

УДК 519.5

*Е. Є. ГЕРМАН, О. Г. ШУТИНСЬКИЙ, О. М. МАКОВОЗ***ВИКОРИСТАННЯ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРУ В СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ КАРБОНІЗАЦІЇ У СОДОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

В статті пропонується використовувати нечіткі регулятори для управління відділенням карбонізації у виробництві кальцинованої соди. Проведено інформаційно-аналітичний огляд щодо використання теорії нечітких множин при розробці та застосуванні нечітких контролерів в промисловості. Представлено декілька типів нечітких ПІД контролерів в залежності від вибору кількості та форми функцій приналежності. Наведено узагальнені принципи синтезу нечіткого ПІД контролерів. Проведено моделювання контуру управління карбонізаційної колони з використанням запропонованих нечітких регуляторів. Результати демонструють, що будь який з запропонованих НПІДК дає кращі характеристики, ніж класичний ПІД регулятор. Найкращі характеристики з нечітких контролерів показали регулятори в яких блок нечіткого налаштування має гаусові функції приналежності. Побудовані порівняльні графіки перехідних процесів контуру регулювання для запропонованих регуляторів.

Ключові слова: нечіткий регулятор, карбонізація, кальцинована сода.

Предлагаются использование нечетких регуляторов для управления отделением карбонизации в производстве кальцинированной соды. Приведен информационно-аналитический обзор по использованию теории нечетких множеств при разработке и применении нечетких контроллеров в промышленности. Представлено несколько типов нечетких ПИД контроллеров в зависимости от выбора количества и формы функций принадлежности. Приведены обобщенные принципы синтеза нечеткого ПИД контроллеров. Проведено моделирование контура управления карбонизационной колонны с использованием предложенных нечетких регуляторов. Результаты показывают, что любой из предложенных нечетких контроллеров дает лучшие характеристики, чем классический ПИД регулятор. Лучшие характеристики с НПІДК показали регуляторы в которых блок нечеткого настройки имеет гауссовы функции принадлежности. Построенные сравнительные графики переходных процессов контура регулирования для предложенных регуляторов.

Ключевые слова: нечеткий регулятор, карбонизация, кальцинированная сода.

As shown by numerous studies, the use of fuzzy sets theory and fuzzy logic in industrial control is appropriate. Therefore, it was proposed to use methods of fuzzy control to control the carbonation department in the production of soda ash. Such control can be implemented by using fuzzy controllers. In this paper information and analytical review on the use of the theory of fuzzy sets in the development and application of fuzzy controllers in the industry is shown. Several types of fuzzy PID controllers depending on the choice of the number and shape of membership functions are represented. The generalized principle of synthesis of fuzzy PID controllers is shown. The mathematical model of the carbonization process in the production of soda ash is described. On the basis of a mathematical model the transfer function of control loop of carbonization column is obtained. The simulation of the control loop using the proposed fuzzy controllers is performed. The results showed that all of the proposed fuzzy controller gives better performance than a classic PID controller. Top performance with fuzzy regulators showed that the fuzzy tuner has a Gaussian membership functions. Built comparative graphs transient control loop for the proposed regulator.

Keywords: fuzzy controller, carbonation, soda ash.

Вступ. Багато понять, які постійно використовуються в повсякденному житті, по суті, є не точними, тобто, визначені “*нечітко*”.

Для того, щоб якесь поняття було визначене, воно повинне мати точне значення та виражене у формалізованому вигляді. У 1965 році Заде ввів поняття «нечіткої логіки», яка, по суті, заснована на якісних міркуваннях. Нечітка логіка і, заснована на ній, теорія нечітких множин пропонує рішення для завдань, які не вдається знайти на основі точних математичних моделей.

Нечітке логічне управління (НЛУ) поєднує в собі два різні типи інформації: чисельні значення вимірюваних та розрахункових показників з одного боку, і лінгвістичні інструкції і описи процесу та алгоритм управління, які виробляє експерт (досвідчений оператор).

Моделювання промислових процесів, і зокрема

карбонізації амонізованого розсолу у виробництві кальцинованої соди, є трудомістким. Це викликано насамперед нелінійністю процесів, які протікають як в просторі так і за часом. Основним завданням дослідження є розробка НЛК, який буде адаптуватись до змін процесу і на виході системи отримувати стійкий сигнал.

Рішення даної задачі можна отримати без застосування промислових установок якщо використати модельну установку для отримання математичної моделі, а потім провести аналіз отриманих результатів за допомогою сучасних апаратних та програмних засобів.

Аналіз літератури. У наш час є необхідність у комп'ютеризації всіх сфер суспільного життя, необхідність постійного вдосконалення технологій промислового виробництва і підвищення його ефективності. Період з 80-х років ХХ століття до теперішнього часу

характеризується широким використанням в різних галузях науки і техніки інтелектуальних інформаційно-керуючих систем.

До них відносяться системи нейро-нечіткого управління, які більшістю вчених і фахівців розглядаються як один з напрямків сучасних технологій управління [1]. Їх актуальність і перевага перед відомими класичними технологіями управління пов'язані з тенденціями збільшення складності математичних моделей реальних систем і необхідністю підвищити їх адекватність шляхом урахування більшої кількості різних факторів і їхнього впливу на процеси прийняття рішень.

Базова структура системи нечіткого управління (СНУ) складається з 4 основних компонентів: база знань (БЗ), блок фазифікації (БФ), або фазифікатор, і блок дефазифікації (БДФ), або дефазифікатор, а також логічна система прийняття рішень [2]. На рисунку 1 показана блокова діаграма СНУ.

База знань містить всі знання регулятора і включає базу правил (БП) нечіткого управління (НУ) і базу даних (БД).

БД – "декларативна" частина БЗ, яка описує визначення об'єктів/цілей (факти, умови, концепції) і визначення функцій приналежності, що використовуються в правилах НУ.

БП НУ – "виробнича" частина БЗ, яка містить інформацію щодо того, як ці об'єкти/цілі можуть використовуватися для виведення нових керуючих впливів.

Логічна система прийняття рішень – це механізм міркувань, який здійснює процедуру виведення на правилах нечіткого управління і задає умови для виведення необхідних керуючих впливів.

Це центральна частина системи нечіткого управління.

БФ визначає відображення дійсного простору в нечітку, а БДФ визначає відображення нечіткого простору, визначеного в предметній області виходу до дійсного простору.

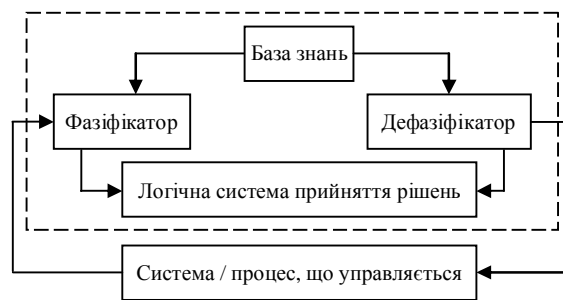


Рис. 1 – Структура системи нечіткого управління

В даний час у більшості промислових додатків використовуються контролери і моделі двох типів Мамдані [3] і Такагі-Сугено [4].

Більшість з них базуються на типових процедурах, властивим традиційним нечітким контролерам: фазифікації, агрегації локальних висновків, імплікації і дефазифікації.

Функціональна модель НЛК представлена на рисунку 2.

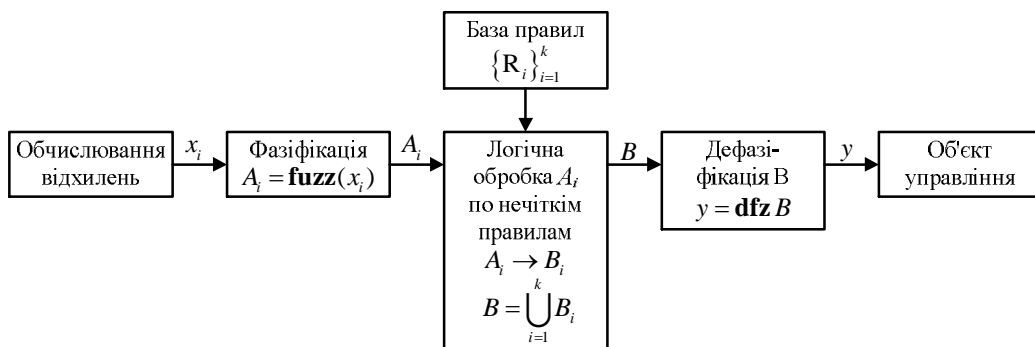


Рис. 2 – Функціональна модель нечіткого логічного контролера

Обчислення керуючих впливів в НЛК складається з чотирьох основних етапів:

- обчислення відхилень вхідний фізичної змінної e ;
- фазифікації: перетворення вхідної фізичної змінної в нечітку множину $A_i (i = 1, k) = \text{fuz}(e_i)$ значень вхідної змінної;
- логічної обробки множини нечітких змінних A_i

відповідно до бази правил та отримання локальних висновків B_i , а також виконання операції агрегації:

$$B = \bigcup_{i=1}^k B_i ; \tag{1}$$

- дефазифікація: процедура перетворення нечіткого загального висновку B в керуючий вплив:

$$\text{dfz}(B) = u. \quad (2)$$

Алгоритм функціонування НЛК описується наступною системою рівнянь, яка визначається послідовністю перетворень інформації в НЛК:

$$\{\mathbf{R}_i\}_{i=1}^k = \begin{cases} \mathbf{R}_1 : A_1 \circ \mathbf{R}_1 = A_1 \circ (A_1 \rightarrow B_1); \\ \mathbf{R}_2 : A_2 \circ \mathbf{R}_2 = A_2 \circ (A_2 \rightarrow B_2); \\ \dots \\ \mathbf{R}_k : A_k \circ \mathbf{R}_k = A_k \circ (A_k \rightarrow B_k); \end{cases} \quad (3)$$

$$B = \bigcup_{i=1}^k B_i; \quad \text{dfz}(B) = u;$$

де “ \circ ” – композиція нечітких відносин; “ \rightarrow ” – нечітка імплікація; $A_i (i = \overline{1, k}) = \text{fuz}(e_i)$; $B_i (i = \overline{1, k})$ – локальний висновок з правила \mathbf{R}_i ; B – загальний висновок з бази правил $\{\mathbf{R}_i\}_{i=1}^k$; fuz , dfz – функції (операції) фазифікації і дефазифікації, відповідно.

На практиці знаходять застосування різноманітні структури НПДК.

Наприклад, такі контролери реалізуються у вигляді цифрових пристроїв у двох варіантах, як показано на рис. 3.

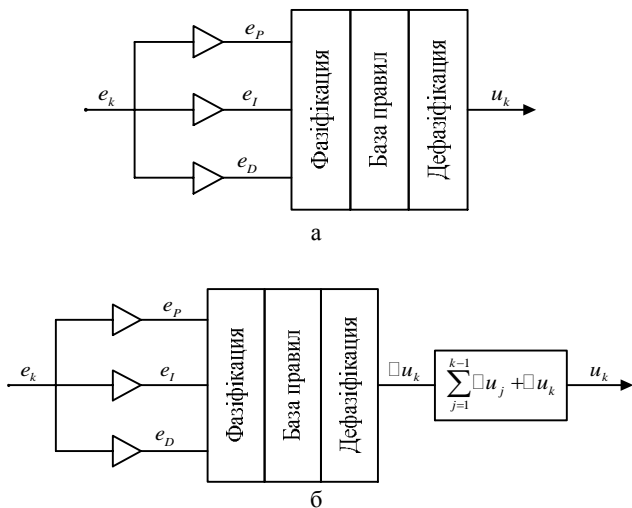


Рис. 3 – Структурні схеми НПДК: а – прямого управління; б – інкрементного управління.

У контролері прямої дії обчислюється на кожному кроці керуючий сигнал, а в інкрементному варіанті обчислюються тільки прирости значень вхідних змінних, що відповідають першій та другій похідній сигналу помилки [5].

На думку ряду авторів НПДК слід застосовувати виключно для управління нелінійними об'єктами.

Однак, як обґрунтовано в [6], управління базується на таких показниках як встановила помилка,

перерегулювання і час регулювання, які є нелінійними функціями параметрів контролера, навіть для лінійного об'єкта.

Таким чином, будь-яке управління, незалежно від виду контролера (лінійного або нелінійного) можна розглядати як нелінійне.

Тому НПДК набагато краще відповідає завданню оптимізації [7].

В останні роки інтенсивно ведуться дослідження по реалізації нечітких ПД контролерів, особливо їх гібридних варіантів [8].

На рисунку 4 наведена схема гібридного ПД контролера, до складу якого включений додатковий блок, що використовує нечіткі висловлювання щодо нелінійної залежності вхід-вихід.

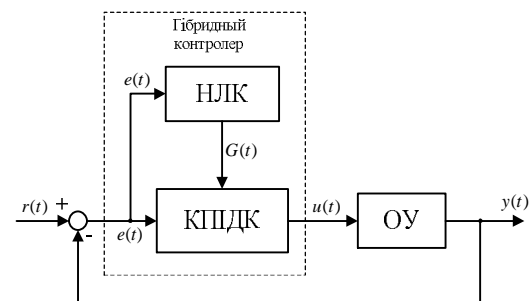


Рис. 4 – Структурна схема гібридного контролера на основі нечіткої бази правил, де $r(t)$ – керуючий вплив або уставка; $e(t)$ – сигнал неузгодженості; $u(t)$ – вихід контролера; $y(t)$ – регульована величина.

У гібридному контролері на базі нечітких висловлювань поліпшуються динамічні властивості системи.

Однак найбільшою проблемою в реалізації нечіткого управління є налаштування НЛК. Існує кілька підходів до проектування НПДК, деякі з яких базуються на евристичних знаннях, тоді як інші засновані на законах класичного ПД управління.

Тому можливо визначити деякі співвідношення між класичними і нечіткими ПД параметрами [9].

Існуючі методи розв'язання задач. Багато сучасних задач НЛУ, такі як управління витратою рідини і системами автоматичного руху поїздів, управління ядерними реакторами, регулюванням трансмісією і багато інших показали ефективність використання НЛУ в комплексі завдань управління складними процесами [10 – 12].

Застосування нечіткої логіки в промислових системах управління визначає можливість створення інтелектуальних пристроїв управління в різних прикладних областях [13].

В [14] приводиться кількісний і якісний аналіз нечітких контролерів відповідно до структури НЛК.

Характеристики НЛК підсумовуються на основі трьох вхідних змінних, які дозволяють отримувати початкові значення масштабних коефіцієнтів НЛК на основі класичних ППД параметрів.

В [15] запропоновано метод проектування НПДК для керування контактними посиленнями шістьма ступенями свободи промислового робота при значних відхиленнях жорсткості контактної середовища.

Отримані задовільні експериментальні результати підтверджують ефективність використання НПДК в розглянутому прикладі.

В [16] запропоновані різні структури НПДК, які дозволили значно поліпшити характеристики систем управління складними промисловими об'єктами, традиційно керованих на основі використання КПДК.

Численні додатки з використанням НПДК довели, що нечітке управління може більш ефективно вирішувати складні практичні проблеми в стислі терміни [17].

В [18] було доведено, що при управлінні нелінійними об'єктами або об'єктами з затримкою, нечіткі контролери перевершували за швидкісним і динамічним характеристикам їх лінійні аналоги.

В [19] були формалізовані правила підбору функцій приналежності нечіткого блоку НПДК а також показаний метод визначення параметрів нечіткої настройки, які описують функції приналежності контролера.

У роботах розглядалися такі аспекти в проектуванні нечітких контролерів як структура, кількість входів і виходів нечітких блоків, кількість і форма функцій приналежності. Викладені результати були представлені на тестових моделях.

Мета роботи та постановка задачі. З висказаного можна зробити висновок, що в багатьох прикладних задачах, системи, що використовують у своїй основі НЛУ, за своїми характеристиками перевищували своїх класичних аналогів, проте наскільки НЛК буде краще його класичного аналога, залишається питанням. Тому виникає завдання моделювання кожного конкретного процесу, використовуючи формалізовані правила конфігурації та налаштування параметрів НЛК.

Математична модель процесу карбонізації у виробництві кальцинованої соди. Процес карбонізації амонізованого розсолу (насичення амонізованого розсолу діоксидом вуглецю) є основним процесом у виробництві кальцинованої соди і його перебіг має значний вплив на техніко-економічні показники. Основним технологічним апаратом відділення карбоні-

зації, в якому здійснюється досліджуваний процес, є карбонізаційна колона.

Складність процесу пояснюється існуванням оборотних реакцій, в яких беруть участь кілька реагуючих компонентів, що знаходяться в трьох фазах стану.

Ступінь утилізації натрію є основним показником якості процесу карбонізації.

Для досягнення максимальної утилізації натрію потрібні оптимальні умови по температурі і тиску.

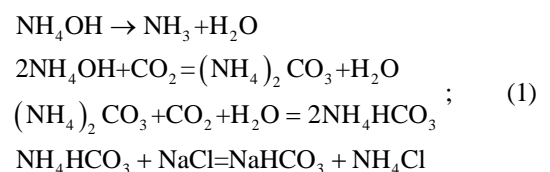
До складу об'єкта насичення амонізованого розсолу діоксидом вуглецю і виділення вологого гідрокарбонату входить об'єкт насичення амонізованого розсолу діоксидом вуглецю (карбонізація), який є основним об'єктом виробництва кальцинованої соди за аміачному способу і від його роботи залежить показники роботи виробництва в цілому.

При нормальній роботі продуктивність об'єкта карбонізації визначає продуктивність інших об'єктів, тому вибір ведучого потоку для реалізації комп'ютерно-інтегрованої системи управління цим об'єктом визначає провідний потік при такому ж управлінні.

В якості ведучого потоку об'єкта насичення амонізованого розсолу прийнято вважати потік діоксиду вуглецю з об'єкта одержання діоксиду вуглецю і вапняної суспензії.

В якості математичної моделі процесу карбонізації будемо розглядати кінетичну модель реакцій.

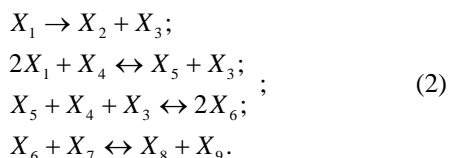
Механізми процесу карбонізації в даний час до кінця не вивчені, технологічний розрахунок, як правило, ведеться за наступним хімічним реакціям:



Введемо наступні позначення: X1 – амонію гідроксид (NH₄OH); X2 – аміак (NH₃); X3 – вода (H₂O); X4 – двоокис вуглецю (CO₂); X5 – амоній вуглекислий ((NH₄)₂CO₃); X6 – амоній двовуглекислий (NH₄HCO₃); X7 – хлорид натрію (NaCl); X8 – натрій двовуглекислий (NaHCO₃); X9 – амоній хлористий (NH₄Cl).

Матриця стехіометричних коефіцієнтів v_{ij} , $i = \overline{1,9}$, $j = \overline{1,4}$, яка відповідає кінетичним рівнянням, має вигляд, представлений в таблиці 1.

З урахуванням позначень хімічні реакції (1) приймуть вигляд:



Таблиця 1 – Математична модель та оптимізація процесу карбонізації амонізованого розсолу

	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4
X_1	-1	-2	0	0
X_2	1	0	0	
X_3	1	1	-1	0
X_4	0	-1	-1	0
X_5	0	1	-1	0
X_6	0	0	2	-1
X_7	0	0	0	-1
X_8	0	0	0	1
X_9	0	0	0	1
γ	1	-1	-1	0

Відповідно до закону діючих мас, кінетичні рівняння, відповідні схемі хімічних перетворень (2), для процесу карбонізації амонізованого розсолу можна виразити рівняннями:

$$\begin{aligned}
 \psi_1(C,T) &= k_1(T)C_1; \\
 \psi_2(C,T) &= k_2(T)C_1^2C_4 - k_2(T)C_3C_5; \\
 \psi_3(C,T) &= k_3(T)C_5C_4C_3 - k_6(T)C_6^2; \\
 \psi_4(C,T) &= k_4(T)C_6C_7 - k_7(T)C_8C_9,
 \end{aligned} \quad (3)$$

де C – вектор мольних концентрацій речовин; $\psi_j(C,T)$ – швидкість j -ї стадії, $j = \overline{1,4}$ м³/год; $k_s(T)$ – константи швидкостей; d – порядок реакції, $s = \overline{1,7}$.

Виходячи з рівняння Арреніуса

$$k_s(T) = k_s^0 e^{-\frac{E_s}{RT}},$$

де k_s^0 – преекспоненціальний множник; E_s – енергія активації стадії, кал/моль; T – абсолютна температура, K ; R – універсальна газова постійна кал/(моль·К).

Оскільки сумарна концентрація змінюється по довжині карбонізаційної колони, то рівняння матеріального балансу з початковими умовами $x_i(0) = x_i^0$, $i = \overline{1,9}$; $C(0) = C_0$, будуть мати вигляд:

$$\frac{v}{S} \frac{dCx_i}{dl} = \sum_{j=1}^5 v_{ij} \omega_j(C,T), \quad i = \overline{1,9} \quad (4)$$

де x_i – концентрація i -го компонента в мольних долях; v – швидкість потоку в колоні карбонізації, м³/год; S – площа поперечного перерізу колони, м²; l – довжина колони, м.

Систему рівнянь (3) замикає умова нормування по компонентам $\sum_{i=1}^9 x_i = 1$. Початкова сумарна концентрація CO постійна при будь-яких температурах.

Тоді, розділивши (4) на CO, отримаємо систему диференціальних рівнянь:

$$\frac{v}{S} \frac{dNx_i}{dl} = \sum_{j=1}^4 v_{ij} W_j(x,T), \quad i = \overline{1,9}; \quad (5)$$

де N – відносна зміна числа молей реакційного середовища; W_j – наведені швидкості хімічних реакцій, 1/ч.

Позначимо

$$F_i = \sum_{j=1}^4 v_{ij} W_j, \quad i = \overline{1,9}. \quad (6)$$

Перетворивши систему рівнянь (5) з урахуванням умов нормування (4), отримаємо:

$$\begin{aligned}
 \frac{dx_i}{dl} &= \frac{S}{v} \frac{F_i - x_i F_n}{N}, \quad i = \overline{1,9}, \\
 \frac{v dN}{S dl} &= -\frac{S}{v} F_n
 \end{aligned}$$

Функції F_n, F_i , $i = \overline{1,9}$ з урахуванням матриці стехіометричних коефіцієнтів приймуть вигляд:

$$\begin{aligned}
 F_1(x,T) &= W_1(x,T) - 2W_4(x,T) \\
 F_2(x,T) &= W_1(x,T); \\
 F_3(x,T) &= W_1(x,T) + W_2(x,T) + W_3(x,T); \\
 F_4(x,T) &= -W_2(x,T) - W_3(x,T); \\
 F_5(x,T) &= W_2(x,T) - W_3(x,T); \\
 F_6(x,T) &= 2W_3(x,T) - W_4(x,T); \\
 F_7(x,T) &= -W_4(x,T); \\
 F_8(x,T) &= W_4(x,T); \\
 F_9(x,T) &= W_4(x,T); \\
 F_n(x,T) &= W_1(x,T) - W_2(x,T) - W_3(x,T).
 \end{aligned}$$

Розробка нечіткого ПІД регулятора. Для НПІДК безліч конструктивних параметрів в узагальненому вигляді можна розділити на дві групи: структурні параметри і параметри настройки (табл. 2).

Таблиця 2 – Конструктивні параметри НПІДК

Структурні параметри	Параметри налаштування
Вхідні змінні нечіткого виводу	Пропорційний коефіцієнт посилення K_P
Вихідні змінні нечіткого виводу	Інтегральний коефіцієнт посилення K_I
Нечіткі лінгвістичні термножини	Диференціальний коефіцієнт посилення K_D
Функції приналежності	Параметри ФП
Нечіткі правила	Коефіцієнти нормування
Механізм нечіткого виводу	Параметри для комутуючих баз знань
Методи дефазікації	Значення вагових коефіцієнтів дефазікації
Структури компенсації інтегрального насичення	Параметри компенсації інтегрального насичення

При проектуванні структурні параметри контролера визначаються до початку його використання, в той час як параметри налаштування розраховуються в режимі онлайн для коригування контролера, з метою підвищення якості системи управління та забезпечення її адаптивних властивостей.

Наразі розроблено велику кількість різних варіантів структур ПІД подібних нечітких контролерів.

В [16] наведені основні варіанти структур НПІДК, які розрізняються за кількістю вхідних сигналів і керуючих впливів.

Таблиця 3 – Характеристики різних структур НПІДК

Тип контролера	Роздільне обчислення управляючих впливів	Незв'язність виходів	Незалежність коефіцієнтів	Загальна кількість правил
КПІДК	Так	Так	Так	0
НПІЕК	3-в-1	Ні	Ні	N^3
	2-в-1	Ні	Ні	N^2
	1-в-1	Так	Так	N
	1-в-3	Так	Так	$3N$

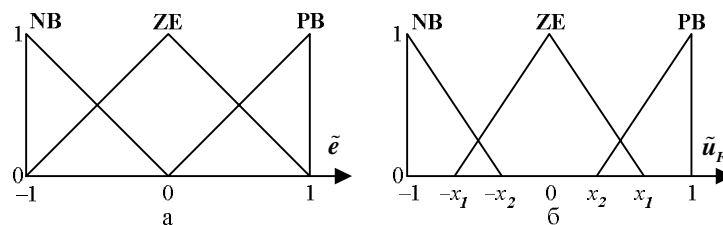


Рис. 5 – Функції приналежності: а – для нормованого сигналу помилки \tilde{e} ; б – вихідного сигналу нечіткого блоку контролера \tilde{u}_F .

У поданій структурі НПІДК використовується два параметри нечіткого налаштування x_1 і x_2 .

Для зменшення складності обчислень керуючих впливів НПІДК пропонується використовувати мінімальну кількість нечітких змінних, то є тільки дві –

Порівняльна таблиця характеристик структур представлена в таблиці 3.

У найпростішому варіанті структури НПІДК з одним вхідною змінною в [20] запропоновано використовувати три нечітких правила, 6 розрахункових параметрів і два параметри нечіткої настройки x_1 і x_2 трьох нечітких змінних (N, Z, P).

Для нормованого сигналу помилки \tilde{e} і дефазікованого вихідного сигналу нечіткого блоку контролера \tilde{u}_F база правил такого НПІДК має вигляд:

Правило 1: якщо ($\tilde{e} \in N$), ТО ($\tilde{u}_F \in N$);

Правило 2: якщо ($\tilde{e} \in Z$), ТО ($\tilde{u}_F \in Z$); (11)

Правило 3: якщо ($\tilde{e} \in P$), ТО ($\tilde{u}_F \in P$);

де нечітка змінна N означає "негативний", Z – "близько нуля", P – "позитивний".

Функції приналежності такого контролера для \tilde{e} і \tilde{u}_F показані на рис. 5.

N і P, які відповідають безлічі нечітких значень ФП – "негативний" і "позитивний", відповідно [21].

Отже, НПІДК буде має функції приналежності для \tilde{e} і \tilde{u}_F , як показано на рис. 6.

Відповідно, база правил НПІДК прийме вигляд:

- Правило 1: якщо $(\tilde{e} \in N)$, ТО $(\tilde{u}_F \in N)$;
 - Правило 2: якщо $(\tilde{e} \in P)$, ТО $(\tilde{u}_F \in P)$.
- (12)

Зменшення числа функцій приналежності для нечітких контролерів, дозволяє скоротити число параметрів нечіткої настройки.

У новій структурі НПДК і введеної бази правил (12) є тільки один параметр нечіткої настройки, що дозволяє скоротити трудомісткість обчислень параметрів НПДК. Графічний приклад формування вихідної дії показаний на рисунку 7.

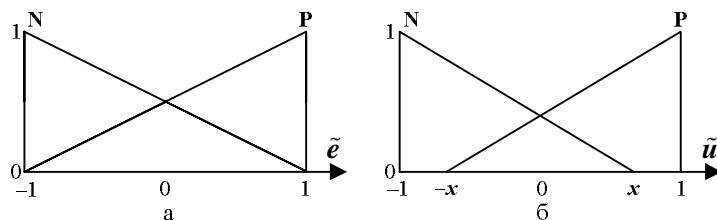


Рис. 6 – Функції приналежності: а – для нормованого сигналу помилки; б – вихідного сигналу нечіткого блоку контролера.

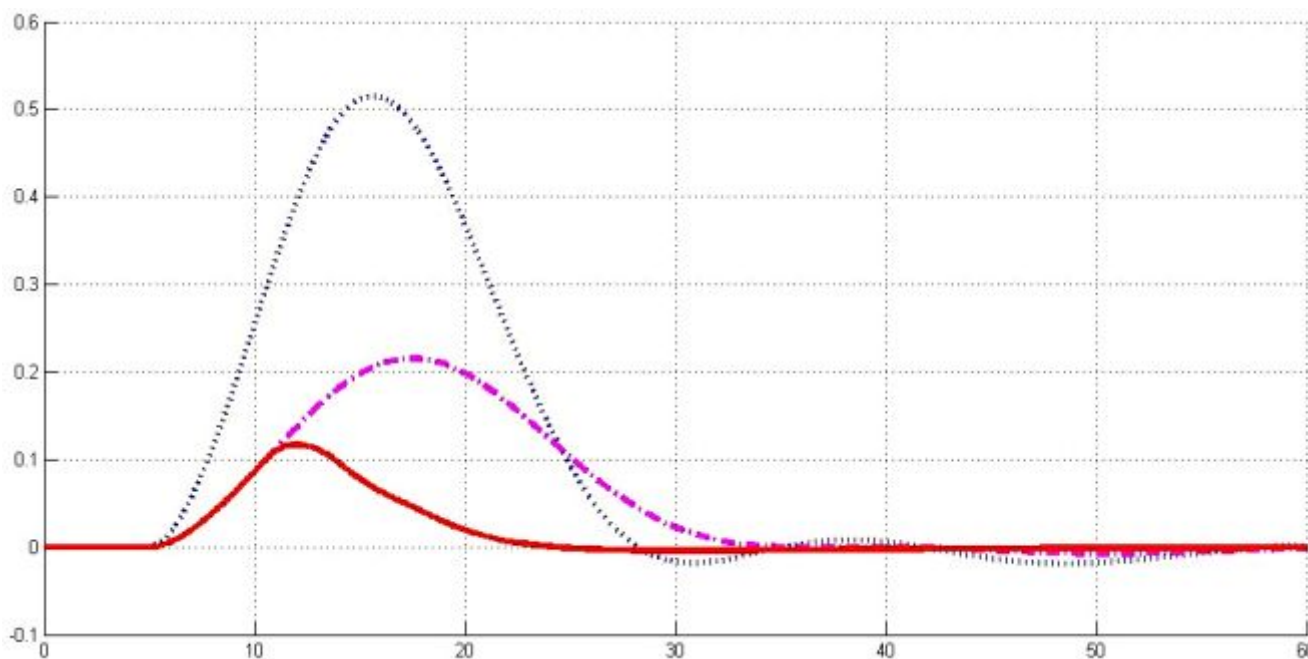


Рис. 7 – Перехідна характеристика для КПДК, НПДК з трикутними та гаусовими ФП.

Виходячи з правила простоти, замість трикутних ФП можна також використовувати гаусові ФП, так як вони визначаються такою ж кількістю параметрів.

Результати моделювання. Було розглянуто два НПДК зі структурою 1-в-1 структурна схема якого представлена на рисунку 8, які відрізняються формою ФП.

Виходячи з математичної моделі процесу карбонізації у виробництві кальцинованої води, управління можна звести до каналу температури, при цьому, передавальна функція об'єкта управління, отримана на основі аналітичних розрахунків та експериментальних даних буде мати вигляд:

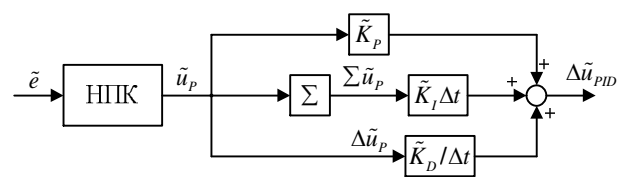


Рис. 8 – НПДК з одним входом і відображенням нечіткого виводу 1-в-1

$$W(s) = \frac{1.47 e^{-5s}}{41s^2 + 15s + 1} \tag{13}$$

На рисунку 8 показано порівняння перехідних характеристик контурів управління, які включають КПДК (пунктир), та два КПДК з блоком нечіткої настройки які відрізняються формою ФП – трикутними (точка-тире) та гаусовими (суцільна), відповід-

но. Результати моделювання наведені в таблиці 4.

Таблиця 4 – Результати моделювання

Параметри	КПДК	НПДК з трикутними ФП	НПДК з гаусовими ФП
Динамічна похибка	0.51486	0.2153	0.11679
Час регулювання при $D_{stat} = 0.005$	55.6	55.2	22.5
Статична похибка при $T_{reg} = 20$	0.36553	0.19676	0.018242
Підінтегральна площа	6.4399	3.1266	1.027
Kp	1.8849	1.8849	0.01
Ki	0.16919	0.16919	7.4226
Kd	6.6869	6.6869	78.9516

З наведених результатів (рис. 8 та таблиця 4) видно, що кращі характеристики дає НПДК з гаусовими ФП. Однак настроювальні ПД параметри можуть знаходитись на фізичних границях можливостей контролера, що в свою чергу може надати негативний вплив при використанні таких регуляторів в реальних умовах.

Висновки.

Проведено інформаційно-аналітичний огляд літератури щодо використання теорії нечітких множин при розробці та застосуванні нечітких контролерів в промисловості.

На підставі запропонованих методів синтезу нечітких ПД регуляторів розроблені структури НПДК з різними наборами параметрів нечіткого налаштування.

Побудовані графіки перехідних процесів контуру регулювання. З результатів видно, що будь який НПДК дає кращі показники, ніж класичний контролер, та найкращими з них є НПДК з гаусовими ФП.

Список літератури

1. Герман Э. Е. Современное состояние и перспективы развития систем нечеткого управления / Э. Е. Герман // Вісник НТУ «ХП». – 2008. – № 57. – С. 37 – 44.
2. Lee C. C. *Fuzzy Logic in control systems: Fuzzy Logic Controller. Part I.* IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1990, Vol. 20, No 2, pp. 404 – 418.
3. Mamdani E. H. *Application of fuzzy algorithms for the control of a dynamic plant.* Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1974, Vol. 121, No 12, pp. 1585 – 1588.
4. Takagi T., Sugeno M. *Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control.* IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1985, No 1, pp. 116 – 132.

5. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: учебник / [под ред. Н. Д. Егунова]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 744 с.
6. Jantzen J. *Design of fuzzy controllers* [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://faculty.petra.ac.id/resmana/private/fuzzy/design.pdf>.
7. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / [под ред. Д. А. Поспелова]. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 312 с.
8. Герман Э. Е. Синтез гибридных контроллеров для управления процессами выращивания крупногабаритных монокристаллов / Э. Е. Герман // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 3. – С. 53 – 56.
9. Li H.-X. *A comparative design and tuning for conventional fuzzy control.* IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B. Cybernetics, 1997, Vol. 27, No 5, pp. 884 – 889.
10. Yasunobu S., Hasegawa T. *Evaluation of an automatic container crane operation system based on predictive fuzzy control.* Control Theory and Advanced Technology, 1986, No 2, pp. 419 – 432.
11. Yasunobu S., Hasegawa T. *Predictive fuzzy control and its application for automatic container crane operation system.* Proceedings of 2-nd International Fuzzy Systems Association Congress, 20-25 July, 1987. – Tokyo, Japan, 1987, pp. 349 – 352.
12. Fujitec F. *FLEX-8800 series elevator group control system.* Osaka, Japan, Fujitec Co., Ltd., 1988, 64 p.
13. Aström K. J., Hang C. P., Person P., Ho W. K. *Towards intelligent PID control.* Automatica, 1992. – Vol. 28, No 1, pp. 1 – 9.
14. Santos M., Dormido S., de la Cruz J. M. *Fuzzy-PID Controllers vs. Fuzzy PI Controllers.* Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 8-11 Sep., 1996. New Orleans, USA, 1996, Vol. 3, pp. 1598 – 1604.
15. Bicker R., Hu Z., Burn K. *Self-tuning Fuzzy Robotic Force Controller.* Proceedings of the 14th CISM-IFTOMM Symposium on the Theory and Practice of Robots and Manipulators, RoManSy, 25-27 Apr., 2002, Udine, Italy, 2002, pp. 119 – 126.
16. Huang H. *Nonlinear PID controller and its applications in power plants.* Proceedings of PowerCon 2002, International Conference on Power System Technology, 13-17 Oct., 2002, Vol. 3, pp. 1513 – 1517.
17. Yen J., Langari R., Zadeh L. A. *Industrial applications of fuzzy control and intelligent systems.* New-York, IEEE Press, 1995, 458 p.
18. Ying H., Siler W., Buckley J. J. *Fuzzy control theory: A nonlinear case.* Automatica, 1990, Vol. 26, pp. 513 – 520.
19. Герман Э. Е. Методы проектирования нечетких ПИД контроллеров / Э. Е. Герман, А. И. Гапон, Л. В. Дербунович // Вісник НТУ «ХП». – 2005. – № 17. – С. 15 – 21.
20. Chen G. *Conventional and fuzzy PID controllers: An overview.* International Journal of Intelligent Control and Systems, 1996, Vol. 1, pp. 235 – 246.
21. Герман Э. Е. Оптимизация параметров нечетких ПИД контроллеров / Э. Е. Герман, Л. В. Дербунович, С. В. Белецкий // Вісник НТУ «ХП». – 2007. – № 36 – С. 3 – 8.

References (transliterated)

1. German E. E. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya sistem nechetkogo upravleniya* [Up-to-date and development prospects of fuzzy control systems]. Visnyk NTU "KhPI" [Bulletin of the National Technical University "KhPI"], Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2008, No 57, pp. 37 – 44.
2. Lee C. C. *Fuzzy Logic in control systems: Fuzzy Logic Controller. Part I.* IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1990, Vol. 20, No 2, pp. 404 – 418.

3. Mamdani E. H. *Application of fuzzy algorithms for the control of a dynamic plant*. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1974, Vol. 121, No 12, pp. 1585 – 1588.
4. Takagi T., Sugeno M. *Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1985, No 1, pp. 116 – 132.
5. *Metody robustnogo, neyro-nechetkogo i adaptivnogo upravleniya: Uchebnik* [Methods of robust, neuro-fuzzy and adaptive control: a textbook] pod red. N. D. Egupova. Moskva, MG TU im. N.E. Bauman Publ., 2002, 744 c.
6. Jantzen J. *Design of fuzzy controllers*. Available at: <http://faculty.petra.ac.id/resmana/private/fuzzy/design.pdf>.
7. *Nechetkie mnozhestva v modelyah upravleniya i iskusstvennogo intellekta* [Fuzzy sets in control models and artificial intelligence] pod red. D. A. Pospelova. Moskva, Nauka Publ, Gl. red. fiz.-mat. lit., 1986, 312 p.
8. German E. E. *Sintez gibridnyh kontrollerov dlya upravleniya protsessami vyrashchivaniya krupnogabaritnyh monokristallov* [Synthesis of hybrid controllers for control of growing large single-crystals process]. Informatsiyno-keruyuchi sistemi na zaliznichnomu transportu, 2010, No 3, pp. 53 – 56.
9. Li H.-X. *A comparative design and tuning for conventional fuzzy control*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B. Cybernetics, 1997, Vol. 27, No 5, pp. 884 – 889.
10. Yasunobu S., Hasegawa T. *Evaluation of an automatic container crane operation system based on predictive fuzzy control*. Control Theory and Advanced Technology, 1986, No 2, pp. 419 – 432.
11. Yasunobu S., Hasegawa T. *Predictive fuzzy control and its application for automatic container crane operation system*. Proceedings of 2-nd International Fuzzy Systems Association Congress, 20-25 July, 1987. – Tokyo, Japan, 1987, pp. 349 – 352.
12. Fujitec F. *FLEX-8800 series elevator group control system*. Osaka, Japan, Fujitec Co., Ltd., 1988, 64 p.
13. Aström K. J., Hang C. P., Person P., Ho W. K. *Towards intelligent PID control*. Automatica, 1992. – Vol. 28, No 1, P. 1 – 9.
14. Santos M., Dormido S., de la Cruz J. M. *Fuzzy-PID Controllers vs. Fuzzy PI Controllers*. Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 8-11 Sep., 1996. New Orleans, USA, 1996, Vol. 3, pp. 1598 – 1604.
15. Bicker R., Hu Z., Burn K. *Self-tuning Fuzzy Robotic Force Controller*. Proceedings of the 14th CISM-IFTOMM Symposium on the Theory and Practice of Robots and Manipulators, RoManSy, 25-27 Apr., 2002, Udine, Italy, 2002, pp. 119 – 126.
16. Huang H. *Nonlinear PID controller and its applications in power plants*. Proceedings of PowerCon 2002, International Conference on Power System Technology, 13-17 Oct., 2002, Vol. 3, pp. 1513 – 1517.
17. Yen J., Langari R., Zadeh L. A. *Industrial applications of fuzzy control and intelligent systems*. New-York, IEEE Press, 1995, 458 p.
18. Ying H., Siler W., Buckley J. J. *Fuzzy control theory: A nonlinear case*. Automatica, 1990, Vol. 26, pp. 513 – 520.
19. German E. E., Gapon A. I., Derbunovich L. V. *Metody proektirovaniya nechetkih PID kontrollerov* [Designing methods of fuzzy PID controllers]. Visnyk NTU "KhPI" [Bulletin of the National Technical University "KhPI"], Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2005, №17, pp. 15 – 21.
20. Chen G. *Conventional and fuzzy PID controllers: An overview*. International Journal of Intelligent Control and Systems, 1996, Vol. 1, pp. 235 – 246.
21. German E. E., Derbunovich L. V., Beletskiy S. V. *Optimizatsiya parametrov nechetkih PID kontrollerov* [Optimization of parameters of indistinct PID controllers]. Visnyk NTU "KhPI" [Bulletin of the National Technical University, "KhPI"], Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2007, No 36, pp. 3 – 8.

Надійшло (received) 04.04.16

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Використання нечіткого регулятора для управління відділенням карбонізації у виробництві кальцинової соди / Е. Є. Герман, О. Г. Шутинський, О. М. Маковоз // Вісник НТУ «ХПІ». – Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 35 (1207). – С. 70 – 79. – Бібліогр.: 21 назв. – ISSN 2079-0821.

Использование нечеткого регулятора для управления отделением карбонизации в производстве кальцинированной соды / Э. Е. Герман, А. Г. Шутинский, А. Н. Маковоз // Вісник НТУ «ХПІ». – Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 35 (1207). – С. 70 – 79. – Бібліогр.: 21 назв. – ISSN 2079-0821.

Using fuzzy controller to control the carbonation department in the production of soda ash / E. E. German, O. G. Shutinsky, O. M. Makovoz // Bulletin of NTU "KhPI". – Series: Chemistry, Chemical Engineering and Ecology. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – No 35 (1207). – P. 70 – 79. – Bibliogr.: 26 names. – ISSN 2079-0821.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Герман Едуард Євгенович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автоматизації хіміко-технологічних систем та екологічного моніторингу; тел.: (050) 301-26-62; e-mail: Edward.E.German@gmail.com.

Герман Эдуард Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры автоматизации химико-технологических систем и экологического мониторинга; тел.: (050) 301-26-62; e-mail: Edward.E.German@gmail.com.

German Eduard Eugenovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Automation of Chemical-engineering Processes and Environmental monitoring; tel.: (050) 301-26-62; e-mail: Edward.E.German@gmail.com.

Шутинський Олексій Григорович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автоматизації хіміко-технологічних систем та екологічного моніторингу; тел.: (063) 480-58-25.

Шутинский Алексей Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры автоматизации химико-технологических систем и экологического мониторинга; тел.: (063) 480-58-25.

Shutynsky Oleksiy Grygorovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Automation of Chemical-engineering Processes and Environmental monitoring; tel.: (063) 480-58-25.

Маковоз Олександра Миколаївна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; тел.: (063) 451-27-85 alex.mako171@gmail.com.

Маковоз Александра Николаевна – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент; тел.: (063) 451-27-85 alex.mako171@gmail.com.

Makovoz Oleksandra Mykolayivna – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student; tel.: (063) 451-27-85 alex.mako171@gmail.com