

## ЕКСПЕРТНА СИСТЕМА ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ БІОКОНВЕРСІЇ

Є.П. Ларюшкін, Ю.І. Мітюшкін, О.В. Леонова, О.М. Янківська

### Вступ

Енергозберігаюче управління технологічним процесом біоконверсії здійснюється на основі чотирьох основних методів [1], два з яких реалізуються на етапі проектування системи управління, а решта складають ієрархію рішень, при прийнятті яких визначальним є досвід оператора. За такої ситуації в роботі системи досить часто виникають збої технологічного режиму, спричинені виходом за межі допустимих значень факторів впливу на процес, які в сукупності утворюють системне поле впливів.

З метою підвищення ефективності роботи енергозберігаючого управління систем запропоновано метод інтелектуальної підтримки процесу управління технологічним процесом біоконверсії. В основі даного методу - використання в якості своєрідного “підказчика” операторові спеціалізованої експертної системи, призначеної для прогнозування виходу біогазу як основного критерію якості процесу анаеробного зброджування органічної біомаси. Адже саме при зміні даного показника виникає необхідність прийняття оператором певних керуючих рішень по модифікації основних факторів, які найбільш суттєво впливають на процес, а рішення ці через об’єктивну присутність людського фактору можуть бути не завжди адекватними.

Що стосується моделі прийняття рішення, втіленої в експертну систему, то, зважаючи на суто експертний характер цілого ряду факторів впливу, а також на нечіткий характер взаємозв’язку “входи”-“вихід”, цілком природним є використання з цією метою сучасних засобів інтелектуальних технологій. В даному випадку було запропоновано математичну модель багатофакторного аналізу процесу біоконверсії на основі ієрархічної нейро-нечіткої мережі.

### Характеристика факторів впливу

Як відомо [2], в типовій сучасній системі біоконверсії на величину виходу біогазу впливають наступні основні незалежні фактори:  $y_1$  – якість сировини,  $y_2$  – вологість сировини,  $y_3$  – гранулометричний зміст,  $y_4$  – кількість жирних кислот,  $y_5$  – водневий показник,  $z_1$  – час бродіння,  $w_1$  – температура бродіння,  $w_2$  – стабільність температурного режиму,  $z_3$  – якість перемішування,  $z_4$  – вміст метаногенної мікрофлори,  $z_5$  – доза завантаження реактора,  $x_1$  – тип біореактора,  $x_2$  – ступінь іммобілізації,  $v_2$  – якість допоміжного обладнання,  $v_3$  – якість апаратно-схемного оформлення.

З точки зору управління процесом, названі фактори по-різному впливають на зміну показника його якості. Щоб оцінити важливість керування тими чи іншими факторами, проведемо їх умовне ранжування за декількома умовними рівнями важливості.

I рівень – фактори, безпосередньо керовані оператором, зміна яких під час протікання процесу біоконверсії найбільшою мірою впливає на показник виходу біогазу. До таких факторів слід віднести  $y_2$ ,  $y_3$ ,  $z_3$  та  $z_5$ .

II рівень – фактори, кількісні або умовні значення яких підтримуються відносно стабільними протягом усього процесу, що протікає в системі. Вказана особливість є характерною для величин  $y_1$ ,  $z_1$ ,  $z_4$  і  $w_1$ .

III рівень – фактори, значення яких певною мірою залежать від сумісної дії ряду факторів I та II рівнів:  $y_4$ ,  $y_5$ ,  $w_2$  та  $z_3$ .

IV рівень – фактори, що визначають конструктивні особливості технічної частини (біореактора) системи біоконверсії:  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $v_2$ , та  $v_3$ .

Таким чином, основне призначення експертної системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень оператором системи біоконверсії полягає в підборі таких рівнів основних

керуючих факторів впливу, які б забезпечили бажаний вихід біогазу при їх встановленні в технічній системі біореактора.

### Характеристика експертної системи

На рис. 1 представлено загальну структуру системи управління технологічним процесом біоконверсії, основу якої складає експертна система інтелектуальної підтримки прийняття рішень оператором.

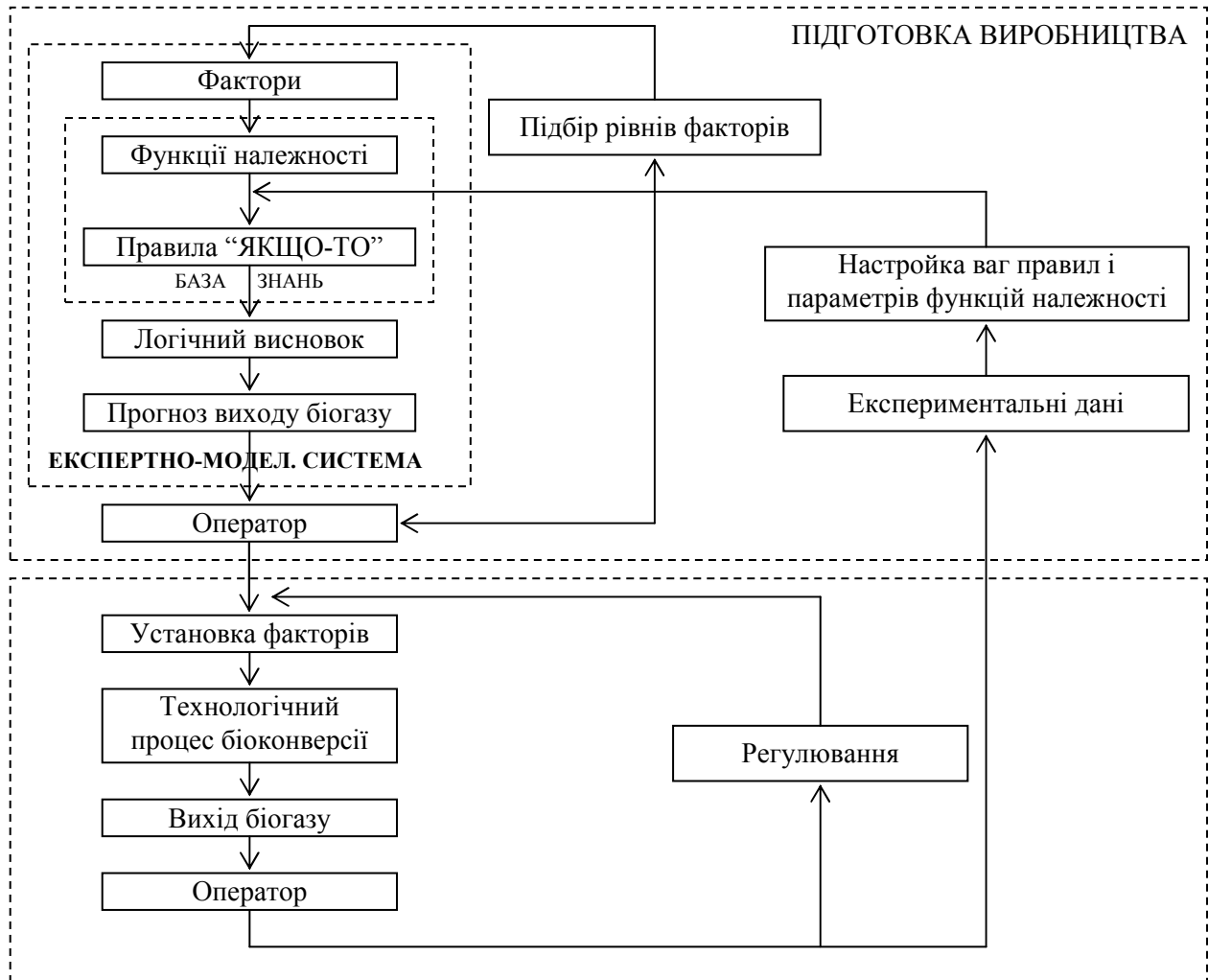


Рис. 1. Експертно-моделююча система для управління технологічним процесом біоконверсії

Як можна бачити з наведеної схеми, основними етапами управління процесом отримання біогазу є підготовка до належної роботи експертно-моделюючої системи і безпосередньо керування технологічним процесом біоконверсії. Причому представлена система певною мірою може розцінюватись як система із зворотнім зв'язком. Дана обставина повинна значно посприяти ефективності реалізації процесу в цілому.

Підготовка експертно-моделюючої системи передбачає тонку настройку математичної моделі прийняття рішення, тобто встановлення таких її основних параметрів, які б забезпечили розрахунок найбільш адекватного показника виходу біогазу на основі відомих значень факторів впливу. В основі математичної моделі – нечітка база знань [2]. При цьому фактори впливу представляються як лінгвістичні змінні, значення яких оцінюються на множинах нечітких термів на зразок “низький”, “середній”, “високий” тощо. Співвідношення між факторами впливу та показником виходу біогазу аналітично мають наступний вигляд:

$$Q = f_q(Y, Z, V), \quad (1)$$

$$Y = f_y(y_1, y_2, y_3, y_4, y_5), \quad (2)$$

$$Z = f_z(z_1, z_2, z_3, z_4, z_5), \quad (3)$$

$$V = f_v(v_1, v_2, v_3), \quad (4)$$

$$z_2 = f_{z_2}(w_1, w_2), \quad (5)$$

$$v_1 = f_{v_1}(x_1, x_2), \quad (6)$$

де додатково вводяться так звані залежні фактори:

- $Y$  – якість вихідної сировини,
- $Z$  – якість технологічного процесу,
- $V$  – якість апаратного оформлення,
- $z_2$  – якість температурного режиму,
- $v_1$  – якість біореактору.

Наведені співвідношення втілюються в експертні бази знань, між якими існує ієрархічний зв'язок. Кожна база знань представляє собою сукупність нечітких логічних правил типу:

$$\begin{aligned} &\text{ЯКЩО } \left[ (x_1 = a_1^{j1}) \text{ I } \dots (x_1 = a_1^{j1}) \text{ I } \dots (x_1 = a_1^{j1}) \right] \text{ (з вагою } w_{j1}) \dots \\ &\dots \text{ АБО } \left[ (x_1 = a_1^{jk_j}) \text{ I } \dots (x_i = a_i^{jk_j}) \text{ I } \dots (x_n = a_n^{jk_j}) \right] \text{ (з вагою } w_{jk_j}), \\ &\text{ТО } y = d_j, \quad j = \overline{1, m}, \end{aligned} \quad (7)$$

де  $a_i^p$  - лінгвістичний терм, що оцінює змінну  $x_i$  в правилі під номером  $p = k_j$ ;

$k_j$  - кількість нечітких правил, що відповідають лінгвістичному терму (класу)  $d_j$  вихідної змінної  $y$ ;

$w_{jp}$  - число в діапазоні  $[0,1]$ , що характеризує суб'єктивну міру впевненості експерта в сформульованому правилі з номером  $p = k_j$ .

З метою здійснення нечіткого логічного висновку [3] на основі всієї сукупності правил проводиться фазифікація значень факторів впливу, тобто оцінка їх ступенів належності до власних лінгвістичних термів за допомогою функцій належності. В моделі застосовано функції квазідзвоноподібного типу [3], які є найоптимальнішими серед розмаїття різних типів з точки зору зручності настройки:

$$\mu^{jp}(x_i) = \frac{1}{1 + \left( \frac{x_i - b_i^{jp}}{c_i^{jp}} \right)^2}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}, \quad p = k_j, \quad (8)$$

де  $b_i^{jp}$ ,  $c_i^{jp}$  – параметри настройки функції належності:

$b$  – координата максимуму,

$c$  – параметр концентрації (стиснення-розтягування) графіка функції (рис. 2).

З метою точної кількісної оцінки виходу біогазу після нечіткого логічного висновку проводиться дефазифікація результату [3]. Одержане значення і буде слугувати оператору

орієнтиром для підбору таких рівнів керованих факторів впливу, які б забезпечили бажану кількість біогазу.

Визначення необхідних значень керованих факторів дає можливість власне до реалізації процесу отримання біогазу, тобто до другого етапу. Технологічний процес біоконверсії починається після завантаження біореактора, встановлення в ньому всіх зовнішніх параметрів і приведення в дію. На основі реальних показників виходу біогазу оператор здійснює регулювання основних керованих параметрів з метою отримання бажаного значення на виході, фіксуючи при цьому всі співвідношення вхідних та вихідних параметрів, що спостерігаються.

Важливою особливістю процесу біоконверсії, яку слід мати на увазі, є його інерційність, коли для переходу від одного режиму, що обумовлюється деякою сукупністю факторів впливу, до іншого проходить певний час. Ця обставина обов'язково повинна враховуватись оператором при

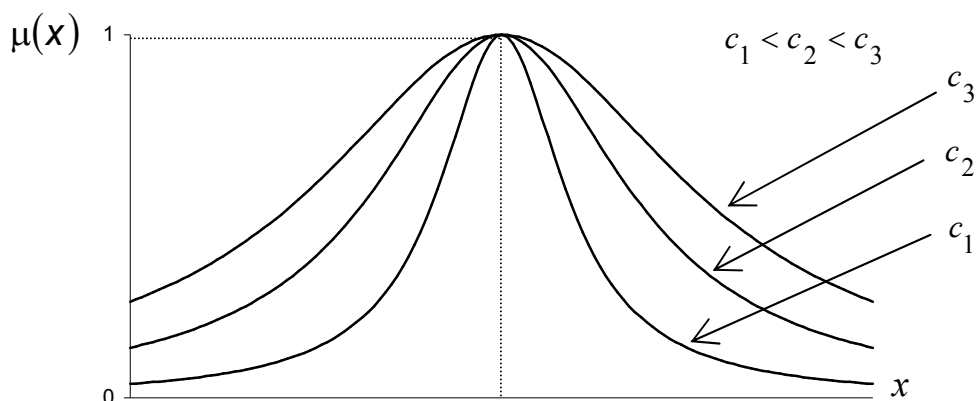


Рис. 2. Квазідзвоноподібні функції належності

регулюванні основних керованих параметрів.

Таким чином, в процесі експлуатації системи біоконверсії є можливість оцінити адекватність “підказок” експертної системи, а також накопичити певний об’єм експериментальних даних “входи-вихід”. При суттєвих розбіжностях реальних і модельних показників виходу біогазу виникає необхідність здійснити умовний зворотній зв’язок і провести тонку настройку математичної моделі прийняття рішення, а саме – підлаштувати змінні параметри нечіткої бази знань таким чином, щоб мінімізувати середню нев’язку модельних та експериментальних вихідних показників для усієї вибірки експериментальних даних. Ефективним засобом настройки моделей у вигляді нечітких баз знань є нейро-нечіткі мережі [4].

### Нейро-нечітка настройка моделі прийняття рішення

Даний метод настройки нечіткої бази знань полягає у представленні нечітких правил ЯКЦО-ТО у вигляді нейронної мережі. Кожен шар цієї мережі містить елементи-аналогії нейронів, які реалізують основні функції нечіткої бази знань – фазифікація, нечіткий логічний висновок та дефазифікація. При цьому логічні операції “І” та “АБО” в нечітких логічних правилах в рамках нечіткого логічного висновку замінені арифметичними операціями множення та додавання [4]. Отримана таким чином нейро-нечітка мережа, по-суті, відображає структуру зв’язків між факторами впливу, їх лінгвістичними термами та правилами, а також між нечіткими базами знань, що відповідають залежностям (1)-(6), через що набуває ієрархічного характеру (рис. 3).

Метод настройки нейро-нечіткої мережі [4] було розроблено на базі методу зворотнього поширення помилки, популярного для традиційних нейронних мереж [5]. Згідно даного методу, основною метою модифікації параметрів нейро-нечіткої мережі (тобто параметрів  $b$  і  $c$  функцій належності та ваг нечітких правил) є мінімізація наступного критерію якості настройки:

$$E_t = 0.5(\hat{y}_t - y_t)^2, \quad (9)$$

де  $\hat{y}_t$  та  $y_t$  – відповідно розрахункове (теоретичне) та експериментальне значення показника виходу біогазу на  $t$ -й ітерації процесу навчання.

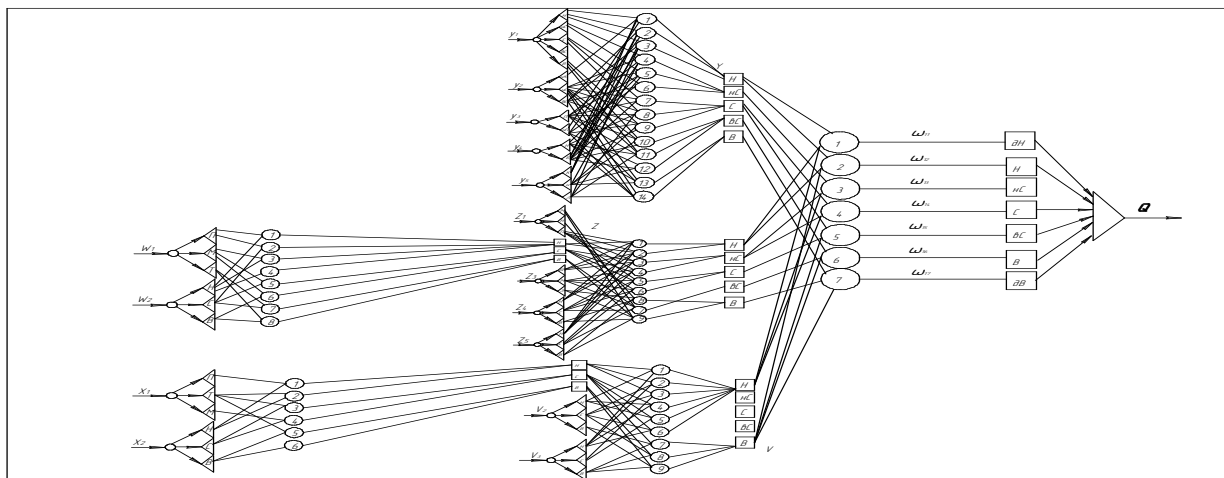


Рис. 3. Нейро-нечітка модель прогнозування виходу біогазу

В роботі [6] були проведені експериментальні дослідження, які підтвердили ефективність використання нейро-нечіткої мережі для настройки нечіткої бази знань, побудованої експертним шляхом для системи біоконверсії [2]. Результати настройки продемонстрували не лише прийнятну невязку між експериментальними та модельними показниками виходу біогазу, а й ступінь важливості різних факторів впливу. Покажемо це на прикладі графіків функцій належності лінгвістичних термів “низька”, “задовільна” та “висока” змінної  $w_2$  (стабільність температурного режиму), побудованих до та після настройки нейро-нечіткої мережі (рис. 4).

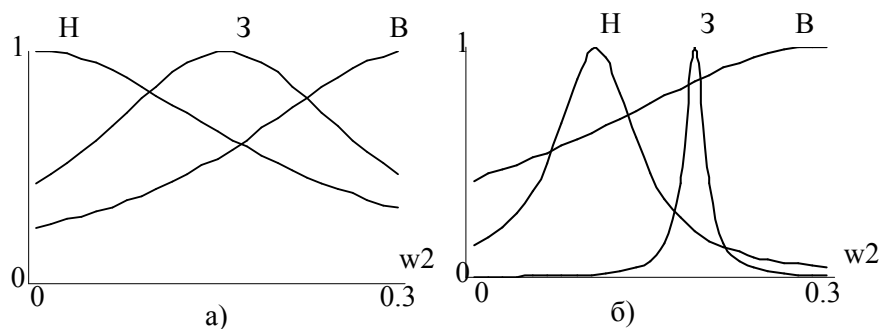


Рис. 4. Функції належності змінної  $w_2$  до настройки (а) і після (б).

Як можна бачити з рисунка, параметри функцій належності в результаті настройки зазнали суттєвих змін. Це може свідчити про певну складність, з якою зіткнувся експерт при розробці нечіткої бази знань – не було враховано всіх нюансів впливу даного фактора на величину виходу біогазу. Для інших вхідних величин зміни параметрів функцій належності були несуттєвими.

#### Висновки

- Описана система інтелектуальної підтримки прийняття рішень оператором системи біоконверсії може бути використана в якості ефективного засобу для встановлення величин основних керованих факторів впливу. Експертний характер деяких факторів обумовлює використання в якості математичної моделі даної системи нечітку базу знань. Крім того, загальна структура системи управління процесом біоконверсії характеризується наявністю зворотного зв'язку, який передбачає можливість настройки параметрів нечіткої бази знань на основі експериментальних даних, що накопичуються в процесі експлуатації системи.

Ефективним засобом настройки може слугувати нейро-нечітка мережа, що оснащена механізмом настройки за принципом методу зворотного поширення помилки.

- Розвиток запропонованої системи може здійснюватись різними шляхами, один з яких – її оснащення підсистемою автоматизованого отримання знань з існуючих експериментальних даних без участі експерта. Один із можливих засобів розв’язання даної задачі – використання генетичних алгоритмів оптимізації.

#### Список літератури

1. Graef S.P. Mathematical Modeling and Control of Anaerobic Digestion / S.P. Graef, J.W. Andrews. – CEP Symp. Ser. [136] 70. – 1974. – P. 101–127.
2. Ротштейн О.П. Багатофакторний аналіз технологічного процесу біоконверсії на основі лінгвістичної інформації / О.П. Ротштейн, Є.П. Ларюшкін, Д.І. Кательніков // Вісник ВПІ. – 1997. – № 3. – С. 38–45.
3. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, нейронные сети, генетические алгоритмы / А.П. Ротштейн. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 320 с.
4. Ротштейн А.П. Нейро-лингвистическая идентификация нелинейных зависимостей / А.П. Ротштейн, Ю.И. Митюшкін // Кибернетика и системный анализ. – 2000. – № 2. – С. 37–44.
5. Аведьян Э.Д. Алгоритмы настройки многослойных нейронных сетей // Автоматика и телемеханика / Э.Д. Аведьян. – 1995. – № 4. – С. 106–118.
6. Ротштейн О.П., Ларюшкін Є.П., Митюшкін Ю.І. Ідентифікація критерію якості системи біоконверсії нейро-нечіткою мережею / О.П. Ротштейн, Є.П. Ларюшкін, Ю.І. Митюшкін // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2005. – № 8. – С. 67–81.

*Ларюшкін Євген Павлович* – к.т.н. доцент кафедри теплоенергетики Вінницького національного технічного університету.

*Мітюшкін Юрій Ігорович* – к.т.н. доцент кафедри комп’ютерних систем управління Вінницького національного технічного університету.

*Леонова Ольга Вікторівна* – студентка Вінницького національного технічного університету.

*Янківська Олена Михайлівна* – студентка Вінницького національного технічного університету.