

1. УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ И ДЕМПФИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ

УДК 621.532.1-503.4

Ю.С. Анисимкин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ТРЕБУЕМОЕ ДЕМПФИРОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРА ДАВЛЕНИЯ ТОПЛИВА

В процессе проектирования, изготовления и доводки регуляторов давления для гидравлических и топливных систем двигателей летательных аппаратов необходимо осуществлять демпфирование их подвижных элементов с целью обеспечения устойчивости, заданного качества процесса регулирования, точности регулируемых параметров в установленном режиме, ресурса, минимального веса и габаритов.

При известных условиях эксплуатации требуемое демпфирование подвижных элементов топливного регулятора давления можно определить, если рассмотреть динамическую модель регулятора, описываемую, в соответствии с представленной на рис. 1 принципиальной схемой, следующими уравнениями /1, 2/:

$$D_1 = Q_3 + Q_5 + Q_7 + Q_9 ;$$

$$Q_2 + Q_6 = Q_4 + Q_{10} + Q_{12} ;$$

$$Q_5 = Q_6 - Q_9 + Q_8 ;$$

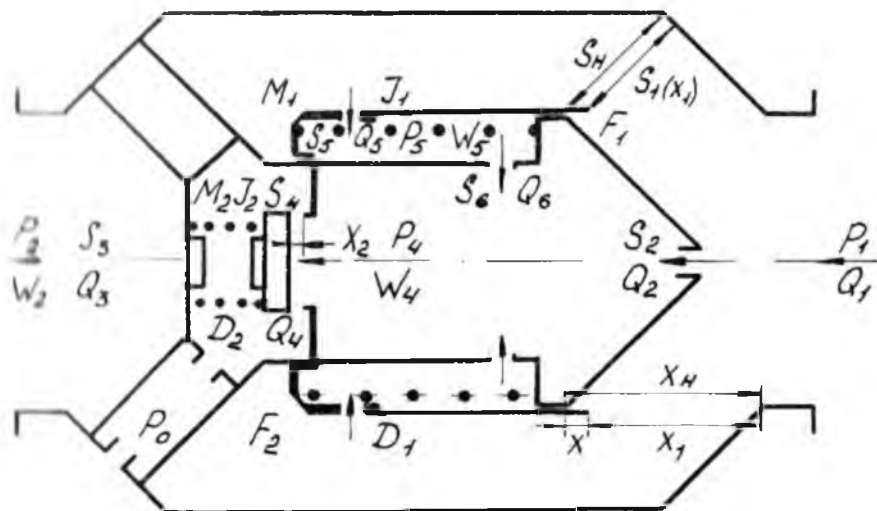
$$M_1 \frac{d^2 x}{dt^2} + D_1 \frac{dx}{dt} + J_1 x = F_2 P_2 - F_1 [P_2 - k_p (P_1 - P_2)] - (F_2 - F_1) P_5 - R_{n1} ;$$

$$M_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + D_2 \frac{dx_2}{dt} + J_2 x_2 = F_3 (P_4 - P_0) - R_{n2} ;$$

$$Q_1 = \mu_1 [S_H - S_1(x_1)] \sqrt{2/\rho(P_1 - P_2)} ; Q_2 = \mu_2 S_2 \sqrt{2/\rho(P_1 - P_4)} ;$$

$$\begin{aligned}
 Q_3 &= \mu_3 S_3 \sqrt{2/\rho(P_2 - P_0)}; & Q_4 &= \mu_4 S_4(x_2) \sqrt{2/\rho(P_4 - P_0)}; \\
 Q_5 &= \mu_5 S_5 \sqrt{2/\rho(P_2 - P_5)}; & Q_6 &= \mu_6 S_6 \sqrt{2/\rho(P_5 - P_4)}; \\
 Q_7 &= \gamma_2 W_2 \frac{dP_2}{dt}; & Q_8 &= \gamma_5 W_5 \frac{dP_5}{dt}; \\
 Q_9 &= (F_2 - F_1) \frac{dx}{dt}; & Q_{10} &= F_3 \frac{dx_2}{dt}; \\
 S_H &= 1,11 x_H (2d_1 + x_H); & Q_{12} &= \gamma_4 W_4 \frac{dP_4}{dt}; \\
 S_7(x_1) &= 1,11 x_1 (2d_1 + x_1); & S_4(x_2) &= \pi d_4 x_2,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где Q_1, Q_3, Q_5, Q_7, Q_9 — расходы рабочей среды через дросселирующее сечение, на входе регулятора и на выходе из него, в пружинную полость, обусловленные сжимаемостью топлива с учетом упругости стенок трубопровода и корпуса регулятора; связанные с движением регулирующего органа регулятора; $Q_2, Q_4, Q_6, Q_8, Q_{10}, Q_{12}$ — расходы рабочей среды через дросселирующие жиклеры, на входе перепускного клапана и на выходе из него; связанные со сжимаемостью топлива и упругостью стенок регулятора; в пружинную полость и в полость перепускного клапана; P_1, P_2, P_4, P_5, P_0 — давления рабочей среды на входе в регулятор, в полости регулятора и объекта регулирования; в полости перепускного клапана; в пружинной полости регулятора; в сливных магистралях; $S_H, S_7(x_1), S_2, S_3, S_4(x_2), S_5, S_6$ — дросселирующие сечения регулятора; жиклеров в полости клапана и объекта регулирования; клапана; жиклеров в пружинной полости регулятора и полости клапана; W_2, W_4, W_5 — объемы полости регулятора и объекта регулирования, полости клапана и пружинной полости регулятора; $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5, \mu_6$ — коэффициенты расхода в дросселирующих сечениях регулятора; жиклеров в полости клапана и объекта регулирования; клапана; жиклеров в пружинной полости регулятора и полости клапана; M_1, M_2 — приведенные массы подвижных элементов регулятора и клапана; D_1, D_2 — коэффициенты демпфирования, эквивалентные вязкому трению в регулирующем органе регулятора и клапана; J_1, J_2 — жесткости упругих элементов регулятора и клапана; F_1, F_2, F_3 — эффективные площади дросселирующей кромки регулятора; чувствительного элемента и клапана; R_{n1}, R_{n2} — усилия затяжки пружин регулирующего органа ре-



Р и с. 1. Расчетная схема регулятора давления топлива

регулятора и клапана при $x = 0$ и $x_2 = 0$; x_H, x, x_1, x_2 - координаты; начальная и текущие для перемещения регулирующего органа регулятора и клапана; $\gamma_2, \gamma_4, \gamma_5$ - коэффициенты сжимаемости рабочей среды с учетом упругости стенок объекта регулирования, пружинной полости регулятора и клапана; ρ - плотность рабочей среды; d_1, d_4 - диаметры регулирующего органа регулятора в дросселирующем сечении и седла клапана.

В системе уравнений (I) приняты следующие допущения: силы демпфирования регулирующего органа регулятора и клапана эквивалентны силам вязкого трения и линейно зависят от скорости; коэффициент расхода не зависит от параметров дросселирующих сечений и подъема регулирующего органа регулятора и клапана, плотности и вязкости рабочей среды; утечки рабочей среды в зазорах и силы сухого трения в направляющих регулирующего органа регулятора и клапана отсутствуют.

Линейризуем исходную систему уравнений (I) с учетом базовых значений переменных в установившемся режиме, получим систему уравнений в относительных координатах и операторном виде при нулевых начальных условиях:

$$(C_{10} p + C_{11}) \varphi = C_{12} \psi + C_{13} \xi - (C_{14} p + C_{15}) x;$$

$$(C_{20} p^2 + C_{21} p + C_{22}) x = C_{23} \varphi - C_{24} \xi - C_{25} \psi;$$

$$(C_{30} p + C_{31}) \lambda = C_{32} \varphi + C_{33} \psi - (C_{34} p + C_{35}) \xi - (C_{36} p + C_{37}) x - C_{38} p x;$$

$$(C_{40} p^2 + C_{41} p + C_{42}) x_2 = C_{43} \lambda,$$

$$2de \quad C_{10} = \frac{2_2 W_{20} P_{20}}{\mu_1 [S_H - S_1(x_1)] \sqrt{2|\rho(P_{10} - P_{20})|}};$$

$$C_{11} = \frac{P_{20}}{2(P_{10} - P_{20})} \left[1 + \frac{\mu_3 S_{30} \sqrt{P_{10} - P_{20}}}{\mu_1 [S_H - S_1(x_1)] \sqrt{P_{20} - P_0}} + \frac{\mu_5 S_{50} \sqrt{P_{10} - P_{20}}}{\mu_1 [S_H - S_1(x_1)] \sqrt{P_{20} - P_{50}}} \right];$$

$$C_{12} = \frac{P_{10}}{2(P_{10} - P_{20})}; \quad C_{13} = \frac{\mu_5 S_{50} P_{50}}{2\mu_1 [S_H - S_1(x_1)] \sqrt{P_{20} - P_{50}} \sqrt{P_{10} - P_{20}}};$$

$$C_{14} = \frac{(F_{20} - F_{10}) x_0}{\mu_1 [S_H - S_1(x_1)] \sqrt{2|\rho(P_{10} - P_{20})|}}; \quad C_{15} = \frac{1.11 [2d_1 + (x_H + x_1)] x_0}{[S_H - S_1(x_1)]};$$

$$C_{20} = \frac{M_1 x_0}{(F_{20} - F_{10}) P_{20}}; \quad C_{21} = \frac{I_1 x_0}{(F_{20} - F_{10}) P_{20}}; \quad C_{22} = \frac{J_1 x_0}{(F_{20} - F_{10}) P_{20}};$$

$$C_{23} = 1 + \frac{k_p F_{10}}{F_{20} - F_{10}}; \quad C_{24} = \frac{P_{50}}{P_{20}}; \quad C_{25} = \frac{k_p F_{10} P_{10}}{(F_{20} - F_{10}) P_{20}};$$

$$C_{30} = \frac{2_4 W_{40} P_{40}}{\mu_4 \pi d_4 x_{20} \sqrt{2|\rho(P_{40} - P_0)|}}; \quad C_{31} = \frac{P_{40}}{2(P_{40} - P_0)} \left[1 + \frac{\mu_2 S_{20} \sqrt{P_{40} - P_0}}{\mu_4 \pi d_4 x_{20} \sqrt{P_{10} - P_{40}}} \right];$$

$$C_{32} = \frac{\mu_4 \pi d_4 x_{20} \sqrt{P_{40} - P_0}}{2\mu_4 \pi d_4 x_{20} \sqrt{P_{40} - P_0} \sqrt{P_{20} - P_{50}}}; \quad C_{33} = \frac{\mu_5 S_{50} P_{50}}{2\mu_4 \pi d_4 x_{20} \sqrt{P_{40} - P_0} \sqrt{P_{20} - P_{50}}};$$

$$C_{34} = \frac{2_5 [W_{50} - (F_{20} - F_{10}) x_0] P_{50}}{\mu_4 \pi d_4 x_{20} \sqrt{2|\rho(P_{40} - P_0)|}}; \quad C_{35} = \frac{\mu_5 S_{50} P_{50}}{2\mu_4 \pi d_4 x_{20} \sqrt{P_{40} - P_0} \sqrt{P_{20} - P_{50}}};$$

$$C_{36} = \frac{F_{30}}{\mu_4 \pi d_4 \sqrt{2|\rho(P_{40} - P_0)|}}; \quad C_{37} = 1; \quad C_{38} = \frac{(F_{20} - F_{10}) x_0}{\mu_4 \pi d_4 x_{20} \sqrt{2|\rho(P_{40} - P_0)|}};$$

$$C_{40} = \frac{M_2 x_{20}}{F_{30} P_{40}}; \quad C_{41} = \frac{I_2 x_{20}}{F_{30} P_{40}}; \quad C_{42} = \frac{J_2 x_{20}}{F_{30} P_{40}}; \quad C_{43} = 1;$$

$$\varphi = \frac{\Delta P_2}{P_{20}}; \quad \psi = \frac{\Delta P_1}{P_{10}}; \quad \xi = \frac{\Delta P_5}{P_{50}}; \quad \lambda = \frac{\Delta P_4}{P_{40}}; \quad x = \frac{\Delta x}{x_0}; \quad x_2 = \frac{\Delta x_2}{x_{20}}; \quad p = \frac{d}{dt}. \quad (3)$$

Решая систему уравнений (2), освобождаемся от промежуточных переменных x , x_2 и ξ . При $\lambda = 0$ получим уравнение движения системы регулирования в виде

$$\left. \begin{aligned} (A_6 p^6 + A_5 p^5 + A_4 p^4 + A_3 p^3 + A_2 p^2 + A_1 p + A_0) \psi = \\ = (B_5 p^5 + B_4 p^4 + B_3 p^3 + B_2 p^2 + B_1 p + B_0) \varphi, \end{aligned} \right\} (4)$$

где

$$A_6 = C_{20} C_{10} C_{40} C_{34};$$

$$A_5 = C_{40} C_{34} (C_{21} C_{10} + C_{20} C_{11}) + C_{20} C_{10} (C_{34} C_{41} + C_{35} C_{40});$$

$$A_4 = C_{40} C_{34} (C_{22} C_{10} + C_{21} C_{11} + C_{23} C_{14}) + (C_{21} C_{10} + C_{20} C_{11}) \times \\ \times (C_{34} C_{41} + C_{35} C_{40}) + C_{20} C_{10} (C_{34} C_{42} + C_{35} C_{41}) - C_{13} C_{20} C_{33} C_{40};$$

$$A_3 = C_{40} C_{34} (C_{22} C_{11} + C_{23} C_{15}) + (C_{22} C_{10} + C_{21} C_{11} + C_{23} C_{14}) (C_{34} C_{41} + \\ + C_{35} C_{40}) + (C_{21} C_{10} + C_{20} C_{11}) (C_{34} C_{42} + C_{35} C_{41}) + C_{40} C_{20} C_{10} C_{35} - \\ - C_{33} (C_{24} C_{14} C_{40} + C_{13} C_{21} C_{40} + C_{13} C_{20} C_{41});$$

$$A_2 = (C_{22} C_{11} + C_{23} C_{15}) (C_{34} C_{41} + C_{35} C_{40}) + (C_{22} C_{10} + C_{21} C_{11} + \\ + C_{25} C_{14}) (C_{34} C_{42} + C_{35} C_{41}) + (C_{21} C_{10} + C_{20} C_{11}) C_{35} C_{42} - \\ - C_{24} C_{34} C_{15} C_{40} - C_{33} (C_{24} C_{14} C_{41} + C_{13} C_{22} C_{40} + C_{13} C_{21} C_{41} + C_{13} C_{20} C_{42});$$

$$A_1 = (C_{22} C_{11} + C_{23} C_{15}) (C_{34} C_{42} + C_{35} C_{41}) + C_{35} C_{42} (C_{22} C_{10} + \\ + C_{21} C_{11} + C_{23} C_{14}) - C_{33} (C_{24} C_{14} C_{42} + C_{24} C_{15} C_{41} + C_{13} C_{22} C_{41} + \\ + C_{13} C_{21} C_{42});$$

$$A_0 = C_{35} C_{42} (C_{22} C_{11} + C_{23} C_{15}) - C_{33} C_{42} (C_{24} C_{15} + C_{22} C_{13});$$

$$B_5 = C_{40} C_{20} C_{34} C_{12};$$

$$B_4 = C_{40} C_{34} (C_{25} C_{14} + C_{21} C_{12}) + C_{20} C_{12} (C_{41} C_{34} + C_{40} C_{35}) + \\ + C_{40} C_{20} C_{32} C_{13};$$

$$B_3 = C_{40} C_{34} (C_{25} C_{15} + C_{22} C_{12}) + (C_{25} C_{14} + C_{21} C_{12}) (C_{34} C_{41} + \\ + C_{35} C_{40}) + C_{20} C_{12} (C_{34} C_{42} + C_{35} C_{41}) + C_{40} C_{32} (C_{24} C_{14} + C_{21} C_{13}) +$$

$$+ C_{13} C_{20} C_{32} C_{41};$$

$$B_2 = (C_{25} C_{15} + C_{22} C_{12})(C_{34} C_{41} + C_{35} C_{40}) + C_{20} C_{42}(C_{12} C_{35} + C_{13} C_{32}) + (C_{25} C_{14} + C_{22} C_{12})(C_{34} C_{42} + C_{35} C_{41}) + C_{40} C_{32}(C_{24} C_{15} + C_{13} C_{22}) + C_{32} C_{41}(C_{24} C_{14} + C_{21} C_{13});$$

$$B_1 = (C_{25} C_{15} + C_{22} C_{12})(C_{34} C_{42} + C_{35} C_{41}) + C_{35} C_{42}(C_{25} C_{14} + C_{21} C_{12}) + C_{32} C_{41}(C_{24} C_{15} + C_{22} C_{12}) + C_{32} C_{42}(C_{24} C_{14} + C_{21} C_{13}).$$

$$B_0 = C_{35} C_{42}(C_{25} C_{15} + C_{22} C_{12}) + C_{32} C_{42}(C_{24} C_{15} + C_{22} C_{13}). \quad (5)$$

Характеристическое уравнение системы регулирования (4) запишется в виде

$$A_6 p^6 + A_5 p^5 + A_4 p^4 + A_3 p^3 + A_2 p^2 + A_1 p + A_0 = 0. \quad (6)$$

Условие устойчивости системы, описываемой характеристическим уравнением (6), по критерию Гурвица [3] имеет вид

$$A_6 > 0; A_5 > 0; A_4 > 0; A_3 > 0; A_2 > 0; A_1 > 0; A_0 > 0;$$

$$A_5 A_4 - A_3 A_6 > 0;$$

$$A_3(A_5 A_4 - A_3 A_6) + A_5(A_1 A_6 - A_2 A_5) > 0;$$

$$(A_5 A_0 + A_3 A_2 - A_1 A_4)(A_5 A_4 - A_3 A_6) - (A_1 A_6 - A_2 A_5)^2 > 0; \quad (7)$$

$$A_1[(A_5 A_0 + A_3 A_2 - A_1 A_4)(A_5 A_4 - A_3 A_6) - (A_1 A_6 - A_2 A_5)^2] - A_0[A_5 A_3(A_4 A_3 - A_2 A_5) + A_5^2(A_5 A_0 - A_1 A_4) - A_6 A_3(A_3^2 - 2 A_1 A_5)] > 0. \quad (7)$$

Если в исходной системе уравнений (I) принять величины M_2 , D_2 , Z_5 достаточно малыми ($M_2 \cong 0$, $D_2 \cong 0$, $Z_5 \cong 0$), то с учетом условий (7), определим выражение для требуемого демпфирования регулирующего органа регулятора:

$$|D_1| > P_{20} (F_{20} - F_{10}) / 2 \times 0, C_{42}^2 C_{10} C_{35} (C_{11} C_{35} - C_{13} C_{33}) \times$$

$$\times \left\{ -C_{42} [A_1^* C_{10} C_{35} + A_2^* (C_{11} C_{35} - C_{13} C_{33})] \pm \right. \quad (8)$$

$$\pm \sqrt{[A_1^* C_{10} C_{35} C_{42} + A_2^* C_{42} (C_{11} C_{35} - C_{13} C_{33})]^2 - 4(A_1^* A_2^* - A_0 A_3)} \times$$

$$\times \sqrt{C_{42}^2 C_{10} C_{35} (C_{11} C_{35} - C_{13} C_{33})},$$

где

$$A_2^* = C_{20} C_{42} (C_{11} C_{35} - C_{13} C_{33}); \quad (9)$$

$$A_1^* = C_{35} C_{42} (C_{22} C_{10} + C_{23} C_{14}) - C_{24} C_{14} C_{33} C_{42}.$$

Из выражений (8), (9) и (3) видно, что требуемый эквивалентный коэффициент демпфирования регулирующего органа регулятора зависит от конструктивных и эксплуатационных параметров системы регулирования.

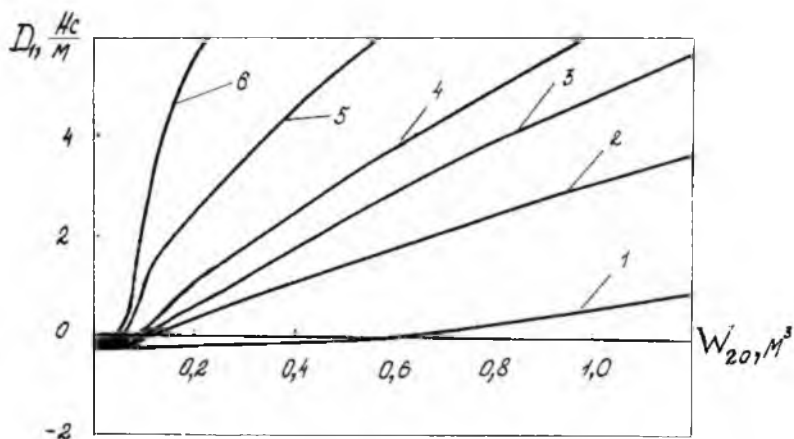
С использованием выражения (8) для границы устойчивости и значений параметров регулятора: $F_{20} = 39,12 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; $F_{10} = 4,78 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; $F_{30} = 0,785 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; $J_1 = 1,4 \cdot 10^8 \text{ Н/м}$; $J_2 = 4,2 \cdot 10^8 \text{ Н/м}$; $M_1 = 1,5 \text{ кг}$; $S_{30} = 78,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; $S_{20} = S_{50} = 0,314 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$; $S_{60} = 0,628 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$; $l = 0,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{Н}$; $\rho = 0,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; $\mu = 0,6$; $d_1 = 0,1 \text{ м}$; $d_4 = 0,01 \text{ м}$, на ЭВМ ЕС-1050 были рассчитаны характеристики требуемого демпфирования регулирующего органа регулятора (рис. 2) для заданного диапазона изменения его конструктивных и эксплуатационных параметров.

Из анализа данных характеристик можно сделать следующие выводы: при давлении рабочей среды на входе регулятора в 1 МПа и объеме объекта регулирования, равном $0,6 \text{ м}^3$, регулирующий орган регулятора можно не демпфировать;

увеличение давления рабочей среды на входе в регулятор от 1 МПа до 2,8 МПа приводит к увеличению эквивалентного коэффициента демпфирования регулирующего органа от 1,2 Н·с/м до 8,2 Н·с/м;

увеличение объема полости регулятора и объекта регулирования от $0,1 \text{ м}^3$ до $1,4 \text{ м}^3$ приводит к увеличению эквивалентного коэффициента демпфирования от 0,3 Н·с/м до 8,2 Н·с/м;

увеличение массы регулирующего органа регулятора от 1,5 кг до 2,5 кг приводит к увеличению эквивалентного коэффициента демпфирования от 8,2 Н·с/м до 12 Н·с/м;



Р и с. 2. Влияние эксплуатационных параметров системы регулирования на требуемое демпфирование регулятора давления топлива: 1 - $P_{10} = 1,0$ МПа, $S_{30} = 78,5 \cdot 10^{-4}$ м², $M_1 = 1,5$ кг; 2 - $P_{10} = 1,5$ МПа, $S_{30} = 78,5 \cdot 10^{-4}$ м², $M_1 = 1,5$ кг; 3 - $P_{10} = 2,0$ МПа, $S_{30} = 78,5 \cdot 10^{-4}$ м², $M_1 = 1,5$ кг; 4 - $P_{10} = 2,8$ МПа, $S_{30} = 78,5 \cdot 10^{-4}$ м², $M_1 = 1,5$ кг; 5 - $P_{10} = 2,8$ МПа, $S_{30} = 78,5 \cdot 10^{-4}$ м², $M_1 = 2,5$ кг; 6 - $P_{10} = 2,8$ МПа, $S_{30} = 40 \cdot 10^{-4}$ м², $M_1 = 1,5$ кг

уменьшение площади проходного сечения на выходе регулятора и объекта регулирования от $78,5 \cdot 10^{-4}$ м² до $40 \cdot 10^{-4}$ м² приводит к увеличению эквивалентного коэффициента демпфирования от 8,2 Н·с/м до 16 Н·с/м.

Следовательно, регулятор давления топлива может устойчиво работать во всем диапазоне эксплуатационных параметров системы регулирования, если в его конструкции реализовать демпфирование регулирующего органа с эквивалентным коэффициентом $D_H > 16$ Н·с/м.

Библиографический список

1. Анисимкин Ю.С., Чибизов В.В. Исследование влияния эксплуатационных параметров системы регулирования на требуемое демпфирование регулятора давления //Динамические процессы в силовых и энерге-

тических установках летательных аппаратов. - Куйбышев: КуАИ, 1985. - С. 5-10.

2. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. - М.: Машиностроение, 1977. - 416 с.

3. Теория автоматического управления /Под ред. А.А.Воронова. Ч. I. - М.: Высшая школа, 1977. - 288 с.

УДК 621.452:681.521.34

А.Г.Гимадиев, Е.В.Шахматов, А.Н.Крючков

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ ДАВЛЕНИЯ

Гидравлические регуляторы (клапаны) постоянного давления (КЦД) являются одними из основных элементов систем гидроавтоматики, склонных к неустойчивой работе /1,2/. Обеспечение устойчивой работы системы с КЦД (рис. 1) является важным фактором повышения ее надежности. Повышение устойчивости только за счет демпфирования подвижного золотника часто ограничено требованием по его быстрдействию, поэтому разрабатываются специальные корректирующие устройства (КУ), устанавливаемые в соединительных гидравлических цепях /3/. Рассмотрим выбор параметров таких КУ для обеспечения устойчивости КЦД.

Расчетная модель КЦД базируется на следующих уравнениях, записанных в операторной форме /2/:

$$(\bar{s}^2 + \bar{c}_d \bar{s} + 1)\bar{x} = K_1 \bar{p}_3 - K_3 \bar{p}_2;$$

$$\bar{q}_1 = K_3 \bar{q}_2 + K_4 \bar{q}_3;$$

$$\bar{q}_3 = K_5 \bar{q}_{2\text{жс}} + K_6 \bar{s} \bar{x};$$

$$\bar{q}_1 = \bar{x} + K_7 \bar{p}_1 - K_8 \bar{p}_2;$$

(1)

$$\bar{q}_{2\text{жс}} = K_9 \bar{p}_2 - K_{10} \bar{p}_3,$$

где \bar{x} - относительное перемещение золотника КЦД; \bar{p}_i , \bar{q}_i - относительные отклонения давления и объемного расхода в магистралях