

УДК 621.646: 62-83

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМ ОБЛАДНАННЯМ З ГІДРОПРИВОДОМ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ****Соколов В.І., Степанова О.Г., Степчук Я.І., Кавун Д.Ю., Ткаченко М.К.****DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF
TECHNOLOGICAL EQUIPMENT WITH ROTARY MOTION HYDRAULIC DRIVE****Sokolov V.I., Stepanova O.G., Stepchuk Ya.I., Kavun D.Yu., Tkachenko M.K.**

Розглянуті питання автоматизації процесів керування технологічним обладнанням з гідроприводом обертального руху. Метою роботи є розробка та дослідження системи автоматичного керування (САК) обладнанням, що враховує стохастичне збурення та шум спостереження.

Запропоновано математичну модель технологічного обладнання з гідроприводом обертального руху як об'єкту автоматичного керування. Математичний опис представляє собою сукупність лінійних динамічних ланок, що мають характерні параметри, а саме: постійна часу процесу регулювання робочого об'єму насоса; постійна часу силової частини приводу; коефіцієнт передачі для кута нахилу шайби (блоку циліндрів) по керуючий напрузі; коефіцієнт передачі силової частини приводу; коефіцієнт передачі для кутової швидкості по навантажуючому моменту.

Розроблено САК 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 синтезу оптимального лінійного регулятора використаний метод динамічного програмування.

Проведені 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. Виконані розрахунки перехідних процесів для кутового переміщення та кутової швидкості при різних значеннях коефіцієнту передачі блоку регулювання робочого об'єму насоса та коефіцієнту передачі регулятора, 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, гідропривід, математична модель, передавальна функція, стохастичне збурення, система автоматичного керування.

Постановка проблеми.

Сучасні технології машинобудування та матеріалообробки пред'являють всезростаючі вимоги до технічних та функціональних характеристик технологічного обладнання для механічної обробки матеріалів (металорізальні верстати та системи, обладнання інструментального виробництва, машини для обробки тиском тощо). Важлива увага приділяється показникам енергетичної ефективності, зокрема, коефіцієнту корисної дії та показникам якості динамічних характеристик. Слід відзначити, що підвищення енергетичної ефективності зменшує собівартість продукції, а поліпшення динамічних характеристик підвищує надійність та довговічність обладнання, а також рівень охорони праці на виробництві.

Якість виробів при матеріалообробці багато в чому залежить від можливості реалізації оптимальних законів руху інструменту та деталей, що оброблюються, точності регулювання їх переміщень, підтримки заданих швидкостей в умовах змінного та стохастичного навантаження. Виконання функціональних вимог до обладнання, досягнення довільної кінематики робочих органів, можливість програмної реалізації оптимальних законів руху забезпечується застосуванням автоматичних гідроприводів, зокрема, гідроприводів з обертальним рухом [1-3].

Розширення функціональних можливостей та поліпшення динамічних характеристик технологічного обладнання з гідроприводом обертального руху може бути досягнуто розробкою та застосуванням систем автоматичного керування (САК). Аналіз рівня автоматизації сучасного технологічного обладнання для механічної обробки показав, що існуючі системи використовують спрощені математичні моделі робочих процесів, не враховують стохастичне збурення та шум спостереження, в наслідок чого відсутні можливості подальшого його удосконалення [3-6]. Тому, для

розробки та дослідження САК потребують розвитку математичні моделі робочих процесів, які протікають в приводах та враховують особливості технологічного призначення обладнання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

При математичному моделюванні динамічних характеристик технологічного обладнання з гідравлічним приводом виникають певні труднощі з описом робочих процесів [4, 5, 7-9], що протікають в них. Крім дослідження процесів, обумовлених функціональним призначенням обладнання, слід прийняти до уваги, що в гідроприводі мають місце коливання тисків, витрат, окремих деталей внаслідок стисливості рідини, впливу робочого середовища на регулюючі пристрої, втечі по зазорам та інших причин. Поєднання цих явищ приведе до складних гідромеханічних процесів, які необхідно враховувати при проектуванні технологічного обладнання з об'ємним гідроприводом [1, 10-12].

Разом з тим, розширення функціональних можливостей та поліпшення динамічних характеристик технологічного обладнання з гідроприводом обертального руху за рахунок розробки та використання САК потребує нескладних достовірних математичних моделей робочих процесів, що протікають в приводах та достатньо повно враховують особливості технологічного призначення обладнання.

У більшості літературних джерел для моделювання динамічних характеристик технологічного обладнання розглядаються детерміновані системи [13-16]. Але робота технологічного обладнання, зокрема обладнання для механічної обробки, здійснюється в умовах впливів на систему, закон зміни яких, в загальному випадку, носить стохастичний характер [17, 18]. При випадкових впливах даних про стан системи в попередній час t_0 недостатньо для того, щоб скільки можливо повно було би судити про її стан в наступний момент часу $t > t_0$, тобто система є стохастичною.

Стохастичні збурення можуть прикладатися к системі зовні (зовнішні впливи) або виникати всередині деяких її елементів. Випадкові виміри властивостей системи зазвичай можна звести до еквівалентного впливу деяких випадкових перешкод, що впливають на неї, тому в подальшому будемо вважати, що на систему діє тільки зовнішні стохастичні збурення.

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 [19, 20].

Разом з тим, в літературі не достатньо повно викладені питання синтезу САК технологічним обладнанням з гідроприводом обертального руху, що враховує стохастичне збурення та шум спостереження. Крім того, для подальшого дослідження будемо розглядати гідропривід обертального руху з об'ємним регулюванням швидкості вихідної ланки. Перевага даному способу регулювання швидкості надана як такому, що має більшу енергетичну ефективність [2, 3].

Мета і завдання дослідження.

Метою даної роботи є синтез та дослідження САК технологічним обладнанням з гідроприводом обертального руху, що враховує стохастичне збурення та шум спостереження.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- побудувати математичну модель робочих процесів в технологічному обладнанні з гідроприводом обертального руху;
- вирішити задачу стохастичної лінійної оптимальної системи при неповній інформації про стан;
- провести дослідження САК.

Методологічну основу проведених авторами досліджень складає системний підхід до моделювання характеристик робочих процесів в технологічному обладнанні з об'ємним гідравлічним приводом. В основі математичних моделей лежать класичні рівняння механіки, у ряді випадків застосовано наближені формули, що являється цілком припустимим при моделюванні таких складних об'єктів, якими є технологічне обладнання для механічної обробки. Для розробки та дослідження САК використано апарат математичного моделювання за допомогою диференціальних рівнянь і чисельних методів їх розв'язання, теорії автоматичного керування, а також методи теорії ймовірності і математичної статистики, методи експериментальних досліджень (при перевірці адекватності розроблених математичних моделей на лабораторних установках).

Матеріали та результати дослідження.

Силова частина гідроприводу обертального руху технологічного обладнання приведена на рис. 1. Відзначимо, що в загальному випадку гідравлічна схема може бути з розімкнутою та замкнутою циркуляцією робочої рідини. Враховуючи, що схема з розімкнутою циркуляцією є окремим випадком замкнутої, яка з точці зору математичного опису є більш складніша, тому розглянута остання. В схемі позначені: Ω_n – кутова швидкість вала насоса; γ – кут нахилу шайби (блока циліндрів) аксіально-поршневого насоса; t – час; Ω – кутова швидкість вала гідромотора; α – кут повороту вала 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_{nm} – тиск в магістралі перед підживлючими клапанами.

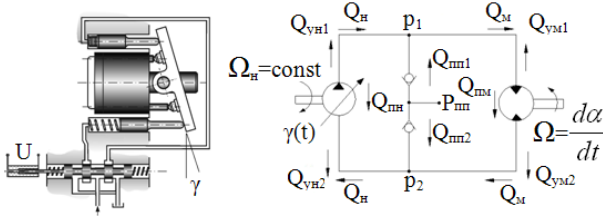


Рис. 1. Розрахункова схемадо побудови математичної моделі

Прийmemo наступні допущення:

1. Електродвигун обертає вал насоса з кутовою швидкістю Ω_n , величина якої не залежить від потужності, що розвиває насос.
2. При роботі гідроприводу тиски в трубопроводах не досягають значень, при яких відкриваються запобіжні клапани.
3. Тиск в магістралі p_{nm} перед підживлючими клапанами підтримується постійним.
4. Зусилля, що долаються гідромотором при керуванні об'єктом, можуть бути представлені сумою навантажуючого моменту та моментів від дії робочого інерційного навантаження, яке приведено до валу гідромотора, позиційного навантаження та гідравлічного тертя.
5. Трубопроводи прийняті достатньо короткими, щоб можна було зневажити в них інерцію рідини та втратами тиску через опір тертя [21].

Математична модель силової частини гідроприводу обертального руху обладнання для механічної обробки матеріалів включає наступні рівняння та залежності:

$$Q_m = \frac{q_m}{2\pi} \Omega;$$

$$Q_n = \frac{q_n}{2\pi} \Omega_n;$$

$$q_n = F_n z_n D_n \text{tg} \gamma;$$

$$Q_m + Q_{nn} + Q_{nm} + Q_{yn1} + Q_{ym1} + Q_{сж1} - Q_{nn1} - Q_n = 0;$$

$$Q_m + Q_{nn} + Q_{nm} - Q_{yn2} - Q_{ym2} - Q_{сж2} + Q_{nn2} - Q_n = 0;$$

$$Q_{nn} = Q_{nm} = Q_{nep}; Q_{yn1} = Q_{ym1} = Q_{ym2}; Q_{yn2} = Q_{ym2} = Q_{ym2};$$

$$Q_{nep} = k_{nep} (p_1 - p_2); Q_{ym1} = k_{ym} p_1; Q_{ym2} = k_{ym} p_2;$$

$$M_m = \frac{q_m}{2\pi} (p_1 - p_2);$$

$$M_{noz} = k_{noz} \alpha;$$

$$M_{mp} = k_{mp} \frac{d\alpha}{dt};$$

$$Q_{сж1} = \frac{W_0}{E_{жс}} \frac{dp_1}{dt}; Q_{сж2} = \frac{W_0}{E_{жс}} \frac{dp_2}{dt};$$

$$M_M - M_{mp} - M_{noz} - M = J \frac{d\Omega}{dt};$$

$$\Omega = \frac{d\alpha}{dt};$$

де $Q_{сж1}, Q_{сж2}$ – 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 якому 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 навантаження 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 робочих характеристик технологічного обладнання для механічної обробки матеріалів з гідроприводом обертального руху, аналізу параметрів математичної моделі та прийнятих на підставі цього допущень побудовано математичну модель обладнання як об'єкту автоматичного керування, що покладена в основу САК. Структурна схема моделі приведена на рис. 2, де позначені наступні параметри: T_{np} – постійна часу процесу регулювання робочого об'єму насоса; $T_{сн}$ – постійна часу силової частини приводу; k_{yU} – коефіцієнт передачі для кута нахилу шайби (блоку циліндрів) по керуючий напрузі; $k_{\Omega\gamma}$ – коефіцієнт передачі силової частини приводу; $k_{\Omega M}$ – коефіцієнт передачі для кутової швидкості по навантажуючому моменту.

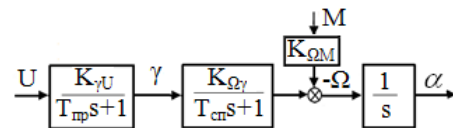


Рис. 2. Структурна схема математичної моделі як об'єкту автоматичного керування

Перевірка адекватності математичних моделей виконувалася на експериментальному стенді за критерієм Фішера. Теоретична залежність покладалась адекватної дослідній, якщо отримане експериментальне значення критерію Фішера менш табличного. В роботі адекватність визначалась порівнянням дослідних та розрахункових характеристик гідроприводу, осцилограм

перехідного процесу для блока регулювання насоса та привода в цілому. Моделі не корегувалися по експериментальним даним, число точок порівняння було не менш 20. Для цих умов табличне значення критерію Фішера рівно $\approx 1,8$ при довірчій імовірності $\alpha=0,95$. Експериментальні значення критерію Фішера (не більш 1,3) не перевершували табличних значень. Тому розроблені моделі характеристик привода було прийнято вважати адекватними.

Блок-схема САК технологічним обладнанням, що запропонована, приведена на рис. 3.

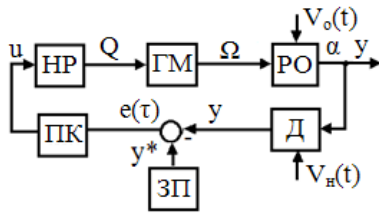


Рис. 3. Блок-схема САК технологічним обладнанням:

РО – робочий орган; Д – датчик вихідного сигналу; y – вихідна змінна; ЗП – задаючий пристрій; y^* – задана вихідна змінна; ГМ – гідромотор; Ω – кутова швидкість валу гідромотора; α – кут повороту робочого органу; Q – витрата, що надходить до гідромотору; НР – насос з робочим об'ємом, що регулюється; ПК – пристрій керування; $e(\tau)$ – сигнал розузгодження;

$V_o(t)$ – стохастична збурююча дія; $V_n(t)$ – шум спостереження; u – керуючий сигнал

Слід відзначити, що в загальному випадку у якості вихідної змінної y розглядається кут повороту α робочого органу (РО), що зв'язаний з гідромотором (ГМ). На практиці дуже часто керується кутова швидкість Ω валу ГМ, але це окремих випадок керування кутом повороту α , що є більш складнішою задачею, яка і вирішується в роботі.

У відповідності до заданого закону керування кутом повороту y^* РО технологічного обладнання, який формується ЗП, на вхід ГМ надходить витрата робочої рідини Q . При цьому здійснюється обертальний рух валу ГМ з кутовою швидкістю Ω та РО, що жорстко з ним зв'язаний. Відбувається поворот РО, який вимірюється датчиком кута повороту Д. Формується сигнал розузгодження $e(\tau)$ як різниця між заданим кутом повороту РО y^* та дійсним y . По сигналу розузгодження $e(\tau)$ ПК створює керуючий сигнал u у вигляді напруги, який надходить до НР, де регулює кут нахилу шайби (блока циліндрів) та відповідно робочий об'єм аксіально-поршневого насоса, який змінює витрату Q , що надходить до ГМ. Так як на технологічний процес робить вплив стохастична збурююча дія $V_o(t)$, а вимір кута повороту РО супроводжується перешкодами – шумом спостереження $V_n(t)$, то розглянута задача оптимального керування при неповній інформації про стан системи.

У просторі станів рівняння об'єкту керування були приставлені в матричній формі

$$\dot{x} = Ax + Bu + V_o(t); \quad y = Cx + V_n(t);$$

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

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1/T_{np}T_{cn} & -(T_{np} + T_{cn})/T_{np}T_{cn} \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_{\gamma U} k_{\Omega} / T_{np} T_{cn} \end{bmatrix};$$

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

Для формування кольорового шуму об'єкту розглянутий формуючий фільтр з передавальною функцією

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

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

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

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 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.

Відповідно до поставленої задачі необхідно було з використанням вимірюваного значення вихідної змінної на інтервалі $[t_0, t]$ знайти незміщену оцінку $\hat{x}(t)$, що забезпечує мінімум середнього квадрату похибки,

$$J = M[(x(t) - \hat{x}(t))^T \cdot (x(t) - \hat{x}(t))] \rightarrow \min.$$

Оптимальні значення незміщеної лінійної оцінки фазового вектору $\hat{x}(t)$ та коефіцієнтів K' підсилення фільтра Калмана-Бьюси знаходились відповідно до рівнянь

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x} + Bu + K'(y - C\hat{x}), \hat{x}(t_0) = \bar{x}^0;$$

$$K' = PC^T R_0^{-1};$$

$$\dot{P} = AP + PA^T - PC^T R_0^{-1} CP + Q_0, P(t_0) = P_0;$$

де R_0 – матриця інтенсивності шуму спостереження; Q_0 – матриця інтенсивності шуму об'єкту; P – дисперсійна матриця похибки.

Синтез наглядача Калмана-Бьюси виконано з використанням пакету прикладних програм *Matlab*. Для синтезу оптимального лінійного регулятора відповідно поставленій задачі використаний метод динамічного програмування. Функціональне рівняння Беллмана розглядалося у вигляді

$$\tilde{Q}x^2(t) + \tilde{R}u^2(t) + \frac{\partial S(x,t)}{\partial x} (Ax(t) + Bu(t)) + \frac{\partial S(x,t)}{\partial t} = 0,$$

$$2\tilde{R}u(t) + \frac{\partial S(x,t)}{\partial x} B = 0.$$

Звідси прийнято вираз для оптимального керування

$$u = -\frac{1}{2} \tilde{R}^{-1} B^T \left(\frac{\partial S}{\partial x} \right)^T.$$

З врахуванням позитивної визначеності функції Беллмана $S(x,t)$ для оптимального керування

$$u = -(K_1''x_1 + K_2''x_2 + K_3''x_3),$$

де x_1, x_2, x_3 – фазові змінні; K_1'', K_2'', K_3'' – коефіцієнти підсилення зворотного зв'язку лінійного оптимального регулятора.

Структурна схема моделі оптимальної системи автоматичного керування наведена на рис. 4.

Перехідні процеси в стохастичній замкнутій САК технологічним обладнанням без використання та з використанням фільтра Калмана-Бьюси представлені на рис. 5. Збурюючий вплив на об'єкт керування розглядався у вигляді білого шуму з спектральною щільністю $S_x(\omega)=1$ та $W_\varphi(s)=0,02$.

Дослідження показали, що в діапазоні можливих параметрів збурювання фільтр виконує функцію оптимальної фільтрації, забезпечує необхідну якість управління обладнанням та істотно зменшує тривалість перехідного процесу.

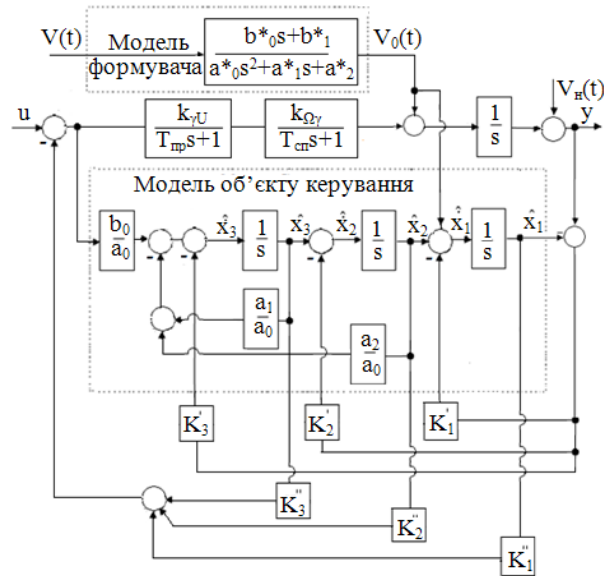


Рис. 4. Структурна схема САУ

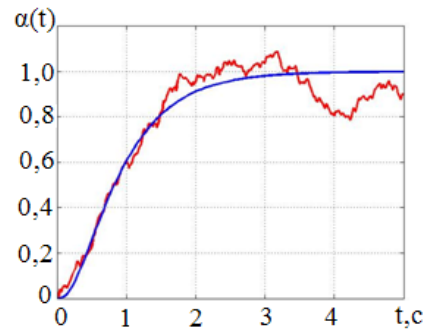


Рис. 5. Перехідні процеси в стохастичній замкнутій системі без використання та з використанням фільтра Калмана-Бьюси

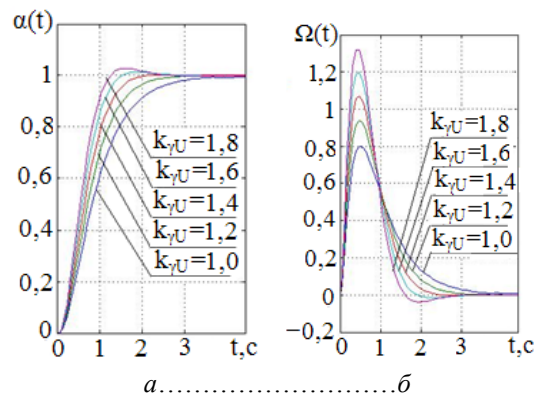


Рис. 6. Вплив на перехідний процес коефіцієнту передачі $k_{\gamma U}$ блоку регулювання робочого об'єму насоса: а – кутове переміщення; б – кутова швидкість

Виконано дослідження САК, зокрема, вплив параметрів об'єкту керування та оптимального регулятора на якість перехідного процесу. Перехідні процеси при різних значеннях коефіцієнту передачі $k_{\gamma U}$ блоку регулювання робочого об'єму насоса приведені на рис. 6, а при різних значеннях коефіцієнту передачі K_2'' регулятора на рис. 7.

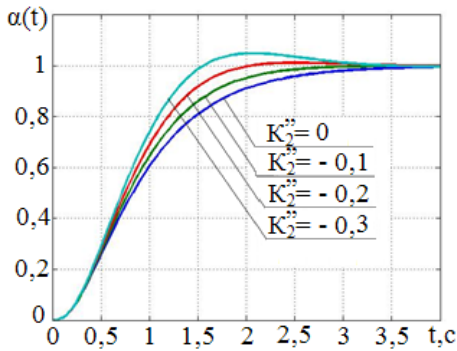


Рис. 7. Вплив на перехідний процес коефіцієнту передачі K_2^* регулятора

Слід зауважити, що при виборі оптимальних значень коефіцієнтів передач необхідно враховувати, що у ряді випадків особливості технологічного призначення обладнання виключають перерегулювання кутового переміщення (або зміни знаку кутової швидкості) робочого органу. Так, для результатів досліджень, що приведені на рис. 6, 7, рекомендовані значення коефіцієнтів передач не будуть відповідати оптимальній швидкодії, а повинні бути обмеженими нерівностями $k_{\gamma U} < 1,4$ та $K_2^* > -1,14$.

Висновки.

1. Запропоновано математичну модель технологічного обладнання з гідроприводом обертального руху як об'єкту автоматичного керування. Математичний опис представляє собою сукупність лінійних динамічних ланок, що мають характерні параметри, а саме: постійна часу процесу регулювання робочого об'єму насоса; постійна часу силової частини приводу; коефіцієнт передачі для кута нахилу шайби (блоку циліндрів) по керуючий напрузі; коефіцієнт передачі силової частини приводу; коефіцієнт передачі для кутової швидкості по навантажуючому моменту. Такий підхід дозволяє врахувати основні динамічні властивості обладнання та вирішити задачу оптимального керування.

2. Розроблено САК 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 наглядча та детерміновану задачу синтезу оптимальної системи. Для синтезу оптимального лінійного регулятора використаний метод динамічного програмування. САК дозволяє розширити функціональні можливості та поліпшити динамічні характеристики обладнання.

3. Проведені дослідження динамічних характеристик САК. Показано, що в діапазоні можливих параметрів збурювання наглядча Калмана-Бьюси виконує функцію оптимальної фільтрації, зменшує тривалість перехідного процесу та забезпечує необхідну якість керування обладнанням. Виконані розрахунки перехідних

процесів для кутового переміщення та кутової швидкості при різних значеннях коефіцієнту передачі блоку регулювання робочого об'єму насоса та коефіцієнту передачі регулятора. Результати досліджень дозволили надати рекомендації щодо вибору оптимальних значень коефіцієнтів передач з урахуванням особливостей технологічного призначення обладнання.

Литература

1. Навроцкий К.Л. Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов. – М.: Машиностроение, 1991. – 384 с.
2. Гидроприводы и гидропневмоавтоматика станков/ В.А. Федорец, М.Н. Педченко, А.Ф. Пичко, Ю.В. Пересадыко, В.С. Лысенко; Под ред. В.А. Федорца. – К.: Вища шк., 1987. – 375 с.
3. Свешников В.К. Станочные гидроприводы: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. / В.К. Свешников, А.А. Усов. – М.: Машиностроение, 1988. – 512 с.
4. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. – М.: Машиностроение, 1987. – 464 с.
5. Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы. – М.: Машиностроение, 1982. – 240 с.
6. 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.
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.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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.

14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Sokolov V., Rasskazova Y. Automation of control processes of technological equipment with rotary hydraulic drive // Eastern-EuropeJournal of Enterprise Technologies. Volume 2, Issue 2, 2015, Pages 44-50.
18. 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.
19. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учебное пособие. – М.: Физматлит, 2004. – 464 с.
20. Соколов В.І., Рассказова Ю.Б. Автоматизація процесів керування технологічним обладнанням з гідроприводом обертального руху // Східно-европейський журнал передових технологій. - 2016. – № 2/2 (80). – С.44 - 50.
21. Соколов В.І., Кріль О.С., Єфіфанова О.В. Гідравліка. – Северодонецьк: СНУ ім. В. Даля. – 2017. – 160 с.
9. 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.
10. Sokolov V.I., Sokolova Ya.V., Tavanyuk T.Ya. Razrabotkametodikiraschyotavivborosnovnyihparametrov elektrogidravlicheskosledyaschegoprivodaspetsialnogot ehnologicheskogooborudovaniya // Visn. SevNTU. Seriya «Mashy`nopy`ladobuduvannya ta transport». – Sevastopol` : SevNTU, 2012. - № 129. – S. 223-228.
11. Sokolova Ya. V., Tavanyuk T.Ya., Sokolov V.I. Nelineynaya matematicheskaya model elektrogidravlicheskosgo sledyaschego privoda s drosselnyim regulirovaniem // Visn. Shidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalya. - 2010. - № 10 (152). – S. 168 – 175.
12. Kovalenko A. A., Sokolov V.I., Uvarov P.E., Pazin V.V. Osnovy ob`emnogo gidravlicheskosgo privoda stroitelnyih i dorozhnyih mashin. - Lugansk: DonGASA. – 1999. – 137 s.
13. 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.
14. 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.
15. Sokolov V. I., Tavanyuk T. Ya. Opredelenie peredatochnyih funktsiy elektrogidravlicheskosgo sledyaschego privoda oborudovaniya dlya obrabotki davleniem // Visn. Shidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalya. – 2011. – № 1(155). – S. 208 - 216.
16. 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.
17. Sokolov V., Rasskazova Y. Automation of control processes of technological equipment with rotary hydraulic drive // Eastern-EuropeJournal of Enterprise Technologies. Volume 2, Issue 2, 2015, Pages 44-50.
18. Sokolova Ya.V., Azarenko N.G., Sokolov V.I. Sintez sistemyi avtomaticheskogo upravleniya oborudovaniem dlya mehanicheskoy obrabotki materialov s gidravlicheskim privodom // Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovyih tehnologiy. - Harkov. – 2014. – № 2/2 (68). – S. 56-60.
19. Kim D.P. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. T.2. Mnogomernyie, nelineynyie, optimalnyie i adaptivnyie sistemyi: uchebnoe posobie. – M.: Fizmatlit, 2004. – 464 s.
20. Sokolov V.I., Rasskazova Yu.B. Avtomaty`zaciya procesiv keruvannya tex-nologichny`m obladnannnyam z gidropry`vodom obertal`nogo ruxu // Sxidno-evropejs`ky`j zhurnal peredovy`x tehnologij. - 2016. – № 2/2 (80). – S.44 - 50.
21. Sokolov V.I., Krol` O.S., Yepifanova O.V. Gidravlika. – Syeverodonecz`k: SNU im. V. Dalya. – 2017. – 160 s.

References

1. Navrotsky K.L. Teoriya i proektirovanie gidro- i pnevmoprivodov. – M.: Mashinostroenie, 1991. – 384 s.
2. Hidroprivody i gidropnevmavtomatika stankov / V.A. Fedorets, M.N. Pedchenko, A.F. Pichko, Yu.V. Peresadko, V.S. Lyisenko; Pod red. V.A. Fedortsa. – K.: Vischa shk., 1987. – 375 s.
3. Sveshnikov V.K. Stanochnyie gidroprivodyi: Spravochnik. – 2-e izd., pererab. i dop. / V.K. Sveshnikov, A.A. Usov. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 512 s.
4. Popov D.N. Dinamika i regulirovanie gidro- i pnevmosistem. – M.: Mashinostroenie, 1987. – 464 s.
5. Popov D.N. Nestatsionarnyie gidromechanicheskie protsessy. – M.: Mashinostroenie, 1982. – 240 s.
6. Popov D. N. Mehanika gidro- i pnevmoprivodov: Ucheb. dlya vuzov. 2-e izd. / D.N. Popov. – M.: MGTU im. N. E. Bauman, 2005. – 320 s.
7. Sokolov V.I., Tavanyuk T.Ya., Sokolova Ya.V. Nestatsionarnoe trenie v gidrosistemah stankov // Visn. SevNTU. Seriya «Mashy`nopy`ladobuduvannya ta transport». – Sevastopol` : SevNTU, 2010. - № 107. – S. 214 - 219.
8. Sokolov V.I., Rasskazova Yu.B. Issledovanie techeniya zhidkosti v mikroazorah s granichnyim izmeneniem vyazkosti // Visn. Shidnoukr. natsion. un-tu Im. V. Dalya. – 2016. - № 2 (226). – S. 20 - 25.

Соколов В.И., Степанова О.Г., Степчук Я.И., Кавун Д.Ю., Ткаченко М.К. Разработка и исследование системы автоматического управления технологическим оборудованием с гидроприводом вращательного движения.

Рассмотрены вопросы автоматизации процессов управления технологическим оборудованием с гидроприводом вращательного движения. Целью работы является разработка и исследование системы автоматического управления (САУ) оборудованием, учитывающей стохастическое возмущение и шум наблюдения.

Предложена математическая модель технологического оборудования как объекта автоматического управления. Математическое описание представляет собой совокупность линейных динамических звеньев, имеющих характерные параметры, а именно: постоянная времени процесса регулирования рабочего объема насоса; постоянная времени силовой части привода; коэффициент передачи для угла наклона шайбы (блока цилиндров) по управляющему напряжению; коэффициент передачи силовой части привода; коэффициент передачи для угловой скорости по нагружающему моменту.

Разработана САУ оборудованием, учитывающая шум наблюдения и стохастическое возмущение объекта управления. Решение задачи стохастической линейной оптимальной системы согласно метода разделения разбито на две: задачу синтеза оптимального наблюдателя и детерминированную задачу синтеза оптимальной системы. Для синтеза оптимального линейного регулятора использован метод динамического программирования.

Проведены исследования динамических характеристик САУ. Показано, что в диапазоне возможных параметров возмущения наблюдатель Калмана-Бьюси выполняет функцию оптимальной фильтрации, уменьшает длительность переходного процесса и обеспечивает необходимое качество регулирования оборудованием. Выполнены расчеты переходных процессов для углового перемещения и угловой скорости при различных значениях коэффициента передачи блока регулирования рабочего объема насоса и коэффициента передачи регулятора, 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, гидропривод, математическая модель, передаточная функция, стохастическое возмущение, система автоматического управления.

Sokolov V.I., Stepanova O.G., Stepchuk Ya.I., Kavun D.Yu., Tkachenko M.K. Development and research of the automatic control system of technological equipment with rotary motion hydraulic drive.

The problems of automation of control processes of technological equipment with the rotary motion hydraulic drive are considered. The purpose of the paper is development and research of the automatic control system (ACS) for

equipment that allows for the stochastic disturbance and observation noise.

The mathematical model of technological equipment with the rotary motion hydraulic drive as an object of automated control is proposed. The mathematical description is a set of linear dynamic links with characteristic parameters, namely the time constant of the pump displacement control process; the time constant of the drive power section; transmission coefficient for the tilt angle of the washer (cylinder block) by the control voltage; transmission coefficient of the drive power section; transmission coefficient for the angular velocity by the loading point.

The ACS of equipment that allows for the observation noise and stochastic disturbance of the control object is developed. 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 synthesis the optimum linear controller, the dynamic programming method is used.

The study of dynamic characteristics of the ACS is made. 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 angular displacement and angular velocity at different values of the transmission coefficient of the pump displacement control unit and the transmission coefficient of the controller are carried out. 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, hydraulic drive, mathematical model, transfer function, stochastic disturbance, automated 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

Степанова Оксана Геннадіївна – студентка групи ІВ – 16дм, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк)
ogstepanova@gmail.com

Степчук Яна Ігорівна – студентка групи МВС – 16дм, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк)
zimogorevrka@mail.ru

Кавун Дмитро Юрійович – студент групи МВС – 16дм, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк)
kavun.dmitriy@mail.ru

Ткаченко Михайло Костянтинович – студент групи МВС – 16дм, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк)
misha-sport@mail.ru

Рецензент: д.т.н., проф. **Чернецька-Білецька Н.Б.**

Стаття подана 07.09.2017