

МОДЕЛЬ БАГАТОФАКТОРНОЇ ОЦІНКИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ МЕРЕЖ

Г. С. Ратушняк, Р. В. Степанковський, С. В. Савчук

Стаття присвячена проблемі енергоефективності функціонування аеродинамічних мереж в різних галузях промисловості. Запропоновано новий підхід за допомогою нечіткої бази знань як взаємозв'язаної сукупності математичних моделей, алгоритмів, формалізованих методик з використанням експертно-лінгвістичної інформації для прогнозування енергоефективності функціонування аеродинамічних мереж в залежності від факторів, що її обумовлюють. Розроблена структура математичної моделі з використанням основних операцій нечіткої логіки: представлення нечіткої множини, застосування продукційних правил “ЯКЩО – ТО”, перетворення в чітке значення, для багатофакторної оцінки енергоефективності функціонування аеродинамічної мережі. Запропонована модель багатофакторної оцінки енергоефективності функціонування аеродинамічної мережі, що дозволяє врахувати особливості факторів впливу, які виникають на стадії проектування, під час будівельно-монтажних робіт та в процесі експлуатації, оптимізувати їх та надати необхідні рекомендації.

Статья посвящена проблеме энергоэффективности функционирования аэродинамических сетей в разных отраслях промышленности. Предложено новый подход с помощью нечеткой базы знаний как взаимосвязанной совокупности математических моделей, алгоритмов, формализованных методик с использованием экспертно-лингвистической информации для прогнозирования энергоэффективности функционирования аэродинамических сетей в зависимости от факторов, что ее обуславливают. Разработанная структура математической модели с использованием основных операций нечеткой логики: представление нечеткого множественного числа, применения продукционных правил, “ЕСЛИ – ТО”, превращение в четкое значение, для многофакторной оценки энергоэффективности функционирования аэродинамической сети. Предложенная модель многофакторной оценки энергоэффективности функционирования аэродинамической сети, что позволяет учесть особенности факторов влияния, которые возникают на стадии проектирования, во время строительно-монтажных работ, а также в процессе эксплуатации, оптимизировать их и дать необходимые рекомендации.

The article is devoted the problem energy efficiency of functioning aerodynamic networks in different industries of industry. New approach is offered by the unclear base of knowledges as associate aggregate of mathematical models, algorithms, formalized methods, with the use of expertly linguistic to information for prognostication of energy efficiency the functioning of aerodynamic networks depending on factors, that it is stipulated. The developed structure of mathematical model is with the use of basic operations of fuzzy logic: presentation of unclear plural, application of rules of products, “IF – THEN”, converting into a clear value, for the multivariable estimation of energy efficiency of functioning aerodynamic network. Offered model of multivariable estimation of energy efficiency of functioning aerodynamic network, that allows to take into account the features of factors influences which arise up on the stage of planning, during buildings and installation works, and also in the process of exploitation, to optimize them and give necessary recommendations.

Вступ

Впровадження нової техніки та прогресивних технологій, проведення заходів щодо покращення умов праці на підприємствах харчової промисловості, будівельному комплексі, громадських установах призводить до необхідності реконструювання та створення ефективних аеродинамічних мереж. Аеродинамічні мережі є складними технічними системами, безперебійна робота яких забезпечує ефективний технологічний процес підприємства. Проектування, підбір відповідного обладнання, монтаж, введення в експлуатацію та сама експлуатація повинні бути скоординованими та направленими на досягнення енергоощадності [1-3].

Ієрархічна класифікація факторів, що впливають на енергоефективність функціонування

аеродинамічних мереж, розглянута в роботі [4]. На базі класифікації сукупності факторів запропоновано модель ієрархічних співвідношень між лінгвістичними змінними у вигляді дерева логічного висновку, проведено оцінювання лінгвістичних змінних за допомогою нечітких термів [4]. Невизначеність функціонування аеродинамічної мережі під впливом сукупності збуджуючих зовнішніх та внутрішніх факторів призводить до зростання ризиків від прийняття неефективних рішень. Результатом такої невизначеності можуть бути негативні техніко-економічні показники функціонування системи. На початкових етапах проектування виникає необхідність оцінювання пропозицій і умов на будівництво об'єкта.

Метою роботи є створення моделі для багатофакторного оцінювання енергоефективності функціонування аеродинамічних мереж й оптимізації факторів впливу для надання необхідних рекомендацій.

Основна частина

Структура математичної моделі для багатофакторної оцінки енергоефективності функціонування аеродинамічної мережі використовує основні операції нечіткої логіки: подання нечіткої множини (фазифікація), застосування продукційних правил “ЯКЩО – ТО” (правила нечітких висновків), перетворення в чітке значення (дефазифікація) [5, 6].

На початковому етапі розроблення моделі багатофакторної оцінки енергоефективності функціонування аеродинамічних мереж передбачається побудова функцій належності – фазифікація нечітких оцінок факторів впливу. Функції належності формують нечіткі терми для оцінки значень лінгвістичних змінних, які входять до факторів впливу [4]. Для досліджуваної предметної області застосовуємо дзвіноподібну модель функції належності, яка забезпечує достатню “гнучкість” подання нечіткої інформації.

На прикладі побудови функцій належності для фактора впливу “рівень налагодження аеродинамічної мережі”, що описується в роботі [4], виконана побудова функцій належності (рис. 1-3) таких факторів впливу: науково-технічний рівень проектних рішень, якість будівельно-монтажних робіт та експлуатаційні показники для оцінювання термінальних вершин дерева логічного висновку всіх нечітких термів та проведення подальшого моделювання.

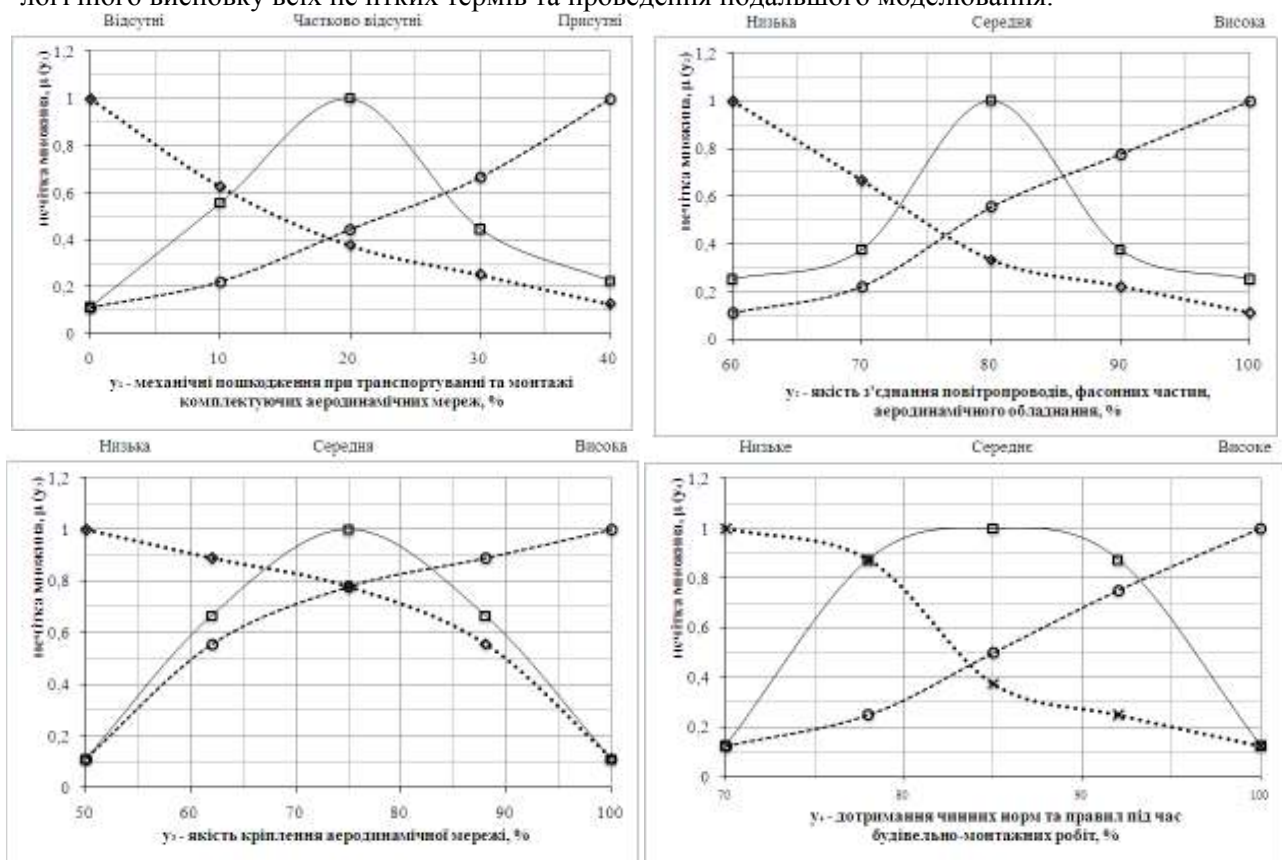


Рис. 1. Функції належності для лінгвістичних змінних, що описують якість будівельно-монтажних робіт

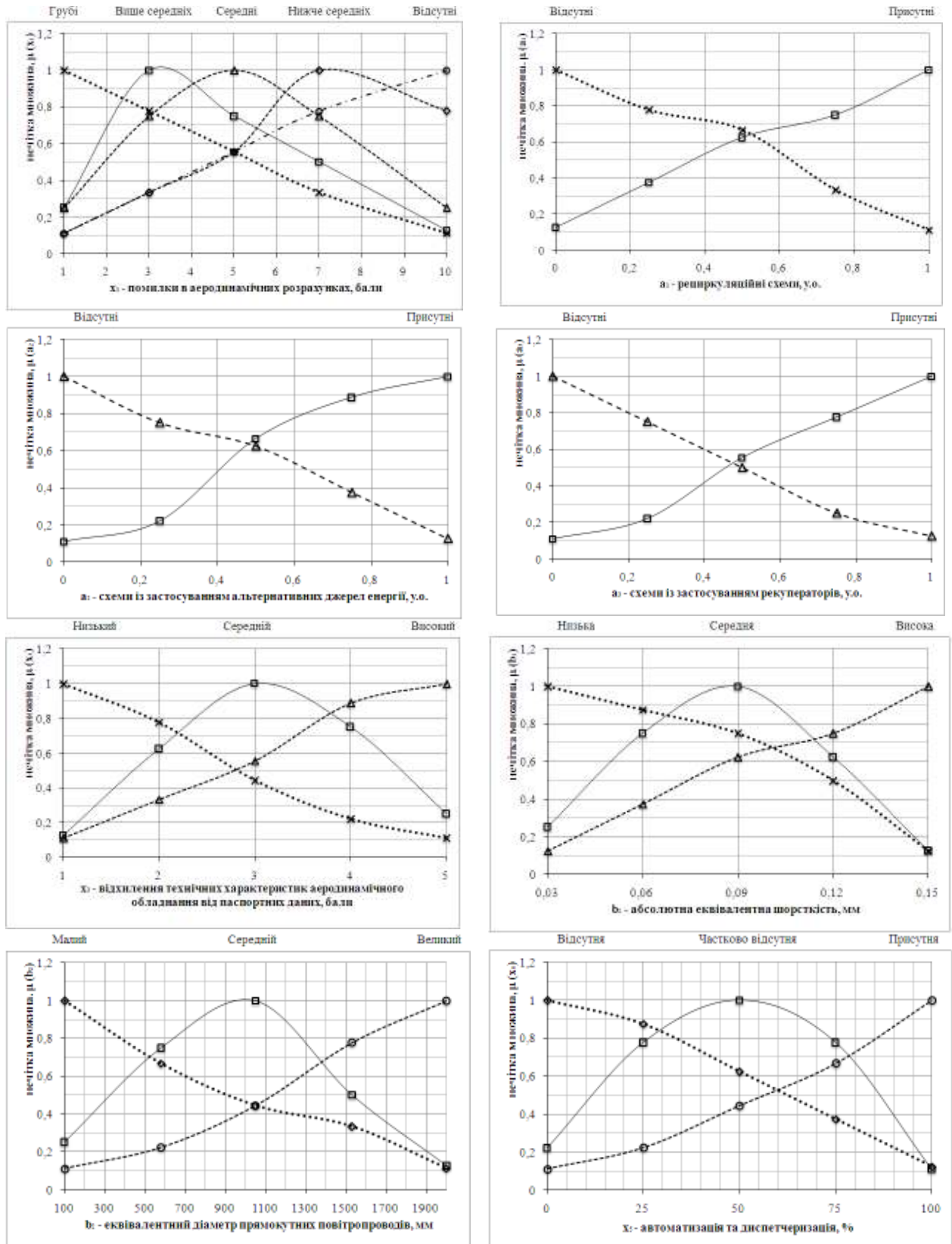


Рис. 2. Функції належності для лінгвістичних змінних, що описують науково-технічний рівень проектних рішень

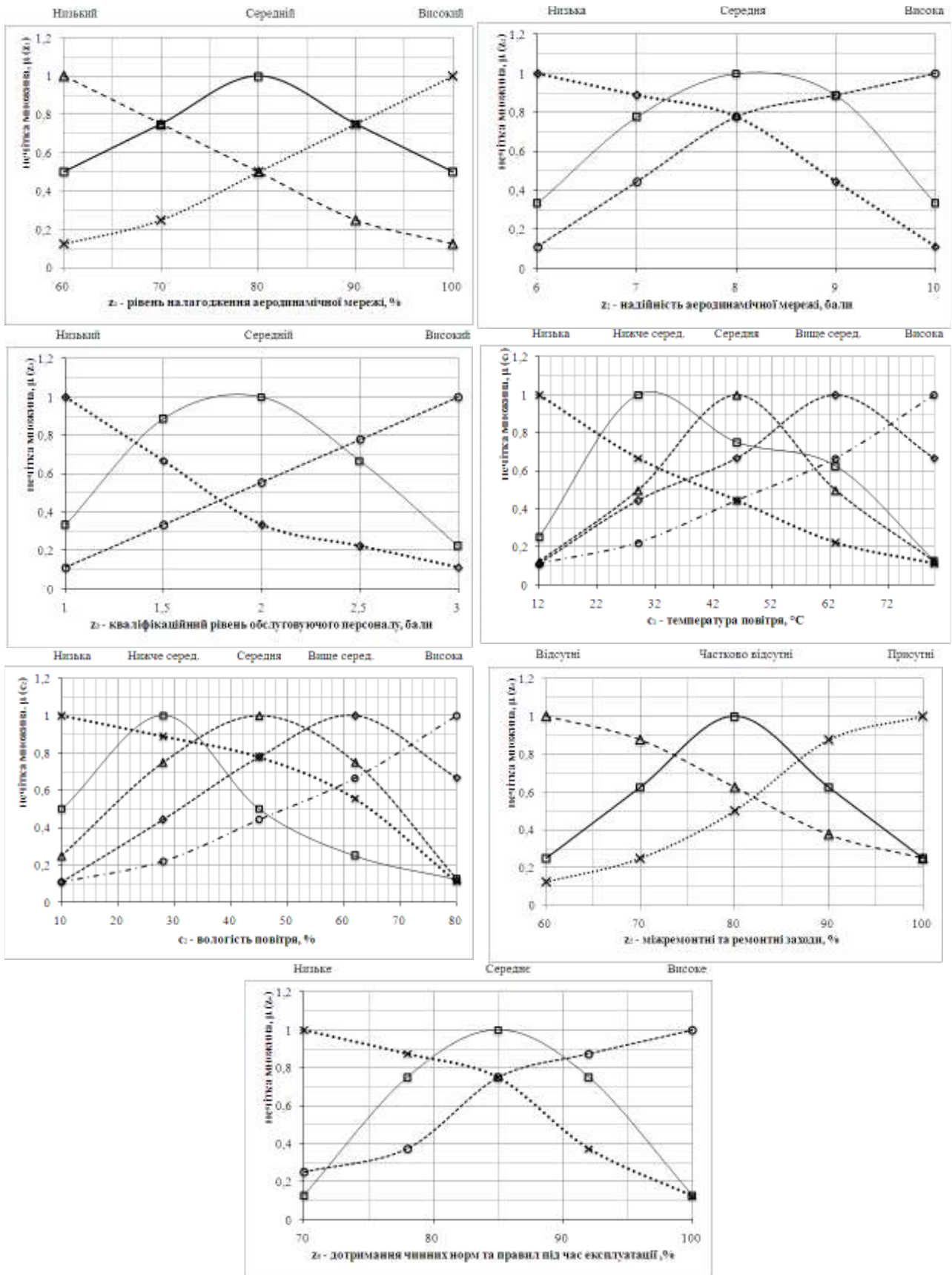


Рис. 3. Функції належності для лінгвістичних змінних, що описують експлуатаційні показники

Моделювання інтелектуальної підтримки прийняття рішень щодо підвищення енергоефективності функціонування аеродинамічних мереж (енергоємність аеродинамічної мережі) проводиться за допомогою нечітких логічних рівнянь.

Для перетворення нечітких вхідних даних на необхідні керуючі впливи, що мають також нечіткий характер використовуються нечіткі умовні правила “ЯКЩО – ТО” у термінах лінгвістичних змінних та нечітких множин.

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що встановлює зв’язок між факторами впливу на енергоефективність функціонування аеродинамічних мереж (L_{AM}) з проектними рішеннями (X), будівельно-монтажними роботами (Y) та експлуатаційними показниками (Z), виконується за допомогою системи терм-множини

$T(L_{AM}) = \langle \text{низька, нижче середнього, середня, вище середнього, висока} \rangle;$

$T(X) = \langle \text{низький, нижче середнього, середній, вище середнього, високий} \rangle;$

$T(Y) = \langle \text{низька, нижче середнього, середня, вище середнього, висока} \rangle;$

$T(Z) = \langle \text{низькі, нижче середнього, середні, вище середнього, високі} \rangle.$

Рівень показника енергоємності аеродинамічної мережі L_{AM} поданий у вигляді співвідношення [4]

$$L_{AM} = f(X; Y; Z), \quad (1)$$

де X – лінгвістична змінна (ЛЗ), що описує науково-технічний рівень проектних рішень;

Y – ЛЗ, що описує якість будівельно-монтажних робіт;

Z – ЛЗ, що описує якість експлуатаційних показників.

Нечітка база знань, що відповідає залежності (1), з урахуванням введених терм-множин, наведена в таблиці 1.

Таблиця 1

Продукційні нечіткі правила “ЯКЩО – ТО” для залежності (1)

Умова			Наслідок
ЯКЩО			ТО
Науково-технічний рівень проектних рішень (X)	Будівельно-монтажні роботи (Y)	Експлуатаційні показники (Z)	Енергоємність аеродинамічних мереж (L_{AM})
Низький (Н)	Низькі (Н)	Низькі (Н)	Низька (Н)
Низький (Н)	Нижче середніх (нС)	Низькі (Н)	
Низький (Н)	Низькі (Н)	Нижче середніх (нС)	
Нижче середніх (нС)	Низькі (Н)	Низькі (Н)	Нижче середнього (нС)
Низький (Н)	Середні (С)	Середні (С)	
Нижче середніх (нС)	Середні (С)	Низькі (Н)	
Середній (С)	Низькі (Н)	Нижче середніх (нС)	Середня (С)
Нижче середніх (нС)	Нижче середніх (нС)	Низькі (Н)	
Середній (С)	Середні (С)	Середня (С)	
Нижче середніх (нС)	Середні (С)	Середня (С)	Вище середнього (вС)
Середній (С)	Середні (С)	Нижче середніх (нС)	
Середній (С)	Вище середніх (вС)	Нижче середніх (нС)	
Середній (С)	Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	Висока (В)
Середній (С)	Вище середніх (вС)	Високі (В)	
Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	
Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	Високі (В)	Висока (В)
Високий (В)	Вище середніх (вС)	Високі (В)	
Високий (В)	Високі (В)	Вище середніх (вС)	
Високий (В)	Високі (В)	Високі (В)	

Продукційним нечітким правилам для залежності (1), що наведені в табл. 1, відповідає система нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню незалежності змінних відповідного терму [5, 6]

$$\mu_H(L_{AM}) = \mu_H(X) \wedge \mu_H(Y) \wedge \mu_H(Z) \vee \mu_H(X) \wedge \mu_{nC}(Y) \wedge \mu_H(Z) \vee \mu_H(X) \wedge \mu_H(Y) \wedge \mu_{nC}(Z) \vee \mu_{nC}(X) \wedge \mu_H(Y) \wedge \mu_H(Z); \quad (2)$$

$$\mu_{nC}(L_{AM}) = \mu_H(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_C(Z) \vee \mu_{nC}(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_H(Z) \vee \mu_C(X) \wedge \mu_H(Y) \wedge \mu_{nC}(Z) \vee \mu_{nC}(X) \wedge \mu_{nC}(Y) \wedge \mu_H(Z); \quad (3)$$

$$\mu_C(L_{AM}) = \mu_C(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_C(Z) \vee \mu_{nC}(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_C(Z) \vee \mu_C(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_{nC}(Z) \vee \mu_C(X) \wedge \mu_{nC}(Y) \wedge \mu_{nC}(Z); \quad (4)$$

$$\mu_{\sigma C}(L_{AM}) = \mu_C(X) \wedge \mu_{\sigma C}(Y) \wedge \mu_{\sigma C}(Z) \vee \mu_{nC}(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_C(Z) \vee \mu_C(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_{nC}(Z) \vee \mu_C(X) \wedge \mu_{\sigma C}(Y) \wedge \mu_{nC}(Z); \quad (5)$$

$$\mu_B(L_{AM}) = \mu_B(X) \wedge \mu_{\sigma C}(Y) \wedge \mu_B(Z) \vee \mu_B(X) \wedge \mu_B(Y) \wedge \mu_{\sigma C}(Z) \vee \mu_B(X) \wedge \mu_B(Y) \wedge \mu_B(Z). \quad (6)$$

Аналогічно прикладу (табл. 1) і (2)-(6) розробляються лінгвістичні висловлювання та відповідні системи нечітких логічних рівнянь для кожної лінгвістичної змінної вищенаведених рівнів.

Використовуючи функції належності (рис. 1, рис. 2, рис. 3), знаходимо аналітичні моделі функцій належності оцінок вхідних змінних для всіх термів, що описуються такою лінійною залежністю [5]

$$\mu_T(u^*) = \frac{au^*+b}{c}, \quad (7)$$

де $a = \mu_{i+1} - \mu_i$;
 $b = \mu_i(u_{i+1} - u_i) - u_i(\mu_{i+1} - \mu_i)$;
 $c = u_{i+1} - u_i$.

Для оцінювання енергоефективності аеродинамічної мережі, з відповідними умовами її функціонування, підставляємо параметри кожної лінгвістичної змінної в аналітичні моделі за заданими рівняннями, що характеризують дану мережу, знаходимо значення функцій належності змінних X, Y, Z, результати яких наведено в таблиці 2.

Використовуючи аналітичні формули (2)-(6), значення функцій належності змінних X, Y, Z (табл.2) отримуємо значення функцій належності терм-оцінок змінної L_{AM}

$$\mu_H(L_{AM}) = 0,63 \cdot 0,59 \cdot 1 \vee 0,63 \cdot 0,59 \cdot 1 \vee 0,63 \cdot 0,59 \cdot 1 \vee 0,77 \cdot 0,59 \cdot 1 = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1;$$

$$\mu_{nC}(L_{AM}) = 0,63 \cdot 0,59 \cdot 1 \vee 0,77 \cdot 0,59 \cdot 1 \vee 0,77 \cdot 0,59 \cdot 1 \vee 0,77 \cdot 0,59 \cdot 1 = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1;$$

$$\mu_C(L_{AM}) = 0,77 \cdot 0,59 \cdot 1 \vee 0,77 \cdot 0,59 \cdot 1 \vee 0,77 \cdot 0,59 \cdot 1 \vee 0,77 \cdot 0,76 \cdot 1 = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1;$$

$$\mu_{\sigma C}(L_{AM}) = 0,77 \cdot 0,76 \cdot 0,77 \vee 0,77 \cdot 0,59 \cdot 1 \vee 0,77 \cdot 0,59 \cdot 1 \vee 0,77 \cdot 0,76 \cdot 1 = 0,77 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 0,77;$$

$$\mu_B(L_{AM}) = 0,78 \cdot 0,76 \cdot 0,77 \vee 0,78 \cdot 1 \cdot 0,77 \vee 0,78 \cdot 1 \cdot 0,77 = 0,78 \cdot 1 \cdot 1 = 0,78.$$

Таблиця 2

Значення функцій належності факторів, що впливають на енергоефективне функціонування аеродинамічних мереж

Фактор впливу (U*)	Значення	Значення функції належності термів для оцінки фактора U*	Значення функції належності змінних (X, Y, Z)	
1	2	3	4	
<i>Науково-технічний рівень проектних рішень</i>				
x ₁ – помилки в аеродинамічних розрахунках	3 бали	$\mu_{Гр}(x_1)=0,52$ $\mu_{вс}(x_1)=1$ $\mu_{с}(x_1)=0,75$ $\mu_{нс}(x_1)=0,33$ $\mu_{Відс}(x_1)=0,33$	$\mu_H(X)=0,63$ $\mu_{нс}(X)=0,77$ $\mu_{с}(X)=0,77$ $\mu_{вс}(X)=0,78$ $\mu_B(X)=0,78$	
x ₂ – конструктивне виконання схем	a ₁ – рециркуляційні схеми	0,5 у.о.		$\mu_{Відс}(a_1)=0,67$ $\mu_{Гр}(a_1)=0,63$
	a ₂ – схеми із застосуванням альтернативних джерел енергії	0,75 у.о.		$\mu_{Відс}(a_2)=0,38$ $\mu_{Гр}(a_2)=0,89$
	a ₃ – схеми із застосуванням рекуператорів	0,25 у.о.		$\mu_{Відс}(a_3)=0,75$ $\mu_{Гр}(a_3)=0,22$
x ₃ – відхилення технічних характеристик аеродинамічного обладнання від паспортних даних	2 бали	$\mu_H(x_3)=0,78$ $\mu_{с}(x_3)=0,63$ $\mu_B(x_3)=0,33$		
x ₄ – аеродинамічні характеристики повітропроводів	b ₁ – абсолютна еквівалентна шорсткість	0,03 мм		$\mu_H(b_1)=1$ $\mu_{с}(b_1)=0,25$ $\mu_B(b_1)=0,13$
	b ₂ – еквівалентний діаметр прямокутних повітропроводів	1050 мм	$\mu_M(b_2)=0,44$ $\mu_{с}(b_2)=1$ $\mu_{Вел}(b_2)=0,44$	
x ₅ – автоматизація та диспетчеризація	75 %	$\mu_{Відс}(x_5)=0,38$ $\mu_{чв}(x_5)=0,77$ $\mu_{Гр}(x_5)=0,67$		
<i>Будівельно-монтажні роботи</i>				
y ₁ - механічні пошкодження при транспортуванні та монтажі комплектуючих аеродинамічних мереж	10 %	$\mu_{Відс}(y_1)=0,63$ $\mu_{чв}(y_1)=0,55$ $\mu_{Гр}(y_1)=0,22$	$\mu_H(Y)=0,59$ $\mu_{нс}(Y)=0,59$ $\mu_{с}(Y)=0,59$ $\mu_{вс}(Y)=0,76$ $\mu_B(Y)=1$	
y ₂ – якість з'єднання повітропроводів, фасонних частин, аеродинамічного обладнання	90 %	$\mu_H(y_2)=0,23$ $\mu_{с}(y_2)=0,38$ $\mu_B(y_2)=0,76$		
y ₃ – якість кріплення аеродинамічної мережі	88 %	$\mu_H(y_3)=0,59$ $\mu_{с}(y_3)=0,63$ $\mu_B(y_3)=0,88$		
y ₄ – дотримання чинних норм та правил під час будівельно-монтажних робіт	100 %	$\mu_H(y_4)=0,13$ $\mu_{с}(y_4)=0,13$ $\mu_B(y_4)=1$		

				Продовження табл. 2		
1	2	3	4			
<i>Експлуатаційні показники</i>						
z_1 – рівень налагодження аеродинамічної мережі	90 %	$\mu_H(z_1)=0,75$ $\mu_C(z_1)=0,75$ $\mu_B(z_1)=0,25$				
z_2 – надійність аеродинамічної мережі	7 балів	$\mu_H(z_2)=0,9$ $\mu_C(z_2)=0,76$ $\mu_B(z_2)=0,42$				
z_3 – кваліфікаційний рівень обслуговуючого персоналу	2,5 балів	$\mu_H(z_3)=0,23$ $\mu_C(z_3)=0,68$ $\mu_B(z_3)=0,77$				
z_4 – мікроклімат обслуговуючого приміщення	c_1 – температура повітря	46 °С	$\mu_H(c_1)=0,45$ $\mu_{HC}(c_1)=0,75$ $\mu_C(c_1)=1$ $\mu_{BC}(c_1)=0,66$ $\mu_B(c_1)=0,44$	$\mu_H(z_4)=0,5$ $\mu_C(z_4)=1$ $\mu_B(z_4)=0,44$	$\mu_H(Z)=1$ $\mu_{HC}(Z)=1$ $\mu_C(Z)=1$ $\mu_{BC}(Z)=0,77$ $\mu_B(Z)=0,77$	
	c_2 – вологість повітря	45 %	$\mu_H(c_2)=0,78$ $\mu_{HC}(c_2)=0,5$ $\mu_C(c_2)=1$ $\mu_{BC}(c_2)=0,77$ $\mu_B(c_2)=0,44$			
z_5 – міжремонтні та ремонтні заходи	100 %	$\mu_{Видс}(z_5)=1$ $\mu_{чВ}(z_5)=0,25$ $\mu_{Пр}(z_5)=0,25$				
z_6 – дотримання чинних норм та правил під час експлуатації	100 %	$\mu_H(z_6)=0,13$ $\mu_C(z_6)=0,13$ $\mu_B(z_6)=1$				

Наступним (кінцевим) етапом моделювання є процес дефазифікації. На вході цього блока маємо нечітку множину (об'єднання вихідних нечітких множин), а на виході чітке значення. Використовуємо найбільш поширений метод дефазифікації знаходження “центру тяжіння” плоскої фігури, яка обмежена функцією належності нечіткої множини та горизонтальною координатою [5, 6].

Для визначення величини енергоємності аеродинамічної мережі використаємо бальну шкалу, згідно з рекомендаціями [5, 6]. Інтуїтивна величина бальної шкали не буде впливати на істинний результат величини енергоємності аеродинамічної мережі: запропонуємо – 5-ти бальну шкалу.

Здійснимо прогнозування енергоефективності функціонування аеродинамічної мережі задаючись конкретними параметрами факторів впливу (табл. 2) та використовуючи таку формулу [5] за умови, що $\underline{L_{AM}} = 1$ бал, $\overline{L_{AM}} = 5$ балів

$$L_{AM}^* = \frac{\sum_{i=1}^m M_{q_i}(L_{AM}) \cdot \left[\underline{L_{AM}} + \frac{\overline{L_{AM}} - \underline{L_{AM}}}{m-1} \cdot (i-1) \right]}{\sum_{i=1}^m M_{q_i}(L_{AM})} =$$

$$= \frac{1 \cdot 1 + 1 \cdot 2 + 1 \cdot 3 + 0,77 \cdot 4 + 0,78 \cdot 5}{1 + 1 + 1 + 0,77 + 0,78} = 2,85 \text{ бала,}$$

де $\underline{L_{AM}}$ ($\overline{L_{AM}}$) – найменше (найбільше) значення змінної L_{AM} .

Отже, енергоефективність функціонування аеродинамічної мережі по 5-ти бальній шкалі з запропонованими параметрами (табл. 2) становить 2,85 бала.

Висновки

- Розроблена структура математичної моделі з використанням основних операцій нечіткої логіки: представлення нечіткої множини, застосування продукційних правил “ЯКЩО – ТО”, перетворення в чітке значення, для багатофакторної оцінки енергоефективності функціонування аеродинамічної мережі.
- Модель багатофакторної оцінки енергоефективності функціонування аеродинамічної мережі дозволяє врахувати особливості факторів впливу, що виникають на стадії проектування, під час будівельно-монтажних робіт та в процесі експлуатації, оптимізувати їх та надати необхідні рекомендації на початкових стадіях проектування.

Використана література

1. Донин Л. С. Справочник по вентиляции в пищевой промышленности // Л.С. Донин. – М.: издательство «Пищевая промышленность». 1977. – 352 с.
2. Богуславский Л. Д. Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха: Справ. Пособие / Л. Д. Богуславский, В. И. Ливчак, В. П. Титов. – М.: Стройиздат, 1990. – 624 с.
3. Вахвахов Г. Г. Энергосбережение и надежность вентиляторных установок / Г. Г. Вахвахов. – М.: Стройиздат, 1989. – 176 с.
4. Ратушняк Г. С. / Моделювання енергоефективності функціонування аеродинамічних мереж за допомогою нечіткої бази знань / Г. С. Ратушняк, Р. В. Степанковський // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. – 2012. - Збірник № 10. – С. 155-164.
5. Ротштейн А. П. Интеллектуальные технологии индентификации. Нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети / Ротштейн А. П. – Винница: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 320 с.
6. Ротштейн А. П. / Нечеткая надежность алгоритмических процессов / А. Ротштейн, С. Штовба. – Винница: Континент – ПРИМ, 1997. – 142 с.

Ратушняк Георгій Сергійович – к.т.н., професор, завідувач кафедри теплогазопостачання Вінницького національного технічного університету.

Степанковський Роман Володимирович – аспірант кафедри теплогазопостачання Вінницького національного технічного університету.

Савчук Святослав Вікторович – студент Вінницького національного технічного університету.