

*А.М. ОНИЩЕНКО*, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПІ»

## **ВПЛИВ КОРЕКТУЮЧОЇ ЛАНКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ГІДРАВЛІЧНОЇ СИЛИ НА ПАРАМЕТРИ ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОГО ПІДСИЛЮВАЧА**

Розглянуто результати досліджень впливу коригувальної ланки з використанням гідравлічної сили на роботу електрогідравлічного підсилювача. Отримано передаточні функції для електрогідравлічного підсилювача з коригувальною ланкою й без нього. Доведено, що введення коригувальної ланки приводить до підвищення швидкодії, проте коефіцієнт підсилення зменшується, але при цьому зберігається сталість електрогідравлічного підсилювача.

Рассмотрены результаты исследований влияния корректирующего звена с использованием гидравлической силы на работу электрогидравлического усилителя. Получены передаточные функции для электрогидравлического усилителя с корректирующим звеном и без него. Доказано, что введение корректирующего звена приводит к повышению быстродействия, тем не менее коэффициент усиления уменьшается, но при этом сохраняется постоянство электрогидравлического усилителя.

Results of researches of influence of an adjusting link with use of hydraulic force for work of electrohydraulic amplifier are considered. Transfer functions for electrohydraulic amplifier with an adjusting part and without it are received. It is proved, that introduction of an adjusting link results in increase of speed, nevertheless the factor of amplification decreases, but thus constancy electrohydraulic amplifier is kept.

**Вступ.** У верстатах з програмним і адаптивним керуванням, електрогідравлічних слідкуючих системах, а також в промислових роботах використовують дроселюючі розподільники, гідроапаратуру з пропорційним керуванням, електрогідравлічні крокові і слідкуючі приводи. Всі ці пристрої за суттю – гідравлічні підсилювачі потужності, які перетворюють вхідну механічну або електричну дію у відповідне переміщення вихідної ланки з зусиллям або моментом, достатнім для переборення сил різання або інших навантажень на робочих органах.

Успішне проектування, налагодження і експлуатація гідравлічних підсилювачів вимагає наявності їх достовірних характеристик, високих параметрів, таких як коефіцієнт підсилення, швидкодія і сталість.

**Аналіз літературних джерел.** Існують різні способи підвищення коефіцієнту підсилення і швидкодії гідравлічних підсилювачів. Це введення зворотного зв'язку по навантаженню або по перепаду тиску на золотниці тощо [1 – 3]. Проте такі способи корекції вимагають установки сприймаючих елементів (трубки Бурдона, сільфонів тощо), що суттєво ускладнює конструкцію, її технологічність і знижує надійність гідравлічного підсилювача.

Використання ефекту гідравлічної сили, яка виникає в зоні сопла і на його торці, дозволяє вельми просто й ефективно реалізувати коректуючу ланку [4] без введення додаткових елементів.

В літературі відсутній аналіз роботи підсилювачів із введенням коректуючих ланок, побудованих з використанням гідравлічної сили.

**Постановка задачі.** На основі розробленої математичної моделі здійснити аналіз роботи гідравлічних підсилювачів із введенням коректуючих ланок, побудованих із використанням гідравлічної сили.

**Розв’язання.** Розглянемо рівняння, що описують кожний із елементів підсилювача, схема якого наведена на рис. 1.

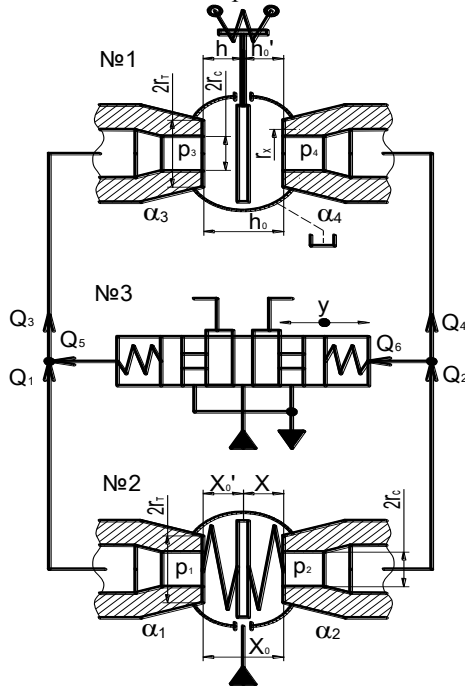


Рисунок 1 – Схема електрогідравлічного підсилювача

Визначимо гідравлічні сили, які діють на плоску заслінку в елементах «сопло–заслінка–сопло» гідропідсилювача. Сила, що діє на заслінку в елементі №1 з одного боку, визначається як сума поршневої і торцевої складових

$$P = P_n + P_t, \quad (1)$$

де  $P_n$  – поршнева складова від тиску робочої рідини

$$P_n = p_3 f_c,$$

тут  $p_3$  – тиск робочої рідини на виході сопла;  $f_c$  – площа сопла;

$P_T$  – торцева складова, яка визначається як

$$P_T = \int_{r_c}^{r_x} p_x r_x dr_x 2\pi,$$

тут  $p_x$  – тиск в зазорі між торцем золотника і заслінкою, що визначається з рівняння витрати через елемент №1

$$p_x = \mu_{c-3}^2 \left( \frac{r_c}{r_x} \right)^2 p_3,$$

де  $\mu_{c-3}$  – коефіцієнт витрат елемента «сопло–заслінка»;  $r_c$  – радіус сопла;  $r_t$  – радіус торця;  $r_x$  – поточне значення радіусу торця.

Тоді

$$P_T = 2\pi \mu_{c-3}^2 r_c^2 p_3 \ln \frac{r_t}{r_c}.$$

Аналогічним чином визначається гідравлічна сила, що діє на заслінку елемента з іншого боку. Сумарна гідравлічна сила, що діє на заслінку в елементі №1, визначається як сума сил, діючих на заслінку з обох боків

$$P_{г1} = \pi r_c^2 \left( 1 + 2\pi \mu_{c-3}^2 \ln \frac{r_t}{r_c} \right) \Phi_3 - p_4 \cdot \quad (2)$$

Сумарна гідравлічна сила, яка діє на заслінку в елементі №2, визначається аналогічно

$$P_{г2} = \pi r_c^2 \left( 1 + 2\pi \mu_{c-3}^2 \ln \frac{r_t}{r_c} \right) \Phi_4 - p_3 \cdot \quad (3)$$

Запишемо рівняння рівноваги елемента №2

$$\sum_{i=1}^n P_i = 0; \quad (4)$$

$$P_{г2} = M_3 \ddot{x} + P_d + c_2 x. \quad (5)$$

Тут  $M_3$  – маса заслінки;  $c_2$  – сумарна жорсткість пружин;  $P_d$  – сила демфування, яка рівна

$$P_d = F_3 b \dot{x},$$

де  $b = \frac{\rho \dot{x}}{2}$ , тут  $\rho$  – густина робочої рідини.

З урахуванням (3) рівняння рівноваги елемента №2 буде мати вигляд

$$A \Phi_4 - p_3 \cdot \quad M_3 \ddot{x} + F_3 b \dot{x} - c_2 x = 0, \quad (6)$$

де  $A = 2\pi r_c^2 \left( 1 + 2\pi \mu_{c-3}^2 \ln \frac{r_t}{r_c} \right)$ .

Після лінеаризації рівняння (6)

$$A \Phi_4 - \Delta p_3 \cdot \quad M_3 \Delta \ddot{x} + F_3 b \Delta \dot{x} - c_2 \Delta x = 0$$

$$\text{або} \quad \frac{A}{c_2} (\varphi_4 - \Delta p_3) = \left( \frac{M_2}{c_2} S^2 + \frac{F_3 b}{c_2} S + 1 \right) \Delta x.$$

Звідки елементарне переміщення заслінки

$$\Delta x = W_{10} (\varphi_4 - \Delta p_3), \quad (7)$$

$$\text{де } W_{10} = \frac{\frac{A}{c_2}}{\frac{M_2}{c_2} S^2 + \frac{F_3 b}{c_2} S + 1}.$$

Запишемо рівняння рівноваги і витрат для золотника (елемент №3)

$$(\varphi_4 - p_3) f_2 = c_3 y + M_2 \ddot{y}, \quad (8)$$

де  $f_2$  – площа торця золотника;  $c_3$  – сумарна жорсткість пружин розподільника;  $M_2$  – маса золотника;  $y$  – переміщення золотника.

Після деяких перетворень, лінеаризуємо рівняння (8)

$$(\varphi_4 - \Delta p_3) = \frac{c_3}{f_2} \Delta y + \frac{M_2}{f_2} \ddot{y}$$

$$(\varphi_4 - \Delta p_3) = \left( \frac{c_3}{f_2} + \frac{M_2}{f_2} S^2 \right) \Delta y. \quad (9)$$

Звідки елементарне переміщення золотника

$$\Delta y = W_3 (\varphi_4 - \Delta p_3),$$

де

$$W_3 = \frac{1}{\frac{c_3}{f_2} + \frac{M_2}{f_2} S^2}.$$

У відповідності зі схемою елемента №3, запишемо рівняння витрат

$$\begin{cases} Q_3 = Q_1 + Q_5; \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} Q_2 = Q_4 + Q_6, \end{cases} \quad (12)$$

де

$$\begin{cases} Q_1 = \alpha_1^* x_0' (\varphi_{ж} - p_3) \\ Q_2 = \alpha_2^* (x_0 - x_0') (\varphi_{ж} - p_4) \\ Q_3 = \alpha_3^* h_0' p_3; \\ Q_4 = \alpha_4^* (h_0 - h_0') p_4; \\ Q_5 = f_2 \dot{y}; \\ Q_6 = f_2 \dot{y}; \end{cases} \quad (13)$$

тут  $\alpha_1^*$ ,  $\alpha_2^*$ ,  $\alpha_3^*$ ,  $\alpha_4^*$  – відносна провідність;  $p_{ж}$  – тиск живлення;  $h_0$  і  $x_0$  – відповідно зазор між соплами в елементах №1 і №2;  $h_0'$  і  $x_0'$  – поточне значення відстані між заслінкою і торцем сопла.

Підставивши значення відповідних витрат  $Q_1$  і  $Q_5$  у рівняння (11) отримаємо

$$\alpha_3^* h_0' p_3 = \alpha_1^* x_0' \left( p_{ж} - p_{30} \right) + f_2 \dot{y}. \quad (14)$$

Після деяких перетворень запишемо рівняння (14) в прирощеннях і лінеаризуємо його

$$\left( \alpha_3^* h_0' + \alpha_1^* x_0' \right) \Delta p_3 = \alpha_1^* \left( p_{ж} - p_{30} \right) \Delta x - \alpha_3^* p_{30} \Delta h + f_2 \Delta y,$$

звідки

$$\Delta p_3 = W_4 \Delta x - W_5 \Delta h + W_6 \Delta y. \quad (15)$$

де

$$W_4 = \frac{\alpha_1^* \left( p_{ж} - p_{30} \right)}{\alpha_1^* x_0' + \alpha_3^* h_0'};$$

$$W_5 = \frac{\alpha_3^* p_{30}}{\alpha_1^* x_0' + \alpha_3^* h_0'};$$

$$W_6 = \frac{f_2 S}{\alpha_1^* x_0' + \alpha_3^* h_0'}.$$

Зробивши аналогічні перетворення з рівнянням (12) отримаємо

$$\Delta p_4 = -W_7 \Delta x + W_8 \Delta h - W_9 \Delta y. \quad (16)$$

де

$$W_7 = \frac{\alpha_2^* \left( p_{ж} - p_{40} \right)}{\alpha_2^* \left( x_0 - x_0' \right) + \alpha_4^* \left( h_0 - h_0' \right)};$$

$$W_8 = \frac{\alpha_4^* p_{40}}{\alpha_2^* \left( x_0 - x_0' \right) + \alpha_4^* \left( h_0 - h_0' \right)};$$

$$W_9 = \frac{f_2 S}{\alpha_2^* \left( x_0 - x_0' \right) + \alpha_4^* \left( h_0 - h_0' \right)}.$$

Таким чином, робота електрогідравлічного підсилювача (ЕГП) буде описана такою системою рівнянь

$$\begin{cases} \Delta x = W_{10} \left( p_4 - \Delta p_3 \right); \\ \Delta p_3 = W_4 \Delta x - W_5 \Delta h + W_6 \Delta y; \\ \Delta p_4 = -W_7 \Delta x + W_8 \Delta h - W_9 \Delta y; \\ \Delta y = W_3 \left( p_4 - \Delta p_3 \right); \end{cases} \quad (17)$$

Згідно з системою (17) збудуємо структурну схему (рис. 2) і знайдемо передаточну функцію ЕГП

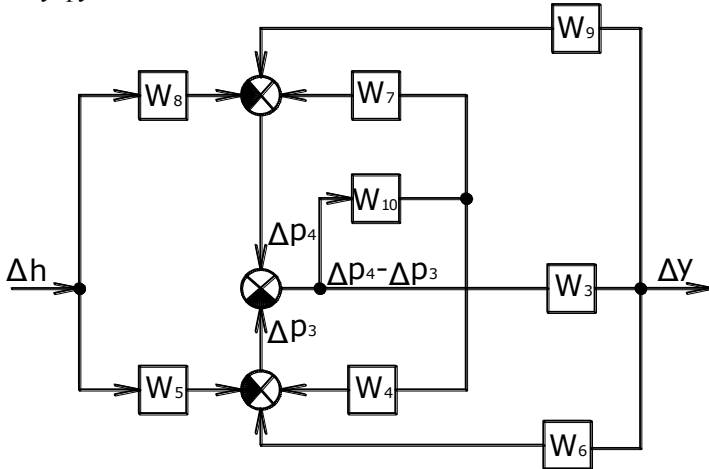


Рисунок 2 – Структурна схема електрогідравлічного підсилювача

Виконаємо такі перетворення

$$\begin{cases} \Delta p_4 - \Delta p_3 = \frac{\Delta x}{W_{10}}; \\ \Delta p_4 - \Delta p_3 = \frac{\Delta y}{W_3}; \\ \Delta p_4 - \Delta p_3 = \Phi W_7 - W_4 \Delta x + \Phi W_8 + W_5 \Delta h + \Phi W_9 - W_6 \Delta y. \end{cases} \quad (18)$$

$$\Delta x = \frac{W_{10}}{W_3} \Delta y;$$

$$\Delta y = \Phi \Delta h,$$

де  $\Phi$  – передаточна функція ЕГП,

$$\Phi = \frac{W_5 + W_8 W_3}{1 + W_4 W_{10} + W_3 W_9 + W_7 W_{10} + W_6 W_3}. \quad (19)$$

Для з'ясування впливу коректуючої ланки на роботу ЕГП визначимо передаточну функцію для двох випадків:

- при наявності коректуючої ланки;
- без коректуючої ланки.

Відсутність коректуючої ланки імітує пружина елемента №2 (рис. 1) з жорсткістю, яка прямує до нескінченності, тобто  $c_2 \rightarrow \infty$ .

Для визначення  $\Phi$  візьмемо конкретні значення параметрів підсилювача:

$$\begin{aligned}
 d_c &= 0,1 \text{ см}; & d_{\text{зол}} &= 0,8 \text{ см}; & \rho_M &= 0,88 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}^3; \\
 d_T &= 0,3 \text{ см}; & d_{\text{засл}} &= 0,8 \text{ см}; & \mu_{c-3} &= 0,6; \\
 h_0 = x_0 &= 0,02 \text{ см}; & c_2 &= 1,0 \text{ кг/см}; & M_{\text{зол}} &= 0,05 \text{ кг}; \\
 p_{\text{ж}} &= 40 \text{ кг/см}^2; & c_3 &= 120 \text{ кг/см}; & M_{\text{засл}} &= 0,007 \text{ кг}; \\
 & & & & b &= 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}^3.
 \end{aligned}$$

При нейтральному (нулевому) положенні заслінки елемента №1, заслінка елемента №2 і золотник будуть також знаходитись у нейтральному положенні.

$$\begin{aligned}
 \text{Тоді} \quad p_{30} &= p_{40} = 0,5 p_{\text{ж}} = 20 \text{ кг/см}^2; \\
 x_0' &= h_0' = 0,5 x_0 = 0,5 h_0 = 0,01 \text{ см}; \\
 \alpha_1^* &= \alpha_2^* = \alpha_3^* = \alpha_4^* = 1,004.
 \end{aligned}$$

Визначимо числове значення відносної провідності  $\alpha_1^*$

$$\alpha_1^* = \frac{\mu \pi c \sqrt{\frac{2}{\rho}}}{\sqrt{p_{\text{ж}} - p_{30}}}; \quad (20)$$

Визначивши передаточні функції ланок, знайдемо передаточну функцію ЕГП при наявності коректуючої ланки

$$\Phi_{\text{ЕГП}}^* = \frac{0,0137S^2 + 0,00308S + 1,96}{0,683 \cdot 10^{-6} S^4 + 341,1 \cdot 10^{-6} S^3 + 213 \cdot 10^{-5} S^2 + 4,91 \cdot 10^{-4} S + 1}. \quad (22)$$

Передаточна функція ЕГП без коректуючої ланки буде рівна

$$\Phi_{\text{ЕГП}} = \frac{8,37}{416,7 \cdot 10^{-6} S^2 + 42095,04 \cdot 10^{-4} S + 1}. \quad (23)$$

**Висновки.** Зіставлення передаточних функцій з коректуючою ланкою (22) і без неї (23) свідчать про ефективність введення коректуючої ланки, завдяки підвищенню швидкодії гідравлічного підсилювача.

У той же час, коефіцієнт підсилення підсилювача дещо зменшується, у зв'язку з чим зберігається сталість електрогідропідсилювача.

**Список літератури:** 1. Попов Д.Н., Ермаков С.А., Лобода І.Н., Фомичов В.М., Шумилов І.С. Инженерные исследования гидроприводов летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1978. – 142 с. 2. Борис Ю.А., Рабинович М.И., Корякин Л.М., Беляков А.В. Улучшение устойчивости и быстрействия следящих гидроприводов посредством коррекции по нагрузке. ВКН. Вневматика и гидравлика. М.: Машиностроение. Вып. 7. – 1979. – С. 139 – 144. 3. Гидроприводы и гидропневмоавтоматика станков / В.А. Федорец, М.П. Педченко, А.Ф. Пичке, Ю.В. Пересадыко, В.С. Лысенко. Под ред. д-ра техн. наук В.А. Федорца. – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1987. – 375 с. 4. Авт. свид. СССР №712535 Ю.А. Грядунов, И.А. Пятак, Л.В. Даниленко, В.П. Запорожец. Электрогидравлический усилитель-преобразователь. Оpubл. в БН №4, 1980.

Надійшла до редколегії 06.08.2010