

больших значениях диаметра дросселя декремент колебания δ в опоре по первой схеме несколько выше. На рис. 4 дана зависимость декремента колебания δ от диаметра дросселя d , соединяющего рабочую и демпферную камеры по второй и первой схемам.

Таким образом, из рассмотренных конструктивных схем виброизоляторов более эффективной является первая, имеющая наименьшее время переходного процесса и наименьший коэффициент передачи на резонансе. Для этой системы автоматического регулирования (САР) изменение коэффициента регулирования $K_{рег}$ в широких пределах не оказывает существенного влияния на ее динамические характеристики, изменение нагрузки лишь незначительно изменяет динамические характеристики САР.

Л и т е р а т у р а

1. Степанов Л.П., Ревзин Г.А. Пневматическая опора для грохотов. - В сб.: Вибрационная техника. М., 1968.
2. Вибрационные машины в строительстве и производстве строительных материалов. Справочник. М., "Машиностроение", 1970.
3. Березовец Г.Т. и др. О допустимых упрощениях при расчете пневматических регуляторов. - "Приборостроение", 1957, № 4.
4. Григанов А.С. и др. Исследование динамики пневматической системы виброизоляции с сервоуправлением. - В сб.: Автоматизация исследования динамики машин. М., "Наука", 1973.
5. Cavanaugh R.D. Air suspensions and servo-controlled isolation systems. Shock and vibration handbook. v.2, ch 33. N.V., McGraw Hill. 1961.

И.П.Токарев, Д.Е.Чегодаев

НЕЛИНЕЙНОЕ ДЕМПИРОВАНИЕ И АВТОКОЛЕБАНИЯ В ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

Газостатические опоры находят применение как средства виброизоляции оборудования и генерирования полезных вибраций [1], [2]. При этом эффективность их работы определяется динамической реакцией $S_{дин}$, учитывающей жесткостные и демпфирующие свойства опоры.

В работе [3] проведен анализ динамических характеристик газостатических опор как систем с релаксационным механизмом демпфирования. Для линейной модели ГСО получено выражение динамической реакции опоры:

$$C_{дин} = \frac{\partial p_k}{\partial \ell} = c \frac{1 + i\omega T_1}{1 + i\omega T_2}, \quad (1)$$

где ∂p_k - приращение давления в рабочей камере опоры; $\partial \ell$ - приращение перемещения подвижной массы опоры; c - статическая жесткость газостатической опоры; T_1, T_2 - постоянные времени опережения и запаздывания; ω - частота вибраций подвижной массы опоры.

Коэффициенты c , T_1 и T_2 зависят от геометрии опоры, рода используемого газа и давлений на входе в опору $p_{вх}$ и на выходе из нее p_a . Динамическая реакция может быть представлена в виде суммы упругой $C_{упр}(\omega)$ и диссипативной $D(\omega)$ составляющих:

$$C_{дин}(i\omega) = C_{упр}(\omega) + iD(\omega), \quad (2)$$

где

$$C_{упр} = c \frac{1 + T_1 T_2 \omega^2}{1 + T_2^2 \omega^2},$$

$$D(\omega) = c\omega \frac{T_1 - T_2}{1 + T_2^2 \omega^2}.$$

Выражение (2) позволяет проанализировать влияние рабочих параметров опоры на каждую из составляющих в отдельности и оценить устойчивость стационарных положений подвижной массы. Устойчивым положениям соответствует положительное демпфирование газового слоя, что имеет место при

$$T_1 > T_2$$

В тех случаях, когда колебательные процессы в опоре происходят с достаточно малой амплитудой перемещения подвижного звена, полученное выражение для динамической жесткости хорошо отражает реальные процессы.

Иначе обстоит дело с нелинейной моделью ГСО, которая принимается при условии существенного проявления нелинейностей и имеет особенности, не отражающиеся выражениями (1), (2). Из всех нелинейностей в уравнениях, описывающих динамику газостатических опор, рассмотрим

только нелинейную зависимость давления p_k в рабочей камере ГСО от хода ℓ подвижной массы опоры, определяемую уравнением неразрывности

$$M_{\delta x}(\ell, p_k) - M_{\delta_{\text{вих}}}(\ell, p_k) = \frac{d}{dt}(\rho V_k), \quad (3)$$

где ρ - плотность газа; V_k - объем рабочей камеры опоры.

Кроме входного $M_{\delta x}(\ell, p_k)$ и выходного $M_{\delta_{\text{вих}}}(\ell, p_k)$ расходов в уравнении (4) нелинейной является и функция

$$F(\ell, p_k) = \frac{d}{dt}[\rho(p_k) \cdot V(\ell)]. \quad (4)$$

Для определения зависимости динамической жесткости ГСО от амплитуды колебаний a принимаются квазигармонические законы изменения $\ell(t)$ и $p_k(t)$:

$$\begin{aligned} \ell &= \ell_0 + \tilde{\ell}, & \tilde{\ell} &= a \sin \omega t; \\ p_k &= p_0 + \tilde{p}, & \tilde{p} &= c_{\text{гнр}} a \sin \omega t + D a \cos \omega t, \end{aligned} \quad (5)$$

проводится гармоническая линейризация функций $M_{\delta x}(\ell, p_k)$, $M_{\delta_{\text{вих}}}(\ell, p_k)$ и $F(\ell, p_k)$:

$$\begin{aligned} M_{\delta x}(\ell, p_k) &\approx M_0' + a_1 \tilde{\ell} + b_1 \tilde{p}; \\ M_{\delta_{\text{вих}}}(\ell, p_k) &\approx M_0'' + a_2 \tilde{\ell} + b_2 \tilde{p}; \\ F(\ell, p_k) &\approx a_3 s \tilde{\ell} + b_3 s \tilde{p}, \end{aligned} \quad (6)$$

где M_0' , M_0'' , a_1 , b_1 , a_2 , b_2 , a_3 , b_3 - коэффициенты гармонической линейризации функций $M_{\delta x}$, $M_{\delta_{\text{вих}}}$, F , зависящие от параметров опоры и амплитуды колебаний a ; $s = \frac{d}{dt}$ - оператор Лапласа.

Гармонически линейризованное уравнение неразрывности определяет динамическую реакцию газового слоя $C_{\text{дин}}^*(s)$ в нелинейной постановке:

$$C_{\text{дин}}^*(s) = \frac{\tilde{p}(s)}{\tilde{\ell}(s)} = \frac{a_2 - a_1 + a_3 s}{b_1 - b_2 + b_3 s},$$

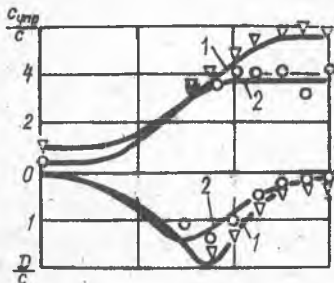
или

$$C_{\text{дин}}^*(s) = C^* \frac{1 + T_1^* s}{1 + T_2^* s}. \quad (7)$$

Здесь c^* - статическая жесткость, T_1^*, T_2^* - постоянные времени опережения и запаздывания нелинейной модели газостатической опоры.

Таким образом, динамическая реакция для нелинейной модели ГСО имеет тот же вид, что и для линейной. Однако коэффициенты c, T_1^* и T_2^* имеют функциональную зависимость от амплитуды колебаний. Полученные результаты могут быть использованы для анализа резонансных характеристик и автоколебательных режимов ГСО.

Упругая $c_{упр}^*(a, \omega)$ и диссипативная $D^*(a, \omega)$ составляющие динамической реакции получаются из выражения (7) подстановкой $s = i\omega$ и совпадают по виду с выражением (2). Графическая зависимость безразмерных величин $c_{упр}^*/c^*$ и D^*/c^* от частоты колебаний ω для устойчивых положений ($T_1 > T_2$) равновесия опорной массы приведена на рис. 1. Для сравнения сюда же нанесены зависимости упругой и диссипативной составляющих, полученных для линейной модели ГСО (т.е. при $a = 0$). Видно, что $c_{упр}^*$ в области низких ($\omega \rightarrow 0$) и высоких ($\omega \rightarrow \infty$) частот падает с ростом амплитуды колебаний a .



Р и с. 1. Безразмерная упругая $c_{упр}/c$ и диссипативная D/c составляющие динамической жесткости для линейной (1) и нелинейной (2) моделей газостатической опоры:

- o, ∇ - экспериментальные результаты;
- ∇ - при $a = 0,5$ мм;
- o - при $a = 5,0$ мм

Это может быть объяснено в рамках представлений ГСО как системы с релаксационным механизмом демпфирования. Действительно, зависимость статической несущей способности гидростатической опоры от хода подвижной массы опоры ℓ носит "мягкий" характер, а квазинепроточной опоры [4] - "жесткий". Однако, поскольку эта зависимость асимметрична относительно координаты положения статического равновесия, в обоих случаях выполняется неравенство $c_{упр}^*(a, \omega) < c_{упр}^*(\omega)$. Диссипативная составляющая $D^*(a, \omega)$ уменьшается с ростом a .

Полученные теоретические результаты и выводы подтверждены экспериментальными исследованиями составляющих динамической реакции.

Подобная зависимость упругой составляющей динамической жесткости от амплитуды колебаний a существует и для неустойчивых ($T_1 < T_2$)

режимов работы газостатической опоры. Однако в этом случае жесткость квазинепротоочной опоры не зависит от амплитуды колебаний. Диссипативная составляющая возрастает при увеличении a . Это может служить объяснением устойчивых автоколебаний подвижной массы опоры. Они возникают в области неустойчивых положений равновесия опорной массы, где справедливы следующие неравенства:

$$T_1 < T_2; \quad (8)$$

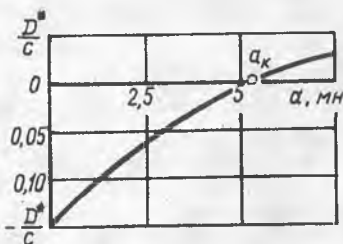
$$C_{ynp}^*(\omega \rightarrow \infty) < C_{ynp}^*(\omega \rightarrow 0); \quad (9)$$

$$D(\omega) < 0. \quad (10)$$

Поскольку диссипативная составляющая $D(\omega)$ динамической реакции отрицательна, то подвижная масса опоры раскачивается около неустойчивого положения равновесия. С ростом амплитуды a газостатическая жесткость $C_{ynp}^*(a, 0)$, как указано выше, уменьшается. При этом демпфирование опоры увеличивается и при какой-то $a = a_k$ достигает нулевого уровня:

$$D^*(a_k) = 0. \quad (11)$$

Дальнейшей раскачки массы опоры не происходит, так как при $a > a_k$ диссипативная составляющая $D^*(a)$ становится положительной, что приводит к уменьшению амплитуды свободных колебаний подвижной массы опоры и уменьшению демпфирования до нуля (рис. 2).



Р и с. 2. Увеличение демпфирования газостатической опоры при раскачке подвижной массы около неустойчивого положения равновесия

Жесткость опоры в этом случае становится постоянной по частоте:

$$C_{ynp}^*(a, 0) = C_{ynp}^*(a, \infty) = C^*. \quad (12)$$

Таким образом, в области неустойчивых положений равновесия газостатической опоры возможно состояние, когда демпфирование газовой полости, полученное для линейной модели ГСО, отрицательно, а для нелинейной - равно нулю. Для упругих составляющих динамической жесткости справедливы зависимости (9) и (12). При этом подвижная масса опоры совершает устойчивые автоколебания с амплитудой a_k и частотой $\Omega = \sqrt{\frac{c^*}{m}}$. Выражение для амплитуды получается из зависимостей (7) и (11) и имеет вид

$$\Gamma_1^* = \Gamma_2^* \quad (13)$$

Проведенные исследования динамических характеристик нелинейной модели газостатических устройств могут быть использованы при проектировании и расчете газостатических опор и генераторов механических колебаний.

Л и т е р а т у р а

1. Белоусов А.И., Несоломенов Г.Ф., Токарев И.П., Чегодаев Д.Е. Низкочастотный пневмостатический амортизатор. - В сб.: Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. Труды КуАИ, 1975, вып. I (68).
2. Галинскас А.В., Гаспарюнас И.В., Кибиркштис Э.Д., Лукшите Б.Б., Шермункшнис А.П. Пневматические вибраторы, работающие в автоколебательном режиме. - В сб.: Вибротехника. Каунас, 1973.
3. Белоусов А.И., Чегодаев Д.Е. Динамические характеристики газостатических устройств. - В сб.: Вопросы виброизоляции оборудования и приборов. Ульяновск, 1974.
4. Чегодаев Д.Е., Белоусов А.И. Гидростатические опоры как гасители колебаний. - В сб.: Проектирование и доводка авиационных газотурбинных двигателей. Труды КуАИ, 1974, вып. 67.

В.П.Шорин, А.Г.Гимадиев, Г.И.Берестнев

ДЕМПФИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ В МАНОМЕТРИЧЕСКИХ МАГИСТРАЛЯХ

При измерении пульсирующего давления манометрическим прибором наблюдается систематическое занижение показаний, достигающее 10-15%