

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., Несоленов 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%

и зависящее от класса точности манометра, пределов его измерения, амплитуды и частоты пульсаций [1]. С целью уменьшить влияние пульсаций давления на точность измерения среднего значения давления предложен демпфер из материала МР (металлорезина) [2].

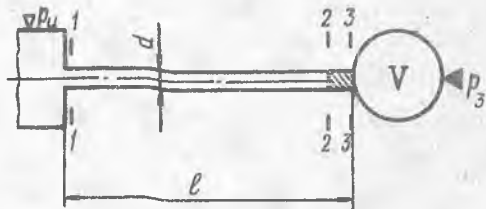
Расчет параметров демпфера из МР проводится исходя из условия обеспечения заданного ослабления пульсаций давления в трубке Бурдона манометра. При этом полагается, что на демпфере реализуется квазистационарный закон гидравлических потерь, возмущения на входе в измерительную магистраль представляют собой гармонические колебания давления.

Связь между давлением и объемным расходом в граничных сечениях подводящего трубопровода (рис. 1) можно выразить согласно [3] зависимостями:

$$p_1 = p_2 \operatorname{ch} \gamma l - j \frac{\rho c^2 \gamma}{S \omega} q_2 \operatorname{sh} \gamma l;$$

$$q_1 = j \frac{S \omega}{\rho c^2 \gamma} p_2 \operatorname{sh} \gamma l + q_2 \operatorname{ch} \gamma l, \quad (I)$$

где $\gamma = \frac{\omega}{c} \left[j \frac{4}{d \sqrt{\frac{\rho \omega}{\nu}}} \frac{J_1(j \frac{d}{2} \sqrt{\frac{\rho \omega}{\nu}})}{J_2(j \frac{d}{2} \sqrt{\frac{\rho \omega}{\nu}})} \right]^{1/2}$ - коэффициент распространения волн, p_1 , p_2 и q_1, q_2 - векторы давления и объемного расхода, J_1, J_2 - функции Бесселя первого и второго порядка первого рода, ρ, ν - плотность и коэффициент кинематической вязкости рабочей среды, c - скорость звука в рабочей среде, S - площадь поперечного сечения трубопровода, ω - круговая частота $j = \sqrt{-1}$.



Р и с. 1. Расчетная схема манометрической магистрали

Коэффициент распространения $\gamma = \sigma + j \epsilon$ комплексная величина, действительная часть которой характеризует затухание волны по амплитуде, а мнимая - фазовый сдвиг. Формулы для определения σ и ϵ представляют сложные зависимости, вычисление которых производится с использованием функций Томсона. Для инженерных расчетов можно вос-

пользоваться приближенными зависимостями [3]

$$\sigma = \varepsilon_0 \left[\frac{k_2}{2k_1} \left(\sqrt{1 + \frac{1}{k_2^2}} - 1 \right) \right]^{1/2}; \quad (2)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left[\frac{k_2}{2k_1} \left(\sqrt{1 + \frac{1}{k_2^2}} - 1 \right) \right]^{1/2},$$

где $\varepsilon_0 = \frac{32\dot{\nu}}{d^2 c} \bar{\omega}$, $\bar{\omega} = \frac{d^2 \omega}{32\dot{\nu}}$.

Параметры k_1 , k_2 в соотношениях (2) вычисляются по формулам

$$k_1 = \frac{(1 - 2\sqrt{\bar{\omega}} + 4\bar{\omega})(2\sqrt{\bar{\omega}} - 1)}{4\bar{\omega} - \sqrt{\bar{\omega}}}; \quad k_2 = \frac{4\bar{\omega}(2\sqrt{\bar{\omega}} - 1)}{4\bar{\omega} - \sqrt{\bar{\omega}}}$$

при $\bar{\omega} \gg 2$ и $k_1 = k_2 = \bar{\omega}$ при $\bar{\omega} < 2$.

Граничное условие на входе в трубопровод соответствует подключению трубопровода к идеальному источнику колебаний давления

$$p_1 = p_4. \quad (3)$$

Для сечений магистрали, ограничивающих демпфер, граничные условия определяются соотношениями

$$g_2 = g_3; \quad (j m \omega + K) g_2 = p_2 - p_3; \quad g_3 z_H = p_3, \quad (4)$$

где $z_H = -j \frac{\rho c^2}{V \bar{\omega}}$, V - приведенный объем гидравлической полости манометра, K , m - коэффициенты, учитывающие гидравлические потери и эффективную колеблющуюся массу рабочей среды в демпфере. Коэффициент K связан с параметрами демпфера и рабочей среды зависимостью [2]

$$K = \frac{A(1-\Pi)^2 \rho \nu l g}{\Pi^2 S_g d_{np}^2}, \quad (5)$$

где A - постоянная пористой среды, Π - пористость материала МР, d_{np} - диаметр проволоки, из которой изготовлен МР, S_g , l_g - площадь поперечного сечения и длина демпфирующего элемента.

Ввиду малости индуктивного сопротивления демпфера по сравнению с активным при расчете полагается $m = 0$.

Из совместного решения уравнений (1), (3), (4) получим выражение для частотной характеристики магистрали:

$$\frac{P_3}{P_u} = \frac{1}{\operatorname{ch} \gamma \bar{\ell} + \frac{\sqrt{\bar{\Omega}}}{S} \operatorname{sh} \gamma \bar{\ell} + j \kappa \frac{V \omega}{\rho c^2} \operatorname{ch} \gamma \bar{\ell}} \quad (6)$$

Для общности анализа и расчета демфера представим модуль частотной характеристики (6) в безразмерных параметрах:

$$\left| \frac{P_3}{P_u} \right| = \frac{1}{\sqrt{T^2 + H^2}} \frac{\operatorname{tg} \frac{\pi \bar{\ell}}{2}}{k_\omega}$$

где

$$T = \frac{2}{\pi k_\omega \bar{\ell}} \left[(\alpha \operatorname{ch} \alpha \sin \beta + \beta \cos \beta \operatorname{sh} \alpha) + \frac{1}{R} \operatorname{sh} \alpha \sin \beta \right] + \bar{\kappa} \operatorname{ch} \alpha \cos \beta,$$

$$H = \frac{2}{\pi k_\omega \bar{\ell}} \left[(\beta \sin \beta \operatorname{ch} \alpha - \alpha \operatorname{sh} \alpha \cos \beta) - \frac{1}{R} \operatorname{ch} \alpha \cos \beta \right] + \bar{\kappa} \operatorname{sh} \alpha \sin \beta,$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{\pi}{2} k_\omega \bar{\ell} \left[\frac{2\bar{\Omega}}{1-2\sqrt{\bar{\Omega}}+4\bar{\Omega}} \left(\sqrt{1 + \frac{[4\bar{\Omega}-\sqrt{\bar{\Omega}}]^2}{4\bar{\Omega}(2\sqrt{\bar{\Omega}}-1)}} - 1 \right) \right]^{1/2} \\ \beta &= \frac{\pi}{2} k_\omega \bar{\ell} \left[\frac{2\bar{\Omega}}{1-2\sqrt{\bar{\Omega}}+4\bar{\Omega}} \left(\sqrt{1 + \frac{[4\bar{\Omega}-\sqrt{\bar{\Omega}}]^2}{4\bar{\Omega}(2\sqrt{\bar{\Omega}}-1)}} + 1 \right) \right]^{1/2} \end{aligned} \right\} \text{при } \bar{\Omega} > 2,$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{\pi}{2\sqrt{2}} k_\omega \bar{\ell} \left(\sqrt{1 + \frac{1}{\bar{\Omega}^2}} - 1 \right)^{1/2} \\ \beta &= \frac{\pi}{2\sqrt{2}} k_\omega \bar{\ell} \left(\sqrt{1 + \frac{1}{\bar{\Omega}^2}} + 1 \right)^{1/2} \end{aligned} \right\} \text{при } \bar{\Omega} < 2,$$

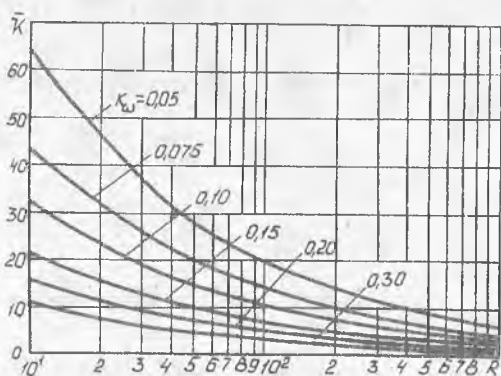
$$\bar{\Omega} = \frac{\pi}{2} \frac{k_\omega \bar{\ell}}{\gamma}, \quad \bar{\ell} = \frac{2L\omega_0}{\pi c} \quad - \text{ относительная длина трубопровода;}$$

$\omega_0 = \frac{\pi \bar{\ell} c}{4L}$ - круговая частота собственных колебаний рабочей среды в манометрической магистрали; $k_\omega = \frac{\omega}{\omega_0}$ - относительная частота вынужденных колебаний; $R = \frac{V}{\bar{\ell} S}$ - параметр, характеризующий отношение

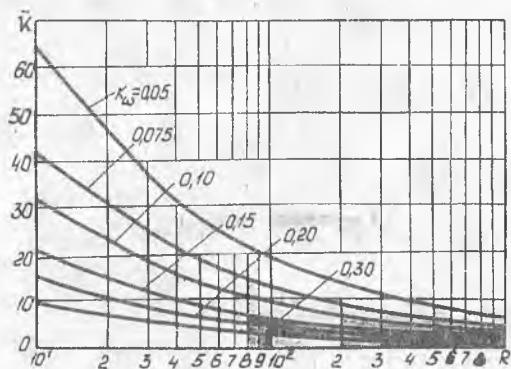
приведенного объема полости манометра и объема трубопровода; $\bar{\gamma} = \frac{128 \nu \bar{\ell} S}{\pi d^4 c}$ - относительное гидравлическое сопротивление трубопровода; $\bar{\kappa} = \frac{\kappa S}{\rho c}$ - параметр, учитывающий гидравлические потери на демфере.

Параметр R связан с $\bar{\ell}$ соотношением

$$R = \frac{2}{\pi \bar{\ell}} \operatorname{ctg} \frac{\pi \bar{\ell}}{2}.$$



Р и с. 2. Зависимость относительных гидравлических потерь на демпфере от параметра R при $\eta = 0,0001$



Р и с. 3. Зависимость относительных гидравлических потерь на демпфере от параметра R при $\eta = 1,0$

полученным приведением к безразмерному виду трансцендентного уравнения собственных колебаний рабочей среды в манометрической магистрали.

Определение параметров демпфера, обеспечивающих заданное ослабление ψ пульсаций давления полости манометра, проведено исходя из условия $\left| \frac{p_3}{p_0} \right| < \psi$.

Результаты расчета для десятикратного ослабления пульсаций давления ($\psi = 0,1$) представлены в виде номограмм, связывающих параметры R и $\bar{\kappa}$ при различных значениях $\bar{\gamma}$ и k_{ω} . Некоторые из этих номограмм для крайних значений $\bar{\gamma} = 0,0001; 1,0$ представлены на рис. 2, 3.

Расчет демпферов по полученным номограммам ведется в следующем порядке. По исходным данным определяется параметр R и вычисляется $\bar{\gamma}$, $k_{\omega} = \frac{\omega}{\omega_0}$, где за ω принимается минимальная частота входных колебаний. По известным $\bar{\gamma}$, k_{ω} и R определяется из номограмм $\bar{\kappa}$. Задавшись некоторыми геометрическими размерами демпфера (l_g , s_g , d_{np}) при известной рабочей среде с использованием формулы (5) определяется пористость Π , которую легко варьировать.

Экспериментальная проверка предложенной методики расчета демпферов проводилась для манометрической магистрали, включающей образцовый манометр (0 - 10 дан/см²), подводящий трубопровод ($l = 450$ мм, $d = 3,8$ мм) и демпфер с параметрами: $\Pi = 0,22$; $l_g = 10,5$ мм; $s_g = 11,3$ мм²; $d_{np} = 0,5$ мм. Рабочая среда - масло АМГ-10. На входе в манометр задавались колебания давления с амплитудой 0,6 дан/см² и частотой 5 - 40 Гц.

В результате экспериментальных исследований установлено, что показания демпфированного образцового манометра совпадают в пределах класса точности прибора со средним значением пульсирующего давления, в то время как осредненные показания недемпфированного образцового манометра занижены на 2%.

Л и т е р а т у р а

1. Ш о р и н В.П., К о н е в А.Г. Влияние пульсаций давления и вибраций корпуса на точность показаний манометров. - "Авиационная промышленность", 1968, № 12.
2. Б е л о у с о в А.И., И ж е у р о в Е.А., К а з а к о в С.Л., К о ж е в н и к о в В.М., М и х е е в В.И. Дросселирующие элементы большого сопротивления на основе упруго-пористого материала МР. - В сб.: Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. Куйбышев, 1975, вып. I(68).

3. П о п о в Д.Н. О влиянии нестационарности профиля местных скоростей на динамические характеристики длинного трубопровода. "Изв. вузов. Машиностроение", 1968, № I.