

МЕХАТРОННА ГІДРОСИСТЕМА З АДАПТИВНИМ РЕГУЛЯТОРОМ

¹Вінницький національний технічний університет, Україна²"Gheorghe Asachi" Technical University, Iasi, Romania

Анотація

У роботі представлена мехатронна гідравлічна система з адаптивним регулятором, призначена для маніпулятора мобільних робочих машин. Мехатронна гідравлічна система побудована на основі керованого насоса, пропорційних гідророзподільників з електрогідравлічним керуванням і контролера. Контролер виконує роль адаптивного регулятора і дозволяє регулювати сигнал зворотного зв'язку гідросистеми при зміні її режимів роботи з метою поліпшення її динамічних характеристик. Проведено моделювання динамічних процесів. Виявлено можливість зменшення перерегулювання і коливань в гідросистемі, а також підвищення її швидкості за рахунок введення коригуючої складової сигналу зворотного зв'язку та її затримки. Для моделювання залежності коефіцієнта коригуючої складової сигналу зворотного зв'язку застосовано систему нечіткого логічного висновку.

Ключові слова: адаптивний регулятор, динамічні характеристики, система нечіткого логічного висновку.

Abstract

The paper presents a mechatronic hydraulic system with an adaptive regulator designed for a manipulator drive of mobile working machines. The mechatronic hydraulic system is built on controlled pump, proportional hydraulic valves with electrohydraulic control, and a controller. The controller acts as an adaptive regulator and allows adjusting the feedback signal of the hydraulic system when changing its operating modes in order to improve its dynamic characteristics. Simulation studies of dynamic processes have been conducted. The possibility of reducing overregulation and oscillation in the hydraulic system has been found, as well as increasing its speed of operation due to the introduction of the corrective component of the feedback signal and its delay. A fuzzy inference system has been applied to model the dependence of the coefficient of the corrective component of the feedback signal.

Keywords: adaptive regulator, dynamic characteristics, fuzzy inference system.

Вступ

У будівництві, на виробництві і на транспорті широко використовуються мобільні робочі машини, оснащені маніпуляторами з гідравлічним приводом. Виробниками таких машин налагоджено виробництво змінних робочих органів, що дозволяє ефективно їх використовувати в усі пори року. Мобільні робочі машини виконують різноманітні операції, що вимагають пропорційного і високоточного керування маніпуляторами з мінімальними непродуктивними втратами потужності в гідроприводах. Крім того, важливо забезпечити мінімальні коливання перехідних рухів у гідроприводах та швидкість роботи. Ці обставини спонукають розробників мобільних робочих машин до активного пошуку схем і конструкцій гідроприводів з поліпшеними технічними параметрами та експлуатаційними властивостями. Розвиток гідроприводів мобільних робочих машин йде в напрямку широкого використання регульованих насосів, пропорційної гідравліки з дистанційним електрогідравлічним керуванням, використання контролерів, що виконують роль адаптивних регуляторів. Впроваджуються також інтелектуальні системи керування машинами [1, 2, 3, 4, 5].

Результати досліджень

Для дослідження робочих процесів, що відбуваються в мехатронній гідросистемі та визначення її характеристик створена нелінійна математична модель. При розробці математичної моделі розглянуто рух стріли маніпулятора. Математична модель, представлена в [6] і створена на основі розрахункової схеми привода стріли, представленої на рис. 1.

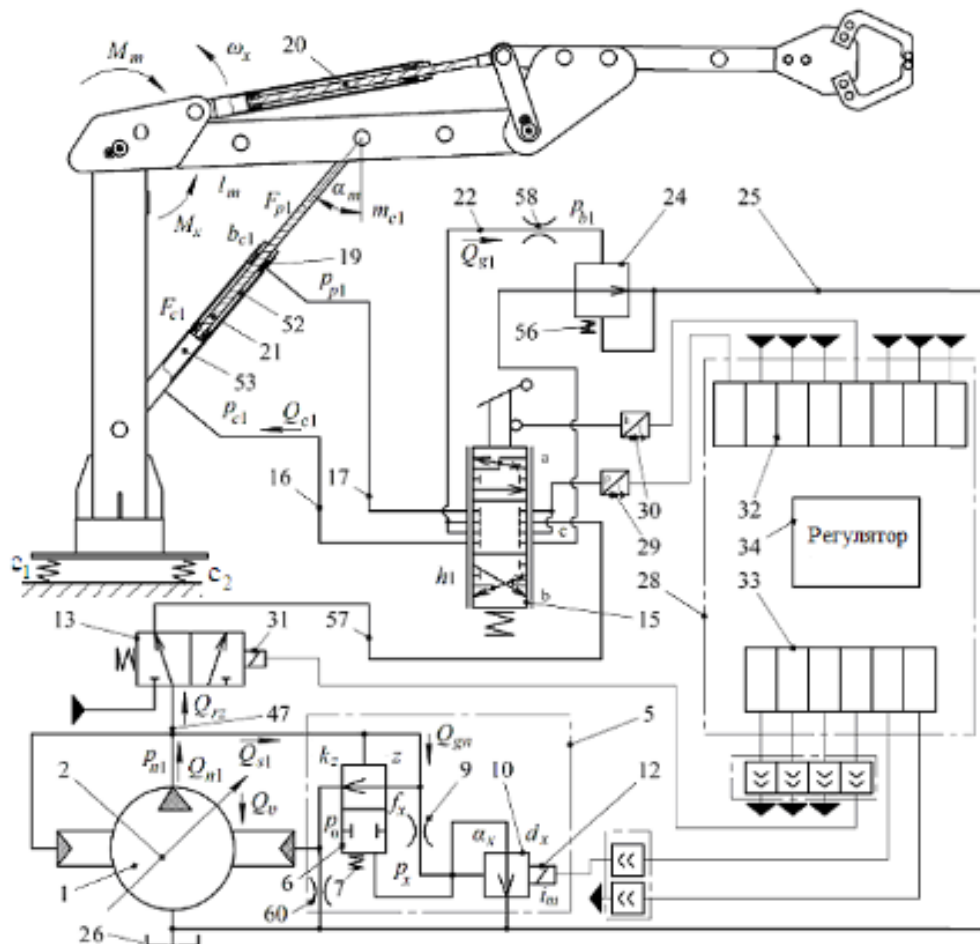


Рисунок 1 – Розрахункова схема привода стріли маніпулятора

Розрахункова схема включає регульований насос 1 з планшайбою 2. Насос оснащений регулятором 3, який складається з золотника 4 з пружиною 5, дроселів 6, 7 та клапана 8 з електромагнітом 9. На виході насоса в гідролінії 31 встановлено розподільник 10 з електромагнітом 11, а в гідролінії 32 встановлено пропорційний розподільник 12 з датчиком тиску 13 та датчиком переміщення 14. Пропорційний розподільник 12 з'єднаний з гідролініями 27 та 28 з гідроциліндром 15, поршень та шток якого з'єднані з стрілою 24. При переміщенні поршня 17 гідроциліндра 15 стріла 24, рукоять 25 та захват 26 переміщуються в напрямку проти руху часової стрілки. На виході пропорційного розподільника 12 встановлено зрівноважувальний клапан 18 з пружиною 19 та дроселем 23. Контролер 20 включає систему комутації, що забезпечує подачу сигналів від датчиків переміщення 14, тиску 13 та до електромагніту 9. В контролері 20 програмно сформовано адаптивний регулятор 22, що реалізує зворотній зв'язок та забезпечує покращення динамічних характеристик привода стріли.

Нелінійні диференціальні математичної моделі мехатронної гідросистеми розв'язувались за допомогою чисельного методу Розенброка при абсолютній похибці $\varepsilon_z=10^{-6}$ відносній похибці $\varepsilon_x=10^{-3}$. Проведені імітаційні дослідження робочих процесів в гідросистемі при ступінчастій зміні навантаження на стрілу маніпулятора. Розраховувались залежності змінних, що описують стан гідросистеми в перехідних процесах, визначались перерегулювання σ , коливальність k та швидкодія гідросистеми (час регулювання t_p). В процесі роботи визначались засоби, що дозволяють мінімізувати перерегулювання, коливальність та час регулювання в гідросистемі.

Можливості підвищення швидкодії мехатронної гідросистеми знаходяться перш за все в адаптивному регуляторі рис 1. Рациональне налаштування його параметрів дає змогу суттєво впливати на характеристики гідросистеми. Адаптивний регулятор формує сигнал зворотного зв'язку U_{m1} який подається на регулятор насоса. Сигнал U_m визначає витрату насоса 1 та тиск p_{c1} , під яким робоча рідина подається в гідросистему. Величина сигналу U_{m1} визначається адаптивним регулятором на основі сигналів i_{p1} та i_{c1} , що формуються датчиками 13 та 14 в залежності від значень

тиску p_c на вході в гідроциліндр 15 стріли та відкриття h_1 робочого вікна пропорційного розподільника 12. Структура адаптивного регулятора представлена на рис. 2. Адаптивний регулятор включає блок 1 основної складової сигналу керування, 2, 3, 4 – блоки математичних операцій, 5 – блок сигналу холостого ходу насоса, логічний блок 6 та блок корегувальної складової сигналу керування. Сигнал U_m визначається залежністю

$$U_m = \begin{cases} F_2(i_{p1}) - k_p (i_{p1} - i_{k1}) \cdot \frac{di_{p1}}{dt}, & \text{when } h_1 > 0 \\ N_p^{xy}, & \text{when } h_1 = 0 \end{cases}$$

де $F_2(i_{p1})$ – передавальна функція блока основної складової сигналу адаптивного регулятора;

k_p – коефіцієнт корегувальної складової сигналу адаптивного регулятора.

База правил, що використана в системі нечіткого логічного висновку представлена нижче:

1. If (x is a1) and (y is b1) then (output1 is z1) (1)
2. If (x is a1) and (y is b2) then (output1 is z7) (1)
3. If (x is a1) and (y is b3) then (output1 is z7) (1)
4. If (x is a1) and (y is b4) then (output1 is z6) (1)
5. If (x is a1) and (y is b5) then (output1 is z5) (1)
6. If (x is a1) and (y is b6) then (output1 is z4) (1)
7. If (x is a1) and (y is b7) then (output1 is z3) (1)
8. If (x is a2) and (y is b1) then (output1 is z7) (1)
9. If (x is a2) and (y is b2) then (output1 is z6) (1)
10. If (x is a2) and (y is b3) then (output1 is z8) (1)
11. If (x is a2) and (y is b4) then (output1 is z5) (1)
12. If (x is a2) and (y is b5) then (output1 is z4) (1)
13. If (x is a2) and (y is b6) then (output1 is z4) (1)
14. If (x is a2) and (y is b7) then (output1 is z2) (1)
15. If (x is a3) and (y is b1) then (output1 is z8) (1)
16. If (x is a3) and (y is b2) then (output1 is z8) (1)
17. If (x is a3) and (y is b3) then (output1 is z5) (1)
18. If (x is a3) and (y is b4) then (output1 is z5) (1)

В базі правил позначено: $x = i_{p1}$, $y = i_{k1}$, $z = k_p$.

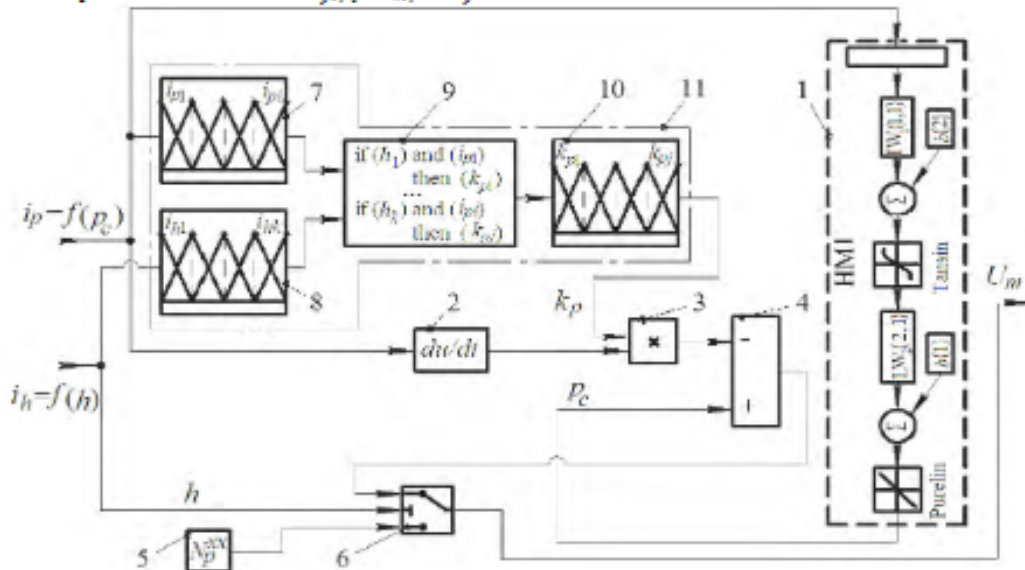


Рисунок 2 – Структура адаптивного регулятора

Проведено розрахунок перехідних процесів в приводі стріли маніпулятора при ступінчастій зміні навантаження. Перехідні процеси розраховувались при таких значеннях основних параметрів: $W_N = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, $W_C = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, $W_P = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, $F_C = 20 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, $F_P = 16,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, $F_N = 1000 \dots 3000 \text{ Н}$, $I_{xx} = 20 \dots 300 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $I_{zz} = 20 \dots 300 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $h = (1 \dots 4) \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $\alpha_m = 30 \dots 50^\circ$, $f_x = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$, $R_c = 2,1 \text{ Ом}$, $L_c = 6,58 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$, $m_b = 0,15 \text{ кг}$, $c_b = 1,5 \cdot 10^4 \text{ Н/м}$, $d_x = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $d_p = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $l_p = 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $k_k = 30 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $f_{z2} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$, $d_{z2} = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $\alpha_{z2} = 60^\circ$, $d_k = 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $l_k = 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $m_k = 0,15 \text{ кг}$, $d_{z3} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

В результаті серії імітаційних досліджень виявлено вплив величини коефіцієнта k_p на час регулювання t_p в приводі стріли манипулятора (рис. 3). Однак можна з певною точністю визначити діапазон зміни величини k_p , використання якого при налаштуванні адаптивного регулятора буде забезпечувати суттєве зменшення часу регулювання t_p . Так для значення $h_1=4 \cdot 10^{-3}$ м цей діапазон становить $\Delta k_p=(100-130) \cdot 10^{-4}$ с, а для $h_1=2 \cdot 10^{-3}$ м $\Delta k_p=(115-145) \cdot 10^{-4}$ с. Визначено також нечіткий вплив величини тиску p_c на діапазони зміни k_p , які забезпечують зменшення часу регулювання в приводі стріли манипулятора. Отримані результати дозволили застосувати систему нечіткого логічного висновку для формування залежності $k_p(i_{p1}, i_{k1})$ за якою змінюється величина коефіцієнта k_p коригувальної складової адаптивного регулятора.

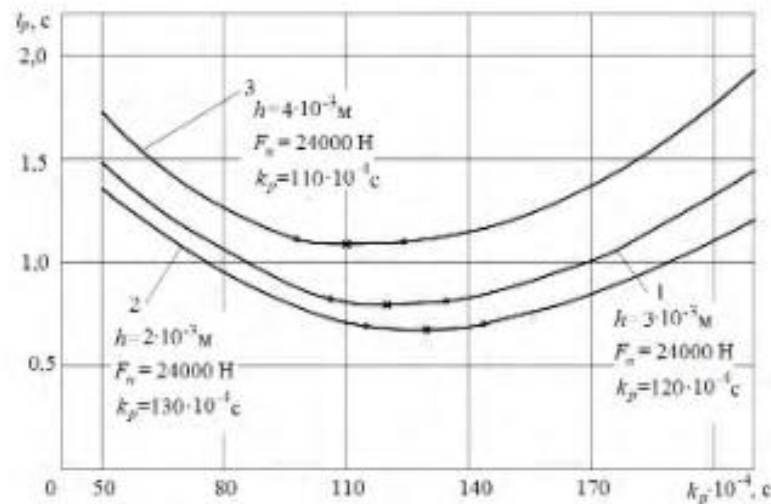


Рисунок 3 – Вплив величини k_p на час регулювання в приводі стріли манипулятора

Залежність має параболічний характер з діапазонами, в яких величина k_p забезпечує мінімізацію часу регулювання t_p . Оскільки величина t_p визначається як момент входження величини тиску p_c в коридор шириною $\pm 5\%$ від усталеного значення p_{c1} , то точне визначення величини t_p при варіюванні величин k_p , p_c , та h_1 неможливе.

На рис. 4 представлено порівняння перехідних процесів в приводі стріли манипулятора з адаптивним регулятором розрахованих для випадків а) при відсутності коригувальної складової сигнала ($k_p=0$), б) із застосуванням коригувальної складової, що реалізується нечіткою системою логічного висновку.

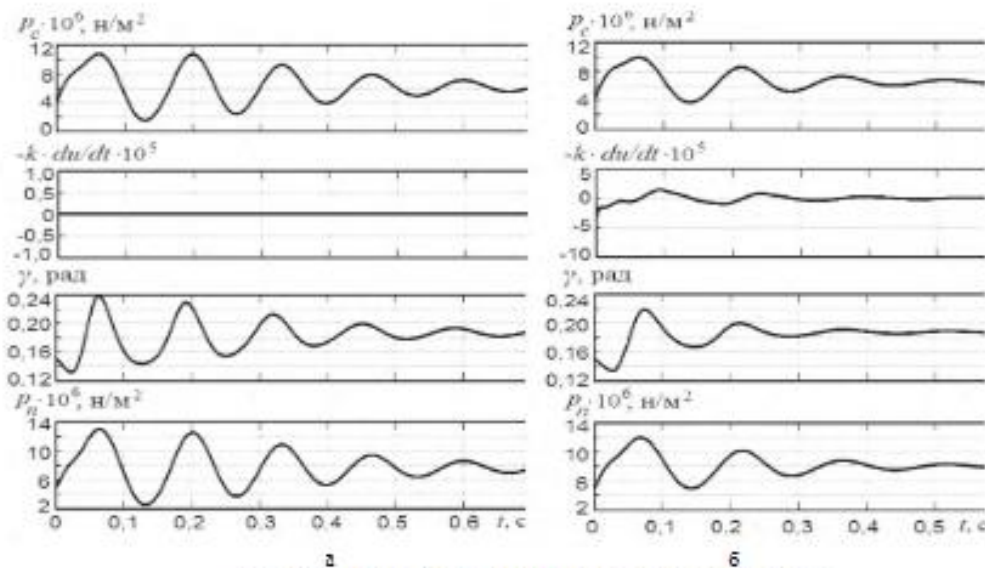


Рисунок 4 – Перехідні процеси в приводі стріли манипулятора
а) при відсутності коригувальної складової сигнала;
б) із застосуванням коригувальної складової сигнала

Висновки

1. Розроблена мехатронна гідросистема маніпулятора забезпечує пропорційне керування та стабілізацію швидкості руху робочого органу.

2. Застосування адаптивного регулятора, який включає корегування сигналу зворотного зв'язку з регульованою затримкою та його налаштування на основі результатів досліджень дозволило зменшити перерегулювання до 20 %, коливальність в гідросистемі до значень $k=3\dots4$ та зменшити час регулювання t_r на 30...60 % в залежності від режимів роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Frerichs, L.; Hartmann, K. Efficient and high performing hydraulic systems in mobile machines. In: 10th International Fluid Power Conference, pp. 33-44, Group 8 - Mobile Hydraulics, Paper 8-0, Dresden (2016).

2. Nurmi, J.; Mattila, J. Global energy-optimal redundancy resolution of hydraulic manipulators: experimental results for a forestry manipulator. *Energies* 10(5), pp. 647-677, (2017), <https://doi.org/10.3390/en10050647>.

3. Xu, B.; Cheng, M. Motion control of multi-actuator hydraulic systems for mobile machineries: recent advancements and future trends. *Front Mech Eng* 13(2), pp. 151-166, (2018), <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0470-5>

4. Lenzgeiger, U.; and Maier, U. Electronic load sensing for tractors. In: 11th international fluid power conference, pp. 488-497, University Library of the RWTH Aachen University. Volume 3, (2018).

5. Jensen, K.J.; Ebbesen, M.K.; Hansen, M.R. Anti-swing control of a hydraulic loader crane with a hanging load. *Mechatronics* 77, pp. 1-13, (2021), [doi10.1016/j.mechatronics.2021.102599](https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2021.102599).

6. Kozlov, L. Adaptive regulator with dynamic Fuzzy-correction of settings for a mechatronic drive of a mobile machine. *Bulletin of the Khmelnytskyi National University, series "Technical Sciences" No. 5*, pp. 29-35, (2014).

Козлов Леонід Геннадійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технологій та автоматизації машинобудування Вінницького національного технічного університету, e-mail: osna2030@gmail.com

Буренніков Юрій Анатолійович – канд. техн. наук, професор, професор кафедри технологій і автоматизації машинобудування Вінницького національного технічного університету, e-mail: yuburennikov@gmail.com

Петріка Візуряну – професор інженерії, доктор філософії, директор Департаменту технологій та обладнання обробки матеріалів, Факультету матеріалознавства та інженерії, Технічного університету «Георге Асачі» м. Ясси, електронна адреса: peviz@tuiasi.ro

Kozlov Leonid Gennadiyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technologies and Automation of Mechanical Engineering, Vinnytsia National Technical University, e-mail: osna2030@gmail.com

Burennikov Yuri Anatolyevich – Ph.D. tech. Sciences, Professor, Professor of the Department of Technologies and Automation of Mechanical Engineering, Vinnytsia National Technical University, E-mail: yuburennikov@gmail.com

Petrica Vizureanu – Ph.D., Director of the Department of Technologies and Equipment for Materials Processing Faculty of Materials Science & Engineering "Gheorghe Asachi" Technical University of Iasi E-mail: peviz@tuiasi.ro

