

Adaptive control methods

УДК 519.5

doi: 10.20998/2522-9052.2019.2.03

Е. Є. Герман, О. Г. Шутинський, І. Г. Лисаченко, С. Д. Деменкова

Національний технічний університет «ХПІ», Харків, Україна

ОПТИМАЛЬНИЙ НЕЧІТКИЙ РЕГУЛЯТОР В СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ КАРБОНІЗАЦІЇ У СОДОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Анотація. Предметом дослідження в даній статті є процедура синтезу нечіткого контролера в системі управління відділенням карбонізації у виробництві кальцинованої соди. **Метою роботи** є розробка оптимального нечіткого контролера, використання якого в системі управління зумовлювало оптимальний результат згідно встановленим критеріям. **Завдання.** На основі існуючих підходів до синтезу нечіткого контролера розробити процедуру синтезу оптимального нечіткого ПІД контролера (НПІДК) відповідно до цілей управління. Процедура побудови контролера залежить як від структури контролера, так і від параметрів нечіткого налаштування, таких як кількість функцій приналежності, їх вигляд, параметри, що визначають функцію приналежності. В результаті проведеного моделювання системи управління відділенням карбонізації було показано залежність кінцевого результату від параметрів нечіткого налаштування. **Висновки.** На підставі запропонованих методів синтезу розроблено структури оптимальних НПІДК з різними наборами параметрів нечіткого налаштування. Показано, що будь який оптимальний нечіткий ПІД регулятор дає кращі показники, ніж класичний контролер, та найкращим з них є регулятор, в якому блок нечіткого налаштування має гаусові функції приналежності.

Ключові слова: карбонізація; нечіткий ПІД контролер; функції приналежності; параметри нечіткого налаштування.

Вступ

Моделювання промислових процесів, і зокрема карбонізації амонізованого розсолу у виробництві кальцинованої соди, є складною задачею. Це викликано насамперед нелінійністю процесів, які протікають як в просторі так і за часом. Одним з можливих варіантів вирішення цього питання є впровадження в систему управління технічних засобів, які мають можливість функціонувати за алгоритмами, що базуються на використанні методів нечіткої логіки та нечіткого управління.

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 з іншого. Основним завданням дослідження є розробка оптимального нечіткого контролера (НЛК), який буде адаптуватись до змін процесу.

Рішення даної задачі можна отримати без застосування промислових систем, якщо використати експериментальну установку для отримання математичної моделі, а потім провести моделювання процесу управління за допомогою сучасних апаратних та програмних засобів.

Огляд питання в сучасній літературі

Комп'ютеризація технологій промислового виробництва і підвищення його ефективності за рахунок використання останніх досягнень є необхідною умовою сучасності. Це викликає необхідність створення швидко переналагоджуваного гнучкого тех-

нологічного обладнання, а, отже, й відповідних програмних систем управління цим обладнанням [1].

Починаючи з 80-х років ХХ століття, а особливо останнє десятиріччя, спостерігається глобальна тенденція в поширенні використання інтелектуальних інформаційно-керуючих систем в різних галузях науки і техніки. До них відносяться і системи нечіткого управління (СНУ), які більшістю фахівців розглядаються як один з напрямків сучасних технологій управління [2]. 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 СНУ складається з 4 основних компонентів (рис. 1) [3]:

- база знань (БЗ),
- блок фазифікації (БФ), або фазифікатор,
- блок дефазифікації (БДФ), або дефазифікатор,
- логічна система прийняття рішень (ЛСПР).

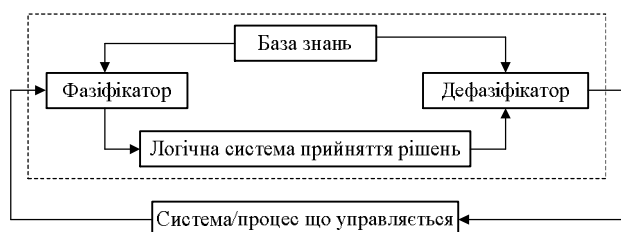


Рис. 1. Структура системи нечіткого управління

База знань містить всі знання регулятора і включає базу правил (БП) нечіткого управління (НУ) і базу даних (БД). БД описує визначення об'єктів (факти, умови, концепції) і визначення фу-

нкій приналежності, що використовуються в правилах НУ. БП містить інформацію про те, як ці об'єкти можуть використовуватися для виведення нових керуючих впливів. Центральна частина СНУ – ЛСПР – це механізм, який здійснює процедуру виводу по правилах нечіткого управління і задає умови для визначення необхідних управляючих впливів. БФ відображає значення з дійсного простору в нечі-

тке, в той час як БДФ виконує зворотну функцію [4]. В даний час у більшості промислових додатків використовуються контролери і моделі двох типів Мамдані [5] і Такагі-Сугено [6]. Більшість з них базуються на типових процедурах, властивим традиційним нечітким контролерам: фазифікації, агрегації локальних висновків, імплікації і дефазифікації. Функціональна модель НЛК представлена на рис. 2.

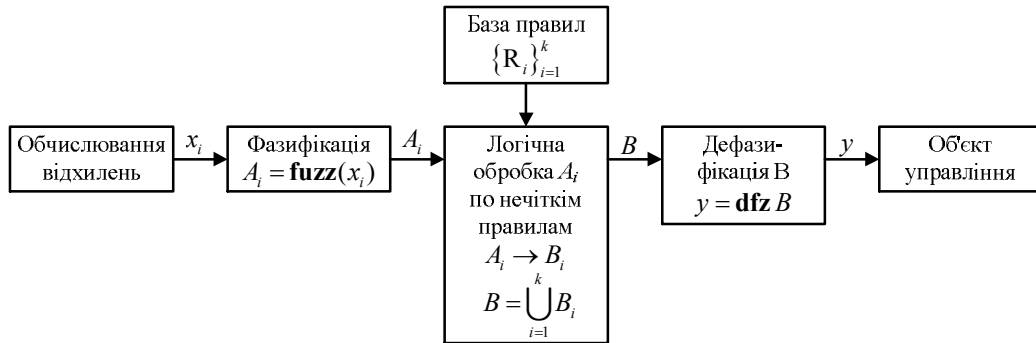


Рис. 2. Функціональна модель нечіткого логічного контролера

Обчислення керуючих впливів в НЛК складається з чотирьох основних етапів:

- обчислення відхилень вхідний фізичної змінної e ;
- фазифікації: перетворення вхідної фізичної змінної в нечітку множину $A_i (i = \overline{1, k}) = \text{fuz}(e_i)$ значень вхідної змінної;
- логічна обробка множини нечітких змінних A_i відповідно до бази правил НЛК 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:

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

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

$$\{R_i\}_{i=1}^k = \begin{cases} R_1 : A_1 \circ R_1 = A_1 \circ (A_1 \rightarrow B_1); \\ R_2 : A_2 \circ R_2 = A_2 \circ (A_2 \rightarrow B_2); \\ \dots \\ R_k : A_k \circ R_k = A_k \circ (A_k \rightarrow B_k); \end{cases} \tag{3}$$

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

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 R_i ; B – загальний нечіткий висновок з бази правил $\{R_i\}_{i=1}^k$; fuz, dfz – функції (операції) фазифікації і дефазифікації, відповідно.

На практиці знаходять застосування різноманітні структури НЛК. Наприклад, в [7] такі контролери реалізуються у вигляді цифрових пристроїв у

двох варіантах: НЛК прямої дії та інкрементний НЛК.

В останні роки інтенсивна ведуться дослідження по реалізації гібридних нечітких ПД контролерів [8] (рис. 3). В цьому випадку до складу КПДК включений додатковий блок, що використовує нечіткі висловлювання щодо нелінійної залежності вхід-вихід. У гібридному контролері на базі нечітких висловлювань поліпшуються динамічні властивості системи.

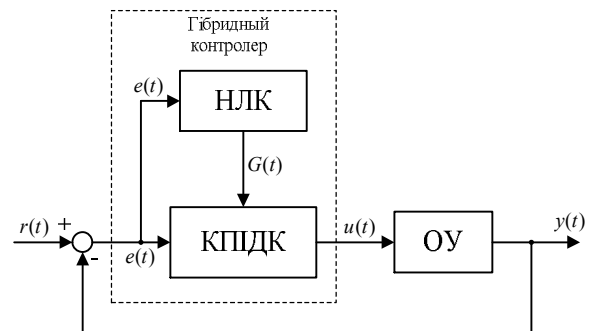


Рис. 3. Структурна схема гібридного контролера на основі нечіткої бази правил, де $r(t)$ – керуючий вплив або уставка; $e(t)$ – сигнал неузгодженості; $u(t)$ – вихід контролера; $y(t)$ – регульована величина

Ряд авторів пропонує застосовувати НЛК виключно для управління нелінійними об'єктами, однак лінійними об'єктами треба управляти тільки за допомогою класичних ПД контролерів (КПДК). Однак, як обгрунтовано в [9], управління базується на таких показниках як статична помилка, перерегулювання та час регулювання, які є нелінійними функціями параметрів ПД контролера, навіть для лінійного об'єкту управління.

Таким чином, будь-яке завдання управління, незалежно від виду контролера (лінійного або нелінійного) можна розглядати як нелінійну. Тому НЛК, який реалізує нелінійне відображення вхідів і виходів, набагато краще відповідає завданню оптимізації за нелінійним критерієм [10].

Однак найбільшою проблемою в реалізації нечіткого управління є налаштування нечіткого контролера. Існує кілька підходів до проектування НППДК [11], 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.

Мета роботи та постановка задачі

В [12] було розглянуто методи використання НППДК в промислових системах управління. Звідки можна зробити висновок, що в багатьох прикладних задачах, системи, що використовують у своїй основі нечітку логічне управління, за своїми характеристиками значно перевищували своїх класичних аналогів, проте наскільки НЛК в тому чи іншому випадку буде краще його класичного аналога залишається питанням. Тому виникає завдання моделювання кожного конкретного процесу, використовуючи формалізовані правила конфігурації та налаштування параметрів НЛК.

Структура нечіткого контролера і формування бази правил

Методи проектування нечітких контролерів залишаються нечіткими процесами на увазі відсутності

суворих і ефективних аналітичних методів проектування на противагу з методами проектування контролерів в рамках лінійної теорії управління. Для НППДК множину конструктивних параметрів в узагальненому вигляді можна розділити на дві групи: структурні параметри і параметри налаштування [13]. Структурні параметри контролера визначаються незалежно, при проектуванні до початку його використання, в той час як параметри налаштування розраховуються в режимі онлайн для коригування функціонування контролера, з метою підвищення якості системи управління та забезпечення її адаптивних властивостей.

Наразі розроблено велику кількість різних варіантів структур ПД подібних нечітких контролерів. В [11] наведені основні варіанти структур НППДК розрізняються за кількістю вхідних сигналів і керуючих впливів. Порівняльна таблиця характеристик структур в залежності від кількості входів та виходів представлена в табл. 1. Послідовність операцій, що виконуються НППДК з відображенням 1-в-1, представлена на рис. 4.

У найпростішому варіанті структури НППДК з одним вхідної змінної в [14] запропоновано використовувати три нечітких правила, 6 розрахункових параметрів і два параметри нечіткої настройки x_1 і x_2 трьох нечітких змінних (N, Z, P).

Таблиця 1 – Характеристики різних структур НППДК

Тип контролера	Роздільне обчислення управляючих впливів	Незв'язність входів	Незалежність налаштування коефіцієнтів	Загальна кількість правил
КППДК	Так	Так	Так	0
НППДК	3-в-1	Ні	Ні	N^3
	2-в-1	Ні	Ні	N^2
	1-в-1	Так	Ні	N
	1-в-3	Так	Так	$3N$

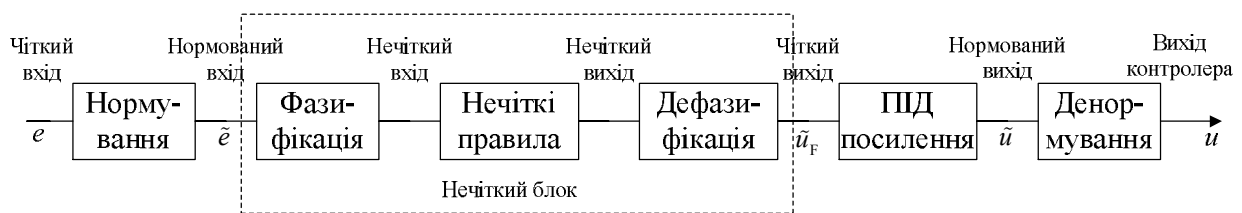


Рис. 4. Послідовність операцій в НППДК

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

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

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

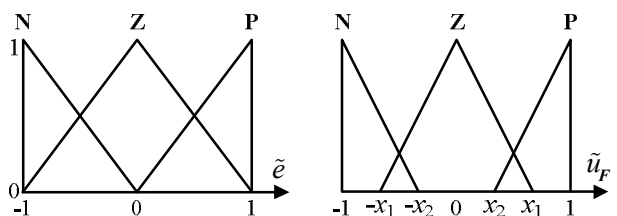


Рис. 5. ФП для нормованого сигналу помилки \tilde{e} вихідного сигналу нечіткого блоку \tilde{u}_F з БЗ (4)

Для зменшення складності обчислень керуючих впливів НППДК пропонується використовувати мінімальну кількість нечітких змінних, то є тільки дві – N і P, які відповідають безлічі нечітких значень

ФП – “негативний” і “позитивний”, відповідно [15]. Отже, НПІДК буде має функції приналежності для \tilde{e} і \tilde{u}_F , як показано на рис. 6.

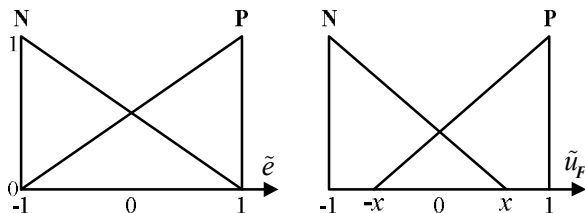


Рис. 6. ФП для нечіткого блоку контролера з БЗ (5).

Відповідно, база правил нечіткого ПІД контролера прийме вигляд:

- Правило 1: якщо ($\tilde{e} \in N$), ТО ($\tilde{u}_F \in N$);
 - Правило 2: якщо ($\tilde{e} \in P$), ТО ($\tilde{u}_F \in P$).
- (5)

Зменшення числа функцій приналежності для нечітких контролерів, дозволяє скоротити число параметрів нечіткої настройки. У новій структурі НПІДК і введеної бази правил (5) є тільки один параметр нечіткої настройки x , що дозволяє скоротити погрішність і трудомісткість обчислень параметрів НПІДК. Графічний приклад формування вихідної дії показаний на рис. 7.

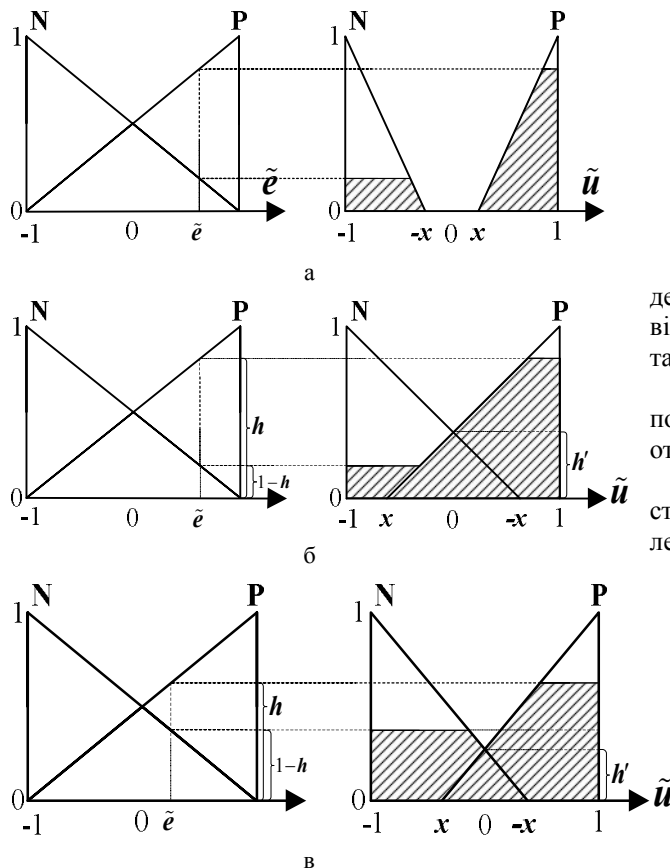


Рис. 7. Нечіткий логічний висновок в НПІДК 1-в-1 з двома функціями належності на вході і виході

а – $x \geq 0$; б – $x < 0$, $h' \geq 1 - h$; в – $x < 0$, $h' < 1 - h$

Виходячи з правила простоти, замість трикутних ФП можна також використовувати гаусові ФП,

так як вони визначаються такою ж кількістю параметрів.

Розробка оптимального нечіткого ПІД регулятора

Вище обговорювалося синтез НПІДК за такими напрямками як структура контролера і формування бази правил. Як було показано, база правил контролера залежить від параметрів нечіткої настройки, а вибір цих параметрів є одним з основних завдань синтезу НПІДК.

Одним з варіантів визначення параметрів нечіткої настройки є використання оптимізаційних методів. Таким чином НПІДК, параметри нечіткої настройки якого отримані шляхом оптимізації, будемо називати оптимальним НПІДК (ОНПІДК).

Сама оптимізація буде провадитися виходячи їх відповідних оцінок якості [16]:

– інтеграл від квадрата помилки (ІКО):

$$IKO = \int_0^T e^2(t) dt,$$

– інтеграл від модуля помилки (ІМО):

$$IMO = \int_0^T |e(t)| dt,$$

– інтеграл від зваженого модуля помилки (ІЗМО):

$$IZMO = \int_0^T t |e(t)| dt,$$

– інтеграл від зваженого квадрата помилки (ІЗКО):

$$IZKO = \int_0^T te^2(t) dt,$$

де T – верхня межа інтегрування, що фізично відповідає часу моделювання, вибирається довільно, але так, щоб інтеграл прагнув до кінцевому значення.

Як показує практика моделювання, найкращі показники якості системи управління зазвичай отримують при використанні ІЗМО.

Нижче розглянемо кілька варіантів НПІДК зі структурою 1-в-1, структурна схема якого представлена на рис. 8.

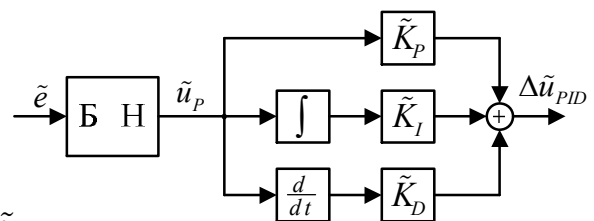


Рис. 8. НПІДК з одним входом і відображенням нечіткого виводу 1-в-1

Варіант 1. Для початку визначимо оптимальні параметри контролера без блоку нечіткої настройки (класичний ПІД контролер).

Варіант 2. Додамо в КПІДК блок нечіткої настройки (рис. 9), що містить по 3 трикутні ФП на вході і на виході.

Варіант 3. Оптимізуємо ПД параметри контролера з урахуванням блоку нечіткої настройки, поданим в попередній контролер.

Варіант 4. Блок нечіткої настройки містить по 2 трикутні ФП на вході і на виході. Оптимізуємо як ПД параметри контролера, так і параметри нечіткої настройки.

Варіант 5. Блок нечіткої настройки містить по 3 гаусові ФП на вході і на виході. Оптимізуємо як ПД параметри контролера, так і параметри нечіткої настройки.

Варіант 6. Блок нечіткої настройки містить по 2 гаусові ФП на вході і на виході. Оптимізуємо як ПД параметри контролера, так і параметри нечіткої настройки.

Результати моделювання контуру управління з використанням оптимального нечіткого регулятора

Виходячи з математичної моделі процесу карбонізації у виробництві кальцинованої води, управління можна звести до каналу температури. При цьому, модель об'єкту управління описана у вигляді передавальної функції. Ця модель, яка була отримана на основі аналітичних розрахунків та експериментальних даних, матиме вигляд:

$$W(s) = \frac{1.47e^{-5s}}{41s^2 + 15s + 1} \quad (6)$$

Математична модель контуру була реалізована в системі MATLAB з залученням апарату мови візуального програмування Simulink. Алгоритми нечіткого виводу були реалізовані при використанні Fuzzy Logic Toolbox.

В якості зміни вхідної дії було обрано ступінчастий сигнал.

Результати порівнювалися з аналогічними системами управління на основі КПКДК.

На рис. 9 показано порівняння перехідних характеристик контурів управління, які включають КПКДК (пунктир), КПКДК з блоком нечіткої настройки (точка-тире) і ОНПКДК з оптимізованими ПД параметрами (суцільна), відповідно. Результати моделювання наведені в табл. 2.

На рис. 10 показано порівняння перехідних характеристик контурів управління які містять ОНПКДК з оптимізованими ПД параметрами і ОНПКДК з двома ФП на вході і виході, відповідно. Результати моделювання наведені в табл. 3.

На рис. 11 показано порівняння перехідних характеристик контурів управління, що містять ОНПКДК, в яких блоки нечіткого виводу містять на вході і виході по 3 та 2 гаусові функції приналежності відповідно. Результати моделювання наведені в табл. 4.

Порівняльний графік перехідних характеристик контурів регулювання для всіх запропонованих типів регуляторів показаний на рис. 12.

Таблиця 2 – Результати моделювання для перших трьох варіантів регуляторів

	КПКДК	КПКДК с БНН	ОНПКДК с оптим. ПД
Динамічна похибка	0.51486	0.2153	0.11679
Час регулювання при Dstat=0.005	55.6	55.2	22.5
Статична похибка при Treg=20	0.36553	0.19676	0.018242
Підінтегральна площа	6.4399	3.1266	1.027

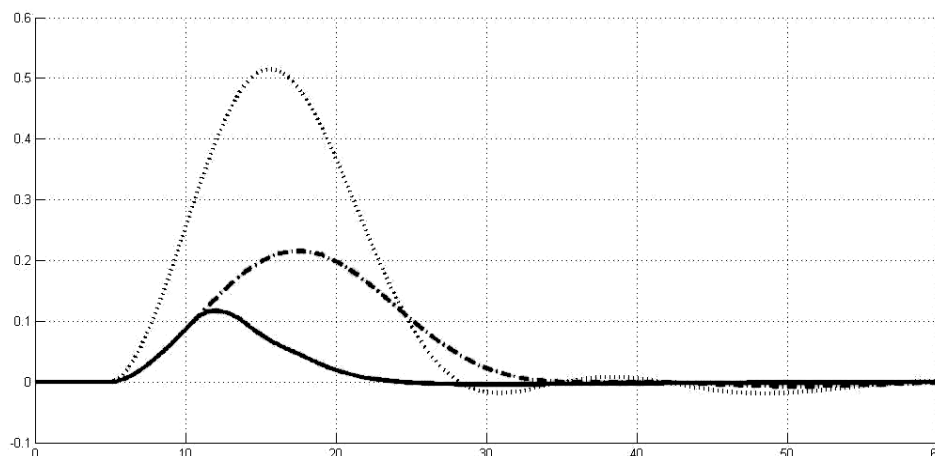


Рис. 9. Перехідна характеристика для КПК, КПК з блоком нечіткого налагодження і ОНПКДК з оптимізованими ПД параметрами.

Таблиця 3 – Результати моделювання для 3-го і 4-го варіантів регуляторів

	ОНПКДК с оптим. ПД	ОНПКДК с 2-мя треугольными ФП
Динамічна похибка	0.11679	0.51486
Час регулювання при Dstat=0.005	22.5	55.6
Статична похибка при Treg=20	0.018242	0.36553
Підінтегральна площа	1.027	6.4399

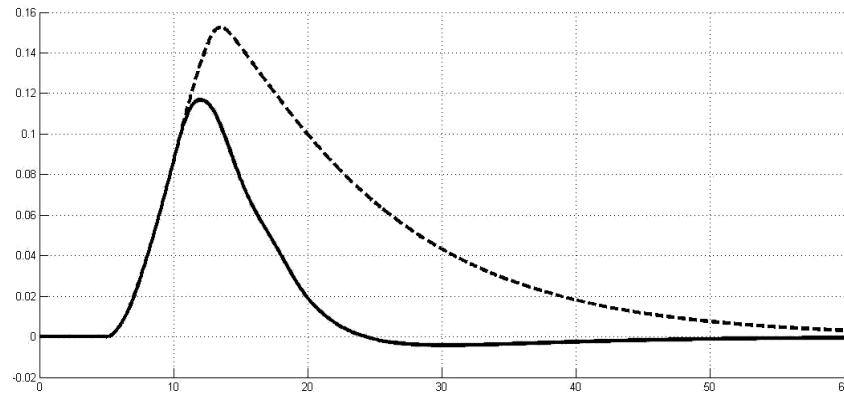


Рис. 10. Перехідна характеристика контуру управління для 3-го і 4-го варіантів регуляторів

Таблиця 4 – Результати моделювання для 5-го і 6-го варіантів регуляторів

	ОНПДК 3-гаус	ОНПДК 2-гаус
Динамічна похибка	0.028742	0.029349
Час регулювання при $Dstat=0.005$	19.05	20
Стагична похибка при $Treg=20$	0.0037506	0.0049289
Підінтегральна площа	0.21525	0.24159

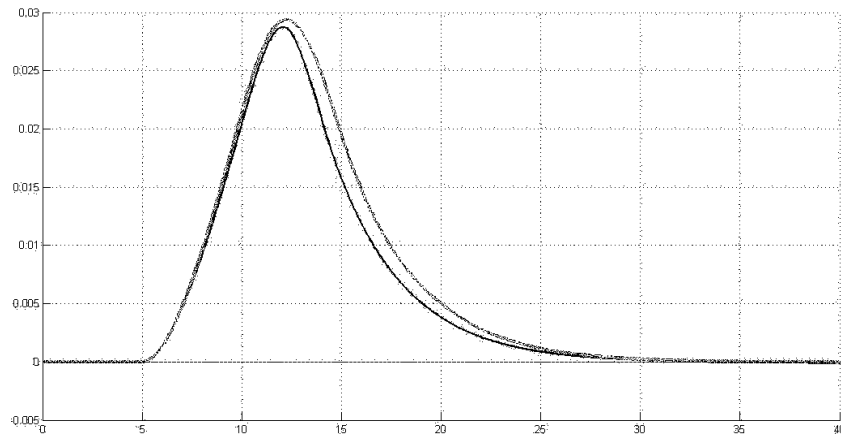


Рис. 11. Перехідна характеристика контуру управління для 5-го і 6-го варіантів регуляторів

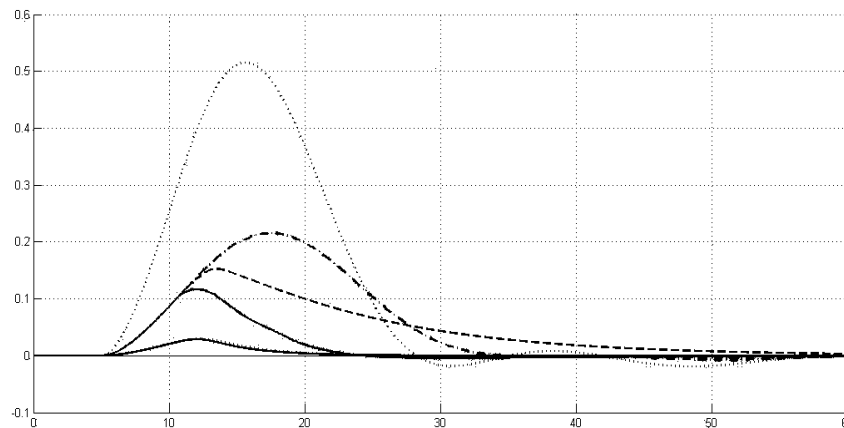


Рис. 12. Перехідні характеристик контурів регулювання для всіх запропонованих варіантів регуляторів

У підсумку проведених досліджень потрібно відмітити, що було представлено декілька типів оптимальних НПДК в залежності від вибору кількості та форми функцій приналежності. З результатів видно, що будь який з запропонованих ОНПДК дає кращі характеристики, ніж класичний ПІД регулятор.

Найкращі характеристики з ОНПДК показали регулятори в яких блок нечіткого налаштування має гаусові функції приналежності.

Висновки

Проведено інформаційно-аналітичний огляд літератури щодо використання теорії нечітких мно-

жин при розробці та застосуванні нечітких контролерів в промисловості.

На підставі запропонованих методів синтезу нечітких ПІД регуляторів розроблені структури оптимальних НППДК з різними наборами параметрів нечіткого налаштування. Побудовані графіки пере-

хідних процесів контуру регулювання для всіх запропонованих регуляторів. Показано, що будь який ОНППДК дає кращі показники, ніж класичний контролер, та найкращими з них є ОНППДК, в яких блок нечіткого налаштування має гаусові функції приналежності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мирошник М.А. Проектирование систем искусственного интеллекта с использованием нечеткой логики / М.А. Мирошник, Э.Е. Герман, В.Г. Котух, Е.В. Загуменная // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2015. – Вып. 182. – С.42-50.
2. Герман Э.Е. Современное состояние и перспективы развития систем нечеткого управления / Э.Е. Герман // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – 2008. – №57. – С. 37–44.
3. Lee C.C. Fuzzy Logic in control systems: Fuzzy Logic Controller – Part I / C.C. Lee // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. – 1990. – Vol. 20, № 2. – P. 404–418.
4. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление: Пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 798 с.
5. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithms for the control of a dynamic plant / E.H. Mamdani // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. – 1974. – T. 121, № 12. – P. 1585–1588.
6. Takagi T. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control / T. Takagi, M. Sugeno // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. – 1985. – T. SMC-15, № 1. – P. 116-132.
7. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: Учебник: под ред. Н.Д. Егупова.. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2002. – 744 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. Jantzen J. Design of fuzzy controllers. [Technical University of Denmark: Dept. of Automation. Lecture notes] / J. Jantzen. – 1998. – P. 27. – Режим доступу до журн.: <http://faculty.petra.ac.id/resmana/private/fuzzy/design.pdf>.
10. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта: под редакцией Д. А. Пospelova. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. – 1986. – 312 с.
11. Герман Э.Е. Методы проектирования нечетких ПИД контроллеров / Э.Е. Герман, А.І. Гапон, Л.В. Дербунович // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ“ХПІ” 2005. -№17– С. 15-21.
12. Герман Е.С. Використання нечіткого регулятора в системі управління карбонізації у содовому виробництві / Герман Е.С., О.Г. Шутинський, О.М. Маковоз // Вісник НТУ «ХПІ». – Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – Х.: НТУ «ХПІ». – № 35. – С. 24–27.
13. German E.E., Zlotov Ye. V. Mathematical modeling of the carbonization column in the production of soda ash. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVI Міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD–2018, 16–18 травня 2018 р.: у 4 ч. Ч. IV (секція 19) / за ред. проф. Сокола Є. І. – Харків: НТУ «ХПІ». – С.164.
14. Chen G. Conventional and fuzzy PID controllers: An overview / G. Chen // International Journal of Intelligent Control and Systems. – 1996. – Vol. 1. – P. 235–246.
15. Герман Э.Е. Оптимизация параметров нечетких ПИД контроллеров / Э.Е. Герман, Л.В. Дербунович, С.В. Белецкий // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – 2007. – № 36 – С. 3–8.
16. Dorf, Richard C. Modern control systems / Richard C. Dorf, Robert H. Bishop // – Boston, Prentice Hall 2014. – 1082 p.

REFERENCES

1. Miroshnik M.A., German E.E., Kotukh V.G., Zagumnennaya E.V. (2015), “Design of artificial intelligence systems with using fuzzy logic”, *Radio engineering: All-Ukr. interdep. sci.-tech. collection*, Vol. 182, pp. 42-50.
2. German E.E. (2008), “Current state and development prospects of fuzzy control systems”, *Herald of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”*, Vol. 57, pp. 37–44.
3. Lee C.C. (1990), “Fuzzy Logic in control systems: Fuzzy Logic Controller – Part I”, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 20, № 2, pp. 404–418.
4. Piegat A. (2009), *Fuzzy Modelling and Control*, BINOM, Knowledge Laboratory, 798 p.
5. Mamdani E.H. (1974), “Application of fuzzy algorithms for the control of a dynamic plant”, *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. Vol 121, № 12, pp. 1585–1588.
6. Takagi T., Sugeno M. (1985), “Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control”, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. Vol 15, № 1, pp. 116-132.
7. *Methods of robust, neuro-fuzzy and adaptive control: Textbook*. ed. by Yegupov N. (2002), Bauman MSTU, 744 p.
8. German E.E. (2010), “Synthesis of hybrid controllers to control of the growing process of large-sized single crystals”, *Information-control systems on railway transport*, Vol. 3, pp. 53–56.
9. Jantzen J. (1998), *Design of fuzzy controllers*. Technical University of Denmark: Dept. of Automation. Lecture notes, available at: <http://faculty.petra.ac.id/resmana/private/fuzzy/design.pdf>.
10. Fuzzy sets in control and artificial intelligence models, ed. by Pospelov D. (1986), Moscow. Science. 312 p.
11. German E.E., Gapon A.I., Derbunovich L.V. (2005), “Design methods for fuzzy PID controllers”, *Herald of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”*. *Automation and instrument making*, Vol. 17, pp. 15-21.
12. German E.E., Shutinsky O.G., Makovoz O.M. (2016), “The use of a fuzzy controller in a carbonization control system in soda production”, *Herald of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”*. *Chemistry, chemical technology and ecology*, Vol. 35, pp. 24–27.

13. German E.E., Zlotov Ye.V. (2018), "Mathematical modeling of the carbonization column in the production of soda ash", *Information technologies: science, techniques, technology, education, health: abstracts of the XXVI International Scientific and Practical Conference MicroCAD*, p.164.
14. Chen G. (1996), "Conventional and fuzzy PID controllers: An overview", *International Journal of Intelligent Control and Systems*. Vol. 1. pp. 235–246.
15. German E.E., Derbunovich L.V., Beletsky S.V. (2007), "Optimization of fuzzy PID controllers parameters", *Herald of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*, Vol. 36, pp. 3-8.
16. Dorf R.C., Bishop R.H. (2014), *Modern control systems*, Boston, Prentice Hall, 1082 p.

Received (Надійшла) 11.04.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 05.06.2019

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Герман Едуард Євгенович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації технічних систем та екологічного моніторингу, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

Eduard German – PhD of tech. sci., Associate Professor of Automation of the Technological Systems and Ecological Monitoring Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: german.khpi@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8221-033X>

Шутинський Олексій Григорович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації технічних систем та екологічного моніторингу, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

Oleksii Shutynskiy – PhD of tech. sci., Associate Professor of Automation of the Technological Systems and Ecological Monitoring Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: shutynskiy@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4288-9309>

Лисаченко Ігор Григорович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації технічних систем та екологічного моніторингу, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

Igor Lysachenko – PhD of tech. sci., Associate Professor of Automation of the Technological Systems and Ecological Monitoring Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: igor_gr.lis@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3723-8587>

Деменкова Світлана Дмитрівна – асистент кафедри автоматизації технічних систем та екологічного моніторингу, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

Svetlana Demenkova – Assistant of Automation of the Technological Systems and Ecological Monitoring Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: svet1972232765@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6596-6605>

Оптимальный нечеткий регулятор в системе управления карбонизации в содовом производстве

Э.Е. Герман, А.Г. Шутинский, И.Г. Лысаченко, С.Д. Деменкова

Аннотация. Предметом исследования в данной статье является процедура синтеза нечеткого контроллера в системе управления отделением карбонизации в производстве кальцинированной соды. Целью работы является разработка оптимального нечеткого контроллера, использование которого в системе управления обусловливало оптимальный результат согласно установленным критериям. **Задача:** на основе существующих подходов к синтезу нечеткого контроллера разработать процедуру синтеза оптимального нечеткого ПИД контроллера (НПИДК) соответствующего целям управления. Процедура построения контроллера зависит как от структуры контроллера, так и от параметров нечеткой настройки, таких как количество функции принадлежности, их вид, параметры, определяющие функцию принадлежности. В результате проведенного моделирования системы управления отделением карбонизации была показана зависимость конечного результата от параметров нечеткой настройки. **Выводы:** на основании предложенных методов синтеза разработаны структуры оптимальных НПИДК с различными наборами параметров нечеткой настройки. Показано, что любой оптимальный нечеткий ПИД регулятор дает лучшие показатели, чем классический контроллер, и лучшими из них являются регуляторы, в которых блок нечеткой настройки имеет гауссовы функции принадлежности.

Ключевые слова: карбонизация; нечеткий ПИД контроллер; функции принадлежности; параметры нечеткой настройки.

Optimal fuzzy controller in the carbonization control system at the soda production

E. German, O. Shutynskiy, I. Lysachenko, S. Demenkova

Abstract. The subject of research in this article is the procedure for the synthesis of a fuzzy controller in the carbonization control system in the production of soda ash. The aim of the work is the development of optimal fuzzy controller, the use of which in the control system will condition the optimal result according to the established criteria. **Task:** based on the existing approaches to the synthesis of FLC, to develop a procedure for the synthesis of the optimal fuzzy PID controller corresponding to the control problems. The procedure for construct of controller depends both on the structure of the controller and on the parameters of fuzzy tuning, such as quantity of the membership function, their appearance, and the parameters that determine the membership function. As a result of the simulation of the carbonization section control system, the dependence of the final result on fuzzy tuning parameters was shown. **Conclusions:** on the basis of the proposed synthesis methods, the structures of optimal FPIDC with different sets of fuzzy tuning parameters were developed. It is shown that any optimal fuzzy PID controller gives better performance than the classic controller, and the best of them are the controller in which the fuzzy tuning block has Gaussian membership functions.

Keywords: carbonization; fuzzy UID controller; membership functions; Fuzzy setup parameters.