

УДК 621.548

мехатроніка

В.С. Лисенко, канд.техн.наук,
В.К. Буслов, канд.техн.наук,
В.Є. Щербо

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

КОРЕКЦІЯ ТА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СЛІДКУЮЧОГО ГІДРАВЛІЧНОГО ПРИВОДА З ГІДРОМОТОРОМ

Рассмотрен новый следящий гидропривод перемещения объекта управления с гидромотором, четырехкромочным золотниковым распределителем и введенным в него корректирующим устройством — реальным интегрирующим контуром, который содержит две пружины и гидроемкость с линейным дросселем. Гидропривод имеет внешнюю обратную связь и управление от шагового двигателя. Представлены нелинейная и линеаризованная математические модели и структурные схемы системы автоматического регулирования, являющиеся алгоритмом ее расчета. Приведен анализ новой следящей системы.

The new design of the fluid servodrive for moving management object is developed. Fluid servodrive includes hydraulic motor, distribution valve of 4 edges and correcting devise - a real integrating contour inserted into it. The correcting devise contains two springs and hydraulic reservoir with a linear throttle. The servodrive has an external feedback and controlled by step-by-step motor. For the benefit of algorithm of the automatic control system calculation, its nonlinear and linear mathematical models and block diagrams are presented. The results of analysis of the automatic control system developed are given.

Вступ

Слідкуючий гідравлічний привод знайшов широке застосування в цілій низці галузей промисловості, а саме, у металорізальних верстатах, приводах роботів, літальних апаратах, будівельно-дорожному, сільськогосподарському машинобудуванні та інше. Розрахунок таких систем автоматичного регулювання базується на розробці їх математичних моделей і побудові структурних схем, які є алгоритмами розрахунку. Для підвищення показників якості систем автоматичного регулювання і управління проводять їх корекцію, тобто вводять у них, наприклад, у регулятор коригуючий пристрій, який дозволяє покращити їх динамічні характеристики, а за необхідності провести синтез, тобто розроблення систем з попередньо заданими показниками якості [1].

Мета дослідження.

Розроблення математичної моделі нової слідкуючої гідросистеми [2] з гидромотором і проведення її корекції з включенням у регулятор (гідрозподільник) коригуючого пристрою — реального інтегруючого контуру, що може підвищити показники якості системи.

Основна частина

На кафедрі прикладної гідроаеромеханіки і мехатроніки НТУУ «КПІ» запропоновано удосконалення слідкуючого гидроприводу шляхом зміни конструктивних елементів та їх зв'язків, що забезпечує покращення його динамічних характеристик та показників якості процесу регулювання.

Слідкуючий гидропривод (рисунок 1) містить насос 1, зливну 2 та напірну 3 гідролінії, гідробак 4, клапан тиску 5

з розвантажуючим гідрозподільником, золотниковий чотирьохлінійний, встановлений на об'єкті управління 6 гідрозподільник 7, золотник 8 якого взаємодіє з пружиною 9 та корпусом 10, а також з кроковим електродвигуном 11 програмноносія. Гідропривод містить також гидромотор 12 пересування об'єкта 6 управління та механізм 13 зворотнього зв'язку [2].

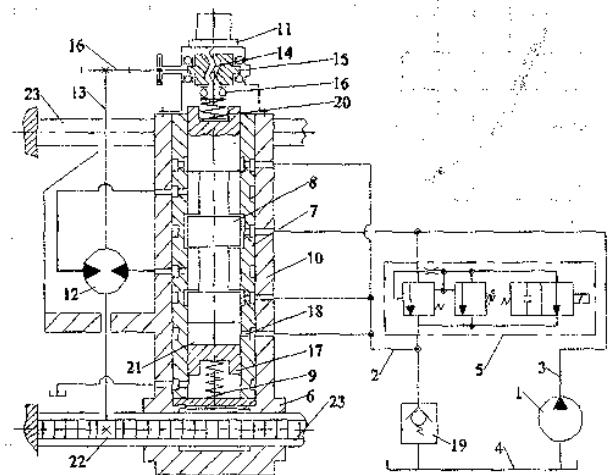


Рисунок 1 — Принципова гідрокінематична схема слідкуючого гидропривода.

Кроковий двигун через передачу гвинт 14 — гайка 15 та опірний підшипник 16 взаємодіє із золотником 8 гідрозподільника 7. Механізм 13 зворотнього зв'язку містить механічну передачу 16, яка з'єднує гидромотор 12, що вста-

новлений на об'єкті управління, з гайкою 15 гвинтової передачі.

Слідкуючий гідропривод може містити плунжер 17, лінійний дросель 18, підпирний клапан 19 та пружину 20. Порожнина 21, утворена торцями плунжера 17 і золотника 8, з'єднана з зливною гідролінією 2. Клапан тиску з'єднує напірну гідролінію з зливною гідролінією перед підпирним клапаном 19.

Пружини 9 і 20, а також дросель 18 з порожниною 21, що з'єднані послідовно, утворюють коригуючий пристрій — реальний інтегруючий контур, що включений у замкнену систему автоматичного регулювання [1], який введений послідовно у регулятор (гідророзподільник) і може підвищити якість процесу регулювання та покращити динамічні характеристики слідкуючого гідропривода у залежності від вимог, які пред'являються при синтезі, тобто при проектуванні її з наперед заданими показниками якості.

Переміщення об'єкта управління 6 (стіл металорізального верстата, привод робота таке ін.) може здійснюватись гідромотором 12 через рейкову передачу 22 по направляючим стійкам 23 або через черв'ячну передачу.

При подачі сигналу керування від програмоносія на кроковий двигун 11 гвинт 14 повертається на відповідний кут, переміщуючи гайку 15, а через опірний підшипник 16 і пружину 20 — золотник 8 в одну або іншу сторону. Робоча рідина від насоса 1 через гідророзподільник 7 підводиться до гідромотора 12, який через рейкову передачу 22 переміщує об'єкт 6 на відстань, відповідну кількості імпульсів крокового двигуна 11. Разом з тим спрацьовує механізм зворотного зв'язку, повертаючи гайку-шестерню 15 у початкове положення. У процесі роботи приймає участь коригуючий пристрій — реальний інтегруючий контур, утворений послідовним з'єднанням пружин 20, 9 і гідравлічного демпфера, що містить порожнину 21, лінійний дросель 18 і плунжер 17. Початкове положення золотника 8 у гідророзподільнику 7 визначається тиском у зливній гідролінії 2 при відключенні розвантаження гідро-системи клапаном 5, де тиск на підпорному клапані 19 незначний.

Коригуючий пристрій

Визначимо залежність між осьовим переміщенням x гайки-шестерні 15, z — золотника 8, y — плунжера 17 відносно золотника 8 на основі рівняння діючих сил пружин і демпфера:

$$c_1(x-z) = c_2(z-y) = \lambda \cdot \dot{y}, \quad (1)$$

де c_1, c_2 — жорсткість пружин 20 і 9, λ — коефіцієнт демпфування, λ — швидкість зміни відносного переміщення у плунжера. Звідси залежність між координатами x і z така:

$$\left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2}\right) \lambda \cdot \frac{dx}{dt} + z = \frac{\lambda}{c_2} \cdot \frac{dy}{dx} + x, \quad (2)$$

де коефіцієнт λ демпфера визначається з умови нерозривності потоку рідини, що йде на переміщення плунжера 17 через дросель 18

$$\lambda = \frac{8 \mu_z l_2 \pi d_z^4}{d_1^4}, \quad (3)$$

де μ_z — коефіцієнт динамічної в'язкості робочої рідини, d_1, l_2 — діаметр отвору лінійного дроселя 18 і його довжина, d_z — діаметр золотника.

Математична модель нелінійної системи

Динаміка розглядаємої нової слідкуючої системи може бути описаною наступною системою рівнянь:

$$\ddot{\varphi}_\varphi = \alpha - i_\varphi \varphi, \quad (4)$$

$$x = t_p \cdot \delta_\varphi, \quad (5)$$

$$\left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2}\right) \lambda \cdot \frac{dz}{dt} + z = \frac{\lambda}{c_2} \cdot \frac{dy}{dx} + x; \quad (6)$$

$$(1 - K_p) \frac{q_m}{2\pi} \cdot p_x = I_m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + K_a \cdot \frac{dy}{dt} + M_{ox} + M_{oz}; \quad (7)$$

$$\frac{q_m}{2\pi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = G_z \cdot z \cdot \sqrt{\frac{1}{2} (p_n - p_x)} - K_k \cdot p_x - \frac{K_d}{2} \cdot \frac{dp_x}{dt}, \quad (8)$$

де (4) — рівняння зворотного зв'язку; (5) — рівняння гвинтової пари 14—15 (рисунк1); (6) — рівняння коригуючого пристрою — реального інтегруючого контуру; (7) — рівняння діючих на валу гідромотора 12 сил; (8) — рівняння нерозривності потоку через гідророзподільник 7.

У системі рівнянь (4)–(8) прийнято такі позначення змінних величин: α — кут повороту вала крокового двигуна 11 — управляючий сигнал; φ — кут повороту гідромотора 12 — регульована величина; δ_φ — сигнал помилки; x — осьове переміщення гайки-шестерні 15; z — переміщення золотника 8; p_n — перепад тиску на гідромоторі; M_{ox} — крутний момент опору на валу гідромотора 12 — головний збурювальний сигнал; t — час.

У рівняннях (4)–(8) прийнято такі позначення постійних величин: i — передаточне число зворотного зв'язку 13; t_p — шаг гвинта 14; K_p, K_a — коефіцієнти контактного та в'язкого тертя гідромотора 12; q_m — робочий об'єм гідромотора; I_m — момент інерції всіх деталей, що рухаються, приведений до валу гідромотора; M_{ox} — момент холостого ходу гідромотора;

$$G_z = \mu \cdot \pi \cdot d_z \sqrt{\frac{2}{\rho}} — \text{провідність гідророзподільника 7;}$$

μ — коефіцієнт витрати гідророзподільника 7; ρ — густина рідини; p_n — перепад тиску на гідророзподільнику 7; K_k — коефіцієнт ковзання (витоків) гідромотора 16; K_d — коефіцієнт деформації робочої рідини і трубопроводів, що знаходяться під тиском нагнітання.

При розробці математичної моделі у зв'язку з малистю нехтували зміною температури робочої рідини, силами інерції та гідродинамічними силами у гідророзподільнику, вважали витокі через щілини гідромотора і закриті щілини гідророзподільника пропорційними перепаду тиску в них, величину деформації рідини і трубопроводів пропорційною швидкості зміни тиску в них, сили контактного тертя пропорційними зміні тиску, в'язкого тертя — пропорційними швидкості відносного руху, тиск перед

клапаном 19 досить малим, гідророзподільник має нульове перекриття каналів і симетричну конструкцію.

За системою рівнянь (4)–(8) побудовано структурну схему (рисунк 2), що становить алгоритм розв'язку розглянутої системи рівнянь.

Математична модель лінеаризованої системи

У системі рівнянь рівняння (8) — нелінійне. Проведемо його лінеаризацію в околі початкових значень величин розглядуваного перехідного процесу, розклавши нелінійність у ряд Тейлора для функції двох змінних і обмежившись лінійною частиною цього ряду.

Нехай у момент часу $t = 0$ початкові умови розглядуваного перехідного процесу не нульові, а саме $z = z_0$; $p_A = p_{A0}$; $\varphi = \varphi_0$; $M_{on} = M_{on0}$. Введемо нові змінні, для яких початкові умови нульові, а саме

$$\Delta x = x - x_0; \quad \Delta z = z - z_0; \quad \Delta \alpha = \alpha - \alpha_0;$$

$$\Delta \delta_{Ж} = \delta_{Ж} - \delta_{Ж0}; \quad \Delta M_{on} = M_{on} - M_{on0};$$

$$\Delta \varphi = \varphi - \varphi_0; \quad \Delta \dot{\varphi} = \dot{\varphi}; \quad \Delta \ddot{\varphi} = \ddot{\varphi};$$

$$\Delta p_A = p_A - p_{A0}; \quad \Delta \dot{p}_A = \dot{p}_A$$

де крапкою позначені похідні відповідних змінних.

Тоді нелінійність рівняння (8), а саме витрата через гідророзподільник 8, набуде вигляду

$$Q_s = G_s \cdot z \cdot \sqrt{\frac{1}{2} (p_A - p_{A0})} \approx Q_{s0} + K_z (z - z_0) - K_{pA} (p_A - p_{A0}),$$

де

$$Q_{s0} = G_s \left. \begin{matrix} z = z_0 \\ p_A = p_{A0} \end{matrix} \right|; \quad K_z = \frac{\partial Q_s}{\partial z} \left. \begin{matrix} z = z_0 \\ p_A = p_{A0} \end{matrix} \right|; \quad K_{pA} = \frac{\partial Q_s}{\partial p_A} \left. \begin{matrix} z = z_0 \\ p_A = p_{A0} \end{matrix} \right|$$

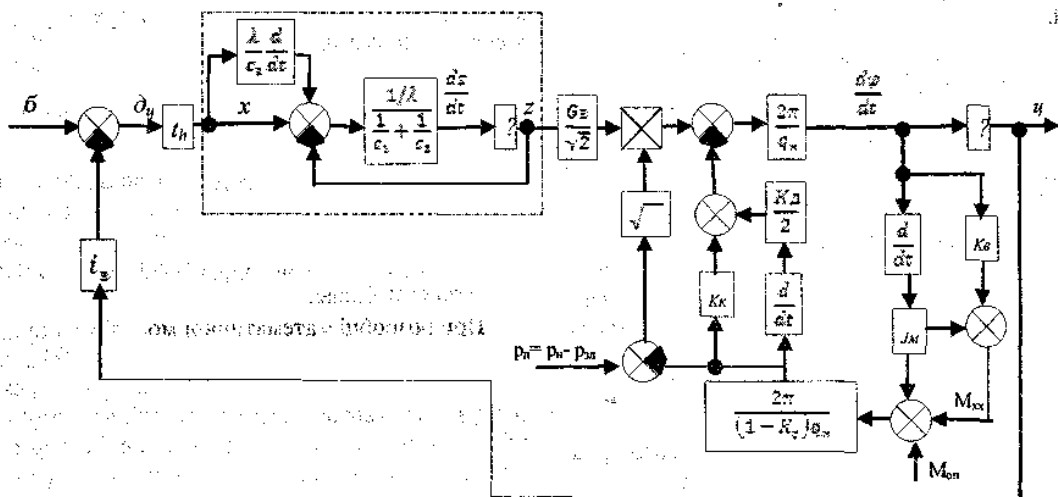


Рисунок 2. Структурна схема нелінійної моделі слідкуючого гідропривода.

а лінеаризоване рівняння (8) прийме вигляд

$$\frac{q_{ж}}{2\pi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = Q_{s0} + K_z (z - z_0) - K_{pA} (p_A - p_{A0}) - K_k \cdot p_A - \frac{K_2}{2} \frac{dp_0}{dt} \quad (9)$$

У момент початку перехідного процесу ($t = 0$) одержимо відповідні рівняння статки:

$$\delta_{\varphi 0} = \alpha_0 - t_z \varphi_0; \quad (10)$$

$$x_0 = t_p \cdot \delta_{\varphi 0}; \quad (11)$$

$$z_0 = x_0; \quad (12)$$

$$(1 - K_p) \frac{q_{ж}}{2\pi} \cdot p_A = M_{жж} + M_{он0}; \quad (13)$$

$$0 = Q_{s0} - K_p \cdot p_{A0}. \quad (14)$$

Для переходу до нових змінних, для яких початкові умови нульові, віднімемо від відповідних рівнянь динаміки (4)–(7), (9) рівняння статки (10)–(14) і проведемо перетворення Лапласа при нульових початкових умовах:

$$\Delta \delta_{\varphi}(S) = \Delta \alpha(S) - t_z \cdot \Delta \varphi(S); \quad (15)$$

$$\Delta x(S) = t_p \cdot \Delta \delta_{\varphi}(S); \quad (16)$$

$$\left(\left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} \right) \lambda S + 1 \right) \Delta z(S) = \left(\frac{\lambda}{c_2} S + 1 \right) \Delta x(S); \quad (17)$$

$$\left(1 - K_p \right) \frac{q_{ж}}{2\pi} \cdot \Delta p_A(S) = K_z \left(\frac{\lambda}{K_s} S + 1 \right) S \Delta \varphi(S) - \Delta M_{он}(S); \quad (18)$$

$$\frac{q_{ж}}{2\pi} \cdot S \cdot \Delta \varphi(S) = K_z \cdot \Delta z(S) - (K_k + K_{pA}) \cdot \left[\frac{K_2}{2(K_k + K_{pA})} S + 1 \right] \Delta p_A; \quad (19)$$

За системою рівнянь (15)–(19) побудовано лінеаризовану структурну схему (рисунк 3), яка є алгоритмом розрахунку динаміки слідкуючої системи, що розглядається,

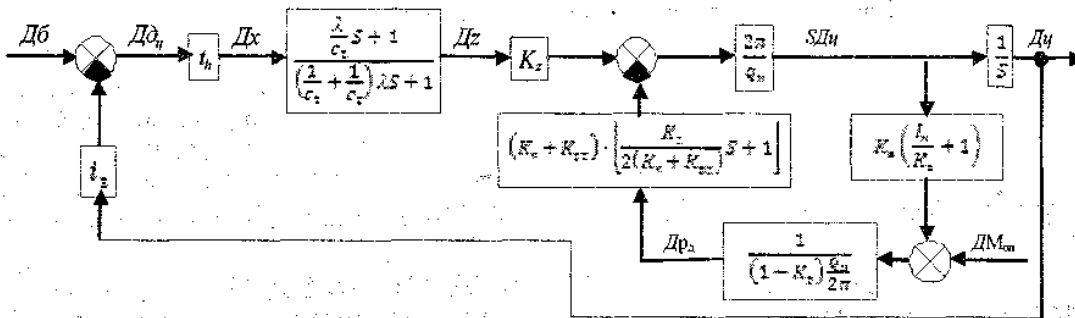


Рисунок 3. Структурна схема лінеаризованої моделі слідкуючого гідропривода.

і яку можна розв'язати як за допомогою ЕОМ, так і немашинними методами теорії автоматичного управління.

Передаюча функція замкненої системи за рисунком 3:

$$\Phi(s) = \frac{\Delta\varphi(s)}{\Delta\alpha(s)} = \frac{t_p \cdot K_z \cdot \frac{2\pi}{q_n} \left(\frac{\lambda}{c_s} s + 1 \right)}{A(s) + B(s)} \quad (20)$$

$$A(s) = \left[\left(\frac{1}{c_s} + \frac{1}{c_s} \right) \lambda s + 1 \right] \left[1 - K_z \left(\frac{\lambda}{c_s} s + 1 \right) \frac{2\pi}{q_n} \right] (K_z + K_{zz}) \left[\frac{K_m}{2(K_z + K_{zz})} s + 1 \right] s$$

$$B(s) = t_p \cdot K_z \cdot \frac{2\pi}{q_n} \cdot i_2 \left(\frac{\lambda}{c_s} s + 1 \right)$$

Подальший аналіз слідкуючої скорегованої системи для визначення її запаса, сталості, показників якості (точності і швидкодії) можна провести одним з чотирьох відомих методів [1] або декількох з них, а саме, по коренях характеристичного рівняння — прирівненого до нуля знаменника передаючої функції замкненої системи (20) — корневий метод, по подачі на вхід системи ступеневого сигналу і побудові кривої перехідного процесу — часовий метод, а також по частотних характеристиках замкненої та розімкненої систем при подачі на їх вхід гармонічного сигналу.

Висновок

Запропоновано нелінійну і лінеаризовану математичну модель і структурні схеми нової слідкуючої систем з гідромотором, що є алгоритмами її розрахунку. Слідкуючий привод з гідромотором має простий і надійний перехід від обертового руху крокового двигуна до осьового необертового руху золотника, винесення зворотного зв'язку за межі золотника, встановлення гідромотора на об'єкті регулювання, введення у регулятор слідкуючого гідропривода коригуючого пристрою — реально-інтегруючого контуру, що дозволяє підвищити показники якості і одночасно плавність роботи, поліпшити динамічні характеристики, спростити обслуговування, наприклад, порівняно з технічним рішенням [3].

Література

1. Бесекерский, В.А., Попов, Е.П. Теория систем автоматического регулирования. — М.: Наука, 1972. — 768 с.
2. Патент України на корисну модель «Слідкуючий гідропривод», № 47796 від 10.02.2010 р.
3. Патент України на корисну модель «Гідравлічний підсилювач крутного моменту», № 43939 від 10.09.2009 р.

Надійшла 14.10.2011 р.