

## ОПТИМІЗАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ШАХТНОЇ ПІДЙОМНОЇ УСТАНОВКИ

*Представлено математичну модель нечіткого регулятора, яка базується на використанні його адаптивних властивостей для заданої точності позиціонування при змінних параметрах та навантаженні, що забезпечує слабку чутливість системи керування до параметричних збурень. На основі запропонованого підходу досліджено метод виключення коливальних процесів для шахтної підйомної установки із застосуванням адаптивного нечіткого регулятора. Розроблені алгоритми управління забезпечують слабку чутливість до зміни параметрів електроприводу*

**Ключові слова:** позиційний електропривод, нечіткий регулятор, система підпорядкованого регулювання.

При проектуванні систем керування складними електромеханічними системами, вплив на динамічний режим пружних зв'язків, ланок з запізненням, гідромеханічних пристроїв не враховується. Це призводить до порушення заданого режиму роботи, зниження енергоефективності та терміну служби окремих елементів і системи в цілому. Так, в підйомних установках глибоких шахт динамічні режими визначаються в основному пружними властивостями підйомних канатів, що викликають пружні коливання. Термін служби канатів при нормальній експлуатації становить 1-2 роки. В середньому вартість однієї вітки каната для шахт глибиною 1000 м становить 5-6 тис. у.о. Тому одним із завдань є зниження за допомогою електроприводу механічних коливань в перехідних режимах, що крім зменшення динамічних навантажень, дозволить реалізувати заданий швидкісний режим, зменшити втрати енергії і забезпечити точну зупинку робочого органу без використання механічного гальмування.

В якості засобів гасіння коливань використовуються різні муфти, пружно-демпфуючі вставки, динамічні гасителі та поглиначі енергії. Ряд досліджень вирішують задачу зменшення механічний коливань в лінії передач підйомних машин за рахунок оптимального керування електроприводом шляхом використання різних «згладжених» діаграм швидкості.

Однак введення таких коригувальних пристроїв призводить до ускладнення систем і не дає задовільних результатів у випадках, коли вихідний опис проблеми, що вирішується є неточним і неповним або в процесі роботи змінюються параметри об'єкта. Відомо, що в таких ситуаціях, завдяки своїм особливостям, найбільш конструктивним є технологія нечіткого керування.

На практиці найбільшого поширення отримали адаптивні системи керування. Недоліком таких систем є те, що більшість алгоритмів адаптації, отримані при відсутності неконтрольованих збурювальних впливів, і при неможливості визначення всіх параметрів об'єкта в процесі ідентифікації. Крім того, практично всі алгоритми адаптації працездатні, якщо протягом часу настройки регулятора відсутні збурювальні впливи. Слід також зауважити, що існуючі алгоритми адаптації досить складні в реалізації, а процес адаптації часто займає неприйнятну тривалий час.

У роботі використано підхід до оптимізації динамічних режимів шахтної підйомної установки, в основу якого покладено використання нечіткого регулятора.

Нечіткий регулятор з істотною нелінійністю становить інтерес, як у теоретичному, так і в практичному значенні. Основне завдання дослідження таких регуляторів полягає у виявленні залежності аналітичних структур найпростіших регуляторів від використаного методу виводу сигналу керування. Про якість функціонування нечіткого регулятора можна судити, використовуючи різні методи виводу, наприклад, найпоширеніші методи Мамдані  $R_M$ , Ларсона  $R_L$  та ін.

Порівняльний аналіз 12 методів виводу був проведений у контексті нечіткого керування методом комп'ютерного моделювання Mizumoto (1988) [1]. У результаті дослідження було встановлено, найкращі результати можна отримати при використанні чотирьох методів  $R_M, R_L, R_{DP}, R_{BP}$ .

З огляду на те, що математичний опис систем, заснованих на нечіткій логіці має нетрадиційний і більшою мірою якісний характер, запропоновано в керуванні електроприводом шахтної підйомної установки застосувати простий нечіткий регулятор, вихідний сигнал якого визначений аналітично за

двома вхідними сигналами, пропорційними помилці регулювання  $e(nT)$  (швидкості або переміщенню) та її похідній  $r(nT) = (e(nT) - e(nT - T)) / T$ .

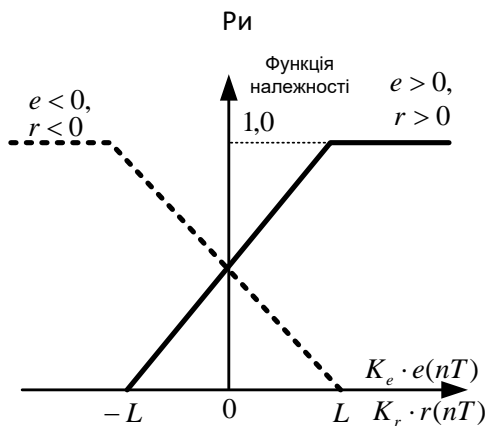
Після масштабування входи:

$$K_e \cdot e(nT) = K_e (y(nT)), \quad (1)$$

$$K_r \cdot r(nT) = K_e (e(nT) - e(nT - T)), \quad (2)$$

де  $K_e$  і  $K_r$  - коефіцієнти пропорційності, відповідно, похибки  $e$  і її похідній  $r$ ,  $y(nT)$  - зміна вихідного сигналу за час  $nT$ ;  $e(nT - T)$  - приріст вхідного сигналу за період  $T$ . На рис. 1 - графічне представлення вхідних нечітких множин та їх похідних.

Масштабована помилка і похідна фазифіковані відповідно входу нечітких множин, функції



приналежності яких наведені на рис. 1. Всередині інтервалу  $[-L...L]$  функція належності збільшується або зменшується лінійно як по відношенню до помилки, так і до її похідної. Поза діапазоном  $[-L...L]$  функція належності приймає значення або 0, або 1.

Вхід нечітких множин для масштабованої позитивної та негативної помилок, описується наступними функціями належності:

$$\mu_e^+ = \frac{L + K_e \cdot e(nT)}{2L} \quad \text{та} \quad \mu_e^- = \frac{L - K_e \cdot e(nT)}{2L} \quad (3)$$

$$\mu_r^+ = \frac{L + K_r \cdot r(nT)}{2L} \quad \text{та} \quad \mu_r^- = \frac{L - K_r \cdot r(nT)}{2L}, \quad (4)$$

Рисунок 1

де  $L$  - максимальне значення помилки. Отже, використовується чотири нечітких правила керування, а саме:

$$\left. \begin{aligned} \text{Якщо } K_e \cdot e(nT) > 0 \quad \text{та} \quad K_r \cdot r(nT) > 0, \text{ то } \Delta U(nT) > 0; \quad (r_1) \\ \text{Якщо } K_e \cdot e(nT) > 0 \quad \text{та} \quad K_r \cdot r(nT) < 0, \text{ то } \Delta U(nT) = 0; \quad (r_2) \\ \text{Якщо } K_e \cdot e(nT) < 0 \quad \text{та} \quad K_r \cdot r(nT) > 0, \text{ то } \Delta U(nT) = 0; \quad (r_3) \\ \text{Якщо } K_e \cdot e(nT) < 0 \quad \text{и} \quad K_r \cdot r(nT) < 0, \text{ то } \Delta U(nT) < 0. \quad (r_4) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

У наведених нечітких правилах  $\Delta U(nT)$  - вихід нечіткого регулятора.

Виходи нечіткого регулятора (позитивний, нульовий і негативний) подібні трапеціям. Форма трапеції визначається параметром  $\theta = A/H$ , який обмежується значеннями  $\theta \leq 0.5$ , щоб уникнути накладення між верхніми сторонами двох сусідніх вихідних нечітких множин.

Формальне визначення  $\Delta U(nT)$  для чотирьох відомих методів виведення наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Метод	Визначення
$R_M$	$\mu \wedge F(\Delta U)$
$R_L$	$\mu \cdot F(\Delta U)$
$R_{DP}$	$\begin{cases} \mu, & F(\Delta U) = 1 \\ F(\Delta U), & \mu = 1 \\ 0, & \mu < 1, F(\Delta U) < 1 \end{cases}$
$R_{BP}$	$0 \vee (\mu + F(\Delta U) - 1)$

У таблиці  $\mu$  - функція приналежності вихідної нечіткої множини, яка розраховується за вхідною нечіткою множиною. Площі вихідних множин для різних методів виводу обчислені за формулами табл. 2. Індексми  $M, L, DP$  і  $BP$  позначено відповідні методи виведення.

Правила контролю  $r_2$  та  $r_3$  створюють дві функції приналежності, а  $F(\Delta U)$  є функцією приналежності вихідної нечіткої множини.

Таблиця 2

Метод виведення	Площа вихідної нечіткої множини
$R_M$	$S_M(\mu) = \mu(2 - \mu + \mu \cdot \theta)H$
$R_L$	$S_L(\mu) = \mu(1 + \theta)H$
$R_{DP}$	$S_{DP}(\mu) = 2\mu \cdot \theta \cdot H$
$R_{BP}$	$S_{BP}(\mu) = \mu(2\theta + \mu - \mu \cdot \theta)H$

Об'єднана функція приналежності

$$\mu_{r_{2\vee r_3}} = \min(\mu_{r_2} + \mu_{r_3}, 1).$$

(6)

Для дефазифікованих нечітких множин використовується метод центру ваги. Виходячи з того, що виходи нечітких множин симетричні щодо їх середніх значень ( $H, 0$  і  $-H$ ), масштабований

вихідний сигнал фазі-контролера:

$$K_U \cdot \Delta U(nT) = K_U \cdot \frac{H \cdot S(\mu_{r_1}) + 0 \cdot S(\mu_{r_{2\vee r_3}}) - H \cdot S(\mu_{r_4})}{S(\mu_{r_1}) + S(\mu_{r_{2\vee r_3}}) + S(\mu_{r_4})} = K_U \cdot H \frac{-S(\mu_{r_4}) + S(\mu_{r_1})}{S(\mu_{r_1}) + S(\mu_{r_{2\vee r_3}}) + S(\mu_{r_4})}. \quad (7)$$

На практиці розглядають зміну масштабованих помилки та її похідної в інтервалі  $[-L \dots L]$ , щоб у повній мірі використовувати нелінійність нечіткого контролера.

Згідно табл. 2 найпростіша модель регулятора визначається при використанні методу виведення  $R_L$ , причому величина  $\theta$  може бути прийнята такою, що дорівнює нулю. В цьому випадку нечіткі множини являтимуть собою рівнобедрені трикутники, а площі активної частини  $S(\mu) = \mu \cdot H$ , де  $\mu$  приймає значення ( $\mu_r^+, \mu_r^-, \mu_e^-, \mu_e^-$  відповідно для  $\mu_{r_1}, \mu_{r_2}, \mu_{r_3}$  та  $\mu_{r_4}$ ), визначаються за формулами (3) і (4).

З використанням цієї комбінації формула (7) набуває вигляду:

$$K_u \cdot U(\Delta T) = \frac{0,5H}{2L - K_e e(nT)} U_{ex}, \quad (8)$$

де  $U_{ex} = (K_e e(nT) + K_r r(nT))$ .

Залежність (8) показує, що коефіцієнт передачі регулятора залежить від помилки регулювання  $e$ : чим більша помилка, тим більший коефіцієнт передачі. Отже, завжди зі збільшенням помилки регулювання зростатиме реакція на її зменшення. У загальному вигляді такий регулятор можна представити схемою в складі замкнутої системи керування (рис. 2).

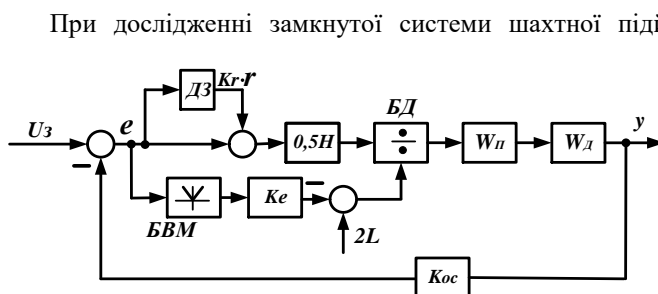


Рисунок 2 – замкнута система керування

При дослідженні замкнутої системи шахтної підйомної установки була прийнята найбільш розповсюджена система тиристорний перетворювач - двигун, математична модель якої отримана відомими методами [2]. Математичне моделювання системи було виконано з використанням пакету прикладних програм Matlab/Simulink.

Як об'єкт було використано шахтну підйомну установку з двигуном постійного струму потужністю 90 кВт, з номінальним моментом 1142,9  $H \cdot м$  [3].

Характер зміни швидкості підйомної установки (1 – заданої, 2 – дійсної) при зміні статичного навантаження без нечіткого регулятора приведений на рис. 3, а, з використанням нечіткого регулятора - на рис. 3, б.

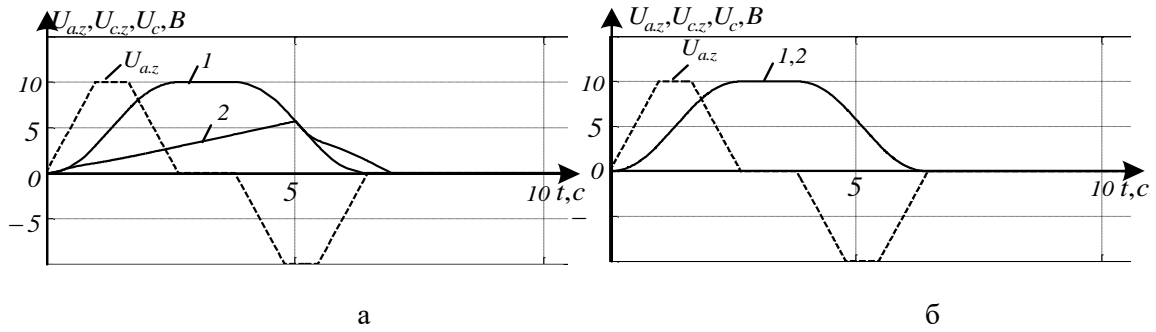


Рисунок 3-- Характер зміни швидкості підйомної установки

Дослідження якості системи керування з нечітким регулятором для позиційного електроприводу з частотно-регульованим асинхронним двигуном типу MDEMA63-42-230V потужністю 0,25 кВт проведені на експериментальній установці. Отримані показники якості керування порівнювалися з результатами, отриманими з використанням П - регулятора положення, реалізованого програмно в самому перетворювачі частоти. Функціональну схему експериментальної установки представлено на рис. 4.

До складу установки входить:

- програмований логічний контролер (ПЛК) Lenze (серії 3200С);
- перетворювач частоти (серії 8400) Vector Highline ;
- фотоімпульсний датчик швидкості (ФІД);
- електромагнітна муфта з системою управління струмом гальмування.

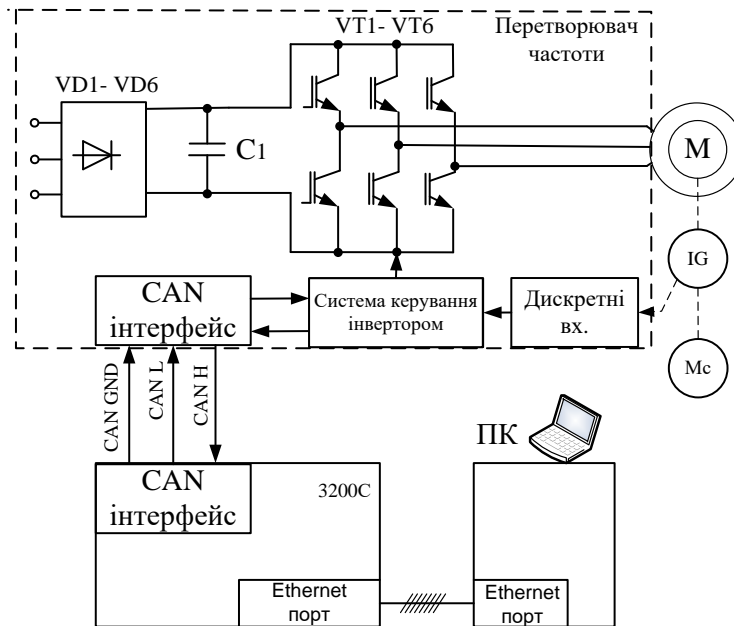


Рисунок 4 -- Функціональну схему експериментальної установки

Дослідження проводилися для  $M_C = 1,35 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

На рис. 5 наведені графіки зміни сигналів: швидкості: а - з фазі-регулятором, б - з П – регулятором при зміні статичного навантаження.

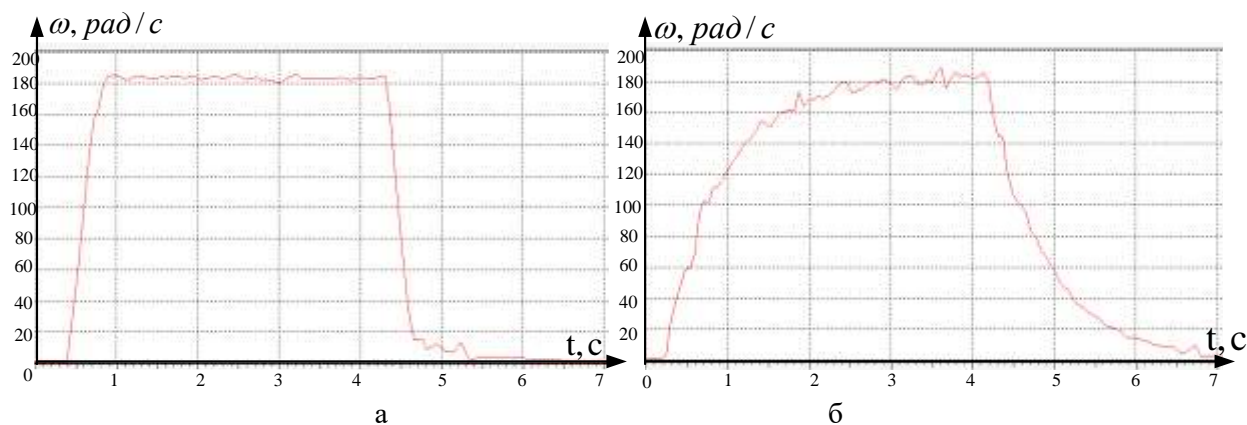


Рисунок. 5 - графіки зміни сигналів: швидкості:  
а - з фазі-регулятором, б - з П – регулятором при зміні статичного навантаження.

З перехідних характеристик швидкості видно, що система з запропонованим нечітким регулятором має кращі показники якості та менш чутлива до параметричних збурень під час відпрацювання завдання у вигляді стрибка.

Також було виконано порівняння систем керування з різними типами регуляторів на прикладі шахтної підйомної установки та розраховані показники якості системи (таблиця 3).

Таблиця 3

	ПД-регулятор	Нечіткий регулятор	Feed forward control
Перерегулювання, %	2	0,2	0,26
Тривалість перехідного процесу, с	16	15	18
Інтегрований квадратичний показник якості	172,19	169,44	172,59

**Висновок.** Розроблена система керування позиційним електроприводом з нечіткою корекцією заданих діаграм швидкості і положення забезпечує реалізацію цих діаграм в оптимальному за швидкодією і динамічним навантаженням режимі при дії параметричних і зовнішніх збурень для любых типів систем керування.

#### Список використаної літератури

1. Hao Ying. The simplest fuzzy controllers using different inference methods are different nonlinear proportional-integral controllers with variable gains / Hao Ying [Text]. // Automatica, 29. – 1993/ - P. 1579–1589.
2. Ключев В.И. Теория электропривода // Энергоатомиздат. – 1985. – №9. – 560 с.
3. Босак, А. В. Позиционное управление многосвязной электромеханической системой с адаптивным фаззи-регулятором / А. В. Босак, В. М. Чермалих [Текст] // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2011. - № 03(79). - С. 439-441.

A. Chermalykh, Cand.Sc. (Eng.)

A. Bosak, Cand.Sc. (Eng.)

A. Danilin, Cand.Sc. (Eng.)

**National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»  
OPTIMIZATION OF DYNAMIC MODES OF MINE HOISTING PLANT**

*A mathematical model of the fuzzy controller is presented, which is based on the use of its adaptive properties for a given positioning accuracy with changed parameters and load, which provides a weak sensitivity of the control system to parametric disturbances. On the basis of the proposed approach, a method for excluding oscillatory processes for a mine hoisting installation with the use of an adaptive fuzzy controller is investigated. The developed control algorithms provide a weak sensitivity of the system to changes in the parameters of the electric drive.*

**Keywords:** position electric drive, fuzzy controller, subordinate control system.

**References**

1. Hao Ying. (1993) “The simplest fuzzy controllers using different inference methods are different nonlinear pro-portional-integral controllers with variable gains”, *Automatica*, 29. P. 1579–1589. (Eng.)
2. Kljuhev V.I. Theory of the electric drive // *Energoatomizdat*. – 1985. – 560 p. (Rus.)
3. Bosak, A. V., Chermalykh, V. M. Positional control of a multiply connected electromechanical system with an adaptive fuzzy controller // *Electrical and computer systems, Ukraine*, - 2011. - Pp. 439–441. (Rus.)

УДК 621.313: 62-83

**О.В. Чермалых**, канд. техн. наук

**А.В. Босак**, канд. техн. наук

**О.В. Данилин**, канд. техн. наук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

**ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ШАХТНОЙ ПОДЪОМНОЙ УСТАНОВКИ**

*Представлена математическая модель нечеткого регулятора, которая основана на использовании его адаптивных свойств для заданной точности позиционирования при измененных параметрах и нагрузки, что обеспечивает слабую чувствительность системы управления к параметрическим возмущениям. На основании предложенного подхода исследован метод исключения колебательных процессов для шахтной подъемной установки с использованием адаптивного нечеткого регулятора. Разработанные алгоритмы управления обеспечивают слабую чувствительность системы к изменению параметров электропривода.*

**Ключевые слова:** силовой автотрансформатор, геомагнитные индукционные токи, магнитная цепь, электрическая цепь, кривая намагничивания.

Надійшла 23.06.2017

Received 23.06.2017