

УДК 621.646: 62-83

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ
ОБЛАДНАННЯМ З ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНИМ ПРИВОДОМ****Соколов В.І., Соколова Я.В.****AUTOMATION OF CONTROL PROCESSES OF TECHNOLOGICAL
EQUIPMENT WITH ELECTRO-HYDRAULIC DRIVE****Sokolov V.I., Sokolova Ya.V.**

Розглянуті питання автоматизації процесів керування технологічним обладнанням з електрогідролічним приводом. Метою роботи є синтез та дослідження системи автоматичного керування (САК) обладнанням, що враховує стохастичне збурення та шум спостереження.

Розроблено типову математичну модель технологічного обладнання з електрогідролічним приводом як об'єкту автоматичного керування. Математичний опис представляє собою сукупність лінійних динамічних ланок, що мають характерні параметри, а саме: коефіцієнт передачі і постійна часу блоку регулювання приводу, коефіцієнт передачі і постійні часу об'єкту та ін.

Синтезовано САК технологічним обладнанням, що враховує шум спостереження та стохастичне збурення об'єкту керування. Рішення задачі стохастичної лінійної оптимальної системи при неповній інформації про стан відповідно до методу розподілу розбито на дві: задачу синтезу оптимального наглядача та детерміновану задачу синтезу оптимальної системи. Для розробки оптимального лінійного регулятора використаний метод динамічного програмування.

Виконано дослідження динамічних характеристик САК. Показано, що в діапазоні можливих параметрів збурювання наглядач Калмана-Бьюси виконує функцію оптимальної фільтрації, зменшує тривалість перехідного процесу та забезпечує необхідну якість керування обладнанням. Проведені розрахунки перехідних процесів для переміщень та швидкостей при різних значеннях параметрів. Надані рекомендації щодо вибору оптимальних значень коефіцієнтів передач з урахуванням особливостей технологічного призначення обладнання.

Результати досліджень можуть бути використані для удосконалення технологічного обладнання, зокрема, для розширення його функціональних можливостей та поліпшення динамічних характеристик

Ключові слова: технологічне обладнання, електрогідролічний привід, математична модель, динамічні характеристики, передавальна функція, стохастичне збурення, фільтр Калмана-Бьюси, система автоматичного керування

Постановка проблеми.

Розвиток технологій обробки матеріалів в машинобудуванні пред'являє суттєві вимоги до

технічних та функціональних характеристик технологічного обладнання. Якість виробів при механічній обробці багато в чому залежить від можливості реалізації оптимальних законів руху робочих органів, точності регулювання їх переміщень та стабільності заданих швидкостей в умовах змінного навантаження. У цьому зв'язку важливим є розширення функціональних можливостей та поліпшення техніко-економічних показників ефективності приводів обладнання.

Досягнення доволіної кінематики робочих органів, можливість програмної реалізації оптимальних законів руху забезпечується застосуванням автоматичних електрогідролічних приводів (ЕГП). Широке поширення гідролічних приводів в технологічному обладнанні визначається такими важливими перевагами [1–4], до яких, насамперед, відносять можливість отримувати значні сили та моменти при порівняно малих розмірах гідродвигунів, плавність переміщення та безступінчасте регулювання швидкості у великому діапазоні, мала інерційність, можливість керувати режимами обробки під час руху робочих органів, простота здійснення прямолінійних зворотно-поступальних рухів та автоматичного керування робочими органами, легкість запобігання перевантажень та висока експлуатаційна надійність.

Подальше удосконалення технологічного обладнання багато в чому зв'язано з розробкою систем автоматичного керування (САК). Дослідження характеристик приводів та синтез САК потребують достовірних математичних моделей робочих процесів, що протікають в приводах. Існуючі системи автоматизації не враховують стохастичне збурення та шум спостереження, використовують спрощені математичні моделі робочих процесів, в наслідок чого відсутні можливості подальшого удосконалення обладнання.

У цьому зв'язку актуальним є питання розробки типової математичної моделі ЕГП технологічного обладнання як об'єкту

автоматичного керування та САК обладнанням, що враховує стохастичне збурення та шум спостереження.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Математичне моделювання характеристик робочих процесів в обладнанні пов'язане з певними труднощами при описі динамічних характеристик [5–9]. В гідроприводі мають місце коливання тисків, витрат, окремих деталей в наслідок стисливості рідини, впливу робочого середовища на регулюючі пристрої, виточки по зазорах та інших причин. Сукупність та поєднання цих явищ приводе до складних гідромеханічних процесів, які повинні бути враховані при проектуванні технологічного обладнання з ЕГП [10–15].

Проблематика розрахунку та проектування автоматичних ЕГП технологічного обладнання, синтезу та дослідження САК обладнанням представлена в роботах Навроцького К.Л., Петракова Ю.В., Попова Д.М., Струтинського В.Б., Федорця В.А. та ін. [1–6].

Слід відзначити, що відомі підходи до опису робочих процесів використовують спрощені математичні моделі характеристик, не враховують стохастичне збурення та шум спостереження [16–21]. Робота технологічного обладнання, зокрема обладнання для механічної обробки, здійснюється в умовах впливів на систему, закон зміни яких, в загальному випадку, носить стохастичний характер [22–25]. Розрахунок САК при випадкових впливах проводять за допомогою спеціальних статистичних методів, до розгляду вводять певні кількісні оцінки стохастичних збурень – статистичні характеристики випадкових впливів, які характеризують стохастичні збурення та при цьому не являються випадковими залежностями. САК, яка спроектована на основі таких методів, буде задовольняти вимогам, що пред'являються до неї, не для одного детермінованого впливу, а для цілої сукупності впливів, які задані за допомогою статистичних характеристик.

Мета статті.

Метою даної роботи є розробка типової математичної моделі ЕГП технологічного обладнання як об'єкту автоматичного керування та САК обладнанням, що враховує стохастичне збурення та шум спостереження.

Матеріали та результати дослідження.

В гідравлічних приводах технологічного обладнання найбільше поширення отримали об'ємний (машинний) і дросельний способи регулювання швидкості вихідної ланки гідроприводу. Сутність об'ємного регулювання швидкістю робочого органу полягає в тому, що подача рідини до гідродвигуна змінюється за рахунок зміни подачі насоса, що регулюється, який підживлює систему. Принцип дросельного регулювання полягає в тому, що частина подачі насоса, що не регулюється, відводиться через клапан або дросель на злив, мінуючи гідродвигун. На

відміну від об'ємного способу регулювання в системах з дросельним регулюванням подача рідини насосом завжди більше подачі, що необхідна для отримання заданої швидкості.

В розрахунковій схемі обладнання з ЕГП з дросельним регулюванням (рис. 1) відображені: електричний блок (ЕБ), електромеханічний перетворювач (ЕМП), гідропідсилювач (ГП), гідродвигун (ГД). ЕБ містить сумуючий (порівнювальний) підсилювач, підсилювач напруги, корегуючий контур та підсилювач потужності. ЕМП та ГП зазвичай становлять один пристрій – електрогідравлічний підсилювач (ЕГПС). У вихідному каскаді підсилення ЕГПС розглянутий золотниковий гідропідсилювач.

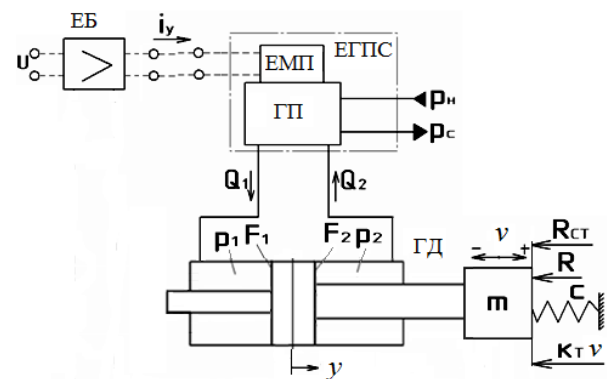


Рис. 1. Розрахункова схема ЕГП з дросельним регулюванням

Математична модель включає наступні рівняння та залежності:

$$L_y \frac{di_y}{dt} + R_y i_y = k_{yc} U; \quad (1)$$

$$T_{2y}^2 \frac{d^2 x_3}{dt^2} + T_{1y} \frac{dx_3}{dt} + x_3 = k_{xi} i_y; \quad (2)$$

$$Q_1 = \begin{cases} \mu_3 \pi d_3 k_n (x_3 - h_n) \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_n - p_1| \text{sign}(p_n - p_1)}, & x_3 > h_n; \\ 0, & |x_3| \leq h_n; \\ \mu_3 \pi d_3 k_n (x_3 + h_n) \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_1 - p_c| \text{sign}(p_1 - p_c)}, & x_3 < -h_n; \end{cases} \quad (3)$$

$$Q_2 = \begin{cases} \mu_3 \pi d_3 k_n (x_3 - h_n) \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_2 - p_c| \text{sign}(p_2 - p_c)}, & x_3 > h_n; \\ 0, & |x_3| \leq h_n; \\ \mu_3 \pi d_3 k_n (x_3 + h_n) \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_H - p_2| \text{sign}(p_H - p_2)}, & x_3 < -h_n; \end{cases} \quad (4)$$

$$m \frac{dv}{dt} = p_1 F_1 - p_2 F_2 - cy - k_T v - R_{cm} \text{sign} v - R; \quad (5)$$

$$\frac{dy}{dt} = v, \quad -H/2 \leq y \leq H/2; \quad (6)$$

$$\frac{W_{но} + F_1(H/2 + y)}{E_{жс}} \frac{dp_1}{dt} = Q_1 - F_1 v; \quad (7)$$

$$\frac{W_{со} + F_2(H/2 - y)}{E_{жс}} \frac{dp_2}{dt} = -Q_2 + F_2 v; \quad (8)$$

де y, v – переміщення та швидкість поршня; p_1, p_2 – тиск у порожнинах гідроциліндру; m – приведена маса рухливих частин; F_1, F_2 – ефективні площі; c – жорсткість позиційного навантаження; k_T – коефіцієнт сили в'язкого тертя; $R_{см}$ – сила сухого тертя; R – навантаження; H – хід поршня; $E_{жс}$ – модуль пружності робочої рідини; $W_{но}, W_{со}$ – «мертві» об'єми напірної та зливної магістралей; k_{oc} – коефіцієнт передачі ЗЗ; k_{xi} – коефіцієнт передачі ЕГПС; T_{2y}, T_{1y} – постійні часу ЕГПС; p_H, p_C – тиск насосної станції та на зливі; x_3 – переміщення золотника; h_n – величина позитивного перекриття; μ_3 – коефіцієнт витрати щілини золотника; d_3 – діаметр золотника; k_n – коефіцієнт повноти використання периметра золотника; ρ – густина робочої рідини; U – вхідна (керуюча) напруга; k_{yc} – коефіцієнт підсилення ЕБ; L_y – індуктивність обмотки керування; R_e – активний опір електричного ланцюга.

На основі дослідження характеристик робочих процесів розроблена типова математична модель обладнання з ЕГП з дросельним регулюванням як об'єкту автоматичного керування. Структурна схема математичної моделі показана на рис. 2, де введені наступні параметри: T_y – постійна часу керуючої частини приводу; T_y – механічна постійна часу гідроциліндра; ζ_m – коефіцієнт відносного демпфування гідроциліндра; k_{QU} – коефіцієнт передачі керуючої частини приводу; k_{vQ} – коефіцієнт передачі для швидкості по витраті; k_{vR} – коефіцієнт передачі для швидкості по навантаженню.

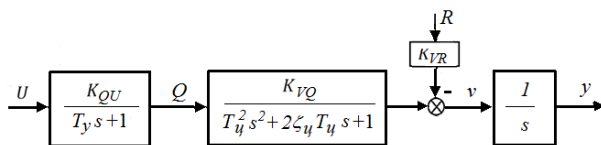


Рис. 2. Структурна схема математичної моделі ЕГП з дросельним регулюванням як об'єкту автоматичного керування

В розрахунковій схемі ЕГП з об'ємним регулюванням (рис. 3) позначені: Ω_n – кутова швидкість валу насоса; γ – кут нахилу шайби насоса (блока циліндрів) аксіально-поршневого насоса; t – час; Ω – кутова швидкість валу гідромотора; α – кут повороту валу гідромотора; Q_n, Q_m – ідеальні витрати насоса та гідромотора; Q_{nn}, Q_{nm} – витрати перетоків в насосі та гідромоторі; $Q_{yn1}, Q_{yn2}, Q_{ym1}, Q_{ym2}$ – витрати

виток в лініях насоса та гідромотора; Q_{nn1}, Q_{nn2} – витрати підживлення скрізь підживлючі клапани; p_1, p_2 – тиски в трубопроводах високого та низького тисків; p_{nn} – тиск в магістралі перед підживлючим клапаном.

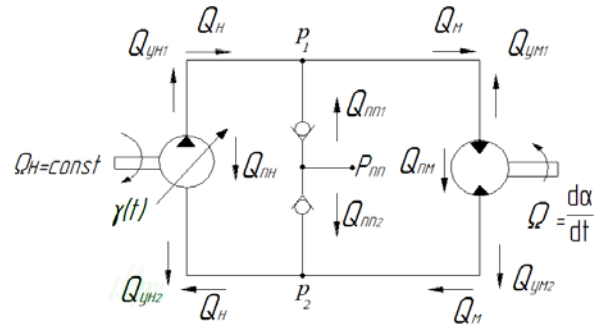


Рис. 3. Розрахункова схема ЕГП з об'ємним регулюванням

Математична модель силової частини гідроприводу обертального руху спеціального технологічного обладнання включає наступні рівняння та залежності:

$$Q_m + Q_{nn} + Q_{nm} + Q_{yn1} + Q_{ym1} + Q_{сжс1} - Q_{nn1} - Q_n = 0; \quad (9)$$

$$Q_m + Q_{nn} + Q_{nm} - Q_{yn2} - Q_{ym2} - Q_{сжс2} + Q_{nn2} - Q_n = 0; \quad (10)$$

$$Q_{nn} = Q_{nm} = Q_{nep}; \quad Q_{yn1} = Q_{ym1} = Q_{ym1}; \quad Q_{yn2} = Q_{ym2} = Q_{ym2}; \quad (11)$$

$$Q_m = \frac{q_m}{2\pi} \Omega = \frac{q_m}{2\pi} \frac{d\alpha}{dt}; \quad Q_n = \frac{q_n}{2\pi} \Omega_n; \quad (12)$$

$$q_n = F_n z_n D_n \operatorname{tg} \gamma; \quad (13)$$

$$Q_{nep} = k_{nep} (p_1 - p_2); \quad Q_{ym1} = k_{ym} p_1; \quad (14)$$

$$Q_{ym2} = k_{ym} p_2; \quad (15)$$

$$Q_{сжс1} = \frac{W_0}{E_{жс}} \frac{dp_1}{dt}; \quad Q_{сжс2} = \frac{W_0}{E_{жс}} \frac{dp_2}{dt}; \quad (16)$$

$$M_M - M_{mp} - M_{noz} - M = J \frac{d\Omega}{dt}; \quad \Omega = \frac{d\alpha}{dt}; \quad (17)$$

$$M_M = \frac{q_m}{2\pi} (p_1 - p_2); \quad M_{noz} = k_{noz} \alpha; \quad (18)$$

$$M_{mp} = k_{mp} \frac{d\alpha}{dt}; \quad (19)$$

де $Q_{сжс1}, Q_{сжс2}$ – складові витрати, які пов'язані з компенсацією стисливості рідини (витрати стискування); $k_{кл}$ – провідність підживлюючого

клапана; q_m – робочий об’єм гідромотора; q_n – робочий об’єм насоса; F_n – робоча площа одного поршня (плунжера) насоса; z_n – кількість поршнів; D_n – діаметр кола, на якій розташовані вісі поршнів насоса; k_{nep} – провідність щілин, по яким в насосі та гідромоторі здійснюються перетоки рідини з порожнин з високим тиском в порожнини з низьким тиском; k_{ym} – провідність щілин, по яким здійснюється виток рідини з насоса та гідромотора; J – момент інерції частин, що обертаються з валом гідромотора (приведений момент інерції загрузки та ротора мотора); W_0 – внутрішній об’єм трубопроводів з підключеними до нього об’ємами порожнин насоса та гідромотора; M_{mp} – момент від сил тертя; M_{noz} – момент від дії позиційного навантаження; M_m – крутний момент; k_{noz} – коефіцієнт жорсткості позиційного навантаження; $k_{mp} = k_{mp1} + k_{mp2}$; k_{mp1} – коефіцієнт моменту від сил тертя в гідромоторі; k_{mp2} – коефіцієнт моменту від сил тертя в виконавчому механізмі.

На основі дослідження характеристик робочих процесів розроблена типова математична модель технологічного обладнання з ЕГП з об’ємним регулюванням як об’єкту автоматичного керування. Структурна схема математичної моделі показана на рис. 4, де введені у розгляд наступні параметри: T_{np} – постійна часу процесу регулювання робочого об’єму насоса; T_m – постійна часу гідромотора; ζ_m – коефіцієнт відносного демпфування гідромотора; $k_{\gamma U}$ – коефіцієнт передачі для кута нахилу шайби (блоку циліндрів) по керуючій напрузі; $k_{\Omega \gamma}$ – коефіцієнт передачі силової частини привода; $k_{\Omega M}$ – коефіцієнт передачі для кутової швидкості обертання по навантажуючому моменту.

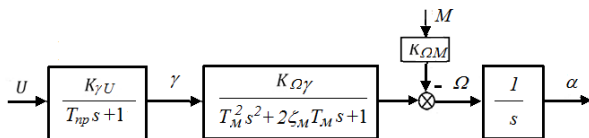


Рис. 4. Структурна схема математичної моделі ЕГП з об’ємним регулюванням як об’єкту автоматичного керування

Аналіз структурних схем математичних моделей ЕГП з дросельним та об’ємними способами регулювання (рисю 2, 4) дозволив запропонувати та покласти в основу подальших досліджень єдину типову математичну модель ЕГП технологічного обладнання як об’єкту автоматичного керування. Структурна схема математичної моделі показана на рис. 5, де обозначені: u – вхідний сигнал; y – вихідна змінна; k_0 , T_0 – коефіцієнт передачі та постійна часу блоку регулювання привода; k , T_1 , T_2 – коефіцієнт передачі та постійні часу об’єкта; $V_o(t)$ – стохастична збуджуюча дія (шум об’єкта).

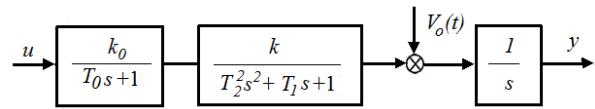


Рис. 5. Структурна схема типової математичної моделі

Єдина типова математична модель стала основою для розробки САК технологічним обладнанням з ЕГП, що враховує стохастичне збурення та шум спостереження.

У просторі стану рівняння об’єкта керування були представлені в матричній формі

$$\dot{x} = Ax + Bu + V_o(t), \quad (20)$$

$$y = Cx + V_n(t), \quad (21)$$

де x – фазовий вектор змінних стану об’єкту автоматичного керування, u – керуючий вплив, y – вихідна змінна, A – матриця параметрів об’єкта керування, B – матриця вхідних параметрів, C – матриця вихідних параметрів, $V_o(t)$ – кольоровий шум об’єкта, $V_n(t)$ – білий шум спостереження;

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1/T_0 T_2^2 & -(T_0 + T_1)/T_0 T_2^2 & -(T_0 T_1 + T_2^2)/T_0 T_2^2 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ K_0 K / T_0 T_2^2 \end{bmatrix};$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0].$$

Для формування кольорового шуму об’єкта розглянутий формуючий фільтр з передавальною функцією

$$W_\phi(s) = \frac{b_0^* s + b_1^*}{a_0^* s^2 + a_1^* s + a_2^*}, \quad (22)$$

на вхід якого подавався стаціонарний стохастичний сигнал $V(t)$ типу білий шум зі спектральною щільністю $S_V(\omega) = L_V$.

Критерій оптимальності управління розглядався у виді

$$J = \int_0^{t_f} (\tilde{Q}x^2(t) + \tilde{R}u^2(t)) dt \rightarrow \min, \quad (23)$$

де \tilde{Q} – позитивно-визначена матриця, що характеризує якість керування; \tilde{R} – величина обмеження керуючої дії.

У зв'язку з тим, що стохастична збурююча дія, що прикладена до об'єкту керування, проявляє себе незалежно від керуючого сигналу, то синтез САК технологічним обладнанням з ЕГП з гідроприводом обертального руху виконано з урахуванням адитивної перешкоди. Таким чином, рішення задачі стохастичної лінійної оптимальної системи при неповній інформації про стан відповідно до методу розподілу розбито на дві: задачу синтезу оптимального наглядача та детерміновану задачу синтезу оптимальної системи [22].

Для синтезу оптимального лінійного регулятора відповідно поставленій задачі використаний метод динамічного програмування. Функціональне рівняння Беллмана розглядалося у вигляді

$$\tilde{Q}x^2 + \tilde{R}u^2 + \frac{\partial S}{\partial x}(A'x + B'u) + \frac{\partial S}{\partial t} = 0. \quad (24)$$

$$2\tilde{R}u + \frac{\partial S}{\partial x}B' = 0. \quad (25)$$

З рівняння (25) прийнято вираз для оптимального керування

$$u = -\frac{1}{2}\tilde{R}^{-1}B' \frac{\partial S}{\partial x}. \quad (26)$$

З урахуванням позитивної визначеності функції Беллмана для оптимального керування технологічним обладнанням отримано

$$u = -(K_1''x_1 + K_2''x_2 + K_3''x_3 + K_4''x_4) \quad (27)$$

де x_1, x_2, x_3, x_4 - фазові змінні; $K_1'', K_2'', K_3'', K_4''$ - коефіцієнти підсилення зворотного зв'язку.

Структурна схема оптимальної САК приведена на рис. 6. Структурная схема оптимальной САУ приведена на рис. 6. Відзначимо, що на схемі позначені коефіцієнти фільтра Калмана-Бьюси - K_1', K_2', K_3', K_4' .

Перехідні процеси стохастичної замкнутої САК технологічним обладнанням з ЕГП без використання та з використанням фільтра Калмана-Бьюси при наявності збурюючого впливу на об'єкт керування у вигляді білого шуму зі спектральною щільністю $S_v(\omega)=1$ та $W_\phi(s)=0,025$ приведені на рис. 7. Дослідження показали, що в діапазоні можливих параметрів збурювання для приводів як з дросельним (1), так і з об'ємним регулюванням (2), фільтр Калмана-Бьюси виконує функцію оптимальної фільтрації, забезпечує необхідну якість управління технологічним обладнанням та зменшує тривалість перехідного процесу.

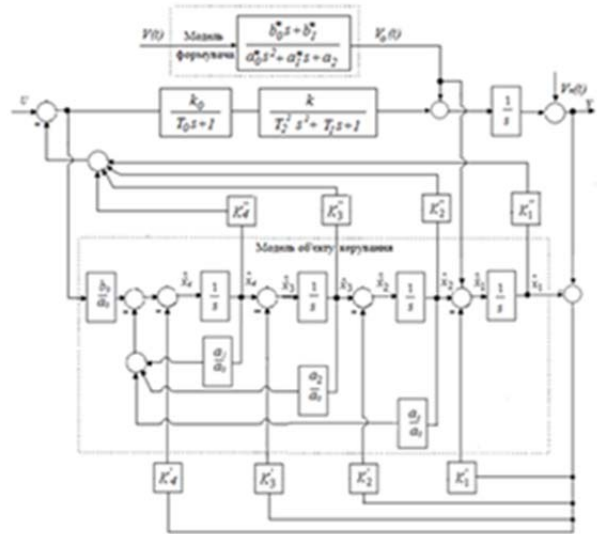


Рис. 6. Структурна схема САК

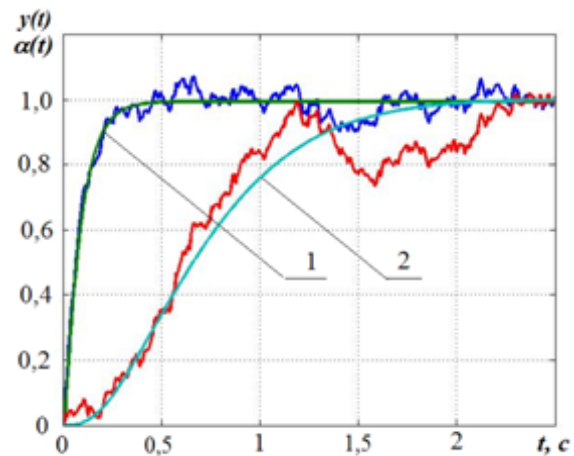


Рис. 7. Перехідні процеси в стохастичній замкнутій системі без використання та з використанням фільтра Калмана-Бьюси для привода с дросельним (1) та об'ємним (2) регулюванням

Виконано дослідження САК, зокрема, вплив параметрів об'єкту керування та оптимального регулятора на якість перехідного процесу. На рис. 8 приведені перехідні процеси в системі для приводу з дросельним регулюванням (а) при різних значеннях коефіцієнту передачі k_{0u} ($m^3/(c \cdot B)$) і приводу з об'ємним регулюванням (б) при різних значеннях безрозмірного коефіцієнту передачі прямого шляху k_0k . На рис. 9 показані перехідні процеси при різних значеннях коефіцієнту передачі K_2'' регулятора для приводу з дросельним регулюванням (а) при $K_1''=108$ і приводу з об'ємним регулюванням (б) при $K_1''=1,35$.

Слід зауважити, що при виборі оптимальних значень коефіцієнтів передач необхідно враховувати, що у ряді випадків особливості технологічного призначення обладнання виключають перерегулювання лінійного чи кутового

переміщення (або зміну знаку швидкості) робочого органу. Очевидно, що для результатів досліджень, які наведені на рис. 8, 9, рекомендовані значення коефіцієнтів передач не будуть відповідати оптимальній швидкості обладнання.

Результати проведених досліджень важливі для удосконалення технологічного обладнання для механічної обробки матеріалів, зокрема, для розширення його функціональних можливостей та поліпшення динамічних характеристик. Необхідно враховувати, що поліпшення динамічних характеристик підвищує надійність та довговічність обладнання, а також рівень охорони праці на виробництві.

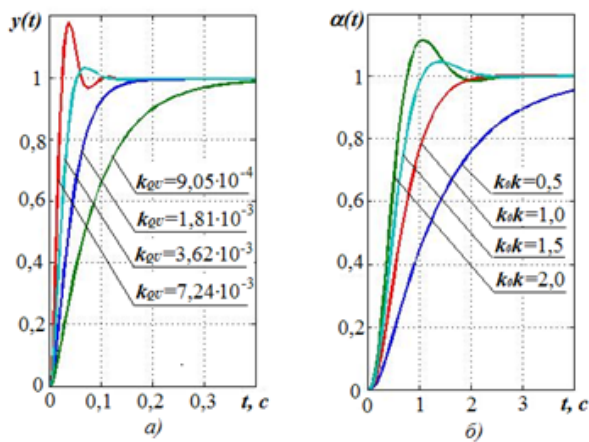


Рис. 8. Вплив на перехідні процесипараметрів об'єкта керування:

а – привід з дросельним регулюванням;
б – привід з об'ємним регулюванням

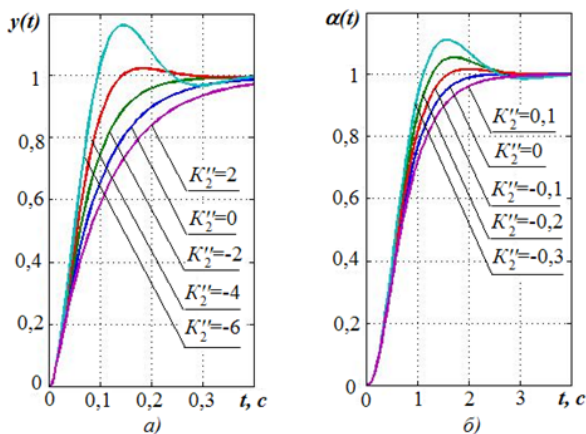


Рис. 9. Вплив на перехідні процеси коефіцієнта K_2'' регулятора:

а – привід з дросельним регулюванням ($K_1'' = 108$);
б – привід з об'ємним регулюванням ($K_1'' = 1,35$)

В подальшому планується проведення досліджень щодо удосконалення САК за рахунок підвищення точності математичної моделі як об'єкту автоматичного керування, зокрема, врахуванням динамічних властивостей елементів та пристроїв

приводу більшого порядку. Викликають інтерес всебічні дослідження характеристик стохастичних збурень та шумів спостереження для різноманітного технологічного обладнання, їх впливу на якість і точність керування.

Висновки.

1. Розроблено типову математичну модель технологічного обладнання з електрогідравлічним приводом як об'єкту автоматичного керування. Математичний опис представляє собою сукупність лінійних динамічних ланок, що мають характерні параметри, а саме: коефіцієнт передачі і постійна часу блоку регулювання приводу, коефіцієнт передачі і постійні часу об'єкту та ін.

2. Синтезовано САК технологічним обладнанням, що враховує шум спостереження та стохастичне збурення об'єкту керування. Рішення задачі стохастичної лінійної оптимальної системи при неповній інформації про стан відповідно до методу розподілу розбито на дві: задачу синтезу оптимального наглядача та детерміновану задачу синтезу оптимальної системи. Для розробки оптимального лінійного регулятора використаний метод динамічного програмування.

3. Виконано дослідження динамічних характеристик САК. Показано, що в діапазоні можливих параметрів збурювання наглядач Калмана-Бьюси виконує функцію оптимальної фільтрації, зменшує тривалість перехідного процесу та забезпечує необхідну якість керування обладнанням. Проведені розрахунки перехідних процесів для переміщень та швидкостей при різних значеннях параметрів. Надані рекомендації щодо вибору оптимальних значень коефіцієнтів передач з урахуванням особливостей технологічного призначення обладнання.

Література

1. Свешников В.К. Станочные гидроприводы: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. / В.К. Свешников, А.А. Усов. – М.: Машиностроение, 1988. – 512 с.
2. Навроцкий К.Л. Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов. – М.: Машиностроение, 1991. – 384 с.
3. Гидроприводы и гидропневмоавтоматика станков/ В.А. Федоренко, М.Н. Педченко, А.Ф. Пичко, Ю.В. Пересадько, В.С. Лысенко; Под ред. В.А. Федорца. – К.: Вища шк., 1987. – 375 с.
4. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. – М.: Машиностроение, 1987. – 464 с.
5. Попов Д. Н. Механика гидро- и пневмоприводов: Учеб. для вузов. 2-е изд. / Д.Н. Попов. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 320 с.
6. Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы. – М.: Машиностроение, 1982. – 240 с.
7. Соколов В.И., Таванюк Т.Я., Соколова Я.В. Нестационарное трение в гидросистемах станков // Вісн. СевНТУ. Серія «Машиноприладобудування та транспорт». – Севастополь: СевНТУ, 2010. - № 107. – С. 214 - 219.

8. Соколов В.І., Кроль О.С., Єпіфанова О.В. Гідравліка. – Северодонецьк: СНУ ім. В. Даля. – 2017. – 160 с.
9. Харламов Ю.А., Соколов В.И., Кроль О.С. Трибологическая надежность металлорежущих станков. – Северодонецк: ВНУ им. В. Даля. – 2017. – 320 с.
10. Sokolova Ya., Krol O., Tavanuk T., Sokolov V. Transfer function of the automatic electrohydraulic drive // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 15. – N 2. – 2015. – Lublin - Rzeszow, Poland. - pp. 3-8.
11. Sokolova Ya., Krol O., Rasskazova Yu., Sokolov V. Mathematical modeling automatic electrohydraulic drive of machine building equipment // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 15. – N 2. – 2015. – Lublin - Rzeszow, Poland. - pp. 9-14.
12. Соколов В.И., Рассказова Ю.Б. Исследование течения жидкости в микрозазорах с граничным изменением вязкости // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. - 2016. - № 2 (226). – С. 20 - 25.
13. Sokolova Ya., Rasskazova Yu., Krol O., Sokolov V. Modeling of fluid flow in microgap considering the boundary change of dynamic viscosity // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 16. – N 2. – 2016. – Lublin - Rzeszow, Poland. - pp. 55 - 59.
14. Коваленко А.А., Соколов В.И., Дымнич А.Х., Уваров П.Е. Основы технической механики жидкостей и газов: Учебное пособие для вузов. - Луганск: ВУГУ, 1998. - 272 с.
15. Коваленко А. А., Соколов В.И., Уваров П.Е., Пазин В.В. Основы объемного гидравлического привода строительных и дорожных машин. - Луганск: ДонГАСА. – 1999. – 137 с.
16. Соколова Я. В., Таванюк Т.Я., Соколов В.И. Нелинейная математическая модель электрогидравлического следящего привода с дроссельным регулированием // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. - 2010. - № 10 (152). – С. 168 – 175.
17. Sokolov V., Azarenko N., Sokolova Ya. Simulation of the power unit of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 12. – N 4. – 2012. - Lublin, Poland. - pp. 268 - 273.
18. Соколов В.И., Соколова Я.В., Таванюк Т.Я. Разработка методики расчёта и выбор основных параметров электрогидравлического следящего привода специального технологического оборудования // Вісн. СевНТУ. Серія «Машиноприладобудування та транспорт». – Севастополь: СевНТУ, 2012. - № 129. – С. 223-228.
19. Соколов В.И., Азаренко Н.Г., Соколова Я.В. Моделирование силовой части автоматического электрогидравлического привода с объемным регулированием // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. – 2012. - № 12 (183). - Ч.1. – С. 260 - 270.
20. Соколов В.И., Соколова Я.В., Азаренко Н.Г. Моделирование течения жидкости в микрозазоре с учетом граничного изменения динамической вязкости // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. - 2013. - № 2 (191). – Ч.1. - С. 98 - 102.
21. Соколов В. И., Таванюк Т. Я. Определение передаточных функций электрогидравлического следящего привода оборудования для обработки давлением // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. – 2011. – №. 1(155). – С. 208 - 216.
22. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учебное пособие. – М.: Физматлит, 2004. – 464 с.
23. Sokolov V., Rasskazova Y. Automation of control processes of technological equipment with rotary hydraulic drive // Eastern-Europe Journal of Enterprise Technologies. Volume 2, Issue 2, 2015, Pages 44-50.
24. Соколова Я.В., Азаренко Н.Г., Соколов В.И. Синтез системы автоматического управления оборудованием для механической обработки материалов с гидравлическим приводом // Восточно-европейский журнал передовых технологий. - Харьков. – 2014. – № 2/2 (68). – С. 56-60.
25. Соколов В.И., Рассказова Ю.Б. Автоматизация процесів керування технологічним обладнанням з гідроприводом обертового руху // Східно-европейський журнал передових технологій. - 2016. – № 2/2 (80). – С.44 - 50.

References

1. Sveshnikov V.K. Stanochnyie gidroprivodyi: Spravochnik. – 2–e izd., pererab. i dop. / V.K. Sveshnikov, A.A. Usov. – М.: Mashinostroenie, 1988. – 512 s.
2. Navrotskyi K.L. Teoriya i proektirovanie gidro- i pnevmoprivodov. – М.: Mashinostroenie, 1991. – 384 s.
3. Gidroprivodyi i gidropnevmavtomatika stankov / V.A. Fedorets, M.N. Pedchenko, A.F. Pichko, Yu.V. Peresadko, V.S. Lyisenko; Pod red. V.A. Fedortsa. – К.: Vischa shk., 1987. – 375 s.
4. Popov D.N. Dinamika i regulirovanie gidro- i pnevmosistem. – М.: Mashinostroenie, 1987. –464 s.
5. Popov D. N. Mehanika gidro– i pnevmoprivodov: Ucheb. dlya vuzov. 2–e izd. / D.N. Popov. – М.: MGTU im. N. E. Baumana, 2005. – 320 s.
6. Popov D.N. Nestatsionarnyie gidromechanicheskie protsessy. – М.: Mashinostroenie, 1982. – 240 s.
7. Sokolov V.I., Tavanyuk T.Ya., Sokolova Ya.V. Nestatsionarnoe trenie v gidrosiste-mah stankov // Visn. SevNTU. Seriya «Mashy' nopyr' ladobuduvannya ta transport». – Sevastopol': SevNTU, 2010. - № 107. – S. 214 - 219.
8. Sokolov V.I., Krol' O.S., Yepifanova O.V. Gidravlika. – Syevyerodonecz'k: SNU im. V. Dalya. – 2017. – 160 s.
9. Harlamov Yu.A., Sokolov V.I., Krol O.S. Tribologicheskaya nadezhnost metallorезhushchih stankov. – Severodonetsk: VNU im. V. Dalya. – 2017. – 320 s.
10. Sokolova Ya., Krol O., Tavanuk T., Sokolov V. Transfer function of the automatic electrohydraulic drive // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 15. – N 2. – 2015. – Lublin - Rzeszow, Poland. - pp. 3-8.
11. Sokolova Ya., Krol O., Rasskazova Yu., Sokolov V. Mathematical modeling automatic electrohydraulic drive of machine building equipment // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 15. – N 2. – 2015. – Lublin - Rzeszow, Poland. - pp. 9-14.
12. Sokolov V.I., Rasskazova Yu.B. Issledovanie tehnicheskoy zhidkosti v mikrozasorah s granichnyim izmeneniem vyazkosti // Visn. Shidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalya. - 2016. - № 2 (226). – S. 20 - 25.
13. Sokolova Ya., Rasskazova Yu., Krol O., Sokolov V. Modeling of fluid flow in microgap considering the boundary change of dynamic viscosity // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 16. – N 2. – 2016. – Lublin - Rzeszow, Poland. - pp. 55 - 59.

14. Kovalenko A.A., Sokolov V.I., Dyimnich A.H., Uvarov P.E. *Osnovyi tehnikeskoy mehaniki zhidkostey i gazov: Uchebnoe posobie dlya vuzov.* - Lugansk: VUGU, 1998. - 272 s.
15. Kovalenko A. A., Sokolov V.I., Uvarov P.E., Pazin V.V. *Osnovni ob'emno gidravlichesko privoda stroitelnyh i dorozhnyh mashin.* - Lugansk: DonGASA. - 1999. - 137 s.
16. Sokolova Ya. V., Tavanyuk T.Ya., Sokolov V.I. *Nelineynaya matematicheskaya model elektrogidravlichesko sledyashego privoda s drosselnym regulirovaniem // Visn. Shidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalya.* - 2010. - № 10 (152). - S. 168 - 175.
17. Sokolov V., Azarenko N., Sokolova Ya. *Simulation of the power unit of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture.* - Vol. 12. - N 4. - 2012. - Lublin, Poland. - pp. 268 - 273.
18. Sokolov V.I., Sokolova Ya.V., Tavanyuk T.Ya. *Razrabotkametodikiraschyotaiviborosnovnyihparametrov elektrogidravlichesko sledyashego privodaspetsialnot ghnologicheskogooborudovaniya // Visn. SevNTU. Seriya «Mashy nopyr' ladobuduvannya ta transport».* - Sevastopol': SevNTU, 2012. - № 129. - S. 223-228.
19. Sokolov V.I., Azarenko N.G., Sokolova Ya.V. *Modelirovanie silovoy chasti avtomaticheskogo elektrogidravlichesko privoda s ob'emnyim regulirovaniem // Visn. Shidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalya.* - 2012. - № 12 (183). - Ch.1. - S. 260 - 270.
20. Sokolov V.I., Sokolova Ya.V., Azarenko N.G. *Modelirovanie tehnicheskoy zhidkosti v mikroazore s uchetom granichnogo izmeneniya dinamicheskoy vyzakosti // Visn. Shidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalya.* - 2013. - № 2 (191). - Ch.1. - S. 98 - 102.
21. Sokolov V. I., Tavanyuk T. Ya. *Opreделение peredatochnykh funktsiy elektrogidravlichesko sledyashego privoda oborudovaniya dlya obrabotki davleniem // Visn. Shidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalya.* - 2011. - № 1(155). - S. 208 - 216.
22. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. T.2. Mnogomernyye, nelineynyye, optimalnyie i adaptivnyie sistemy: uchebnoe posobie.* - M.: Fizmatlit, 2004. - 464 s.
23. Sokolov V., Rasskazova Y. *Automation of control processes of technological equipment with rotary hydraulic drive // Eastern-Europe Journal of Enterprise Technologies.* Volume 2, Issue 2, 2015, Pages 44-50.
24. Sokolova Ya.V., Azarenko N.G., Sokolov V.I. *Sintez sistemy avtomaticheskogo upravleniya oborudovaniem dlya mehanicheskoy obrabotki materialov s gidravlicheskim privodom // Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovoyih tehnologiy.* - Harkov. - 2014. - № 2/2 (68). - S. 56-60.
25. Sokolov V.I., Rasskazova Yu.B. *Avtomaty`zaciya procesiv keruvannya tex-nologichny`m obladnannym z gidropy`vodom obertal`nogo ruxu // Sxidno-evropejs`ky` zhurnal peredov`x tehnologij.* - 2016. - № 2/2 (80). - S.44 - 50.

Соколов В.И., Соколова Я.В. Автоматизация процессов управления технологическим оборудованием с электрогидравлическим приводом.

Рассмотрены вопросы автоматизации процессов управления технологическим оборудованием с электрогидравлическим приводом. Целью работы

является синтез и исследование системы автоматического управления (САУ) оборудованием, учитывающей стохастическое возмущение и шум наблюдения.

Разработана типовая математическая модель технологического оборудования с электрогидравлическим приводом как объекта автоматического управления. Математическое описание представляет собой совокупность линейных динамических звеньев, имеющих характерные параметры, а именно: коэффициент передачи и постоянная времени блока регулирования привода, коэффициент передачи и постоянные времени объекта и др.

Синтезирована САУ технологическим оборудованием, учитывающая шум наблюдения и стохастическое возмущение объекта управления. Решение задачи стохастической оптимальной системы при неполной информации о состоянии в соответствии с методом разделения разбито на две: задачу синтеза оптимального наблюдателя и детерминированную задачу синтеза оптимальной системы. Для разработки оптимального линейного регулятора использован метод динамического программирования.

Выполнены исследования динамических характеристик САУ. Показано, что наблюдатель Калмана-Бьюси выполняет функцию оптимальной фильтрации, уменьшает время переходного процесса и обеспечивает необходимое качество управления оборудованием. Проведены расчеты переходных процессов для перемещений и скоростей при различных значениях параметров. Даны рекомендации по выбору оптимальных значений коэффициентов передач с учетом особенностей технологического назначения оборудования.

Результаты исследований могут быть использованы для совершенствования технологического оборудования, в частности, для расширения его функциональных возможностей и улучшения динамических характеристик.

Ключевые слова: *технологическое оборудование, электрогидравлический привод, математическая модель, динамические характеристики, передаточная функция, стохастическое возмущение, фильтр Калмана-Бьюси, система автоматического управления*

Sokolov V.I., Sokolova Ya.V. Automation of control process of technological equipment with electro-hydraulic drive.

The problems of automation of control processes of technological equipment with electro-hydraulic drive are considered. The purpose of the paper is synthesis and study of the automatic control system (ACS) for equipment that allows for the stochastic disturbance and observation noise.

The typical mathematical model of technological equipment with electro-hydraulic drive as an object of automated control is developed. The mathematical description is a set of linear dynamic links with characteristic parameters, namely: the transmission coefficient and time constant of drive control unit, the transmission coefficient and time constants of object etc.

The ACS of technological equipment that allows for the observation noise and stochastic disturbance of the control object is synthesized. The solution of the problem of the stochastic optimum linear system with incomplete information about the state according to the method of distribution is divided into two: the problem of synthesis of the optimum supervisor and the deterministic problem of synthesis of the

optimum system. To develop the optimum linear controller, the dynamic programming method is used.

The study of dynamic characteristics of the ACS is carried out. It is shown that in the range of possible disturbance options, the Kalman-Bucy supervisor performs the function of optimum filtering, reduces the transient duration and provides necessary equipment control quality. The calculations of transients for displacements and velocities at different parameters are made. Recommendations for selecting the optimum values of transmission coefficients allowing for the features of the technological purpose of equipment are given.

The research results can be used to improve the technological equipment, particularly to expand functionality and enhance dynamic characteristics.

Keywords: *technological equipment, electro-hydraulic drive, mathematical model, dynamic characteristics, transfer*

function, stochastic disturbance, Kalman-Bucy filter, automatic control system.

Соколов Володимир Ілліч – д.т.н., проф., завідувач кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк)

sokolov.snu.edu@gmail.com

Соколова Яна Володимирівна – к.т.н., доц., здобувач кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк)

ya.v.sokolova@inbox.ru

Рецензент: д.т.н., проф. **Харламов Ю.О.**

Стаття подана 07.09.2017