

7. Flood, M. The Application of Visual Analytics to Financial Stability Monitoring [Text] / M. Flood, V. Lemieux, M. Varga, W. Wong // Journal of Financial Stability. – 2016. – P. 50. doi: 10.2139/ssrn.2438194
8. Sarli, P. Macroprudential oversight, risk communication and visualization [Text] / P. Sarli // Journal of Financial Stability, 2016. – P. 40. doi: 10.1016/j.jfs.2015.12.005
9. Tolonen, A. Product portfolio management – Targets and key performance indicators for product portfolio renewal over life cycle [Text] / A. Tolonen, M. Shahmarichatghieh, J. Harkonen, H. Naapasalo // International Journal of Production Economics. – 2015. – Vol. 170. – P. 468–477. doi: 10.1016/j.ijpe.2015.05.034
10. Давлетханова, О. Х. Економічний аналіз ефективності системи управління сільськогосподарськими підприємствами [Текст] / О. Х. Давлетханова, Я. Л. Миколайчук // Науковий огляд. – 2014. – Т. 9, № 10. – С. 5–12.
11. Гринчак, О. В. Теоретико-методологічні аспекти інформаційного забезпечення оперативного управління сільськогосподарським виробництвом [Текст]: зб. наук. пр. / О. В. Гринчак, Я. Л. Миколайчук // Економічний аналіз. – 2012. – Вип. 11, Ч. 4. – С. 223–227.
12. Butler, M. Integrating information technology and operational research in the management of milk collection [Text] / M. Butler, P. Herlihy, P. Keenan // Journal of Food Engineering. – 2005. – Vol. 70, Issue 3. – P. 341–349. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2004.02.046
13. Зубко, В. М. Технологічна та техніко-економічна оцінка машинних агрегатів при виконанні основного обробітку ґрунту [Текст] / М. В. Зубко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. – 2013. – Вип. 135. – С. 32–39.
14. Ільченко, В. Ю. Практикум з використання машин у рослинництві [Текст] / В. Ю. Ільченко, А. С. Кобець, В. П. Мельник, П. І. Карасьов, П. М. Кухаренко, А. В. Ільченко. – Дніпропетровськ: Дніпропетровський державний аграрний університет, 2002. – 212 с.
15. Saaty, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process [Text] / T. L. Saaty // Int. J. Services Sciences. – 2008. – Vol. 1, Issue 1. – P. 83–89.

*Розглянуті питання автоматизації процесів керування технологічним обладнанням для механічної обробки матеріалів. Представлена математична модель обладнання з гідроприводом обертової дії як об'єкту автоматичного керування. Виконано синтез системи автоматичного керування технологічним обладнанням, що враховує стохастичне збурення та шум спостереження. Проведено аналіз якості регулювання системи автоматичного керування*

*Ключові слова: технологічне обладнання, гідропривід, передатна функція, стохастичне збурення, система автоматичного керування*

*Рассмотрены вопросы автоматизации процессов управления технологическим оборудованием для механической обработки материалов. Представлена математическая модель оборудования с гидроприводом вращательного движения как объекта автоматического управления. Выполнен синтез системы автоматического управления технологическим оборудованием, учитывающей стохастическое возмущение и шум наблюдения. Проведен анализ качества регулирования*

*Ключевые слова: технологическое оборудование, гидропривод, передаточная функция, стохастическое возмущение, система автоматического управления*

УДК 621.646:62-83  
DOI: 10.15587/1729-4061.2016.63711

# АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ОБЛАДНАННЯМ З ГІДРОПРИВОДОМ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ

**В. І. Соколов**

Доктор технічних наук, професор\*

E-mail: sokolov.snu.edu@gmail.com

**Ю. Б. Рассказова**

Аспірант\*

E-mail: urass.snu.edu@gmail.com

\*Кафедра машинобудування,  
верстатів та інструментів

Східноукраїнський національний університет  
пр. Радянський, 59а,  
м. Сєвєродонецьк, Україна, 93400

## 1. Вступ

Сучасні технології машинобудування та матеріалобробки пред'являють всезростаючі вимоги до тех-

нічних 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 матеріалобробці 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, 2].

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.

---

## 2. Аналіз питань автоматизації процесів керування технологічним обладнанням з гідроприводом обертального руху

---

При математичному моделюванні динамічних характеристик технологічного обладнання з гідравлічним приводом виникають певні труднощі з описом робочих процесів, 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 приводе до складних нестационарних процесів, які необхідно враховувати при проектуванні технологічного обладнання з гідроприводом обертального руху.

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

У більшості робіт для моделювання динамічних характеристик технологічного обладнання розглядаються детерміновані системи. Так, в роботі [3] за-

пропонована математична модель гідроприводу машинобудівного обладнання, але без врахування стохастичного збурення. В дослідженні [5] розглядаються питання удосконалення детермінованих систем автоматичного керування електрогідравлічними приводами технологічного обладнання. В роботі [7] при моделюванні динамічних характеристик обладнання з гідравлічним приводом також не розглядається стохастичне збурення та шум спостереження. Складність робочих процесів в приводах технологічного обладнання показана в дослідженні [8]. Слід відзначити, що в наведених джерелах при дослідженні характеристик гідравлічних приводів в повній мірі враховуються рекомендації відомих класичних підходів [1, 2, 6]. Стохастична діагностика взаємодії інструменту та заготовки при механічній обробці досліджена в роботі [4]. 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 [9].

Робота технологічного обладнання, зокрема обладнання для механічної обробки, здійснюється в умовах впливів на систему, закон зміни яких, в загальному випадку, носить стохастичний характер. 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 [10].

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.

---

## 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).

#### 4. Синтез та дослідження системи автоматичного керування технологічним обладнанням

Силова частина гідроприводу обертового 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:  $\Omega_n$  – кутова швидкість вала насоса;  $\gamma$  – кут нахилу шайби (блока циліндрів) аксіально-поршневого насоса;  $t$  – час;  $\Omega$  – кутова швидкість вала гідромотора;  $\alpha$  – кут повороту вала гідромотора;  $Q_n, Q_m$  – ідеальні витрати насоса та гідромотора;  $Q_{пн}, Q_{пм}$  – витрати перетоків в насосі та гідромоторі;  $Q_{ун1}, Q_{ун2}, Q_{ум1}, Q_{ум2}$  – витрати виток в лінійні насоса та гідромотора;  $Q_{пн1}, Q_{пн2}$  – витрати підживлення скрізь підживлючі клапани;  $p_1, p_2$  – тиски в трубопроводах високого та низького тисків;  $p_{пн}$  – тиск в магістралі перед підживлючими клапанами.

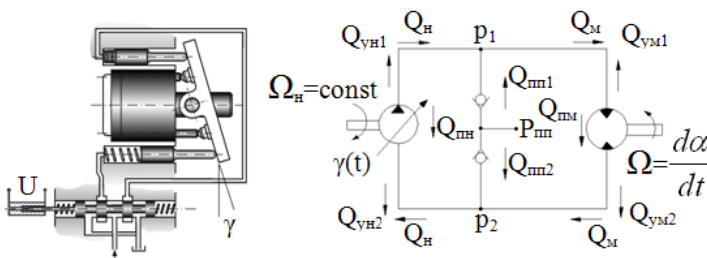


Рис. 1. Розрахункова схема до побудови математичної моделі

Прийmemo наступні допущення:

1. Електродвигун обертає вал насоса з кутовою швидкістю  $\Omega_n$ , 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  $p_{пн}$  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 інерцією рідини та втратами тиску через опір тертя.

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

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

$$Q_n = \frac{q_n}{2\pi} \Omega_n; q_n = F_n z_n D_n \text{tg} \gamma;$$

$$Q_m + Q_{пн} + Q_{пм} + Q_{ун1} + Q_{ум1} + Q_{сж1} - Q_{пн1} - Q_n = 0;$$

$$Q_m + Q_{пн} + Q_{пм} - Q_{ун2} - Q_{ум2} - Q_{сж2} + Q_{пн2} - Q_n = 0;$$

$$Q_{пн} = Q_{пм} = Q_{пер}; Q_{ун1} = Q_{ум1} = Q_{ут1};$$

$$Q_{ун2} = Q_{ум2} = Q_{ут2};$$

$$Q_{пер} = k_{пер}(p_1 - p_2); Q_{ут1} = k_{ут1} p_1; Q_{ут2} = k_{ут2} p_2;$$

$$M_m = \frac{q_m}{2\pi} (p_1 - p_2) p_m; M_{поз} = k_{поз} \alpha; M_{тр} = k_{тр} \frac{d\alpha}{dt};$$

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

$$M_m - M_{тр} - M_{поз} - M = J \frac{d\Omega}{dt}; \Omega = \frac{d\alpha}{dt},$$

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;  $k_{пер}$  – провідність щілини, по яким в насосі та гідромоторі здійснюються перетоки рідини з порожнин з високим тиском в порожнини з низьким тиском;  $k_{ут}$  – провідність щілини, 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;  $M_{тр}$  – момент від сил тертя;  $M_{поз}$  – момент від дії позиційного навантаження;  $M_m$  – крутний момент;  $k_{поз}$  – коефіцієнт жорсткості позиційного навантаження;  $k_{тр} = k_{тр1} + k_{тр2}$ ;  $k_{тр1}$  – коефіцієнт моменту від сил

тертя в гідромоторі;  $k_{\tau p2}$  – коефіцієнт моменту від сил тертя в виконавчому механізмі.

На основі дослідження робочих характеристик технологічного обладнання для механічної обробки матеріалів з гідроприводом обертового 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;  $T_{cn}$  – постійна часу силової частини приводу;  $k_{\gamma U}$  – 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.

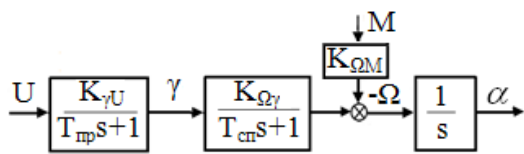


Рис. 2. Структурна схема математичної моделі як об'єкту автоматичного керування

Перевірка адекватності математичних моделей виконувалася на експериментальному стенді [9] за критерієм Фішера. Теоретична залежність покладалася адекватної дослідній, якщо отримане експериментальне значення критерію Фішера менше табличного. В роботі адекватність визначалась порівнянням дослідних та розрахункових характеристик гідроприводу, осцилограм перехідного процесу для блока регулювання насоса та приводу в цілому. Моделі не корегувалися по експериментальним даним, число точок порівняння було не менше 20. Для цих умов табличне значення критерію Фішера рівно  $\approx 1,8$  при довірчій імовірності  $\alpha = 0,95$ . Експериментальні значення критерію Фішера (не більше 1,3) не перевершували табличних значень. Тому розроблені моделі характеристик приводу було прийнято вважати адекватними.

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

Слід відзначити, що в загальному випадку у якості вихідної змінної у розглядається кут повороту  $\alpha$  робочого органу (РО), що зв'язаний з гідромотором (ГМ). На практиці дуже часто керується кутова швидкість  $\Omega$  вала ГМ, але це окремий випадок керування кутом повороту  $\alpha$ , 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 вала ГМ з кутовою швидкістю  $\Omega$  та РО, що жорстко з ним зв'язаний. Відбувається поворот РО, який виміряється 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  $V_0(t)$ , а вимір кута повороту РО супроводжується перешкодами – шумом спостереження  $V_n(t)$ , то розглянута задача оптимального керування при неповній інформації про стан системи.

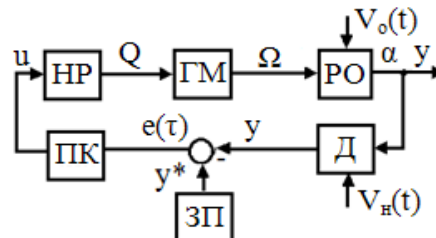


Рис. 3. Блок-схема САК технологічним обладнанням: РО – робочий орган; Д – датчик вихідного сигналу;  $y$  – вихідна змінна; ЗП – задаючий пристрій;  $y^*$  – задана вихідна змінна; ГМ – гідромотор;  $\Omega$  – кутова швидкість вала гідромотора;  $\alpha$  – кут повороту робочого органу;  $Q$  – витрата, що надходить до гідромотору; НР – насос з робочим об'ємом, що регулюється; ПК – пристрій керування;  $e(\tau)$  – сигнал розузгодження;  $V_0(t)$  – стохастична збурююча дія;  $V_n(t)$  – шум спостереження;  $u$  – керуючий сигнал

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

$$\dot{x} = Ax + Bu + V_0(t); \quad y = Cx + V_n(t),$$

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,  $V_0(t)$  – кольоровий шум об'єкту,  $V_n(t)$  – білий шум спостереження;

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

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_{\gamma U}k_{\Omega \gamma}/T_{np}T_{cn} \end{bmatrix}; \quad C = [1 \ 0 \ 0].$$

Для формування кольорового шуму об'єкту розглянутий формуючий фільтр з передатною 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 обладнанням для механічної обробки матеріалів з гідروприводом 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 виміряного 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-Б'юсі знаходились відповідно до рівнянь

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

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

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

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

Синтез наглядача Калмана-Б'юсі 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.

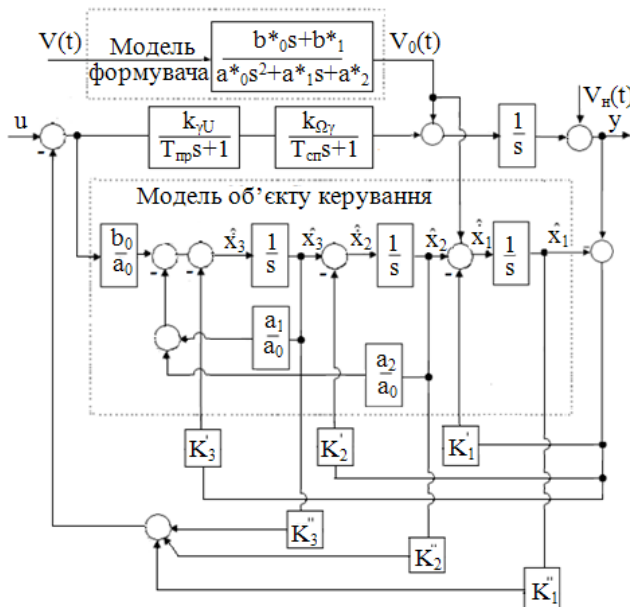


Рис. 4. Структурна схема системи автоматичного керування

Перехідні процеси стохастичної замкнутої САК технологічним обладнанням без використання та з використанням фільтра Калмана-Б'юсі представлені на рис. 5. Збурюючий вплив на об'єкт керування розглядався у вигляді білого шуму з спектральною щільністю  $S_v(\omega)=1$  та  $W_\phi(s)=0,02$ . Дослідження показали, що в діапазоні можливих параметрів збурювання фільтр виконує функцію оптимальної фільтрації, забезпечує необхідну якість управління обладнанням та істотно зменшує тривалість перехідного процесу.

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

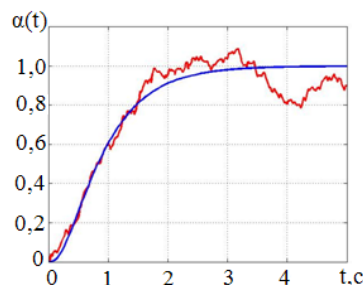


Рис. 5. Перехідні процеси в стохастичній замкнутої системі без використання та з використанням фільтра Калмана-Б'юсі

Слід зауважити, що при виборі оптимальних значень коефіцієнтів передачі 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 оптимальної швидкодії, а повинні бути обмеженими рівняннями  $k_{\gamma U} < 1,4$  та  $K_2'' > -1,14$ .

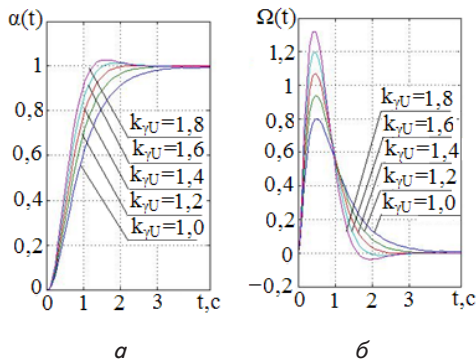


Рис. 6. Вплив на перехідний процес коефіцієнту передачі  $k_{\gamma U}$  блоку регулювання робочого об'єму насоса: а – кутове переміщення; б – кутова швидкість

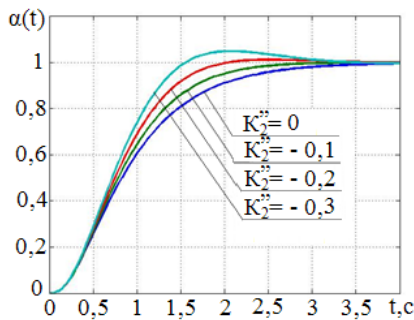


Рис. 7. Вплив на перехідний процес коефіцієнту передачі  $K_2''$  регулятора

## 5. Обговорення результатів синтезу та дослідження САК

На основі дослідження динамічних характеристик технологічного обладнання з гідروприводом обертового руху, а також аналізу параметрів елементів та пристроїв приводу та прийнятих на підставі цього допущень розроблено математичну модель обладнання як об'єкту автоматичного керування. Математичний опис представляє собою сукупність лінійних динамічних ланок, що мають характерні параметри, а саме: постійну часу процесу регулювання робочого об'єму насоса; постійну 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. Модель дещо спрощено, зокрема, зменшено порядок динамічних ланок блоку регулювання робочого об'єму насоса та силової частини приводу обладнання, але це дало змогу в цілому спростити рішення задачі оптимального керування.

Синтезовано САК технологічним обладнанням з гідроприводом обертового руху, що враховує шум спостереження та стохастичне збурення об'єкту ке-

рування. Враховуючи, що стохастична збурююча дія, що прикладена до об'єкту керування, проявляє себе незалежно від керуючого сигналу, то розробку САК проведено з урахуванням адитивної перешкоди. У цьому зв'язку, 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 розробки оптимальної системи. Синтез наглядача Калмана-Б'юсі виконано з використанням пакету прикладних програм Matlab. Для розробки оптимального лінійного регулятора використаний метод динамічного програмування. САК дозволяє розширити функціональні можливості та поліпшити динамічні характеристики обладнання.

Виконано дослідження динамічних характеристик САК. Показано, що в діапазоні можливих параметрів збурювання наглядач Калмана-Б'юсі виконує функцію оптимальної фільтрації, зменшує тривалість перехідного процесу та забезпечує необхідну якість керування обладнанням. Це досягається тому, що алгоритм обробки даних фільтра складається з двох повторюваних етапів: передбачення стану системи та коригування передбачених значень з урахуванням даних вимірювань. Наглядач Калмана-Б'юсі враховує як результати вимірювань, що представляють собою корисний сигнал плюс випадкова перешкода, так і властивості досліджуваної системи, шляхом введення в рівняння фільтра рівнянь динаміки системи. Проведені 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 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.

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.

## 6. Висновки

1. Розроблено математичну модель технологічного обладнання з гідроприводом обертового руху як об'єкту автоматичного керування. Математичний опис представляє собою сукупність лінійних динамічних ланок, що мають характерні параметри, а саме: постійну часу процесу регулювання робочого об'єму насоса; постійну часу силової частини приводу; коефіцієнт пе-

редачі 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 ва вирішити задачу оптимального керування.

2. Синтезовано 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 розробки оптимального лінійного регулятора використаний метод динамічного програмування. САК дозволяє

розширити функціональні можливості та поліпшити динамічні характеристики обладнання.

3. Виконано дослідження динамічних характеристик САК. Показано, що в діапазоні можливих параметрів збурювання наглядач Калмана-Б'юсі виконує функцію оптимальної фільтрації, зменшує тривалість перехідного процесу та забезпечує необхідну якість керування обладнанням. Проведені 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.

---

#### Література

1. Навроцкий, К. Л. Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов [Текст] / К. Л. Навроцкий. – М.: Машиностроение, 1991. – 384 с.
2. Свешников, В. К. Станочные гидроприводы [Текст]: справочник / В. К. Свешников, А. А. Усов. – М.: Машиностроение, 1988. – 512 с.
3. Sokolova, Ya. Mathematical modeling automatic electrohydraulic drive of machine building equipment [Text] / Ya. Sokolova, O. Krol, Yu. Rasskazova, V. Sokolov // ТЕКА Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – 2015. – Vol. 15, Issue 2. – P. 9–14.
4. Новосёлов, Ю. К. Стохастическая диагностика взаимодействия инструмента и заготовки при круглом наружном шлифовании [Текст]: зб. наук. ст. / Ю. К. Новосёлов, С. М. Братан // Сучасні технології у машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХП», 2007. – С. 91–102.
5. Соколова, Я. В. Совершенствование электрогидравлических приводов машиностроительного оборудования [Текст]: монография / Я. В. Соколова, Н. Г. Азаренко, Д. С. Грешной. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2014. – 100 с.
6. Попов, Д. Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем [Текст] / Д. Н. Попов. – М.: Машиностроение, 1987. – 464 с.
7. Соколова, Я. В. Моделирование динамических характеристик автоматического гидропривода машиностроительного оборудования [Текст] / Я. В. Соколова, Ю. Б. Рассказова // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2015. – № 5 (222). – С. 105–110.
8. Guan, C. Adaptive sliding mode control of electro-hydraulic system with nonlinear unknown parameters [Text] / C. Guan, S. Pan // Control Engineering Practice. – 2008. – Vol. 16, Issue 11. – P. 1275–1284. doi: 10.1016/j.conengprac.2008.02.002
9. Рассказова, Ю. Б. Экспериментальные исследования эффективности регулирования объемного гидропривода [Текст] / Ю. Б. Рассказова // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2015. – № 5 (222). – С. 88–91.
10. Ким, Д. П. Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учебное пособие [Текст] / Д. П. Ким. – М.: Физматлит, 2004. – 464 с.