

УДК 622.34:658.52.011.56

А.М. Ніколаєнко, професор, к.т.н.

Н.О. Мінняйло, доцент, к.т.н.

К.І. Феленко, магістрант

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ АГЛОМЕРАЦІЇ НА БАЗІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

*Запорізька державна інженерна академія*

Приведен принцип разработки модели двух контуров системы автоматического регулирования процесса спекания агломерационной шихты. Модель построена на основе нечетких регуляторов и обеспечивает стабилизацию газодинамических свойств слоя шихты. Показано, что предложенная система позволяет уменьшить время регулирования в системе и повысить точность поддержания технологических параметров на заданом уровне.

Ключевые слова: агломерация, шихта, газодинамические свойства, система управления, нечеткий регулятор, математическая модель.

Наведено принцип розробки моделі двох контурів системи автоматичного регулювання процесу спікання агломераційної шихти. Модель побудовано на основі нечітких регуляторів і забезпечує стабілізацію газодинамічних властивостей шару шихти. Показано, що запропонована система дозволяє зменшити час регулювання у системі та підвищити точність підтримки технологічних параметрів на заданому рівні.

Ключові слова: агломерація, шихта, газодинамічні властивості, система управління, нечіткий регулятор, математична модель.

There is the principle of development of two circuits model for the automatic control of process of agglomeration sinter mix. This model is based on fuzzy regulators and provides stabilization of gas-dynamic properties at the layer of mixture. There is shown that the proposed system allows reduces the time of control in system and improve the accuracy of maintaining process parameters at a given level in the article.

Key words: agglomeration, control system, charge, gas-dynamic properties, fuzzy regulator, mathematical model.

*Вступ.* Значне місце в технологічній схемі агломераційного виробництва займають процеси, які пов'язані із спіканням шару шихти, що запалено під горном. Максимальну продуктивність агломераційних машин та якість агломерату досягають у тому разі, коли спікання всього шару шихти закінчується у кінці робочої (активної) довжини машини [1]. Тому, основною метою автоматичного регулювання процесу спікання є узгодження швидкості руху палет агломераційної машини із вертикальною швидкістю спікання шихти.

*Стан питання.* Відомо [1-3], що процес агломерації характеризується швидкістю спікання шихти на агломераційній машині, яка пов'язана з технологічними параметрами співвідношенням:

$$\frac{v_{cn}}{v_{n.a.m}} = \frac{h_{ш}}{L}, \quad (1)$$

де  $v_{cn}$  – швидкість спікання шихти, м/с;  $v_{n.a.m}$  – швидкість руху палет агломераційної машини, м/с;  $h_{ш}$  – висота шару шихти на агломераційній стрічці, м;  $L$  – довжина аг-

ломераційної машини, м.

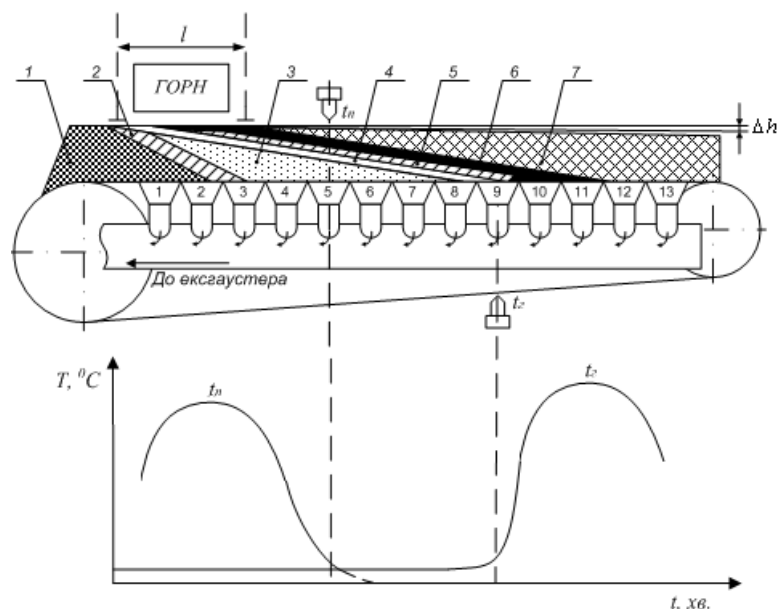
Таким чином, швидкість спікання  $v_{cn}$  визначає швидкість руху палет агломераційної машини  $v_{n.a.m}$  за висоти шару шихти  $h_{ш}$  та довжини машини  $L$ . Тоді, під час змінювання швидкості спікання, з метою збереження постійного місця закінчення спікання, слід впливати або на швидкість руху палет агломераційної машини, або на висоту шару, або на те та інше.

Аналіз багатьох систем автоматичного регулювання (САР) процесу спікання шихти на агломераційних машинах показав, що вони не забезпечують високу якість агломерату та максимальну продуктивність машин. Це пов'язано з тим, що технологічний процес характеризується значним часом транспортного запізнювання (15... 20 хв.) та наявністю випадкових збурень, а регулювання ведеться, здебільшого, за параметрами, які характеризують тільки закінченість спікання [2,3].

*Постановка завдання.* З метою забезпечення якісного регулювання процесу спікання агломераційної шихти необхідно розробити систему автоматизації, яка б використовувала інформацію про хід процесу спікання на ранніх стадіях і формувала ефективну керуючу дію.

*Основна частина.* Для вирішення поставленого завдання пропонується спосіб автоматичного регулювання процесу спікання, згідно з яким швидкість руху палет агломераційної машини регулюють за швидкістю спікання середнього шару шихти, а висоту завантаження шихти на агломераційну стрічку – за газодинамічними властивостями шару шихти на початковому періоді спікання.

Шар шихти на агломераційній машині (рис. 1) складається із зони сирової шихти 1, зони конденсації 2, зони перезволоження 3, зони сушіння 4, зони інтенсивного нагрівання 5, зони плавлення 6 та готового агломерату 7.



**Рисунок 1** – Схема спікання шихти та графік кривих розподілу температур поверхні шару спеченої шихти  $t_n$  та газів  $t_g$ , що відхідять

Як параметр, що характеризує швидкість спікання середнього шару шихти, застосовують різницю температур газів  $t_g$ , що відхідять, у вакуум-камері, над якою за оптимальним протіканням процесу має закінчуватися сушіння шару шихти, та поверхні спеченої шихти  $t_n$  за горном у місці, де температура за оптимальним веденням

процесу спікання дорівнює температурі  $t_2$ .

Параметром, що характеризує газодинамічні властивості шару шихти, є добуток усадки шихти під горном на швидкість руху палет агломераційної машини.

Дослідження [4] показують, що нахил кривої охолодження поверхні шару спеченої шихти  $t_n$  визначається, в основному, макроструктурою агломерату та швидкістю руху повітря, яке просмоктується через шар на агломераційній стрічці. Враховуючи те, що у даному разі розглядається охолодження поверхні шару спеченої шихти на початковій стадії, коли під ним знаходиться значний шар неспеченої шихти, охолодження визначається тільки швидкістю руху повітря, що проходить через шихту, а отже висотою її шару та його питомим опором.

Тоді за певної потужності ексаустера, для ділянки  $l_n$ , у першому наближенні справедливим є:

$$\frac{t_n}{K_1 \cdot v_{n.a.m}} = \frac{n \cdot h_{us}}{l_n}, \quad (2)$$

звідки

$$t_n = K_1 \cdot \frac{n \cdot h_{us} \cdot v_{n.a.m}}{l_n}, \quad (3)$$

де  $t_n$  – температура поверхні шару спеченої шихти у місці установки термомпари, °С;  $l_n$  – відстань до термомпари ( $t_n$ ) відносно точки завантаження шихти, м;  $K_1$  – коефіцієнт пропорційності між температурою поверхні та швидкістю руху палет агломераційної машини, °С/м·с<sup>-1</sup>;  $n$  – коефіцієнт, що враховує макроструктуру агломерату та питомий опір шару шихти.

Відомо [4], що на крутизні висхідної гілки термограми газів, що відходять, позначається швидкість просмоктування повітря через шар, склад і властивості шихти, які визначають швидкість спікання шару  $v_{cn}$ .

Враховуючи зазначене, для ділянки  $l_2$  можна записати:

$$\frac{t_2}{K_2 \cdot l_2} = \frac{v_{cn}}{v_{n.a.m}}, \quad (4)$$

звідки

$$t_2 = K_2 \cdot \frac{l_2 \cdot v_{cn}}{v_{n.a.m}}, \quad (5)$$

де  $t_2$ ,  $l_2$  – відповідно температура газів, що відходять, у місці установки термомпари, °С, та відстань до термомпари ( $t_2$ ) відносно місця завантаження шихти, м;  $K_2$  – коефіцієнт пропорційності між температурою газів і лінійною координатою за довжиною стрічки, °С/м·с<sup>-1</sup>.

Тоді різниця температур  $t_2$  і  $t_n$  дорівнює:

$$t_2 - t_n = K_2 \cdot \frac{l_2 \cdot v_{cn}}{v_{n.a.m}} - K_1 \cdot \frac{n \cdot h_{us} \cdot v_{n.a.m}}{l_n}, \quad (6)$$

звідки

$$v_{cn} = \frac{K_1 \cdot n \cdot h_{us} \cdot v_{n.a.m}^2 + l_n \cdot v_{n.a.m} \cdot (t_2 - t_n)}{K_2 \cdot l_n \cdot l_2}. \quad (7)$$

Таким чином, різниця температур  $(t_c - t_n)$  між точками вимірювання визначає швидкість спікання шихти на стрічці.

Коли  $(t_c - t_n) = 0$ , процес йде нормально, швидкість спікання шихти на агломераційній машині є оптимальною. Коли  $(t_c - t_n) > 0$ , швидкість спікання шихти на агломераційній машині є вищою за оптимальну, що призводить до перепікання шихти, коли  $(t_c - t_n) < 0$ , швидкість спікання шихти на агломераційній машині є нижчою за оптимальну, що призводить до недопікання шихти.

У процесі агломерації структура завантаженого на агломераційну машину шару шихти значно змінюється [1]. Протягом початкового періоду спікання шар ущільнюється під дією вакууму та теплового випромінювання горну. Це спричинює випаровування вологи, конденсацію й утворення зони перезволоження, що сприяє розмиванню окремих гранул шихти та подальшій усадці шару. Величина усадки ( $\Delta h$ ) у цей період визначається властивостями, що одержала шихта під час її грудкування та транспортування до агломераційної стрічки [5,6]. Тоді її величина  $\Delta h$  за час, на протязі якого шар агломераційної шихти з певними газодинамічними властивостями  $p_{ш}$  проходить відстань  $l$  від місця вимірювання його висоти перед горном до точки вимірювання висоти за горном (рис. 1), складе:

$$\Delta h = \frac{l}{v_{n.a.m} \cdot p_{ш}} \quad (8)$$

А це означає, що знаючи усадку шару  $\Delta h$  на контрольованій ділянці  $l$  та швидкість руху стрічки  $v_{n.a.m}$ , можна з певною точністю за їх добутком судити про газодинамічні властивості шару шихти та під час відхилення їх від оптимального значення коригувати висотою шихти, завантажувальної на агломераційну стрічку.

Математична модель двох контурів системи автоматичного регулювання процесу агломерації на базі нечіткої логіки реалізована на ЕОМ за допомогою пакету моделювання «*Simulink*» інтерактивної системи «*Matlab*» (рис. 2) і складається з об'єкта управління, розробленого на базі рівнянь (2)-(8) і нечітких ПД-регуляторів, що забезпечують стабілізацію газодинамічних властивостей шару шихти за величиною добутку його усадки під горном на швидкість агломераційної стрічки, та швидкості спікання середнього шару шихти за різницею температур газів, що відходять, і поверхні шару спеченої шихти за горном  $(t_c - t_n)$  [7].

Нечіткі ПД-регулятори реалізовано на базі нечіткого контролера (*Fuzzy Logic Controller*), на три входи якого подають сигнали, що пропорційні неузгодженню поточного та заданого значення регульованої величини ( $p$ ), інтегралу неузгодження поточного і заданого значення регульованої величини ( $i$ ) та диференціалу неузгодження поточного та заданого значення регульованої величини ( $d$ ). На виході нечіткого контролера формувався сигнал управління ( $u$ ).

Під час створення нечіткого логічного контролера використовували метод побудови бази знань (правил), заснований на аналізі характеристик замкнених систем стабілізації добутку усадки шару шихти під горном на швидкість агломераційної стрічки та різниці температур газів, що відходять, та поверхні шару спеченої шихти за горном. Системи типу Мамдані, які реалізують нечіткий регулятор *Fuzzy Logic Controller with Ruleviewer\_1* першого контуру, та нечіткий регулятор *Fuzzy Logic Controller with Ruleviewer\_2* другого контуру, створені за допомогою інструментів пакету «*Fuzzy Logic Toolbox*».

У системах такого типу база знань складається з правил виду:

Правило 1: «Якщо  $x = A_1$  і  $y = B_1$ , то  $z = C_1$ »;



Правило 2: «Якщо  $x = A_2$  і  $y = B_2$ , то  $z = C_2$ »; (9)

.....

Правило  $n$ : «Якщо  $x = A_n$  і  $y = B_n$ , то  $z = C_n$ »,

де  $x, y$  – вхідні змінні;  $z$  – змінна виводу;  $A, B$  і  $C$  – функції приналежності, які визначено для  $x, y$  і  $z$  відповідно.

Нечіткий контролер *Fuzzy Logic Controller* включає три основні блоки: блок фаззифікації (*fuzzyfication*), блок формування логічного рішення (*inference*) та блок дефаззифікації (*defuzzyfication*).

У блоці фаззифікації сигнали вхідних змінних  $p, i, d$  за допомогою функцій приналежності (ФП) перетворюються на значення лінгвістичних змінних. ФП визначає ступінь приналежності кожного елементу множині  $U$  числом між 0 і 1, яке називають ступенем істинності лінгвістичної змінної даному терму.

У блоці формування логічного вирішення на основі матриці знань, що представляє собою сукупність лінгвістичних правил вигляду (9), формується результуюча ФП для розрахунку вихідної величини.

У блоці дефаззифікації одержану результуючу ФП для управляючої дії на об'єкт регулювання перетворюють на числову величину вихідного сигналу ( $u$ ).

Для опису вхідних змінних  $p$  та  $i$  й вихідної змінної  $u$  використовували наступні значення лінгвістичних термів:  $NB$  – негативний великий,  $NM$  – негативний середній,  $NS$  – негативний малий,  $ZE$  – близький до нуля, нульовий,  $PS$  – позитивний малий,  $PM$  – позитивний середній,  $PB$  – позитивний великий, для яких побудовано функції приналежності. Причому для підвищення чіткості регулювання ФП термів вихідної змінної вибрано непересічними. Діапазон вхідного сигналу  $d$  розбивають на три терм-множини:  $N$  – негативний;  $ZE$  – близький до нуля, нульовий;  $P$  – позитивний.

Для ФП вибрано найбільш поширену форму – трикутну, аналітичний запис якої має вигляд:

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right), \quad (10)$$

де  $a, b, c$  – коефіцієнти, що визначають параметри функції.

Для вхідних змінних регуляторів визначено симетричні діапазони змінювання, а для вихідних змінних регуляторів діапазони змінювання задано у вигляді  $u \in [0; C]$ . Верхня межа  $C$  вибрана такою, щоб вихідний сигнал регулятора міг компенсувати збурення, та дотримувалося оптимальне співвідношення між величиною динамічної помилки, часом регулювання і кількістю коливань.

**Таблиця 1** – База правил для fuzzy-регулятора, що реалізовує ПІД-закон регулювання

		$p$						
		$NB$	$NM$	$NS$	$ZE$	$PS$	$PM$	$PB$
~	$NB$	$NB$	$NB$	$NB$	$NB$	$NM$	$NS$	$ZE$
	$NM$	$NB$	$NB$	$NB$	$NM$	$NS$	$ZE$	$PS$
	$NS$	$NB$	$NB$	$NM$	$NS$	$ZE$	$PS$	$PM$
	$ZE$	$NB$	$NM$	$NS$	$ZE$	$PS$	$PM$	$PB$
	$PS$	$NM$	$NS$	$ZE$	$PS$	$PM$	$PB$	$PB$
	$PM$	$NS$	$ZE$	$PS$	$PM$	$PB$	$PB$	$PB$
	$PB$	$ZE$	$PS$	$PM$	$PB$	$PB$	$PB$	$PB$

Діапазони змінювання вхідних і вихідної змінних після настройки регулятора

*Fuzzy Logic Controller with Ruleviewer\_1* у контурі регулювання добутку усадки шару шихти під горном на швидкість переміщення агломераційної стрічки, дорівнюють:  $p \in [-0,005; 0,005]$ ,  $i \in [-0,25; 0,25]$ ,  $d \in [-1; 1]$ ,  $u \in [0; 0,1]$ , а після настройки регулятора *Fuzzy Logic Controller with Ruleviewer\_2* у контурі регулювання різниці температур ( $t_e - t_n$ ), відповідно:  $p \in [-9; 9]$ ,  $i \in [-43,7; 0]$ ,  $d \in [-300; 300]$ ,  $u \in [-0,4; 0]$ .

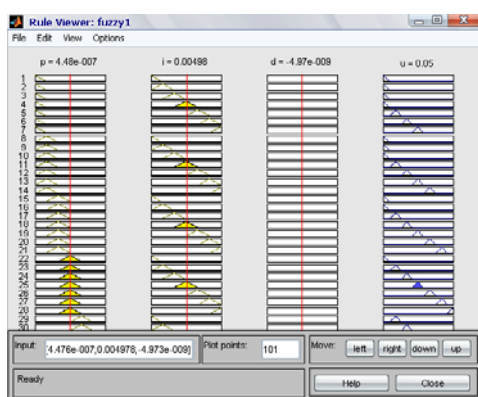
Оскільки таблицю правил для трьох входів  $p$ ,  $i$ ,  $d$  fuzzy-контролера скласти важко, спочатку за допомогою редактора «*Rule Editor*» було сформовано бази та списки правил тільки для сигналів  $p$  та  $i$  (табл. 1).

На основі табл. 1 складено список правил виду (9):

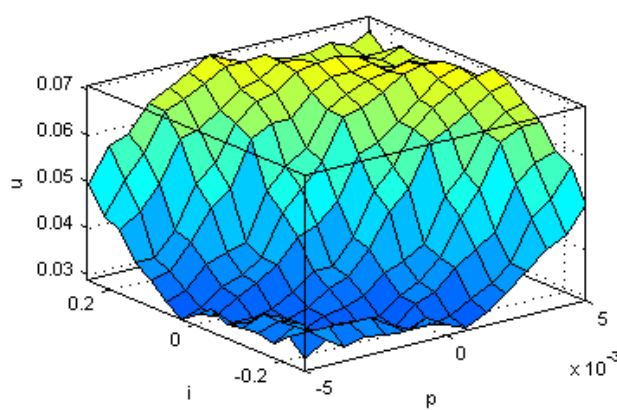
- правило 1: якщо  $p = NB$  та  $i = NB$ , то  $u = NB$  (1);
- правило 2: якщо  $p = NB$  та  $i = NM$ , то  $u = NB$  (1);
- правило 3: якщо  $p = NB$  та  $i = NS$ , то  $u = NB$  (1);
- правило 4: якщо  $p = NB$  та  $i = ZE$ , то  $u = NB$  (1);
- .....
- правило 46: якщо  $p = PB$  та  $i = ZE$ , то  $u = PB$  (1);
- правило 47: якщо  $p = PB$  та  $i = PS$ , то  $u = PB$  (1);
- правило 48: якщо  $p = PB$  та  $i = PM$ , то  $u = PB$  (1);
- правило 49: якщо  $p = PB$  та  $i = PB$ , то  $u = PB$  (1);

Основні правила доповнено правилами для сигналу пропорційному диференціалу неузгодження поточного та заданого значення регульованої величини  $d$ :

- правило 50: якщо  $d = N$ , то  $u = N$  (1);
- правило 51: якщо  $d = ZE$ , то  $u = ZE$  (1);
- правило 52: якщо  $d = P$ , то  $u = P$  (1).



а



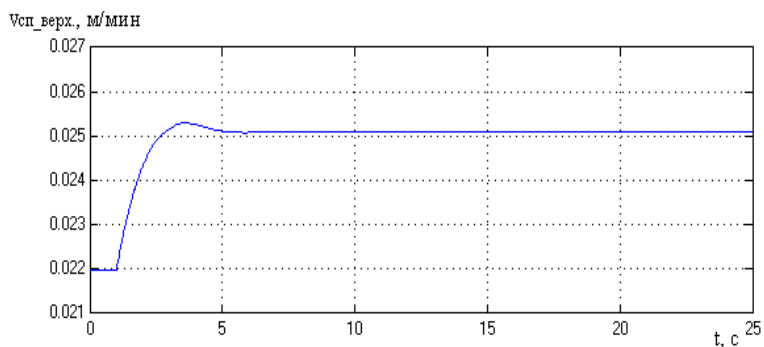
б

**Рисунок 3** – Візуалізація нечіткого логічного виводу (а) та поверхні «входи-вихід» (б) *Fuzzy Logic Controller with Ruleviewer\_1*

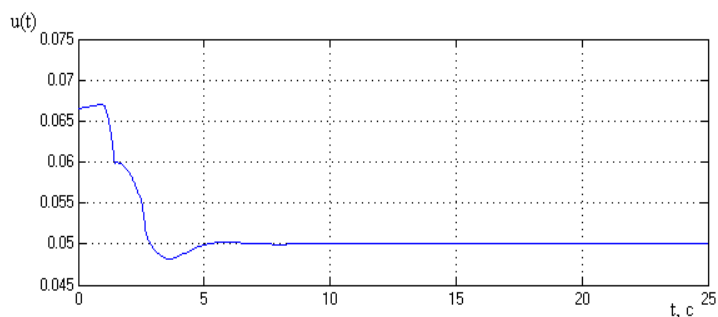
Моделювання роботи двох контурів системи автоматичного регулювання процесу спікання агломераційної шихти із синтезованими fuzzy-регуляторами проведено за ступінчастими входними сигналами, які моделюють змінювання усадки спеченої

шихти  $\Delta h$  від 0,064 до 0,056 м і вертикальної швидкості спікання середнього шару  $v_{cn\_cp}$  від 0,0284 до 0,0251 м/хв.

Візуалізацію нечіткого логічного виводу (рис. 3,а) здійснювали за допомогою модуля «Rule Viewer». Кожне правило бази знань для регуляторів *Fuzzy Logic Controller with Ruleviewer* надавали у вигляді послідовності горизонтально розташованих прямокутників.



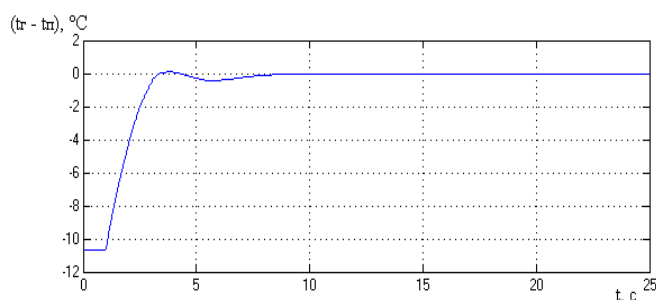
а)



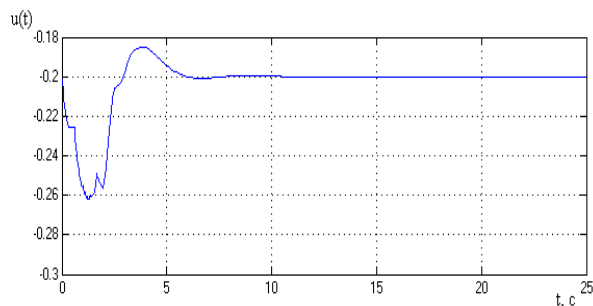
б)

а - перехідний процес регульованої величини;  
б - сигнал управління на виході нечіткого регулятора

**Рисунок 4** – Перехідні процеси у контурі регулювання добутку усадки шару шихти на швидкість агломераційної стрічки з нечітким регулятором *Fuzzy Logic Controller with Ruleviewer\_1*



а



б

а - перехідний процес регульованої величини;  
б - сигнал управління на виході нечіткого регулятора

**Рисунок 5** – Перехідні процеси у контурі регулювання різниці температур газів, що відходять і поверхні спеченої шихти за горном з нечітким регулятором *Fuzzy Logic Controller with Ruleviewer\_2*

А огляд отриманої поверхні «входи-вихід» системи нечіткого виводу *fuzzy* (рис. 3,б) та візуалізацію графіків залежності вихідних змінних від окремих вхідних, здійснювали за допомогою модуля «Surface Viewer».



Виходячи з отриманих перехідних процесів, у АСР добутку усадки шару шихти на швидкість переміщення агломераційної стрічки тривалість моделювання регулювання не перевищує 8,5 с, а динамічна помилка складає 0,0002 м/хв. (рис. 4).

У САР різниці температур газів, що відходять, і поверхні агломераційного шару за горном ( $t_2 - t_n$ ) час моделювання регулювання не перевищує 12 с, а динамічна помилка складає 0,4 °С (рис. 5).

*Висновки.* Порівняльний аналіз роботи двох контурів САР процесу агломерації на базі аналогових та змодельованих нечітких ПІД-регуляторів показав, що САР із нечіткими ПІД-регуляторами забезпечує значне підвищення якості регулювання. Так, у контурі регулювання добутку усадки шихти під горном на швидкість агломераційної стрічки з нечітким регулятором час регулювання скорочується у два рази, а динамічна помилка у п'ять разів менша, ніж у контурі управління з аналоговим ПІД-регулятором. А у контурі управління швидкістю спікання середнього шару шихти за різницею температур ( $t_2 - t_n$ ) час регулювання та динамічна помилка в системі з нечітким регулятором у два рази менші, ніж в контурі управління з аналоговим ПІД-регулятором. Окрім того, система управління із нечіткими регуляторами має значно вищу стійкість при змінюванні динамічних властивостей об'єкта регулювання.

#### ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Базилевич, С. В.* Агломерация [Текст] / С. В. Базилевич, Е. Ф. Вегман. – М. : Металлургия, 1967. – 368 с. – Библиогр. : с. 357-368.
2. *Астахов, А. Г.* Автоматизация процессов окускования железных руд и концентратов : монография [Текст] / А. Г. Астахов, Н. В. Федоровский. – Киев : Техніка, 1965. – 248 с. – Библиогр. : с. 245-246.
3. *Глинков, Г. М.* АСУ технологическими процессами в агломерационных и сталеплавильных цехах [Текст] / Г. М. Глинков, В. А. Маковский. – М. : Металлургия, 1981. – 360 с. – Библиогр. : с. 357-358.
4. *Сигов, А. А.* Агломерационный процесс [Текст] / А. А. Сигов, В. А. Шурхал. – Киев : Техніка, 1969. – 232 с. – Библиогр.: с. 220-230.
5. Исследование усадки шихты в начальный период спекания [Текст] / П. А. Половой, В. И. Гранковский, В. П. Пузанов [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 1978. – № 8. – С. 32-35.
6. Исследование усадки слоя на агломашине [Текст] / В. И. Гранковский, А. Н. Николаенко, М. Ю. Пазюк [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 1979. – № 2. – С. 32-34.
7. *Гостев, В. И.* Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления [Текст] / В. И. Гостев. – 3-е изд. – Киев : Радиоаматор, 2005. – 708 с. – Библиогр. : с. 688-702. – ISBN 966-95890-0-2.

Стаття надійшла до редакції 24.05.2013 р.  
Рецензент, проф. М.Ю. Пазюк