

О ВЫБОРЕ ПАРАМЕТРОВ ГАСИТЕЛЕЙ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Е.В. Шахматов,
И.А. Попельнюк

«Самарский национальный
исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

Московское шоссе, д. 34,
г. Самара, 443086

shakhm@ssau.ru

В статье рассматривается проблема выбора параметров гасителей колебаний для гидравлических цепей систем управления с учётом обеспечения динамической точности системы после их установки. Вводится понятие коэффициента коррекции, представляющего собой отношение изображений по Лапласу соответствующих параметров рабочей среды в гидравлической цепи до и после установки гасителя. Получена зависимость, связывающая относительное отклонение регулируемого параметра системы с коэффициентом коррекции. Сформулировано условие для проверки эффективности действия гасителя с учётом сохранения требуемого качества регулирования в системе.

Ключевые слова: гидравлическая цепь; гаситель колебаний; коэффициент коррекции, динамическая точность

1 Введение

Гасители колебаний являются одним из эффективных средств подавления вынужденных колебаний рабочей среды в гидравлических системах. Выбор параметров гасителей колебаний по существующим методикам [1] проводится из условий требуемого снижения амплитуды колебаний рабочей среды, т.е.:

$$K_{\text{вн}} \geq K_{\text{вн тр}} \text{ при } \omega \in [\omega_1, \omega_2] \quad (1)$$

где $K_{\text{вн}}$, $K_{\text{вн тр}}$ – фактическое и требуемое значения коэффициента вносимого затухания; ω – угловая частота колебаний; ω_1 и ω_2 – нижний и верхний пределы диапазона частот подавляемых колебаний. В качестве дополнительного используется условие обеспечения гидравлического сопротивления устройства не выше заданного $R_2 \leq R_{2 \text{ доп}}$ – фактическое и допустимое значения гидравлического сопротивления гасителя. Однако, такой выбор параметров гасителей для гидравлических цепей систем управления может привести к невыполнению требований по качеству регулирования, в частности к отклонению выходного

параметра цепи в переходном процессе выше допустимой нормы. Для нормального функционирования системы управления с гасителем колебаний необходимо, чтобы одновременно выполнялись требования по подавлению повышенных колебаний рабочей среды (1) и по динамической точности системы:

$$\Delta \bar{X}_p(t) \leq \Delta \bar{X}_{p \text{ доп}}(t), \quad (2)$$

где $\Delta \bar{X}_p(t)$, $\Delta \bar{X}_{p \text{ доп}}(t)$ фактическое и допустимое относительные отклонения выходного (регулируемого) параметра системы, обусловленные установкой гасителя колебаний.

2 Расчёт коэффициента коррекции и выбор параметров гасителей колебаний

Для оценки эффективности действия гасителей в системе управления с учетом условий (1) и (2) целесообразно ввести понятие коэффициента коррекции $K_k(s)$, который представляет собой отношение изображений по Лапласу соответствующих параметров рабочей среды в гидравлической цепи до и после установки гасителя.

Коэффициент коррекции $K_k(s)$ позволяет анализировать характеристики системы как во временной, так и в частотной области и установить взаимосвязь параметров, определяющих условия (1) и (2).

Для оценки эффективности действия гасителей рассмотрим гидравлическую цепь системы управления, которая состоит из ряда функционально связанных между собой агрегатов и может быть представлена обобщенной схемой (рисунок 1) с выделением трех основных участков: 1 – агрегаты управления (левая часть), 2 – агрегаты распределения жидкости и исполнительные органы (правая часть), 3 – трубопровод командного давления. Предполагаем, что помимо трубопровода 3 левая 1 и правая 2 части системы динамически не связаны; сигнал управления X_y действует на один из агрегатов в левой части 1 и передается к выходу правой части 2, то есть выходным параметром системы по полезному сигналу является регулируемый параметр X_p .

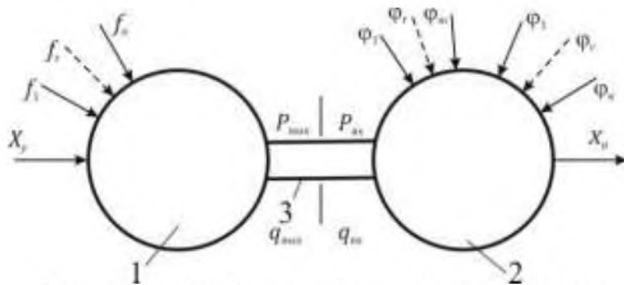


Рисунок 1 – Обобщенная функциональная схема гидравлической цепи системы управления

Возмущающие факторы, являющиеся причиной повышенных колебаний рабочей среды, действуют как в левой, так и в правой частях гидравлической цепи. Рассматриваем вынужденные колебания, период которых существенно меньше характерного времени переходного процесса по сигналу управления. Колебания рабочей среды контролируются в соединительном трубопроводе 3, и по одному из сечений трубопровода задается требуемый коэффициент вносимого затухания. Вначале рассмотрим исходную

гидравлическую цепь (рисунок 1), для которой с учётом принятых допущений справедлива следующая система линеаризованных уравнений в изображениях по Лапласу:

$$p_{\text{вых}} = z_1(s)q_{\text{вых}} + W_1(s)X_y + \sum_{r=1}^{r=n} F_r(s) \cdot \bar{f}_r;$$

$$p_{\text{вых}} = p_{\text{ex}}; q_{\text{вых}} = q_{\text{ex}};$$

$$p_{\text{ex}} = Z_2(s)q_{\text{ex}} + \sum_{r=1}^{r=m} \Phi_r(s) \cdot \bar{\varphi}_r; \quad (3)$$

$$X_p = W_2(s)[W_p(s)p_{\text{ex}} + W_q(s)q_{\text{ex}}] + \sum_{r=1}^{r=k} \Psi_r(s) \cdot \psi_r,$$

где $p_{\text{вых}}, q_{\text{вых}}$ – давление и расход на выходе из левой части системы;

$Z_1(s) = \frac{p_{\text{вых}}}{q_{\text{вых}}}$ – входной импеданс левой части системы;

X_y – сигнал управления;

$W_1(s) = \frac{p_{\text{вых}}}{x_y}$ – передаточная функция

системы по сигналу управления;

$F_r(s) = \frac{p_{\text{вых}}}{f_r}$ – передаточная функция

системы по возмущающему воздействию f_r ;

$p_{\text{вых}}, q_{\text{вых}}$ – давление и расход на входе в правую часть системы;

$Z_2(s) = \frac{p_{\text{ex}}}{q_{\text{ex}}}$ – входной импеданс правой части системы;

$\Phi_r(s) = \frac{p_{\text{ex}}}{\varphi_r}$ – передаточная функция правой

части системы по возмущающему воздействию φ_r ;

$W_2(s)$ – передаточная функция исполнительного органа цепи управления;

$W_p(s)$ и $W_q(s)$ – передаточные функции, связывающие давление и расход с входным

параметром исполнительного органа;

$\psi_r(s)$ – передаточная функция, связывающая регулируемый параметр цепи X_p непосредственно с возмущающим воздействием ψ_r со стороны исполнительных органов.

При установке гасителя на стыке левой и правой частей системы параметры гидравлической цепи изменяются и система уравнений (3) принимает вид

$$p_{\text{вых}} + \Delta p_{\text{вых}} = Z_1(s)(q_{\text{вых}} + \Delta q_{\text{вых}}) + W_1(s)X_y + \sum_{r=1}^{r=n} F_r(s) \cdot f_r;$$

$$p_{\text{вых}} + \Delta p_{\text{вых}} = A(s)(p_{\text{ex}} + \Delta p_{\text{ex}}) + B(s)(q_{\text{ex}} + \Delta q_{\text{ex}});$$

$$q_{\text{вых}} + \Delta q_{\text{вых}} = C(s)(p_{\text{ex}} + \Delta p_{\text{ex}}) + D(s)(q_{\text{ex}} + \Delta q_{\text{ex}}); \quad (4)$$

$$p_{\text{ex}} + \Delta p_{\text{ex}} = Z_2(s)(q_{\text{ex}} + \Delta q_{\text{ex}}) + \sum_{r=1}^{r=m} \Phi_r(s) \cdot \varphi_r;$$

$$X_p + \Delta X_p = W_2(s)[W_p(s)(p_{\text{ex}} + \Delta p_{\text{ex}}) + W_q(s)(q_{\text{ex}} + \Delta q_{\text{ex}})] +$$

$$+ \sum_{r=1}^{r=k} \psi_r(s) \cdot \psi_r,$$

где $A(s), B(s), C(s), D(s)$ – коэффициенты матрицы передачи гасителя колебаний, выраженные в операторной форме; индексом Δ обозначены отклонения параметров, обусловленные установкой гасителя колебаний.

Рассмотрим случай, когда возмущающие воздействия приложены так же, как и сигнал управления, к левой части системы, то есть когда $\varphi_r = 0, r = 1 \dots m$. Тогда гаситель препятствует прохождению колебаний от левой части системы в правую. Для оценки эффективности гасителя определим коэффициент коррекции по давлению P_{ex} :

$$K_k(s) = \frac{P_{\text{ex}}}{p_{\text{ex}} + \Delta p_{\text{ex}}}$$

Формула для $K_k(s)$ выводится из совместного решения уравнений (3) и (4), решая которые получим

$$p_{\text{ex}} = \frac{Z_2(s)}{Z_1(s) + Z_2(s)} \left| W_1(s) \tilde{X}_y + \sum_{r=1}^{r=n} F_r(s) \cdot f_r \right| \quad (5)$$

$$p_{\text{ex}} + \Delta p_{\text{ex}} = \frac{Z_2(s) \left| W_1(s) X_y + \sum_{r=1}^{r=n} F_r(s) \cdot f_r \right|}{A(s)Z_2(s) + B(s) + C(s)Z_1(s)Z_2(s) + D(s)Z_1(s)} \quad (6)$$

Отношение выражений (5) и (6) дают значение

$$K_k(s) = \frac{A(s)Z_2(s) + B(s) + C(s)Z_1(s)Z_2(s) + D(s)Z_1(s)}{Z_1(s) + Z_2(s)} \quad (7)$$

Из равенства (7) следует, что коэффициент коррекции будет одинаков как для управляющего, так и для возмущающего воздействий и определяется параметрами гидравлической цепи и гасителя колебаний.

Проанализируем случай, когда возмущения приложены к правой части системы ($f_r = 0, r = 1, \dots, n$). В этом случае гаситель препятствует прохождению колебаний из правой части в левую, то есть навстречу полезному сигналу. Коэффициент коррекции определяется соотношением

$$K'_k(s) = \frac{P_{\text{вых}}}{p_{\text{вых}} + \Delta p_{\text{вых}}}.$$

Из решения систем уравнений (3) и (4) будем иметь:

$$p_{\text{вых}} = \frac{Z_2(s)}{Z_1(s) + Z_2(s)} W_1(s) X_y + \frac{Z_1(s)}{Z_1(s) + Z_2(s)} \left. \sum_{r=1}^{r=m} \Phi_r(s) \cdot \varphi_r \right\};$$

$$p_{\text{ex}} + \Delta p_{\text{ex}} = \left(\frac{A(s)Z_2(s) + B(s)}{A(s)Z_2(s) + B(s) + C(s)Z_1(s)Z_2(s) + D(s)Z_1(s)} \right) \times \quad (8)$$

$$\times W_1(s) X_y + \left(\frac{Z_1(s)[A(s)D(s) - B(s)C(s)]}{A(s)Z_2(s) + B(s) + C(s)Z_1(s)Z_2(s) + D(s)Z_1(s)} \right) \sum_{r=1}^{r=m} \Phi_r(s) \cdot \varphi_r$$

Так как рассматриваются пассивные гасители колебаний, то справедливо равенство $A(s)D(s) - B(s)C(s) = 1$. Тогда разделив соответственно левые и правые части уравнений (8), с учётом последнего равенства и $X_y = 0$ получим:

$$K'_k(s) = \frac{A(s)Z_2(s) + B(s) + C(s)Z_1(s)Z_2(s) + D(s)Z_1(s)}{Z_1(s) + Z_2(s)} \quad (9)$$

Из сравнения формул (7) и (9) следует, что $K_k(s) = K'_k(s)$. Это означает, что для одной и той же цепи, и гасителя колебаний

коэффициент коррекции, подсчитанный по давлению за гасителем (по отношению к источнику вынужденных колебаний), будет один и тот же, независимо от места расположения источника колебаний.

Изменение качества переходного процесса в гидравлической цепи определяется отношением отклонения регулируемого параметра ΔX_p , обусловленного установкой гасителя колебаний, к регулируемому параметру в исходной цепи X_p , т.е. $\overline{X_p} = \frac{\Delta X_p}{X_p}$. Выражение

для $\overline{\Delta X_p}$ может быть получено из совместного решения систем уравнений (3) и (4):

$$\overline{\Delta X_p} = \frac{Z_1(s) + Z_2(s)}{A(s)Z_2(s) + B(s) + C(s)Z_1(s)Z_2(s) + D(s)Z_1(s)} - 1 \quad (10)$$

Из сопоставления зависимостей (7), (9) и (10) следует, что:

$$\overline{\Delta X_p} = \frac{1}{K_k(s)} - 1 \quad (11)$$

Таким образом получена формула, связывающая относительное отклонение регулируемого параметра системы с коэффициентом коррекции. Требования по динамической точности системы могут быть заданы не только условием (2), но и условием допустимого отклонения передаточной функции системы по управляющему воздействию:

$$\overline{\Delta W}(s) \leq \overline{\Delta W}_{\text{дон}}(s), \quad (12)$$

где $\overline{\Delta W}(s)$ и $\overline{\Delta W}_{\text{дон}}(s)$ – фактическое и допустимое относительные отклонения передаточной функции системы.

Из уравнений (3) и (4) находим передаточную функцию системы по управляющему воздействию X_y и её отклонение

$$W(s) = \frac{X_p}{X_y} = \frac{W_1(s)W_2(s)[W_p(s)Z_2(s) + W_q(s)]}{Z_1(s) + Z_2(s)},$$

$$\Delta W(s) = \frac{\Delta X_p}{\Delta X_y} = W_1(s)W_2(s)[W_p(s)Z_2(s) + W_q(s)] \times$$

$$\times \frac{[Z_1(s) + Z_2(s)] - [A(s)Z_2(s) + B(s) + C(s)Z_1(s)Z_2(s) + D(s)Z_1(s)]}{[Z_1(s) + Z_2(s)] \cdot [A(s)Z_2(s) + B(s) + C(s)Z_1(s)Z_2(s) + D(s)Z_1(s)]}$$

Относительное отклонение передаточной функции системы определяется как отношение $\Delta W(s)/W(s)$ и будет равно:

$$\overline{\Delta W}(s) = \frac{Z_1(s)}{A(s)Z_2(s) + B(s)} + \quad (13)$$

$$\frac{Z_2(s)}{C(s)Z_1(s)Z_2(s) + D(s)Z_1(s)} - 1$$

Сопоставляя выражения (7) и (13) получаем соотношение, связывающее относительное отклонение передаточной функции системы с коэффициентом коррекции:

$$\overline{\Delta W}(s) = \frac{1}{K_k(s)} - 1 \quad (14)$$

Из сравнения формул (11) и (14) видно, что относительные отклонения $\overline{\Delta X_p}$ и $\overline{\Delta W}(s)$ связаны с $K_k(s)$ одним и тем же выражением. Рассматривая зависимость (14) в частотной форме ($s = j\omega$) при заданной величине $\overline{\Delta W}_{\text{дон}}(s)$, можно определить допустимое значение коэффициента коррекции в диапазоне частот полезных сигналов $\omega \in [0; \omega_{ep}]$:

$$\Delta K_{k \text{ дон}} = \frac{1}{|\overline{\Delta W}_{\text{дон}}(j\omega) + 1|}, \quad (15)$$

где ω_{ep} – граничная частота полосы пропускания сигналов управления.

Как известно [1], коэффициент вносимого затухания в области частот подавления вынужденных колебаний $[\omega_1; \omega_2]$ определяется как модуль частотной функции:

$$K_{\text{ен}} = \left| \frac{A(j\omega)Z_2(j\omega) + B(j\omega) + C(j\omega)Z_1(j\omega)Z_2(j\omega)}{Z_1(j\omega) + Z_2(j\omega)} + \frac{D(j\omega)Z_1(j\omega)}{Z_1(j\omega) + Z_2(j\omega)} \right| \quad (16)$$

Очевидно, что и коэффициент коррекции $K_k(s)$ и $K_{\text{ен}}$ зависят от одних и тех же параметров системы (Z_1 и Z_2) и гасителя колебаний (A, B, C, D).

Из этого следует, что обеспечение определенной величины $K_{\text{ен}}$ приводит к соответствующему отклонению регулируемого параметра X_p . Это позволяет анализировать возможность обеспечения требуемой степени подавления колебаний при допустимом отклонении регулируемого параметра $\Delta X_{p \text{ доп}}$.

Предположим, что в процессе работы системы на переходных режимах регулируемый параметр изменяется как переходная функция апериодического звена или его изображение по Лапласу (X_p)

$$\text{определяется зависимостью } X_p = \frac{k}{(T \cdot s + 1)s},$$

где k – коэффициент передачи (усиления), T – постоянная времени.

Полагаем, что и при установке гасителя в систему выходной параметр изменяется так же, как переходная функция апериодического звена, но с большей постоянной времени ($T_1 = \alpha \cdot T$, где $\alpha > 1$),

$$\text{т.е. } X'_p = \frac{k}{(T\alpha s + 1)s}.$$

Тогда изображение по Лапласу допустимого относительного отклонения выходного параметра имеет вид:

$$\Delta \bar{X}_p = \frac{X'_p - X_p}{X_p} = \frac{T \cdot s + 1}{T\alpha s + 1} - 1 \quad (17)$$

Из сопоставления выражений (11) и (17) получаем выражение для допустимого коэффициент коррекции:

$$K_{k \text{ доп}}(s) = \frac{T\alpha s + 1}{T \cdot s + 1} \quad (18)$$

Переходя к частотной форме ($s = j\omega$) и относительным параметрам ($\bar{\omega} = \omega T$), преобразуем равенство (18) к виду:

$$K_{k \text{ доп}}(j\omega) = \frac{1 + j\alpha\bar{\omega}}{1 + j\bar{\omega}} \quad (19)$$

Определив модуль частотной функции (19), получим выражение для допустимого коэффициента коррекции в области частот полезных сигналов $\bar{\omega} \in [0, \bar{\omega}_{\text{зп}}]$ (рисунок 2):

$$K_{k \text{ доп}} = \sqrt{\frac{1 + \alpha^2 \bar{\omega}_{\text{зп}}^2}{1 + \bar{\omega}_{\text{зп}}^2}}$$

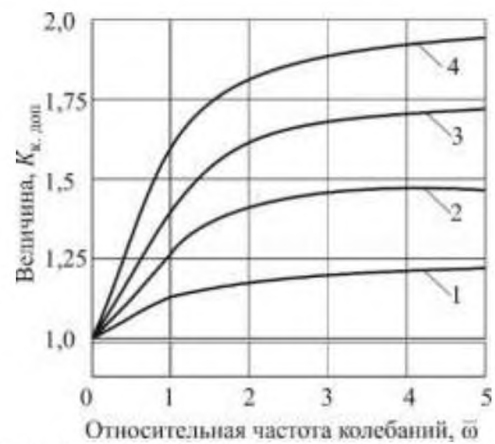


Рисунок 2 – Зависимости допустимого коэффициента коррекции от частоты колебаний:

1 – $\alpha = 1,25$; 2 – $\alpha = 1,5$; 3 – $\alpha = 1,75$; 4 – $\alpha = 2$

3 Заключение

Если $K_{\text{ен доп}} \geq K_{\text{ен тр}}$ в диапазоне частот $\bar{\omega} \in [\omega_1, \omega_2]$, а $K_k \leq K_{k \text{ доп}}$ в диапазоне частот $\bar{\omega} \in [0, \bar{\omega}_{\text{зп}}]$, то применение гасителя колебаний удовлетворяет условиям (1) и (2), что обеспечивает требуемое подавление вынужденных колебаний при сохранении необходимого качества регулирования в системе. В противном случае необходимо выбирать другую схему (конструкцию) гасителя колебаний.

Список использованных источников

[1] Шорин, В.П. Устранение колебаний в авиационных трубопроводах / В.П. Шорин. - М.: Машиностроение, 1980. - 100 с.

ON THE CHOICE OF THE PARAMETERS OF VIBRATION DAMPERS FOR HYDRAULIC CIRCUITS OF CONTROL SYSTEMS

Evgeniy V. Shakhmatov
Ilya A. Popelnyuk

Samara National Research University

34, Moskovskoe shosse, Samara,
443086, Russian Federation

shakhm@ssau.ru

The article deals with the problem of choosing OF the parameters of vibration dampers for hydraulic circuits of control systems, taking into account the provision of dynamic accuracy of the system after their installation. The concept of a correction factor, which is the ratio of Laplace images of the corresponding parameters of the working medium in the hydraulic circuit before and after the damper installation is introduced. A dependence that associate the relative deviation of the system-controlled parameter with the correction factor is obtained. A condition for checking the effectiveness of the damper, taking into account the preservation of the required quality of regulation in the system is formulated.

Keywords: *hydraulic circuit; vibration damper; correction factor; dynamic accuracy*

References

[1] Shorin V.P. Eliminate vibrations in aircraft pipelines [Ustranenie kolebanij v aviacionnyh truboprovodah]. – Moscow: Mashinostroenie. 1980. – 100 p (in Russian)