

УДК 536.24: 628.477

Г. С. РАТУШНЯК, І. А. КОЩЕЄВ

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГООЩАДНОСТІ БІОРЕАКТОРА З АЛЬТЕРНАТИВНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ФУНКЦІЙ НАЛЕЖНОСТІ ЛІНГВІСТИЧНИХ ЗМІННИХ**

**Анотація.** В статті наведено структуру ієрархічної нейро-нечіткої мережі, яка відповідає дереву логічного висновку факторів впливу на процес біоконверсії. Запропоновано нечітку матрицю знань про співвідношення на системному рівні впливу нетрадиційних джерел енергії. Складено систему нечітких логічних рівнянь до лінгвістичних висловлювань, що характеризують поверхню належності змінних за відповідними термами. Проведено дефазифікацію на рівні нетрадиційних джерел енергії, для чого обчислено значення функцій належності парних порівнянь, в результаті чого визначено ступені належності елементів до термів «низький, середній, високий». У вигляді нечітких множин представлено використання нетрадиційних джерел енергії, які описані функціями належності для лінгвістичної змінної «нетрадиційні джерела енергії».

**Ключові слова:** біореактор, біогаз, нечітка логіка, нетрадиційні джерела енергії, функція приналежності.

**Аннотация.** В статье приведена структура иерархической нейро-нечеткой сети, соответствующей дереву логического вывода факторов влияния на процесс биоконверсии. Предложена нечеткая матрица знаний о соотношении на системном уровне влияния нетрадиционных источников энергии. Составлена система нечетких логических уравнений к лингвистическим высказываниям, которые характеризуют поверхность принадлежности переменных с соответствующими термами. Проведена дефазификация на уровне нетрадиционных источников энергии, для чего вычислено значение функций принадлежности парных сравнений, в результате чего определены степени принадлежности элементов к термам «низкий, средний, высокий». В виде нечетких множеств представлено использование нетрадиционных источников энергии, которые описаны функциями принадлежности для лингвистической переменной «нетрадиционные источники энергии».

**Ключевые слова:** биореактор, биогаз, нечеткая логика, нетрадиционные источники тепла, функция принадлежности.

**Abstract.** The hierarchical structure of the neuro-fuzzy network that corresponds to the tree inference of factors influencing the bioconversion process is described in the article. A fuzzy matrix of knowledge of the ratio in the system level of impact of alternative energy sources was proposed. The system of fuzzy logic equations to linguistic expressions that characterize the surface of belonging of variables with relevant terms was made. The values of function of belonging of paired comparisons was calculated for carrying the defuzzification at the level on the alternative sources of energy and the degrees of elements to the terms "low, medium, high" was defined in result. The using of alternative energy sources was presented in the form of fuzzy sets, which was described by functions of belonging for the linguistic variable "non-traditional energy sources."

**Keywords:** a bioreactor, a biogas, a fuzzy logic, alternative energy sources, a belonging function

**Вступ**

Біоконверсія є технологічним процесом, який передбачає перероблення органічної маси з метою отримання теплоти або палива високої якості, а також екологічно чистих органічних добрив. Ефективність перероблення біомаси в енергетичну продукцію досягається лише за раціональних параметрів технологічних процесів, що забезпечують біоконверсію, основним з яких є підтримання температурного режиму процесу бродіння, що супроводжується виділенням тепловтрат у навколишнє середовище. Моделювання технологічного процесу біоконверсії з використанням нечіткої логіки дозволяє врахувати кожен фактор впливу на ефективність біоконверсії за його якісною або кількісною характеристикою [1, 2]. Використання нечітких систем зводиться до пошуку таких значень параметрів математичної моделі, які мінімізують розбіжність між бажаними результатами та результатами моделювання [3].

**Актуальність**

Перспективним методом отримання альтернативної енергії є виробництво біогазу завдяки технологічному процесу біоконверсії. Біогаз є однією з альтернатив природному газу, одержання якого може бути організоване шляхом процесу біоконверсії при збродженні в анаеробних умовах органічної речовини. Виникає необхідність розв'язання задачі інтелектуальної підтримки з використанням сучасних інформаційних технологій керування параметрами процесу біоконверсії на основі взаємозв'язку вхідних і вихідних кількісних та якісних змінних процесу. Для вирішення цієї задачі доцільно використовувати математичний апарат нечіткої логіки та лінгвістичної змінної

**Мета**

Метою роботи є моделювання продуктивності біореактора з альтернативними джерелами енергії з використанням нейро-нечіткої мережі для отримання функцій належності лінгвістичних змінних.

**Задачі**

1. Побудувати ієрархічну нейро-нечітку мережу, яка відповідає дереву логічного висновку факторів впливу на процес біоконверсії.
2. Описати нечітку матрицю знань про співвідношення на системному рівні впливу нетрадиційних джерел енергії.
3. Скласти систему нечітких логічних рівнянь до лінгвістичних висловлювань, які характеризують поверхню належності змінних за відповідними термами.

4. Провести дефазифікацію на рівні нетрадиційних джерел енергії та обчислити значення функцій належності парних порівнянь.
5. Визначити ступені належності елементів до термів «низький, середній, високий».
5. Представити у вигляді нечітких множин використання нетрадиційних джерел енергії та описати їх функціями належності для лінгвістичної змінної «нетрадиційні джерела енергії».

### Розв'язання задач

На основі дерева логічного висновку конструктивно-технологічних факторів впливу на вихід біогазу, отриманого в дослідженні [4], моделюємо структуру ієрархічної нейро-нечіткої мережі (рис. 1).

Кожний елемент цієї структури представляє собою певний рівень логічного дерева впливу на вихід біогазу в процесі біоконверсії. Кожний елемент має терм-множину експертних оцінок, що вказана на вході параметрів на рис.1 : «Н – низький», «НС – нижче середнього», «С – середній», «ВС – вище середнього»; «В – високий».

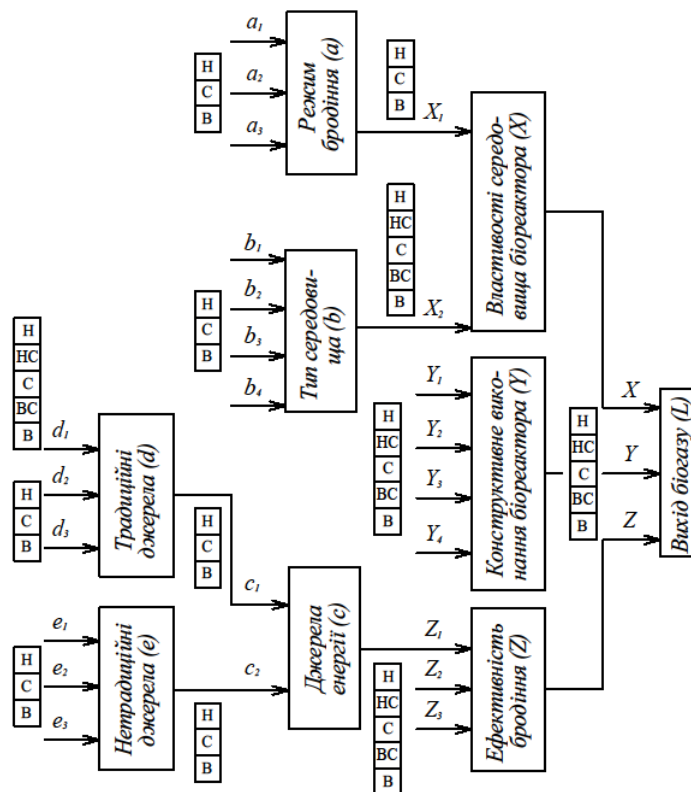


Рисунок 1 - Структура ієрархічної нейро-нечіткої мережі продуктивності біореактора  
Фактори впливу, що впливають на вихід біогазу:

$$L = f_L(X, Y, Z), \quad (1)$$

$$X = f_X(x_1, x_2), \quad (2)$$

$$Y = f_Y(y_1, y_2, y_3, y_4), \quad (3)$$

$$Z = f_Z(z_1, z_2, z_3), \quad (4)$$

$$x_1 = f_{x1}(a_1, a_2, a_3), \quad (5)$$

$$x_2 = f_{x2}(b_1, b_2, b_3, b_4), \quad (6)$$

$$z_1 = f_{z1}(c_1, c_2), \quad (7)$$

$$c_1 = f_{c1}(d_1, d_2, d_3), \quad (8)$$



$$\mu_{\epsilon}(\epsilon) = \mu_{\epsilon_1}(\epsilon_1) \wedge \mu_{\epsilon_2}(\epsilon_2) \vee \mu_{\epsilon_1}(\epsilon_1) \wedge \mu_{\epsilon_2}(\epsilon_2) \wedge \mu_{\epsilon_3}(\epsilon_3), \quad (11)$$

$$\mu_{\epsilon}(\epsilon) = \mu_{\epsilon_1}(\epsilon_1) \wedge \mu_{\epsilon_2}(\epsilon_2) \wedge \mu_{\epsilon_3}(\epsilon_3) \vee \mu_{\epsilon_1}(\epsilon_1) \wedge \mu_{\epsilon_2}(\epsilon_2) \wedge \mu_{\epsilon_3}(\epsilon_3) \vee \mu_{\epsilon_1}(\epsilon_1) \wedge \mu_{\epsilon_2}(\epsilon_2) \wedge \mu_{\epsilon_3}(\epsilon_3). \quad (12)$$

Техніка нечіткого логічного висновку, що застосовувалась до інформації на попередніх етапах, дозволяє обчислити показники, котрі прогноуються як нечіткі множини. Нечіткі множини визначають ступінь ефективності бродіння при виборі нетрадиційного джерела енергії для фіксованого вектора факторів впливу. Щоб перейти від нечітких множин до кількісної оцінки, необхідно виконати процедуру дефазифікації. Серед різних методів дефазифікації скористаємось методом «Centroid» [1]. Проводимо дефазифікацію на рівні нетрадиційних джерел енергії, для термостабілізації анаеробного бродіння обчислено значення функцій належності парних порівнянь, а також скористаємось шкалою Сааті для експертної оцінки елементів[2].

Матриця парних порівнянь різних нетрадиційних джерел енергії, з точки зору їх близькості до терму «низька» розміщена в табл.2. Фактор  $\epsilon$  – нетрадиційні джерела енергії визначений на універсальній множині  $U(\epsilon) = \{1, 2, 3\}$  (у.о.). Лінгвістичні значення цього фактора задаються терм-множиною  $T(\epsilon) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle$  [5].

Таблиця 2 – Парні порівняння нетрадиційних джерел енергії відповідно їх близькості до терму «низька»

		$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$
$A_{\text{низька}}(\epsilon) =$	$\epsilon_1$	1	6/9	1/9
	$\epsilon_2$	9/6	1	1/6
	$\epsilon_3$	9	6	1

При формуванні цієї матриці експертно визначався лише третій рядок, а елементи інших рядків обчислювалися, виходячи з властивостей отриманої матриці [2].

Відповідно до даних табл. 2 отримано ступені належності елементів  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  до терму «низька»:

$$\epsilon_{\text{низька}}(\epsilon_1) = \frac{1}{1 + \frac{6}{9} + \frac{1}{9}} = 0,5625, \quad (13)$$

$$\epsilon_{\text{низька}}(\epsilon_2) = \frac{1}{\frac{9}{6} + 1 + \frac{1}{6}} = 0,375, \quad (14)$$

$$\epsilon_{\text{низька}}(\epsilon_3) = \frac{1}{9 + 6 + 1} = 0,0625. \quad (15)$$

Аналогічно визначаються матриці парних порівнянь різних нетрадиційних джерел енергії, з точки зору їх близькості до терму «середня» та «висока».

Таблиця 3 – Парні порівняння нетрадиційних джерел енергії відповідно їх близькості до терму «середня»

		$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$
$A_{\text{середня}}(\epsilon) =$	$\epsilon_1$	1	9/1	6/1
	$\epsilon_2$	1/9	1	6/9
	$\epsilon_3$	1/6	9/6	1

Таблиця 4 – Парні порівняння нетрадиційних джерел енергії відповідно їх близькості до терму «висока»

		$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$
$A_{\text{висока}}(\epsilon) =$	$\epsilon_1$	1	1/6	9/6
	$\epsilon_2$	6/1	1	9/1
	$\epsilon_3$	6/9	1/9	1

Відповідно до даних табл. 3 отримано ступені належності елементів  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  до терму «середня»:

$$\epsilon_{\text{середня}}(\epsilon_1) = \frac{1}{1 + 9 + 6} = 0,0625, \quad (16)$$

$$\epsilon_{\text{середня}}(\epsilon_2) = \frac{1}{\frac{6}{9} + 1 + \frac{9}{9}} = 0,5625, \quad (17)$$

$$\epsilon_{\text{середня}}(\epsilon_3) = \frac{1}{\frac{6}{9} + \frac{9}{9} + 1} = 0,375. \quad (18)$$

Відповідно до даних табл. 4 отримано ступені належності елементів  $e_1, e_2, e_3$  до терму «висока»:

$$e_{\text{висока}}(e_1) = \frac{1}{1+\frac{1}{2}+\frac{1}{3}} = 0,375, \quad (19)$$

$$e_{\text{висока}}(e_2) = \frac{1}{8+1+9} = 0,0625, \quad (20)$$

$$e_{\text{висока}}(e_3) = \frac{1}{\frac{1}{3}+\frac{1}{7}+1} = 0,5625. \quad (21)$$

Отримані значення функцій належності пронормовані на одиницю шляхом ділення на найбільший ступінь належності. В результаті цього різні рівні використання нетрадиційних джерел енергії представляються у вигляді таких нечітких множин:

- нетрадиційне джерело енергії «низька»  
 $= \left\{ \frac{0,5625}{1}, \frac{0,375}{2}, \frac{0,0625}{3} \right\};$
- нетрадиційне джерело енергії «середня»  
 $= \left\{ \frac{0,0625}{1}, \frac{0,5625}{2}, \frac{0,375}{3} \right\};$
- нетрадиційне джерело енергії «висока»  
 $= \left\{ \frac{0,375}{1}, \frac{0,0625}{2}, \frac{0,5625}{3} \right\}.$

Нечіткі множини, що характеризують функції належності для лінгвістичної змінної «нетрадиційні джерела енергії» наведено на рис.2.

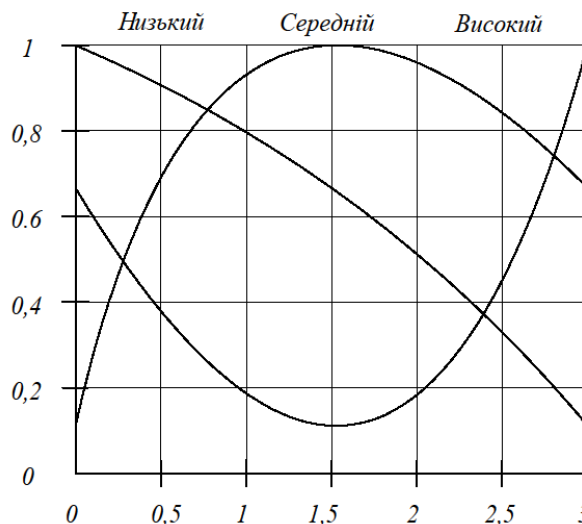


Рисунок 2 - Функції належності для лінгвістичної змінної «нетрадиційні джерела енергії»

В результаті побудови графіків функцій належності на рис. 2, отримано графічні моделі залежності виходу біогазу при використанні різних нетрадиційних джерел енергії. Отримана база знань про зв'язки нечітких термів вхідних та вихідних лінгвістичних змінних дозволяє оптимізувати вибір нетрадиційного джерела енергії для забезпечення енергоощадного процесу термостабілізації анаеробного бродіння органічної маси при біоконверсії в біореакторі.

### Висновки

1. Запропоновано структуру ієрархічної нейро-нечіткої мережі продуктивності біореактора з використанням нетрадиційних джерел енергії;
2. Наведено нечітку матрицю знань про співвідношення на системному рівні впливу нетрадиційних джерел енергії;
3. Складено систему нечітких логічних рівнянь до лінгвістичних висловлювань, що характеризують поверхню належності змінних за відповідними термами;
4. Проведено дефазифікацію на рівні нетрадиційних джерел енергії, для чого обчислено значення функцій належності парних порівнянь, в результаті чого визначено ступені належності елементів до термів «низький, середній, високий»;
5. Використання нетрадиційних джерел енергії представлено у вигляді нечітких множин, які описані функціями належності для лінгвістичної змінної «нетрадиційні джерела енергії».

#### Список літератури

1. Ратушняк Г. С. Енергозберігаючі відновлювальні джерела тепlopостачання / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула, К. В. Анохіна – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 170 с.
2. Ротштейн О. П. Soft Computing в біотехнології: багатофакторний аналіз і діагностика: Монографія/ О.П. Ротштейн, Є.П. Ларюшкін, Ю.І. Мітюшкін. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 144с.
3. Ратушняк Г. С. Енергоефективні технологічні процеси та обладнання біоконверсії : монографія / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 148 с.
4. Кошєєв І. А. Моделювання процесу біоконверсії в біореакторі з нетрадиційними джерелами енергії з використанням нечіткої логіки // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2015: №1. – С. 86–91.
5. Ратушняк Г. С. Експертна система на базі нечіткої логіки прогнозування продуктивності біогазової установки з механічним перемішувальним пристроєм / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2010. - №3 (19). – С. 20-25.

#### Відомості про авторів

**Ратушняк Георгій Сергійович** – к.т.н., професор, декан ФБТЕГП Вінницького національного технічного університету, академік Академії будівництва України, (0432) 465-204.

**Кошєєв Іван Анатолійович** – аспірант кафедри ТГП Вінницького національного технічного університету.