электронный научно-технический журнал
ИНЖЕНЕРНЫЙ ВЕСТНИК
издатель ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»

Оптимизация технических характеристик пневмогидравлических амортизаторов из условия максимума надёжности механической системы

77-48211/597480

06, июнь 2013

Тушев О. Н., Беляев А. В.

УДК 62.752

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана
tushev1943@bk.ru
beliaev@bmstu.ru

1. Введение. Нелинейные задачи статистической динамики имеют высокую актуальность для инженерной практики. Они используются, в частности, для анализа надежности функционирования механических систем, подвергающихся различным динамическим воздействиям. Это могут быть вибрационные и ударные нагрузки высокой интенсивности, имеющие случайный характер. Известно, что для защиты от таких нагрузок успешно применяются различные системы амортизации. В их числе - двухштоковый телескопический амортизатор [1], схема которого приведена на рис.1. Амортизатор имеет малые габариты при высоких развиваемых усилиях, обладает большим ресурсом работы и возможностью простой регулировки рабочих характеристик. Корпус 1 имеет камеру со сжатым газом 2. Нижняя часть корпуса служит цилиндром, в котором движется поршень 3 основного ("плавающего") штока 8. Основной шток является цилиндром для поршня 6 штока слежения 7. Внутренние полости корпуса и основного штока заполнены рабочей жидкостью 9, поверхность которой отделена от газовой камеры подвижной перегородкой 13. В поршне основного штока имеются дроссельные отверстия 4 и 11, работающие попеременно на прямом и обратном ходах основного штока соответственно. Прямой ход сопровождается сжатием газа. Аналогичные дроссельные отверстия 5 и 10 имеются и в поршне штока слежения. Это обеспечивает демпфирующие усилия на прямом и обратном ходах поршня. Попеременная работа отверстий 4, 7, а также 5, 10 достигается с помощью перекидных шайб (на рисунке не показаны). Маслопровод 12 служит для выравнивания давления в полостях и является дополнительным дроссельным отверстием.

В значительной степени эффективность двухштокового телескопического амортизатора достигается за счет нелинейных участков его упругих и диссипативных

характеристик. Упругая (позиционная) характеристика реализуется сжатым газом (азотом), а демпфирующая (скоростная) - дросселированием жидкости.

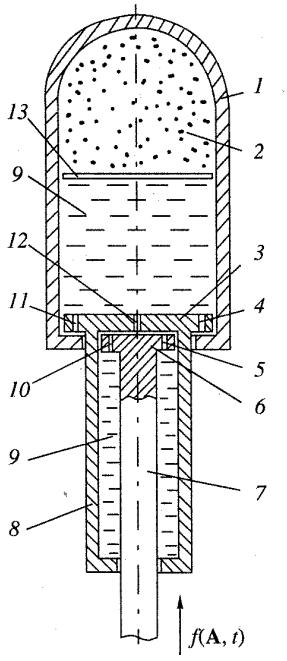

Рис.1. Двухштоковый телескопичекий амортизатор

Надежность механической системы, согласно [2], можно представить как вероятность пребывания в заданных допусках значений некоторой группы кинематических параметров системы, определяющих её нормальное функционирование. В их состав могут входить значения перегрузки, линейные и угловые перемещения отдельных элементов механической системы, перемещение амортизируемого объекта относительно основания, на котором установлен амортизатор, и другие параметры. Указанная оценка надежности механической системы будет использоваться в качестве критерия оптимизации при варьировании упругими и диссипативными характеристиками конкретного амортизатора.

Целью работы является разработка методики выбора оптимальных характеристик двухштокового телескопичекого амортизатора, используемого для защиты объекта от внешнего случайного воздействия.

2. Постановка задачи. Будем считать, что физическая модель защищаемого объекта с системой амортизации имеет конечное число степеней свободы и описывается обыкновенным векторным дифференциальным уравнением

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{\Phi}\left(\mathbf{X}, \mathbf{A}, \mathbf{B}, t\right) + \mathbf{F}\left(\mathbf{A}, t\right), \quad \mathbf{X}\left(t_0\right) = \mathbf{X}_0, \tag{1}$$

где $\mathbf{X}=\left(x_1,x_2,...,x_n\right)^T$, $\mathbf{F}\left(\mathbf{A},t\right)$, $\mathbf{A}=\left(a_1,a_2,...,a_s\right)^T$, $\mathbf{B}=\left(b_1,b_2,...,b_m\right)^T$ – векторы соответственно фазовых координат, внешних возмущений, случайных параметров, варьируемых параметров амортизации; точкой обозначено дифференцирование по времени t, $\mathbf{X}_0$ - вектор фазовых координат в начальный момент времени t_0.

Введем вектор кинематических параметров $\mathbf{V}=\left(v_1,v_2,...,v_l\right)^T$, элементы которого являются заданными аналитическими функциями $\mathbf{X}$, зависящими от $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$. Уровень защиты объекта от динамических нагрузок определяется мерой достижения допустимых границ $v_i^{(0)}$ элементами $\mathbf{V}$ в течение переходного процесса. Таким образом, в пространстве $\mathbf{V}$ задается допустимая область:

$$C=\left\{\mathbf{V}:v_i\left|\left(\mathbf{A},\mathbf{B},t\right)\right|\le v_j^{(0)}\right\},\ j=1,2,...,l,\ t\in\left[0,T\right],$$

где T – граница интервала затухания переходного процесса в системе. Используем в качестве целевой функции при оптимизации надёжность механической системы [3], представляющей собой вероятность нахождения $\mathbf{V}$ в допустимой области C. Тогда наибольший уровень защиты объекта будет обеспечиваться при выполнении условия $\max\limits_{\mathbf{B}}\mathbf{P}\left(\mathbf{V}\in C\right)$.

3. Метод вычислений. Известно, что реализация численной процедуры оптимизации на основе точного определения надежности представляет собой сложную задачу, решение которой для реальных систем требует больших затрат машинного времени. Оценки надежности, полученные в [2, 3], позволяют упростить задачу. Однако, для нестационарных процессов задача остается сложной, если размерность $\mathbf{V}$ велика. Кроме того, оценки обеспечивают удовлетворительную точность только для высоконадежных систем, в то время как на начальном этапе оптимизации надежность может оказаться весьма низкой.

В настоящей работе для приближенного определения надежности предлагается использовать аппроксимацию зависимости элементов $\mathbf{V}$ от случайных параметров посредством полиномиальной интерполяции [4]. После этого вычисление надежности не представляет существенной сложности.

Выберем по каждому из случайных параметров q_i узлов интерполирования $a_{i1},a_{i2},a_{ip_i},...,a_{iq_i}$. Согласно методу [4], интерполяционный полином для *j*-ой составляющей вектора параметров качества строится по формуле Лагранжа (для сокращения записи $\mathbf{B},t$ не указаны):

$$v_j\left(A\right)=\sum_{p_1,p_2,...,p_s}^{q_1,q_2,...,q_s}v_j\left(a_{1p_1},a_{2p_2},...,a_{sp_s}\right)\prod\frac{H_{q_i}\left(a_i\right)}{H'_{q_i}\left(a_{ip_i}\right)\left(a_i-a_{ip_i}\right)},\ j=1,2,...,l, \qquad (2)$$

где $H_{q_i}\left(a_i\right)$ – ортогональные полиномы с весами $\mathbf{\Phi}\left(a_i\right)$; $\mathbf{\Phi}\left(a_i\right)$ – плотности вероятности; $H'_{q_i} = dH_{q_i}\left(a_i\right)/da_i\Big|_{a_i=a_{ip_i}}$.

Суммирование в (2) выполняется по всем возможным комбинациям индексов $p_1, p_2, ..., p_s$. В качестве узлов интерполяции выбираются корни соответствующих ортогональных полиномов. В случае произвольных законов распределения элементов **A** систему ортогональных полиномов можно построить с помощью известной процедуры Грама - Шмидта. Для равномерного, экспоненциального, нормального, "arcsin" распределений данные системы являются классическими полиномами Лагранжа, Лагерра, Эрмита, Чебышева. Значение узлов классических полиномов затабулированы [4, 5]. Доказывается, что аппроксимация (2) обеспечивает минимум средней квадратической ошибки при фиксированном числе узлов.

4. Алгоритм оптимизации. После того как соотношения (2) получены, несложно вычислить с достаточной точностью значения надежности на каждом шаге оптимизационной процедуры с помощью метода Монте-Карло, так как теперь машинное время вычисления одной реализации весьма мало. Заметим, что для определения (2) требуется Q интегрирований исходной системы уравнений

$$Q = q_1 \cdot q_2 \cdot ... \cdot q_s. \tag{3}$$

Из (3) следует, что при решении реальных задач число элементов вектора **A** и количество узлов по каждой из координат ограничиваются относительно небольшими значениями, которые определяются возможностями используемой вычислительной техники.

Для безусловной максимизации надежности можно применить такой алгоритм, который не требует вычисления производных, так как нелинейности в (1) имеют разрывы и изломы. Предлагается использовать метод "деформируемого многогранника" Нельдера – Мида, эффективность которого для подобного класса оптимизационных задач отмечается в [6, 7]. Суть метода заключается в следующем: в пространстве поиска размерности m задается многогранник $m + 1$ вершинами. Многогранник движется к экстремуму путем замены по специальному правилу вершин с наименьшими значениями целевой функции на "лучшие". В процессе поиска многогранник "деформируется", адаптируясь к целевой функции, а в окрестности экстремума стягивается в точку.

5. Конкретизация задачи. Будем считать, что защищаемый объект установлен на подвижном основании (перемещение $f\left(\mathbf{A}, t\right)$) посредством двухштокового телескопического амортизатора. Принципиальная схема системы амортизации приведена на рис. 2.

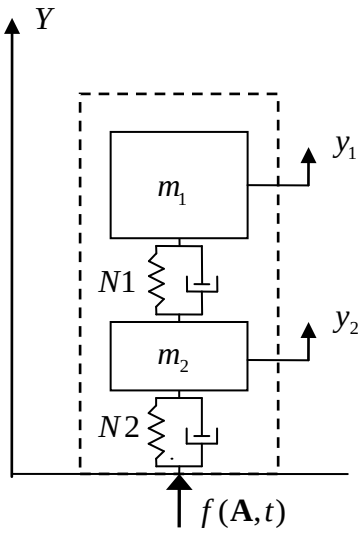

Рис. 2. Принципиальная схема системы амортизации

Амортизатор имеет на два каскада $N1$ и $N2$ (с общей газовой камерой), разделенных инерционным звеном. На рис. 2 обозначено: m_1 – масса защищаемого жесткого объекта; m_2 – масса основного штока. Защищаемый объект и амортизатор размещены в контейнере, который изображен на рисунке пунктиром в виде прямоугольника.

Будем считать, что силовые характеристики каскадов сепарабельны и могут быть представлены в виде

$$R^{(j)}\left(\mathbf{B},u^{(j)},\dot{u}^{(j)}\right)=R_1^{(j)}\left(\mathbf{B},u^{(j)}\right)+R_2^{(j)}\left(\mathbf{B},\dot{u}^{(j)}\right),$$

где $j=1,2$ – номер каскада; $R_1^{(j)}\left(\mathbf{B},u^{(j)}\right),R_2^{(j)}\left(\mathbf{B},\dot{u}^{(j)}\right)$ – позиционная и скоростная характеристика; $u^{(j)}$ – ход каскадов.

Для данного типа амортизаторов позиционные характеристики могут быть сформированы следующим образом:

$$R_1^{(1)}\left(u^{(1)}\right)=\begin{cases}S_p^{(1)}\ при\ 0\le u^{(1)}\le \breve{u}^{(1)},\\ S_{p+k^{(1)}}^{(1)}u^{(1)}\ при\ u^{(1)}\le 0,\end{cases} R_1^{(2)}\left(u^{(2)}\right)=\begin{cases}S_p^{(2)}\ при\ \breve{u}^{(2)}\le u^{(2)}\le 0,\\ S_{p+k^{(2)}}^{(2)}u^{(2)}\ при\ u^{(2)}>0,\end{cases} \tag{4}$$

где p – рабочее давление в полостях амортизатора; $S^{(1)},S^{(2)}$ – контактные жесткости пар основной шток – шток слежения, шток слежения – корпус; $\breve{u}^{(1)},u^{(2)}$ – конструктивно располагаемые ходы.

Положительным считается ход, сопровождающийся сжатием газа. За ноль отсчета принимаются ходы при таком положении амортизатора, когда он имеет минимальный габарит. Давление определяется по формуле политропного сжатия азота [1]

$$p=p_0\left(1-\frac{S^{(1)}u^{(1)}+S^{(2)}u^{(2)}}{\omega_0}\right)^{-h}, \tag{5}$$

где p_0 – зарядное давление; ω_0 – объем газа при $u^{(1)} = u^{(2)} = 0$; h = 1,3 – показатель политропы.

Демпфирующие усилия в амортизаторе возникают в результате дросселирования масла через калиброванные отверстия. При этом реализуется квадратическая зависимость демпфирующих усилий от скорости движения штоков

$$R_2^{(j)}\left(\dot{u}^{(j)}\right) = \begin{cases} D_+^{(j)}\left(\dot{u}^{(j)}\right)^2 \; при\, \dot{u}^{(j)} \geq 0, \\ -D_-^{(j)}\left(\dot{u}^{(j)}\right)^2 \; при\, \dot{u}^{(j)} < 0, \end{cases} \quad j = 1, 2, \tag{6}$$

где $D_+^{(j)}, D_-^{(j)}$ – коэффициенты демпфирования на прямом и обратном ходах, вычисляемые по формуле (индексы опущены) $D = \eta\rho S_1^3 / 2S_2^2$; η – коэффициент сопротивления отверстия; ρ - плотность жидкости; S_2 – площадь калиброванного отверстия; $S_1 = 0.25\pi\left(d_1^2 - d_2^2\right)$; d_1, d_2 – диаметры поршня и штока.

В соответствии с (4)-(6), из условия минимальной размерности пространства поиска экстремума выбираем варьируемые параметры

$$p_0\omega_0, p_0S^{(1)}, p_0S^{(2)}, D_+^{(1)}, D_-^{(1)}, D_+^{(2)}, D_-^{(2)}, \beta, \tag{7}$$

имеющие ясный физический смысл. Здесь $p_0\omega_0$ – потенциальная энергия газа при зарядном давлении; $p_0S^{(1)}, p_0S^{(2)}$ – усилия на штоках амортизатора при $u^{(1)} = u^{(2)} = 0$; $D_+^{(1)}, D_-^{(1)}, D_+^{(2)}, D_-^{(2)}$ – коэффициенты демпфирования; β – коэффициент статической установки защищаемого объекта относительно основания. Введение β диктуется необходимостью наиболее полного использования высоты контейнера, так как в общем случае максимальные перемещения защищаемого объекта вверх и вниз неодинаковы. (Высота контейнера, умноженная на β, дает координату статической установки.)

Для удовлетворения физическому смыслу задачи при оптимизации требуется выполнить следующие координатные ограничения:

$$p_0\omega_0 \geq 0, \quad D_+^{(j)} \geq 0, \quad D_-^{(j)} \geq 0 \quad \left(j = 1, 2\right), \quad 0 \leq \beta \leq 1. \tag{8}$$

Для фиксации защищаемого объекта в заданном статическом положении (до приложения нагрузки и возвращения его в начальное положение) требуется, чтобы

$$p_0S^{(1)} > m_1 g, \quad 0 < p_0S^{(2)} < \left(m_1 + m_2\right) g. \tag{9}$$

Оказалось, что все перечисленные в (7) параметры ограничены. Это необходимо учитывать при оптимизации. Введём элементы **B** с помощью простых преобразований, которые формально позволяют освободиться от координатных ограничений (8), (9)

$$
\begin{aligned}
&p_0\omega_0 = \exp(b_1), \quad p_0 S^{(1)} = m_1 g + \exp(b_2),\\
&p_0 S^{(2)} = (m_1 + m_2) g \left(0.5 + \frac{1}{\pi} arctg(b_3)\right),\\
&D_+^{(1)} = \exp(b_4), \quad D_-^{(1)} = \exp(b_5), \quad D_+^{(2)} = \exp(b_6),\\
&D_-^{(2)} = \exp(b_7), \quad \beta = 0.5 + \frac{1}{\pi} arctg(b_8).
\end{aligned} \tag{10}
$$

Нетрудно заметить, что, согласно (10), при произвольном варьировании $b_i \forall i$ ограничения (8), (9) всегда выполняются.

6. Пример. Рассмотрим оптимизацию параметров амортизатора системы, изображенной на рис. 2. Уравнения движения:

$$
\begin{aligned}
&m_1 \ddot{y}_1 = -m_1 g + R^{(1)}\left(\mathbf{B}, u^{(1)}, \dot{u}^{(1)}\right),\\
&m_2 \ddot{y}_2 = -m_2 g - R^{(1)}\left(\mathbf{B}, u^{(1)}, \dot{u}^{(1)}\right) + R^{(2)}\left(\mathbf{B}, u^{(2)}, \dot{u}^{(2)}\right),
\end{aligned}
$$

где $u^{(1)} = y_1 - y_2, u^{(2)} = y_2 - f(\mathbf{A}, t)$, $f(\mathbf{A}, t) = a_1 \exp(-a_2 t) \sin a_3 t$; a_1, a_2, a_3 – случайные параметры с нормальным законом распределения. Элементами вектора кинематических параметров $\mathbf{V}$ выбраны относительное перемещение и абсолютное ускорение объекта: $v_1 = u^{(1)} + u^{(2)}, v_2 = \ddot{y}_1$. При вычислении надежности применялась параболическая интерполяция (3 узла) по каждому из случайных параметров, что приводит к ошибке не более 4% на границах области практически возможных разбросов случайных параметров $(\pm 3\sigma)$. При реализации метода Монте-Карло использовали $5 \cdot 10^3$ реализаций. Результаты расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1

Оптимальные значения параметров двухштокового телескопического амортизатора

№	*Параметры*	*Начальное значение*	*Оптимальное значение*
1	$p_0\omega_0$, *кДж*	600,7	2413
2	$p_0 S^{(1)}$, *кН*	432,2	438,9
3	$p_0 S^{(2)}$, *кН*	150,4	182,5
4	$D_+^{(1)}$, *т/м*	44,14	39,65
5	$D_-^{(1)}$, *т/м*	539,5	3637
6	$D_+^{(2)}$, *т/м*	112,6	2978
7	$D_-^{(2)}$, *т/м*	24,52	14,09
8	λ	0,5	0,493

Существенные отклонения оптимальных настроек от начальных значений получены для четырех (первого, третьего, пятого и шестого) варьируемых параметров амортизатора:

1) $p_0\omega_0$ – потенциальная энергия газа при зарядном давлении;
2) $p_0S^{(2)}$ – усилие на штоке слежения амортизатора;
3) $D_-^{(1)}$ – коэффициент демпфирования на обратном ходе основного штока;
4) $D_+^{(2)}$ – коэффициент демпфирования на прямом ходе штоке слежения.

Оптимизация рабочих характеристик двухштокового телескопического амортизатора проведена с точностью 2%, на это потребовалось 93 итерации. В результате оптимизации значение надежности $P(V \in C)$ изменилось с 0,692 до 0,981, то есть увеличилось примерно на 40 процентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Драгун Д.К., Иванин В.Я., Левашев В.Н. Пневмогидравлические амортизаторы технологического оборудования. М.: Министерство обороны СССР, 1991. 128 с.
2. Вибрации в технике. Т. 1. Колебания линейных систем / Под ред. В.В. Болотина. М.: Машиностроение, 1978. 352 с.
3. Тушев О.Н., Светлицкий В.А. Приближенные целевые функционалы в задачах оптимизации виброзащиты // Тр. XII Междунар. Симпозиума «Динамика виброударных систем». М.: Наука, 1998. С. 86-88.
4. Чернецкий В.И. Анализ точности нелинейных систем управления. М.: Машиностроение, 1968. 246 с.
5. Статистические методы в проектировании нелинейных систем автоматического управления /Под ред. Б.Г. Доступова. М.: Машиностроение, 1978. 407 с.
6. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1976. 534 с.
7. Сычев М.П., Тушев О.Н. Поисковый алгоритм оптимизации механической системы из условия максимума надежности // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред. М.: Изд-во "ЛАТМЭС" МГАТУ, 1998. С. 71.