

УДК 681.5

Ю.П. Кондратенко, О.В. Козлов

## СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ БАГАТОКОНТУРНОЇ ЦИРКУЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ КОМПЛЕКСУ ЕКОПРОГЕНЕЗИСУ НА НЕЧІТКІЙ ЛОГІЦІ

**Вступ.** Проблема утилізації промислових та побутових органічних відходів є однією з головних екологічних проблем, викликаних розвитком промисловості та ростом урбанізації в багатьох країнах світу. Досить перспективним методом розв'язання даної проблеми є використання технології екопірогенезису (ЕПГ), яка дозволяє повністю утилізувати весь об'єм органічної частини твердих відходів та низькосортного вугілля в екологічно безпечних й енергозберігаючих режимах [1]. Також застосування даної технології дозволяє отримувати на виході рідкі та газоподібні фракції альтернативного палива, придатні для використання у двигунах внутрішнього згорання без додаткового очищення. Для реалізації технології ЕПГ використовуються спеціалізовані технологічні комплекси, які, в свою чергу, являють собою складні багатокомпонентні технічні об'єкти. Автоматизація технологічних комплексів даного типу дозволяє значно підвищити їх ефективність роботи та економічні показники.

Стабілізація заданого значення температури на виході багатоконтурної циркуляційної системи (БЦС) є однією з важливих задач автоматичного керування технологічним процесом ЕПГ [2]. Можливість керування даною температурою з високими показниками якості дає змогу керувати процесом термодеструкції при різній глибині розкладання вуглеводнів від бензину до дизельного палива з достатньо високою точністю [3]. Це дає змогу отримувати на виході рідкі фракції альтернативного палива високої якості з заданою молекулярною масою, а також потребує наявності спеціальної системи автоматичного керування (САК) температурою. Для дослідження ефективності даної САК на стадії її проектування доцільно використовувати методи математичного та комп'ютерного моделювання, які в порівнянні з експериментальними та іншими підходами є досить ефективним та низьковартісним інструментом.

В роботах [4, 5, 6] наведені та докладно розглянуті основні способи математичного моделювання об'єктів керування, що застосовуються для аналізу та синтезу САК. Математичний опис основних теплоенергетичних об'єктів, таких як промислові печі та парові котли, наведений в [5, 7, 8, 9]. Також у науковій літературі є певна кількість публікацій стосовно автоматизації технологічних комплексів ЕПГ та їх основних компонентів [2, 3, 10, 11]. Так, в роботах [12, 13] та [14] наведені розробки математичних моделей та САК піролізного реактора комплексу ЕПГ як об'єкта керування температурою та рівнем завантаженості, відповідно. Що стосується розробки математичної моделі БЦС та синтезу її САК, то ці задачі на даний час залишаються невирішеними.

Аналіз фізичних властивостей та технічних характеристик БЦС як об'єкта керування температурою показує доцільність розробки її математичної моделі на основі принципів та алгоритмів що спираються на теорію нечітких множин та нечітку логіку [15, 16, 17], враховуючи особливості багатоконтурної структури БЦС. Математичні моделі та системи керування, що базуються на нечіткій логіці, розроблені й успішно впроваджені в таких областях, як: керування технологічними процесами, керування транспортом, медична та технічна діагностика, фінансовий менеджмент, біржове прогнозування, розпізнавання образів та ін. [18, 19, 20].

**Метою даної статті** є розробка математичної моделі БЦС комплексу ЕПГ на основі нечіткої логіки та її дослідження у складі САК з різнотипними регуляторами з урахуванням багатоконтурної структури БЦС.

### **1. Принципова та функціональна схеми системи автоматичного керування температурою вихідної точки БЦС**

Принципова схема системи керування температурою вихідної (контрольної) точки БЦС комплексу ЕПГ наведена на рис. 1, де прийнято наступні позначення: БК – блок керування; ДТ – датчик температури; ЛРВ – лінійний регулятор витрати; ВК – вихідний конденсатор; ПВ – повітряний вентилятор; СП – сервопривід; ВН – вентиль; П – охолоджуюче повітря; В – охолоджувальна вода; 1К, 2К, 3К – перший, другий та третій контури охолодження БЦС; ОВ – органічні відходи; ГП – газовий пальник, який нагріває реактор; ГБ – газовий балон із зрідженим газом.

Задача БЦС полягає в тому, щоб охолоджувати парогазову суміш, отриману в процесі розкладання відходів у реакторі, до певної заданої температури в її вихідній точці. Система охолодження БЦС складається з трьох послідовно з'єднаних контурів з різними типами охолодження: 1-й – з нерегульованим повітряним; 2-й – з регульованим повітряним; 3-й – з нерегульованим водяним. Тому реалізацію керування значенням температури в контрольній точці на виході БЦС можливо забезпечити за рахунок зміни витрати охолоджувального повітря 2-го контуру БЦС. Нерегульований повітряний вентилятор забезпечує

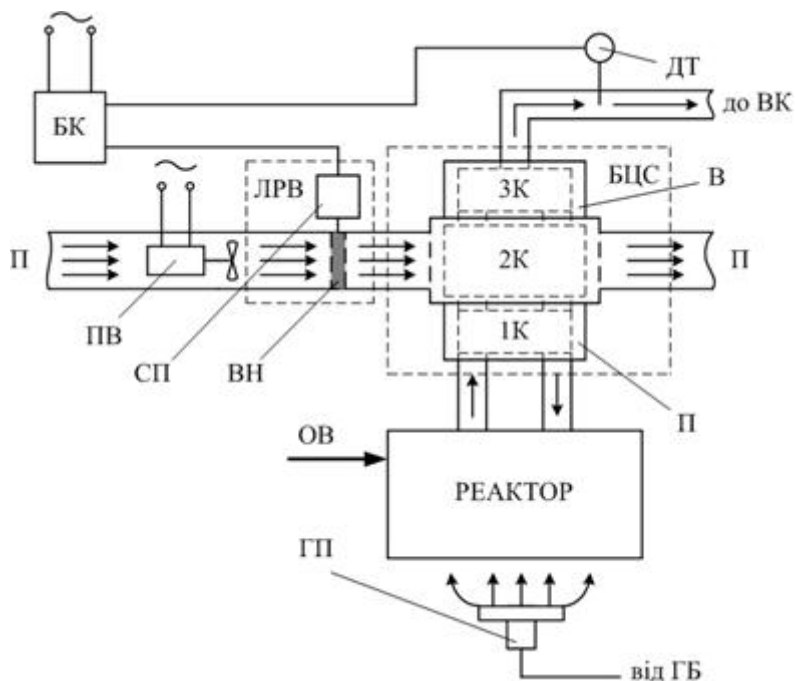


Рис. 1. Принципова схема системи автоматичного керування температурою вихідної точки БЦС

стале значення витрати охолоджуючого повітря через 2-ий контур, яке потім може змінюватися за допомогою лінійного регулятора витрати повітря. ЛРВ повітря, в свою чергу, являє собою вентиль з сервоприводом і має лінійну характеристику залежності витрати повітря від вхідної напруги. На вхід ЛРВ подається сигнал у вигляді напруги постійного струму від 0 до 10 В, згідно якому сервопривід обертає вентиль на певний кут, змінюючи тим самим витрату охолоджувального повітря. Блок керування містить задавальний пристрій (ЗП), суматор та регулятор температури і дозволяє керувати температурою вихідної точки БЦС як в ручному, так і в автоматичному режимах. Функціональна схема системи керування температурою вихідної точки БЦС представлена на рис. 2.

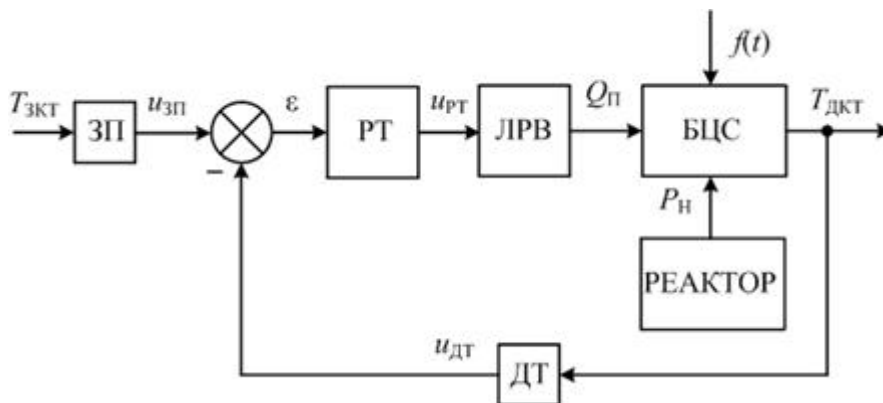


Рис. 2. Функціональна схема системи автоматичного керування температурою вихідної точки БЦС

Охолоджувальні контури БЦС послідовно нагріваються тепловим потоком  $P_H$  парогазової суміші, яка надходить від реактора. Задане значення температури контрольної точки БЦС  $T_{зкт}$  встановлюється на задавальному пристрої ЗП. За допомогою суматора сигнал з задавального пристрою  $u_{зп}$  порівнюється з сигналом  $u_{дт}$  від датчика температури ДТ і при цьому обчислюється помилка керування  $\epsilon$ . В свою чергу сигнал  $\epsilon$  відповідає дійсному значенню температури контрольної точки БЦС  $T_{дкт}$ . Регулятор температури РТ згідно помилки  $\epsilon$  виробляє і подає керувальний сигнал  $u_{рт}$  на ЛРВ, якому відповідає певне значення витрати охолоджуючого повітря  $Q_{п}$ . Також на БЦС діють різноманітні збурювальні впливи  $f(t)$ , які мають невизначений характер.

При відхиленні дійсного значення температури контрольної точки БЦС  $T_{дкт}$  від заданого значення  $T_{зкт}$  регулятор температури (згідно з законом керування) виробляє керувальний сигнал  $u_{рт}$ , що змінює витрату охолоджуючого повітря  $Q_{п}$  і, в свою чергу, забезпечує відповідне охолодження БЦС.

**2. Розробка та дослідження математичної моделі БЦС як об'єкта керування температурою**

При розробці математичної моделі БЦС як об'єкта керування температурою за допомогою рівнянь, що описують фізичні процеси теплообміну та нагріву, виникає ряд труднощів. Це обумовлено тим, що нагрів та охолодження контурів БЦС здійснюється за допомогою конвективної теплопередачі, яка, в свою чергу, являє собою достатньо складний процес [8]. Тепловий потік, що передається за рахунок конвекції, визначається законом Ньютона-Ріхмана [7]:

$$P_n = \alpha(T_c - T_n)F, \tag{1}$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі;  $T_c$  – температура рідкого або газоподібного середовища, що нагріває тіло;  $T_n$  – температура нагріву поверхні тіла;  $F$  – площа поверхні тіла, що нагрівається.

Коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  в загальному випадку є функцією форми і розмірів тіла, режиму руху, швидкості, температури та фізичних параметрів рідини або газу і обчислюється на основі критерію Нуссельта [8]

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}, \tag{2}$$

де 
$$Nu = f(Gr, Re, Pr); \tag{3}$$

$$Gr = \frac{g\beta l^3 \Delta T}{\nu^3}; \tag{4}$$

$$Re = \frac{ul}{\nu}; \tag{5}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a}. \tag{6}$$

В функціональних залежностях (2)-(6) позначено:  $l$  – лінійний розмір поверхні, що нагрівається;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності рідини або газу;  $Gr$  – критерій Грасгофа;  $Re$  – критерій Рейнольдса;  $Pr$  – критерій Прандтля;  $g$  – прискорення сили тяжіння;  $\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення рідини або газу;  $\Delta T$  – температурний напір;  $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості;  $u$  – швидкість руху рідини або газу;  $a$  – коефіцієнт теплопровідності.

Кількісні залежності між вищенаведеними критеріями зазвичай встановлюються експериментальним шляхом для кожного окремого об'єкта [8]. Цей процес досить трудомісткий і є предметом окремих досліджень. Тому в даному випадку більш доцільно буде скористатися підходом, наведеним в [9], який також забезпечує досить високу адекватність розробленої моделі. Суть даного підходу полягає в представленні математичної моделі об'єкта у вигляді типової передаточної функції теплоенергетичних об'єктів керування (7) та ідентифікації її параметрів на основі експериментальної характеристики перехідного процесу реального об'єкта

$$W_{OK}(p) = \frac{U_{вих}(p)}{U_{вх}(p)} = \frac{ke^{-\tau p}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)^n}, \tag{7}$$

де  $W_{OK}(p)$  – передаточна функція об'єкта керування;  $U_{вих}(p)$  – зображення керованої координати (температура контрольної точки)  $U_{вих}(t)$ ;  $U_{вх}(p)$  – зображення керувального впливу (підведений тепловий потік нагріву)  $U_{вх}(t)$ ;  $k$  – коефіцієнт підсилення;  $\tau$  – час запізнення;  $T_1, T_2$  – сталі часу аперіодичної та інерційної ланок, відповідно.

Так як в даному випадку значення підведеного теплового потоку нагріву визначити практично неможливо, то й неможливим є визначення пропорційної залежності температури контрольної точки від теплового потоку у вигляді коефіцієнта підсилення  $k$  передаточної функції (7). В свою чергу, сумарний тепловий потік, що підводиться до БЦС, в основному залежить від таких відомих величин, як: потужність нагрівальної установки реактора  $P_{HP}$ , температура відходів у верхній частині реактора  $T_{BP}$ , витрата охолоджуючого повітря 2-го контуру БЦС  $Q_{II}$  та температура оточуючого середовища  $T_{OC}$ . Тоді, для розробки математичної моделі БЦС за допомогою вищенаведеного підходу пропонується застосувати нечітку систему обчислення температури (НСОТ) згідно залежності  $T_{DKT} = f_{НСОТ}(P_{HP}, T_{BP}, Q_{II}, T_{OC})$ , яка може бути синтезована на основі експертних даних. Функціональна структурна нечіткої математичної моделі БЦС наведена на рис. 3.

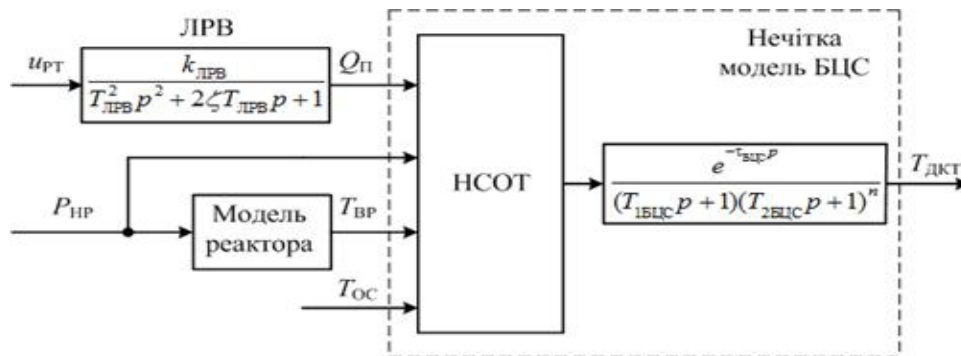


Рис. 3. Функціональна структурна нечіткої математичної моделі БЦС

На вхід даної моделі подається значення потужності нагрівальної установки реактора  $P_{НР}$ , температури відходів у верхній частині реактора  $T_{ВР}$ , витрати охолоджуючого повітря 2-го контуру БЦС  $Q_{П}$  та температури оточуючого середовища  $T_{ОС}$ . На виході формується значення температури контрольної точки БЦС  $T_{ДКТ}$ . Сталі часу  $T_{1БЦС}$ ,  $T_{2БЦС}$ ,  $\tau_{БЦС}$ , а також порядок  $n$  визначаються з експериментальної характеристики перехідного процесу нагріву вихідної точки БЦС за допомогою підходу, наведеного в [9]. В якості математичної моделі реактора обрана добре апробована модель, яка розроблена і наведена в [12]. В свою чергу, математична модель ЛРВ представлена у вигляді коливальної ланки, де  $k_{ЛРВ}$ ,  $T_{ЛРВ}$ ,  $\zeta$  – коефіцієнт підсилення, стала часу та коефіцієнт демпфування, що визначаються параметрами сервопривода та газового вентиля, які входять до складу лінійного регулятора витрати.

Розглянемо більш детально процедуру синтезу НСОТ Мамдані типу. Основними етапами нечіткого логічного висновку Мамдані типу є: фазифікація, агрегація, активізація, акумуляція та дефазифікація [20, 21, 22, 23].

На етапі фазифікації для кожної вхідної змінної визначається відповідне їй лінгвістичне значення та ступінь належності відповідній нечіткій множині [17]. У цьому випадку доцільно вибрати наступні лінгвістичні терміни для вхідних і вихідної змінних, параметри яких зведені в таблицю.

Таблиця 1

Терм	Тип функції належності	Діапазон значень
1	2	3
Для вхідної змінної $P_{НР}$		
Z – нульова	Трикутна	[0 0 0,25]
S – мала	Трикутна	[0 0,25 0,5]
M – середня	Трикутна	[0,25 0,5 0,75]
B – велика	Трикутна	[0,5 0,75 1]
VB – дуже велика	Трикутна	[0,75 1 1]
Для вхідної змінної $T_{ОС}$		
L - низька	Трикутна	[0 0 10]
M – середня	Трикутна	[10 20 30]
H – висока	Трикутна	[30 40 50]
Для вхідної змінної $T_{ВР}$		
L - низька	Трикутна	[0 0 160]
M – середня	Трикутна	[40 200 360]
H – висока	Трикутна	[240 400 560]
Для вхідної змінної $Q_{П}$		
Z – нульова	Трикутна	[0 0 0,25]
L – мала	Трикутна	[0 0,25 0,5]
M – середня	Трикутна	[0,25 0,5 0,75]
B – велика	Трикутна	[0,5 0,75 1]
VB – дуже велика	Трикутна	[0,75 1 1]

продовження табл.1

1	2	3
Для вихідної змінної ТДКТ		
VL – дуже низька	Трикутна	[0 0 35]
L - низька	Трикутна	[0 35 65]
LM – нижче середньої	Трикутна	[35 70 100]
M – середня	Трикутна	[65 100 135]
MM – вище середньої	Трикутна	[100 135 165]
H – висока	Трикутна	[135 170 200]
VH – дуже висока	Трикутна	[175 200 225]

Для реалізації нечіткого логічного висновку сформуємо базу знань. Правила бази знань за алгоритмом Мамдані являють собою лінгвістичні твердження виду:

$$\text{ЯКЩО } "P_{HP} = a" \text{ I } "T_{OC} = b" \text{ I } "T_{BP} = c" \text{ I } "Q_{II} = d", \text{ ТО } "T_{DKT} = e", \tag{8}$$

де a, b, c, d та e – відповідні значення лінгвістичних термів.

Для даного випадку база знань складається з 225 правил, які відповідають всім комбінаціям чотирьох вхідних нечітких змінних. Перші 15 правил мають наступний вигляд:

- ЯКЩО "P<sub>HP</sub> = VB" I "T<sub>OC</sub> = H" I "T<sub>BP</sub> = L" I "Q<sub>II</sub> = Z", ТО "T<sub>DKT</sub> = VL";
- ЯКЩО "P<sub>HP</sub> = VB" I "T<sub>OC</sub> = H" I "T<sub>BP</sub> = L" I "Q<sub>II</sub> = L", ТО "T<sub>DKT</sub> = VL";
- ЯКЩО "P<sub>HP</sub> = VB" I "T<sub>OC</sub> = H" I "T<sub>BP</sub> = L" I "Q<sub>II</sub> = M", ТО "T<sub>DKT</sub> = VL";
- ЯКЩО "P<sub>HP</sub> = VB" I "T<sub>OC</sub> = H" I "T<sub>BP</sub> = L" I "Q<sub>II</sub> = B", ТО "T<sub>DKT</sub> = VL";
- ЯКЩО "P<sub>HP</sub> = VB" I "T<sub>OC</sub> = H" I "T<sub>BP</sub> = L" I "Q<sub>II</sub> = VB", ТО "T<sub>DKT</sub> = VL";
- ЯКЩО "P<sub>HP</sub> = VB" I "T<sub>OC</sub> = H" I "T<sub>BP</sub> = M" I "Q<sub>II</sub> = Z", ТО "T<sub>DKT</sub> = L";
- ЯКЩО "P<sub>HP</sub> = VB" I "T<sub>OC</sub> = H" I "T<sub>BP</sub> = M" I "Q<sub>II</sub> = L", ТО "T<sub>DKT</sub> = L";
- ЯКЩО "P<sub>HP</sub> = VB" I "T<sub>OC</sub> = H" I "T<sub>BP</sub> = M" I "Q<sub>II</sub> = M", ТО "T<sub>DKT</sub> = L";
- ЯКЩО "P<sub>HP</sub> = VB" I "T<sub>OC</sub> = H" I "T<sub>BP</sub> = M" I "Q<sub>II</sub> = B", ТО "T<sub>DKT</sub> = VL";
- ЯКЩО "P<sub>HP</sub> = VB" I "T<sub>OC</sub> = H" I "T<sub>BP</sub> = M" I "Q<sub>II</sub> = VB", ТО "T<sub>DKT</sub> = VL";
- ЯКЩО "P<sub>HP</sub> = VB" I "T<sub>OC</sub> = H" I "T<sub>BP</sub> = H" I "Q<sub>II</sub> = Z", ТО "T<sub>DKT</sub> = H";
- ЯКЩО "P<sub>HP</sub> = VB" I "T<sub>OC</sub> = H" I "T<sub>BP</sub> = H" I "Q<sub>II</sub> = L", ТО "T<sub>DKT</sub> = MM";
- ЯКЩО "P<sub>HP</sub> = VB" I "T<sub>OC</sub> = H" I "T<sub>BP</sub> = H" I "Q<sub>II</sub> = M", ТО "T<sub>DKT</sub> = M";
- ЯКЩО "P<sub>HP</sub> = VB" I "T<sub>OC</sub> = H" I "T<sub>BP</sub> = H" I "Q<sub>II</sub> = B", ТО "T<sub>DKT</sub> = LM";
- ЯКЩО "P<sub>HP</sub> = VB" I "T<sub>OC</sub> = H" I "T<sub>BP</sub> = H" I "Q<sub>II</sub> = VB", ТО "T<sub>DKT</sub> = LM";

На етапі агрегації визначаються ступені істинності для кожного з правил системи нечіткого логічного висновку, а на етапі активізації реалізується процедура знаходження ступенів істинності кожного з підзаключень правил нечітких продукцій.

Подальшим етапом нечіткого логічного висновку є акумуляція, тобто процедура знаходження функцій належності для кожної з вихідних лінгвістичних змінних [21]. Метою акумуляції є об'єднання всіх вихідних лінгвістичних термів з відповідними ступенями істинності кожного з правил для отримання функції належності вихідної змінної. Таким чином, на етапі акумуляції формується результуюча функція належності для нечіткого рішення, яке потрібно перетворити в чітке значення вихідного сигналу. Процедура знаходження чіткого числового значення температури контрольної точки ТДКТ являє собою процедуру дефазифікації.

Існує кілька методів дефазифікації: метод центру тяжіння, метод центру площини, метод лівого модального значення, метод правого модального значення та ін. [15, 18]. Для даного випадку обираємо метод центру тяжіння, згідно якого значення вихідного сигналу розраховується за формулою (9)

$$T_{DKT} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i \cdot m(T_i)}{\sum_{i=1}^n m(T_i)}, \tag{9}$$

де  $n$  – кількість значень вихідної лінгвістичної змінної;  $T_i$  –  $i$ -те значення відповідної вихідної лінгвістичної змінної;  $m(T_i)$  – значення результуючої функції належності для відповідного значення  $T_i$ .

На рис. 4 представлені сімейства статичних характеристик БЦС, які отримані на основі синтезованої математичної моделі на нечіткій логіці:

- а)  $T_{ДКТ} = f(Q_{П})$  при  $P_{НР} = P_{НРmax}$ ,  $T_{ОС} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{БР1} = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{БР2} = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{БР3} = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{БР4} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- б)  $T_{ДКТ} = f(Q_{П})$  при  $P_{НР} = P_{НРmax}$ ,  $T_{БР} = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{ОС1} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{ОС2} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{ОС3} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{ОС4} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

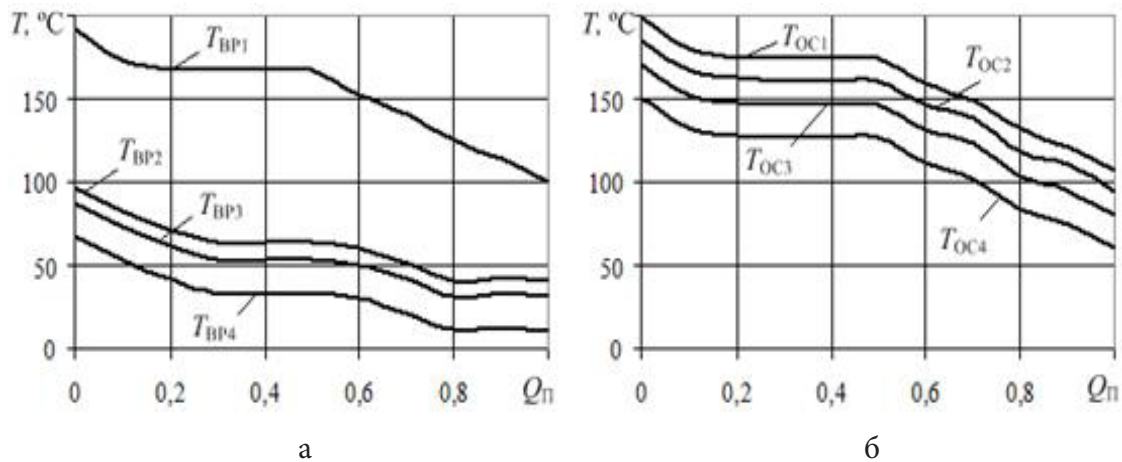


Рис. 4. Сімейства нелінійних статичних характеристик нечіткої математичної моделі БЦС

Аналіз результатів моделювання (рис. 4) показує, що залежності температури вихідної точки БЦС від витрати охолоджуючого повітря 2-го контуру  $T_{ДКТ} = f(Q_{П})$  при різних значеннях  $R_{НР}$ ,  $T_{БР}$  та  $T_{ОС}$  мають суттєво нелінійний характер, що підтверджує адекватність розробленої нечіткої моделі БЦС реальному об'єкту керування.

### 3. Комп'ютерне моделювання системи автоматичного керування температурою вихідної точки БЦС з різнотипними регуляторами

За допомогою розробленої нечіткої математичної моделі БЦС було проведено комп'ютерне моделювання системи автоматичного керування температурою вихідної точки БЦС експериментального комплексу ЕПП з регуляторами наступних типів: пропорційний, пропорційно-диференціальний та пропорційно-інтегрально-диференціальний. Робочий об'єм піролізного реактора даного комплексу складає 14 літрів, максимальна потужність газового пальника – 25 кВт, номінальна потужність повітряного вентилятора 2-го контуру охолодження БЦС – 800 Вт. Знайдені в процесі ідентифікації параметри передаточної функції БЦС становлять:  $T_{1БЦС} = 57\text{ с}$ ;  $T_{2БЦС} = 24\text{ с}$ ,  $\tau_{БЦС} = 12\text{ с}$ ,  $n = 3$ . Моделювання проводилося при сталій нагрівальній потужності газового пальника  $P_{НР} = P_{НРmax} = 25\text{ кВт}$ , при температурі кипіння полімерних відходів, завантажених у реактор  $T_{к} = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$  та при сталій температурі оточуючого середовища  $T_{ОС} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Коефіцієнти регуляторів були знайдені за допомогою параметричної оптимізації, для П-регулятора:  $K_{П} = -1,4$ ; для ПД-регулятора:  $K_{П} = -4,2$ ;  $K_{Д} = -450$ ; для ПІД-регулятора:  $K_{П} = -8,6$ ;  $K_{Д} = -520$  та  $K_{І} = -0,081$ . Результати моделювання у вигляді графіків перехідних процесів САК температурою вихідної точки БЦС з вищенаведеними регуляторами при  $T_{ЗКТ} = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$  наведені на рис. 5, де прийнято наступні позначення:  $t_{БР}$  – час нагріву полімерних відходів у реакторі до температури кипіння;  $t_{к}$  – момент часу, в який відходи в реакторі починають кипіти;  $t_{р1}$  та  $t_{р2}$  – час регулювання системи з ПІД- та ПД-регуляторами, відповідно.

Проаналізувавши результати моделювання можна стверджувати, що розроблена математична модель має досить високу адекватність, так як характер перехідного процесу з високою точністю повторює характер реальних процесів нагріву БЦС. З графіків перехідного процесу (рис. 4) видно, що до початку кипіння відходів у реакторі, процес нагріву БЦС проходить дуже повільно, і здійснюється в основному за рахунок незначного пароутворення при нагріві та плавленні відходів. Потім, після початку кипіння відходів, за рахунок інтенсивного їх випаровування, швидкість нагріву БЦС значно зростає.

Також з рис. 5 видно, що найкращі показники якості керування має система з ПІД-регулятором, а саме: найвищу швидкодію ( $t_{р1} = 135\text{ с}$ ), а також відсутність коливальності та статичної помилки. Система керування з ПД-регулятором має дещо гірші показники: час регулювання  $t_{р2} = 345\text{ с}$  та статична помилка  $\Delta = 3\%$ . Щодо системи керування з П-регулятором, то вона має незадовільні показники якості, а саме: високу коливальність, яка викликає наявність постійної гармонійної складової помилки з амплітудою 12% від заданого значення температури та періодом коливань 105 с.

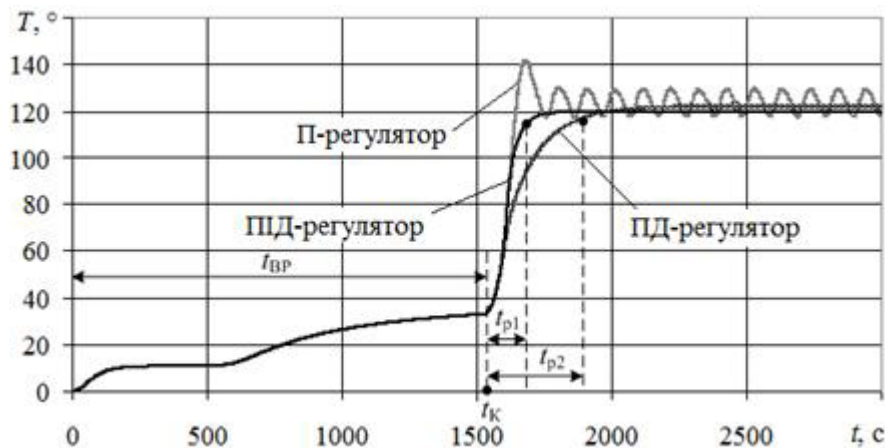


Рис. 5. Перехідні процеси САК температурою вихідної точки БЦС при  $T_{зкт} = 120^{\circ}\text{C}$

**Висновки.** У даній статті представлена процедура синтезу математичної моделі БЦС комплексу ЕПГ на нечіткій логіці, а також результати її дослідження у складі САК з різнотипними регуляторами (пропорційний, пропорційно-диференціальний та пропорційно-інтегрально-диференціальний).

Розроблена нечітка математична модель дає змогу досліджувати поведінку даного об'єкту керування температурою в усталеному та перехідному режимах, зокрема розраховувати температуру в його контрольній точці при певних заданих та збурювальних впливах. Застосування математичного апарату нечіткої логіки при розробці даної моделі дозволяє враховувати особливості багатоконтурної структури БЦС та з досить високою точністю відображати основні її властивості як об'єкта керування з суттєво нелінійними та невизначеними параметрами. Аналіз отриманих результатів комп'ютерного моделювання у вигляді графіків статичних та динамічних характеристик БЦС як об'єкта керування температурою підтверджує високу адекватність розробленої моделі реальним процесам.

В результаті проведених авторами досліджень системи автоматичного керування температурою з використанням синтезованої на основі нечіткої логіки моделі БЦС можна зробити висновок, що при застосуванні класичних типів регуляторів найкращих показників якості керування можна досягти в САК з ПД-регулятором. Для підвищення показників якості керування в САК такого класу доцільно застосовувати регулятори, синтезовані на основі методів штучного інтелекту, які на даний час добре апробовані при розробці та впровадженні систем автоматичного керування об'єктами з суттєво нелінійними та невизначеними параметрами.

Отримана математична модель може бути застосована в подальшому при розробці та дослідженні ефективності ієрархічної системи керування і контролю технологічного комплексу ЕПГ, а також її програмно-алгоритмічного забезпечення реального часу.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Маркіна, Л.М. Впровадження екологічно безпечної технології екопірогенезису при утилізації органічних побутових відходів з одержанням альтернативного палива // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2011. – сс. 457-460.
2. Кондратенко, Ю.П. Козлов, О.В. Аналіз комплексу задач та координат керування технологічним процесом екопірогенезису // Технічні вісті. Вип.1(33), 2(34), 2011. – сс. 13-16.
3. Рижков, С.С., Маркіна, Л.М. Експериментальні дослідження утилізації органічних відходів методом багатоконтурного циркуляційного піролізу // Збірник наукових праць НУК. – 2007. – № 5. – сс. 100 – 106.
4. Усов, А.В., Дубров, А.В., Дмитришин, Д.В. Моделирование систем с распределенными параметрами. – Одесса: Астропринт, 2002. – 664 с.
5. Федоткін, І.М., Бурляй, І.Ю., Рюмшин, М.О. Математичне моделювання технологічних процесів: Теорія реакторів, рециркуляції й прилежового шару. – К.: Техніка, 2003. – 424 с.
6. Шаруда, В.Г. Практикум з теорії автоматичного управління. – Дніпропетровськ : НГУ, 2002. – 414 с.
7. Исламов, М.Ш. Проектирование и эксплуатация промышленных печей. – Л.: Химия, 1986. – 280 с., ил.
8. Мастрюков, Б.С. Теплотехнические расчеты промышленных печей. – М.: Изд-во «Металлургия», 1972. – 368 с.
9. Ротач, В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. – М.: Энергоатомиздат. 1985. – 296 с.
10. Пат. 52840 Україна, МПК F23G5/027, C10G1/00. Спосіб утилізації органічних відходів / Маркіна,

- Л.М., Рудюк, М.В., Бабій, В.П.; заявл. 19.03.2001; опубл. 15.01.2003, Бюл. №1. – 5 с.
11. Пат. 77954 Україна, МПК F23B99/00, C10G3/20. Газогенератор двозонний / Маркіна, Л.М., Ришков, С.С., Рудюк, М.В., Кондратенко, Ю.П., Коробко, О.В., Козлов, О.В.; заявл. 03.05.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. №5. – 9 с.
  12. Kondratenko, Y.P., Kozlov, O.V.: Mathematic Modeling of Reactor's Temperature Mode of Multiloop Pyrolysis Plant // Modeling and Simulation in Engineering, Economics and Management: Lecture Notes in Business Information Processing, 2012, Volume 115, pp. 178-187.
  13. Кондратенко, Ю.П., Козлов, О.В. Нечіткі регулятори в системах керування реакторами багатоконтурних піролізних установок // Проблеми інформаційних технологій. – 2012. – № 11. – сс. 12- 20.
  14. Кондратенко, Ю.П., Козлов, О.В. Синтез системи керування рівнем завантаженості реактора технологічного комплексу екопірогенезісу на базі нейрорегуляторів // Праці Одеського політехнічного університету, Вип. 1(40), 2013, сс. 122-131.
  15. Hampel, R., Wagenknecht M. and Chaker N. (Eds.). Fuzzy Control: Theory and Practice. Physika-Verlag, Heidelberg, New York, 2000.
  16. Zadeh L.A. Fuzzy sets. Information and Control 8, 338-353, 1965.
  17. Zimmermann, H. J. Fuzzy Set Theory and Its Applications, Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London, 1992.
  18. Герасимов, Б.М., Грабовский, Г.Г., Рюмшин, М.А. Нечеткие множества в задачах проектирования, управления и обработки информации. – К.: Техніка, 2002. – 140 с.
  19. Пегаг, А. Нечеткое моделирование и управление. – М.: БИНОМ Лаборатория Знаний, 2009. –798 с.
  20. Ротштейн, А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети. – Винница: “УНІВЕРСУМ-Вінниця”, 1999. – 300 с.
  21. Гостев, В., Кражнев, В., Скрутов, С. Выбор функций принадлежности и настройка нечетких регуляторов систем автоматического управления. Автоматизация производственных процессов, № 1 (14), 2002. сс. 162-167.
  22. Ямпольський, Л.С., Ткач, Б.П., Лісовиченко, О.І. Системи штучного інтелекту в плануванні, моделюванні та управлінні. – К.: ДП «Видавничий дім «Персонал», 2011. – 544 с.
  23. Каргин, А.А. Введение в интеллектуальные машины. Книга 1. Интеллектуальные регуляторы.– Донецк: Норд-Пресс, ДонНУ, 2010. – 526 с.

КОНДРАТЕНКО Юрій Пантелійович, професор, доктор технічних наук, Заслужений винахідник України, професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського державного університету ім. П. Могили, професор кафедри комп'ютеризованих систем управління Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

Наукові інтереси: Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень, інформаційні технології, системи автоматичного керування, комп'ютерні системи та компоненти, нечітка логіка.

КОЗЛОВ Олексій Валерійович, аспірант кафедри комп'ютеризованих систем управління, молодший науковий співробітник науково-дослідної частини Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

Наукові інтереси: автоматизація процесів керування, інформаційні технології, інтелектуальні регулятори.