расхода на переходные характеристики системы при реализации пропорционального закона управления по смещению опорной массы. Из полученных графиков следует, что за счет изменения расхода газа через межкамерный дроссель или при изменении давления в рабочей камере от регулятора значительно снижена амплитуда последействия и период стабилизации подвижной массы. Это подтверждает целесообразность использования в системе элементов активного управления характеристиками РУ

Список литературы

1. Самсонов В.Н. Некоторые вопросы создания виброизолирующих подвесок //Periodika Politechnika.-Budapest.-1990. -Vol.34, № 3-4. -pp. 209-221.
2. Самсонов В.Н. Анализ способов и средств стендовой подвески изделий. -Самара.: СГАУ, 1996. -46 с.- Деп. в ВИНТИ 24.07.96 г., № 2533-В96.
3. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. -М.: Наука, 1975,- 768 с.