

УДК 69.03

## Аналіз впливу факторів на надійність забезпечення енергоефективності огорожувальних конструкцій у вузлах примикання з використанням лінгвістичних змінних

Г. С. Ратушняк<sup>1</sup>, О. Г. Лялюк<sup>2</sup>, О. Ю. Горюн<sup>3</sup>

<sup>1</sup> к.т.н., проф. Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, [ratusnak@gmail.com](mailto:ratusnak@gmail.com), ORCID:0000-0001-9656-5150

<sup>2</sup> к.т.н., доц., Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, [Lyaluk74@gmail.com](mailto:Lyaluk74@gmail.com), ORCID 0000-0001-6446-92443

<sup>3</sup> студ., Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, [oksana2718@ukr.net](mailto:oksana2718@ukr.net)

***Анотація.** Застосування інноваційних енергоощадних конструктивних вузлів примикання при будівництві дозволить підвищити енергоефективність багатоповерхових житлових будинків та зменшити затрати коштів на оплату спожитих енергоносіїв на опалення в холодний період року. Надійність будь-якої системи залежить від проектування, виготовлення і експлуатації. Довговічність і надійність конструкції може бути підвищена на стадії проектування, тобто під час наукових досліджень, конструювання, розрахунків і проектних розробок. Розроблена ієрархія факторів впливу на надійність забезпечення енергоефективності огорожувальних конструкцій у вузлах примикання. Проведено аналіз впливу факторів на надійність забезпечення енергоефективності огорожувальних конструкцій у вузлах примикання з використанням лінгвістичних змінних. З метою оцінки надійності теплоізоляційного матеріалу сформовано експертні бази знань та написано нечіткі логічні рівняння, а також побудовано поверхню відгуку.*

***Ключові слова:** математична модель, надійність, лінгвістична змінна, нечіткі логічні рівняння, теплоізоляційний матеріал, вузол примикання*

**Вступ.** Забезпечення енергетичної ефективності будівель – це організаційно-технологічні заходи, результатом виконання яких є підвищення теплотехнічних показників огорожувальних конструкцій будівель та/або показників споживання енергетичних ресурсів інженерними системами [1]. Основними технічними заходами щодо зменшення тепловтрат через огорожувальні конструкції є утеплення фасадів зовнішніх стін, перекриття останнього поверху та підвальних приміщень, встановлення енергоощадних вікон.

Надійність – властивість технічних об'єктів зберігати в часі в установлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати потрібні функції в заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування [2].

**Актуальність дослідження.** Застосування інноваційних енергоощадних конструктивних вузлів дозволяє суттєво знизити витрати на оплату спожитих енергоносіїв на опалення. Це підвищує загальну енергоефективність будівель відповідно до вимог ДБН В.2.6-31:2016 і є актуальною задачею.

**Останні дослідження та публікації.** На факультеті будівництва, теплоенергетики та газопостачання Вінницького національного технічного університету разом з концерном "Поділля" проводилися наукові спостереження за результа-

тами тепловізійного обстеження багатоповерхового житлового будинку [3]. Виявлено, що характерними місцями з підвищеними тепловтратами є місця примикання. Незважаючи на те, що при проектуванні й будівництві дотримувались чинних вимог щодо величин термічного опору. Тому врахування тепловтрат у місцях примикання різних елементів зовнішніх огорожувальних конструкцій є важливим завданням.

**Формулювання цілей статті.** Метою статі є побудова поверхні відгуку, що показує вплив факторів на надійність забезпечення енергоефективності огорожувальних конструкцій у вузлах примикання з використанням лінгвістичних змінних.

**Основна частина.** Фактори, що впливають на надійність термомодернізації будівель шляхом улаштування енергозбережних вузлів примикання елементів огорожувальних конструкцій:

- проектні рішення;
- будівельно-монтажні роботи;
- експлуатаційні фактори.

Вплив великої кількості чинників зручно класифікувати ієрархічним деревом логічного висновку (Рис. 1). На підставі його створюється експериментально-модельна система багатфакторного аналізу впливу прийнятих факторів, які характеризуються лінгвістичними та якісними термами.



Рис.1 Класифікація факторів, що впливають на надійність забезпечення енергоефективності огорожувальних конструкцій у вузлах примикання

При цьому використано теорію нечітких і лінгвістичних змінних [4].

Фактори впливу на надійність системи утеплення вузлів примикання на системному рівні як лінгвістичну змінну можна подати у формі залежності

$$Y = f_1(X_1, X_2, X_3), \quad (1)$$

де  $X_1$  – лінгвістична змінна (ЛЗ), що описує науково-технічний рівень проектних робіт;  $X_2$  – ЛЗ, що описує якість будівельно-монтажних робіт;  $X_3$  – ЛЗ, що описує якість експлуатаційних показників.

Лінгвістична змінна, що описує науково-технічний рівень проектних робіт,

$$X_1 = f_{x1}(X_{11}, X_{12}, X_{13}), \quad (2)$$

де  $X_1 - X_{11}$  – ЛЗ “Помилки в теплотехнічних розрахунках”;  $X_{12}$  – ЛЗ “Теплотехнічні характеристики утеплюючого матеріалу”;  $X_{13}$  – ЛЗ “Конструктивне виконання вузла примикання”.

У рівнянні (2) міститься змінна

$$X_{12} = f_{x1}(z_1, z_2, z_3), \quad (3)$$

де  $z_1$  – ЛЗ “Теплопровідність”;  $z_2$  – ЛЗ “Паропроникність”;  $z_3$  – ЛЗ “Густина”.

Лінгвістична змінна, що описує якість будівельно-монтажних робіт,

$$X_2 = f_{x2}(X_{21}, X_{22}, X_{23}), \quad (4)$$

де  $X_{21}$  – ЛЗ “Механічні пошкодження при влаштуванні теплоізоляційної системи”;  $X_{22}$  – ЛЗ “Якість з’єднання шарів конструкції”;  $X_{23}$  – ЛЗ “Дотримання чинних норм та правил під час будівельно-монтажних робіт”.

Лінгвістична змінна, що описує якість експлуатаційних показників, може бути подана співвідношенням:

$$X_3 = f_{x3}(X_{31}, X_{32}, X_{33}), \quad (5)$$

де  $X_{31}$  – ЛЗ “Екологічність теплоізоляційного матеріалу”;  $X_{32}$  – ЛЗ “Мікроклімат в приміщенні”;  $X_{33}$  – ЛЗ “Міжремонтні та ремонтні заходи”.

У рівнянні (5) є змінна

$$X_{32} = f_{x1}(a_1, a_2), \quad (6)$$

де  $a_1$  – ЛЗ “Температура повітря”;  $a_2$  – ЛЗ “Вологість повітря”.

Всі фактори, що впливають на надійність забезпечення енергоефективності огорожувальних конструкцій у вузлах примикання, розглядаються як лінгвістичні змінні, які задані на відповідних універсальних множинах і оцінюються нечіткими термами (табл. 1).

Якісний нечіткий терм є лінгвістичною змінною, значення якої виражається словом. Як нечіткі терми для оцінювання лінгвістичних змінних в співвідношеннях прийняті кількісні вирази “низька” (Н), “середня” (С) та “висока” (В). Використання нечітких термів дозволяє побудувати експертні нечіткі бази знань, які віддзеркалюють зв’язки між вхідними та вихідними змінними [5].

Корінь дерева логічних висновків як інтегральний показник дозволяє на експертному рівні здійснювати інтелектуальну підтримку прийнятих рішень щодо вибору теплоізоляційного матеріалу та конструктивного виконання вузлів примикання.

За результатами сукупності параметрів, що характеризують фактори впливу на надійність забезпечення енергоефективності огорожувальних

конструкцій у вузлах примикання, побудовано дерево логічного висновку ієрархічних зв’язків (рис. 2).

Для отримання результатів моделювання складемо, на основі експертної бази знань і термів (табл. 2 -7) функції належності та базу нечітких логічних рівнянь. при цьому будемо використовувати операції  $\wedge$  (I-min) та  $\vee$  (АБО-max) [5].

Нечіткі логічні рівняння, які характеризують поверхню належності змінних (табл. 2) за відповідним термом, мають вигляд

$$\begin{aligned} \mu_n(y) = & \mu_n(x_1) \wedge \mu_n(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \mu_n(x_1) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \mu_c(x_1) \wedge \mu_n(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \\ & \vee \mu_n(x_1) \wedge \mu_n(x_2) \wedge \mu_c(x_3) \vee \mu_c(x_1) \wedge \mu_n(x_2) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_3) \vee \mu_n(x_1) \wedge \mu_c(x_2) \wedge \mu_c(x_3) \vee \mu_c(x_1) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_2) \wedge \mu_n(x_3); \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \mu_c(y) = & \mu_c(x_1) \wedge \mu_c(x_2) \wedge \mu_c(x_3) \vee \mu_n(x_1) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_2) \wedge \mu_c(x_3) \vee \mu_c(x_1) \wedge \mu_c(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \\ & \vee \mu_c(x_1) \wedge \mu_n(x_2) \wedge \mu_c(x_3); \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \mu_n(y) = & \mu_n(x_1) \wedge \mu_n(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \mu_n(x_1) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \mu_n(x_1) \wedge \mu_n(x_2) \wedge \mu_c(x_3) \vee \\ & \vee \mu_c(x_1) \wedge \mu_n(x_2) \wedge \mu_n(x_3). \end{aligned} \quad (9)$$

Таблиця 1

Фактори впливу як лінгвістичні змінні

Параметри	Позначення та назва лінгвістичної змінної	Універсальна множина	Терми для оцінки
Науково-технічні проєктні рішення, $x_1$	$X_{11}$ – помилки в теплотехніч. розрахунках	1, 5, 10 балів	грубі, середні, відсутні
	$X_{12}$ – теплотехнічні характеристики утеплюючого матеріалу	1, 5, 10 балів	низька, середня, висока
	$X_{13}$ – конструктивне виконання вузла примикання	1, 5, 10 балів	низька, середня, висока
	$z_1$ – теплопровідність	0,016, 0,036 0,07 Вт/(м <sup>2</sup> К)	низька, середня, висока
	$z_2$ – паропроникність	0,05 0,2 0,55 мг/(м·год·Па)	низька, середня, висока
	$z_3$ – густина	10, 100, 220 кг/м <sup>3</sup>	низька, середня, висока
Будівельно-монтажні роботи, $x_2$	$X_{21}$ – механічні пошкодження при влаштуванні теплоізоляційної системи	0, 20, 40 %	відсутні, частково відсутні, присутні
	$X_{22}$ – якість з’єднання шарів конструкції	60, 80, 100 %	низька, середня, висока
	$X_{23}$ – дотримання чинних норм та правил під час будівельно-монтажних робіт	70, 85, 100 %	низьке, середнє, високе
Експлуатаційні показники, $x_3$	$X_{31}$ – екологічність теплоізоляційного матеріалу	1, 5, 10 балів	низька, середня, висока
	$X_{32}$ – мікроклімат в приміщенні	1, 5, 10 балів	низька, середня, висока
	$X_{33}$ – міжремонтні та ремонтні заходи	60, 80, 100 %	низька, середня, висока
	$a_1$ – температура повітря	14, 21, 27 °С	низька, середня, висока
	$a_2$ – вологість повітря	30, 50, 70 %	низька, середня, висока

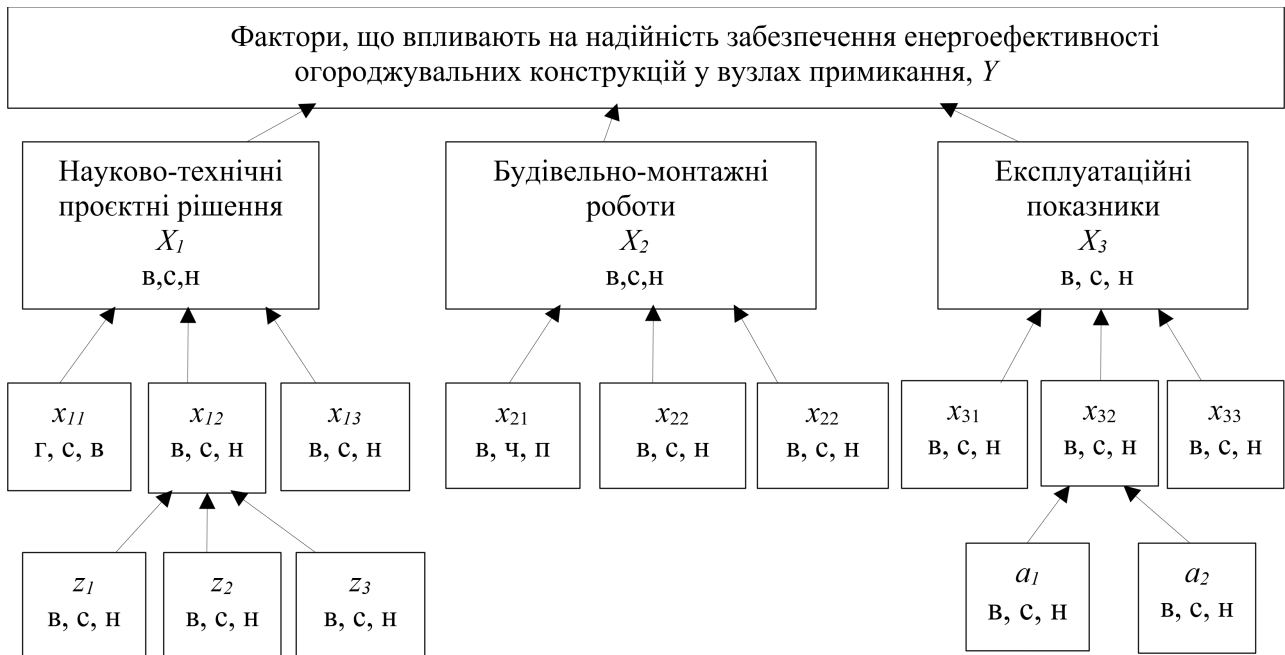


Рис. 2 Дерево логічного висновку ієрархічних зв'язків факторів, що впливають на надійність забезпечення енергоефективності огорожувальних конструкцій у вузлах примикання

Таблиця 2

Експертна база знань термів на системному рівні для залежності (1) – x

Якщо	Вхідні змінні	$X_1$	В	В	С	С	В	С	С	Н	С	Н	Н
		$X_2$	В	С	В	С	С	В	Н	С	Н	С	Н
		$X_3$	В	В	В	В	Н	Н	В	Н	Н	Н	Н
То	Вихідна змінна	$Y$	В			С					Н		

Нечіткі логічні рівняння, які характеризують поверхню належності вихідних змінних табл. 3 за відповідним термом, мають вигляд

$$\begin{aligned} \mu_n(x_1) = & \mu_c(x_{11}) \wedge \mu_n(x_{12}) \wedge \mu_n(x_{13}) \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \\ & \wedge \mu_n(x_{12}) \wedge \mu_n(x_{13}) \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \\ & \wedge \mu_n(x_{13}) \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \mu_n(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \vee \\ & \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_n(x_{13}) \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \mu_n(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}); \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \mu_c(x_1) = & \mu_c(x_{11}) \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{13}) \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \vee \\ & \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_n(x_{13}) \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \mu_n(x_{12}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{13}) \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \vee \\ & \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \mu_n(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_n(x_{13}); \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \mu_c(x_1) = & \mu_c(x_{11}) \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{13}) \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}). \end{aligned} \quad (12)$$

Нечіткі логічні рівняння, які характеризують поверхню належності вихідних змінних з табл. 4 за відповідним термом, мають вигляд

$$\mu_n(x_2) = \mu_n(x_{21}) \wedge \mu_n(x_{22}) \wedge \mu_n(x_{23}) \vee \mu_c(x_{21}) \wedge$$

$$\begin{aligned} & \wedge \mu_n(x_{22}) \wedge \mu_n(x_{23}) \vee \mu_n(x_{21}) \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \mu_n(x_{23}) \\ & \vee \mu_n(x_{21}) \wedge \mu_n(x_{22}) \wedge \mu_c(x_{23}) \vee \mu_n(x_{21}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \mu_c(x_{23}) \vee \mu_n(x_{21}) \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \mu_n(x_{23}) \\ & \vee \mu_c(x_{21}) \wedge \mu_n(x_{22}) \wedge \mu_c(x_{23}); \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \mu_c(x_2) = & \mu_n(x_{21}) \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \mu_c(x_{23}) \vee \mu_c(x_{21}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \mu_c(x_{23}) \vee \mu_n(x_{21}) \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{23}) \vee \mu_n(x_{21}) \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \mu_c(x_{23}) \vee \\ & \vee \mu_n(x_{21}) \wedge \mu_n(x_{22}) \wedge \mu_c(x_{23}) \vee \mu_c(x_{21}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \mu_n(x_{23}) \vee \mu_c(x_{21}) \wedge \mu_n(x_{22}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{23}) \vee \mu_n(x_{21}) \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \mu_n(x_{23}) \vee \\ & \vee \mu_n(x_{21}) \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \mu_c(x_{23}) \vee \mu_n(x_{21}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \mu_c(x_{23}); \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \mu_c(x_2) = & \mu_c(x_{21}) \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \mu_c(x_{23}) \vee \mu_c(x_{21}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \mu_c(x_{23}) \vee \mu_c(x_{21}) \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \\ & \mu_c(x_{23}) \vee \mu_n(x_{21}) \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \mu_c(x_{23}). \end{aligned} \quad (15)$$

Нечіткі логічні рівняння, які характеризують поверхню належності змінних з табл. 5 за відповідним термом мають вигляд

$$\begin{aligned} \mu_n(x_{12}) = & \mu_n(z_1) \wedge \mu_n(z_2) \wedge \mu_n(z_3) \vee \mu_c(z_1) \wedge \\ & \wedge \mu_n(z_2) \wedge \mu_n(z_3) \vee \mu_n(z_1) \wedge \mu_c(z_2) \wedge \mu_n(z_3) \vee \\ & \vee \mu_n(z_1) \wedge \mu_n(z_2) \wedge \mu_c(z_3) \vee \mu_n(z_1) \wedge \mu_c(z_2) \wedge \\ & \wedge \mu_c(z_3) \vee \mu_c(z_1) \wedge \mu_c(z_2) \wedge \mu_n(z_3) \vee \mu_c(z_1) \wedge \\ & \wedge \mu_n(z_2) \wedge \mu_c(z_3); \end{aligned} \quad (16)$$

Таблиця 3

**Експертна база знань якісних термів для науково-технічних проєктних рішень ( $x_i$ )**

Якщо			То
Вхідні змінні			Вихідна змінна
$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$X_1$
В	В	В	В
В	В	С	
В	С	В	
С	В	В	
С	С	С	С
В	С	С	
С	В	С	
С	С	В	
Г	С	В	
В	С	Н	
С	Н	В	
Г	В	С	
В	Н	С	
С	В	Н	
Г	Н	Н	Н
С	Н	Н	
Г	С	Н	
Г	Н	С	
Г	С	С	
С	С	Н	
С	Н	С	

$$\begin{aligned} \mu_c(x_2) = & \mu_c(z_1) \wedge \mu_c(z_2) \wedge \mu_c(z_3) \vee \mu_\theta(z_1) \wedge \\ & \wedge \mu_c(z_2) \wedge \mu_c(z_3) \vee \mu_c(z_1) \wedge \mu_\theta(z_2) \wedge \mu_c(z_3) \vee \\ & \vee \mu_c(z_1) \wedge \mu_c(z_2) \wedge \mu_\theta(z_3) \vee \mu_c(z_1) \wedge \mu_n(z_2) \wedge \\ & \wedge \mu_\theta(z_3) \vee \mu_\theta(z_1) \wedge \mu_c(z_2) \wedge \mu_n(z_3) \vee \mu_\theta(z_1) \wedge \\ & \wedge \mu_n(z_2) \wedge \mu_c(z_3) \vee \mu_c(z_1) \wedge \mu_\theta(z_2) \wedge \mu_n(z_3) \vee \\ & \vee \mu_n(z_1) \wedge \mu_c(z_2) \wedge \mu_\theta(z_3) \vee \mu_n(z_1) \wedge \mu_\theta(z_2) \wedge \\ & \wedge \mu_c(z_3); \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \mu_\theta(x_2) = & \mu_\theta(z_1) \wedge \mu_\theta(z_2) \wedge \mu_\theta(z_3) \vee \mu_\theta(z_1) \wedge \\ & \wedge \mu_\theta(z_2) \wedge \mu_c(z_3) \vee \mu_\theta(z_1) \wedge \mu_c(z_2) \wedge \mu_\theta(z_3) \vee \\ & \vee \mu_c(z_1) \wedge \mu_\theta(z_2) \wedge \mu_\theta(z_3). \end{aligned} \quad (18)$$

Нечіткі логічні рівняння, які характеризують поверхню належності змінних з табл. 6 за відповідним термом, мають вигляд

$$\begin{aligned} \mu_n(x_3) = & \mu_n(x_{31}) \wedge \mu_n(x_{32}) \wedge \mu_n(x_{33}) \vee \mu_c(x_{31}) \wedge \\ & \wedge \mu_n(x_{32}) \wedge \mu_n(x_{33}) \vee \mu_n(x_{31}) \wedge \mu_c(x_{32}) \wedge \\ & \wedge \mu_n(x_{33}) \vee \mu_n(x_{31}) \wedge \mu_n(x_{32}) \wedge \mu_c(x_{33}) \vee \\ & \vee \mu_n(x_{31}) \wedge \mu_c(x_{32}) \wedge \mu_c(x_{33}) \vee \mu_c(x_{31}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{32}) \wedge \mu_n(x_{33}) \vee \mu_c(x_{31}) \wedge \mu_n(x_{32}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{33}); \end{aligned} \quad (19)$$

$$\mu_c(x_3) = \mu_c(x_{31}) \wedge \mu_c(x_{32}) \wedge \mu_c(x_{33}) \vee \mu_\theta(x_{31}) \wedge$$

$$\begin{aligned} & \wedge \mu_c(x_{32}) \wedge \mu_c(x_{33}) \vee \mu_c(x_{31}) \wedge \mu_\theta(x_{32}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{33}) \vee \mu_c(x_{31}) \wedge \mu_c(x_{32}) \wedge \mu_\theta(x_{33}) \vee \\ & \vee \mu_c(x_{31}) \wedge \mu_n(x_{32}) \wedge \mu_\theta(x_{33}) \vee \mu_\theta(x_{31}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{32}) \wedge \mu_n(x_{33}) \vee \mu_\theta(x_{31}) \wedge \mu_n(x_{32}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{33}) \vee \mu_c(x_{31}) \wedge \mu_\theta(x_{32}) \wedge \mu_n(x_{33}) \vee \\ & \vee \mu_n(x_{31}) \wedge \mu_c(x_{32}) \wedge \mu_\theta(x_{33}) \vee \mu_n(x_{31}) \wedge \\ & \wedge \mu_\theta(x_{32}) \wedge \mu_c(x_{33}); \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \mu_\theta(x_2) = & \mu_\theta(x_{21}) \wedge \mu_\theta(x_{22}) \wedge \mu_\theta(x_{23}) \vee \mu_\theta(x_{21}) \wedge \\ & \wedge \mu_\theta(x_{22}) \wedge \mu_c(x_{23}) \vee \mu_\theta(x_{21}) \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \\ & \wedge \mu_\theta(x_{23}) \vee \mu_c(x_{21}) \wedge \mu_\theta(x_{22}) \wedge \mu_\theta(x_{23}). \end{aligned} \quad (21)$$

Нечіткі логічні рівняння, які характеризують поверхню належності змінних табл. 7 за відповідним термом, мають вигляд

$$\mu_n(x_{32}) = \mu_n(a_1) \wedge \mu_n(a_2) \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \mu_c(x_{32}) = & \mu_c(a_1) \wedge \mu_c(a_2) \vee \mu_c(a_1) \wedge \mu_n(a_2) \vee \\ & \vee \mu_n(a_1) \wedge \mu_c(a_2) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \mu_\theta(x_{32}) = & \mu_\theta(a_1) \wedge \mu_\theta(a_2) \vee \mu_\theta(a_1) \wedge \mu_c(a_2) \vee \\ & \vee \mu_c(a_1) \wedge \mu_\theta(a_2). \end{aligned} \quad (24)$$

Таблиця 4

Експертна база знань якісних термів для науково-технічних проєктних рішень ( $x_1$ )

Якщо			То
Вхідні змінні			Вихідна змінна
$X_{21}$	$X_{22}$	$X_{23}$	$X_2$
в	в	в	в
в	в	с	
в	с	в	
ч	в	в	
ч	с	с	
в	с	с	с
ч	в	с	
ч	с	в	
ч	н	в	
в	с	н	
в	н	с	
ч	в	н	
п	с	в	
п	в	с	
п	н	н	
с	н	н	н
п	с	н	
п	н	с	
п	с	с	
ч	с	н	
ч	н	с	

Таблиця 5

Експертна база знань якісних термів для теплотехнічних характеристик матеріалу утеплювача параметру ( $x_{12}$ )

Якщо	Вхідні змінні	$Z_1$	в	в	в	с	с	в	с	с	в	с	с	в	н	н	н	с	н	н	н	с	с	
		$Z_2$	в	в	с	в	с	с	в	с	с	в	н	н	в	с	н	н	с	н	с	с	н	н
		$Z_3$	в	с	в	в	с	с	с	с	в	н	н	в	с	с	в	н	н	н	с	с	н	с
То	Вихідна змінна	$X_{12}$	в				с								н									

Таблиця 6

Експертна база знань якісних термів для експлуатаційних показників ( $x_3$ )

Якщо	Вхідні змінні	$X_{31}$	в	в	в	в	с	в	с	с	с	в	в	с	н	н	н	с	н	н	н	с	с	
		$X_{32}$	в	в	с	в	с	с	в	с	с	в	с	н	в	с	в	н	н	с	н	с	с	н
		$X_{33}$	в	с	в	в	с	с	с	с	в	н	в	с	в	в	с	н	н	н	с	с	н	с
То	Вихідна змінна	$X_3$	в				с								н									

Таблиця 7

Експертна база знань якісних термів для мікроклімату в приміщенні ( $x_{32}$ )

Якщо	Вхідні змінні	$a_1$	в	в	с	с	с	н	н	
		$a_1$	в	с	в	с	н	с	н	
То	Вихідна змінна	$Y$	в				с			н

Сформулюємо матрицю парних порівнянь науково-технічних проєктних рішень для термів «низький», «середній» і «високий». Маємо

$$A^{\text{низький}}(x_1) =$$

	U1	U2	U3	U4	U5
U1	1	7/9	5/9	3/9	1/9
U2	9/7	1	5/7	3/7	1/7
U3	9/5	7/5	1	3/5	1/5
U4	9/3	7/3	5/3	1	1/3
U5	9	7	5	3	1

$$A^{\text{середній}}(x_1) =$$

	U1	U2	U3	U4	U5
U1	1	3	5	7	9
U2	1/3	1	5/3	7/3	9/3
U3	1/5	3/5	1	3/5	9/5
U4	1/7	3/7	5/7	1	9/7
U5	1/9	3/9	5/9	7/9	1

$$A^{\text{високий}}(x_1) =$$

	U1	U2	U3	U4	U5
U1	1	3	5	7	9
U2	1/3	1	5/3	7/3	9/3
U3	1/5	3/5	1	3/5	9/5
U4	1/7	3/7	5/7	1	9/7
U5	1/9	3/9	5/9	7/9	1

На підставі розв’язання матриць парних порівнянь було отримано функції належностей

для всіх термів. Отримані результати функцій належності пронормовано до одиниці шляхом ділення на найбільший ступінь належності.

Математичну оцінку процесу проведено з використанням програмного забезпечення Matlab 7.7.0.471 з надбудовою Fuzzy Logic. Результатом є графічні поверхні вихідних змінних (рис. 2). Для тонкого налаштування моделі в подальшому необхідно використовувати апарат генетичних алгоритмів, який забезпечує результат залежно від вибірки.

**Висновки.** Проведений аналіз впливу факторів на надійність забезпечення енергоефективності огорожувальних конструкцій у вузлах примикання з використанням лінгвістичних змінних дозволив сформувати експертні бази знань та нечіткі логічні рівняння, які характеризують поверхню належності змінних. Результати лягли в основу експертної системи. Побудовані поверхні відгуку з використанням цієї експертної системи дозволять приймати обґрунтовані рішення на основі нечіткого логічного висновку.

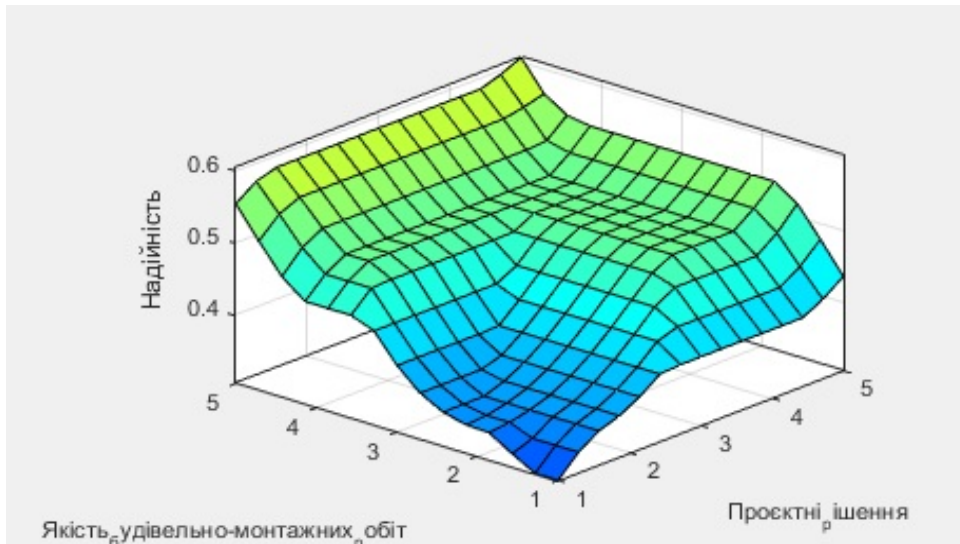
**Перспективи подальших досліджень.** На базі отриманих результатів слід розробити організаційно-технологічні заходи вдосконалення системи утеплення, що сприятиме підвищенню надійності забезпечення енергоефективності будівлі.

### Література

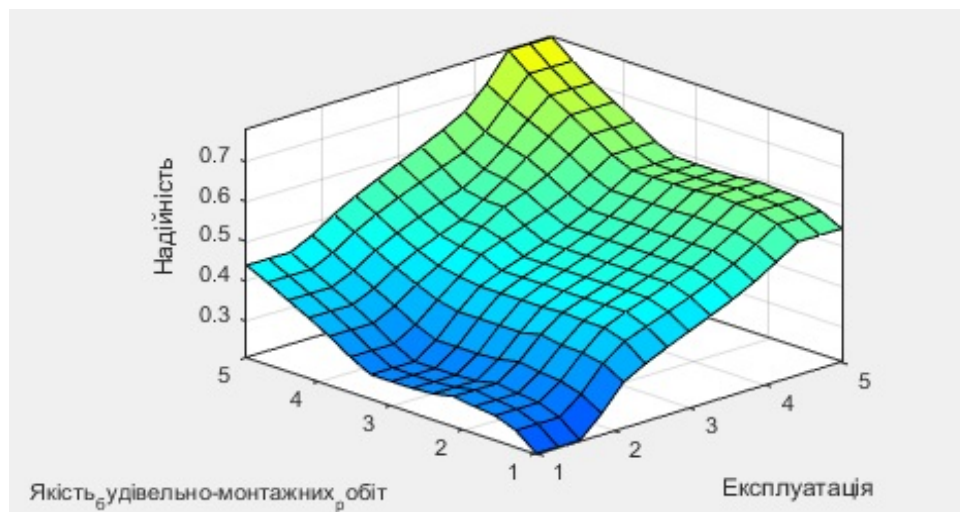
1. Фаренюк Г. Г. Теплова надійність огорожувальних конструкцій та енергоефективність будинків при новому будівництві та реконструкції: автореф. дис... докт. техн. наук: 05.23.01 / Фаренюк Г. Г.; Міністерство освіти і науки України, Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка. – Полтава, 2009. – 36 с.
2. Ратушняк Г. С. Управління проєктами енергозбереження шляхом термореновації будівель / Г. С. Ратушняк, О. Г. Ратушняк. – ВНТУ, 2006. – 106 с.
3. Ратушняк Г. С. Підвищення енергоощадності багатопверхових будинків шляхом вдосконалення вузлів примикання огорожувальних конструкцій / Г. С. Ратушняк, А. М. Очеретний, О. Ю. Материнська // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2017. – № 1. – С. 113-119.
4. Коваль А. А. Логіко-лінгвістичні моделі в нечітких системах / А. А. Коваль // Проблеми програмування. – 2008. – № 2-3. – С. 375-378.
5. Ротштейн О. П. Метод побудови функцій належності нечітких множин / О. П. Ротштейн, Г. О. Черноволик, Є. П. Ларюшкін // Вісник Вінницького політехнічного інституту: наук. журнал. – 1996. – № 3. – С. 72–75.

### References

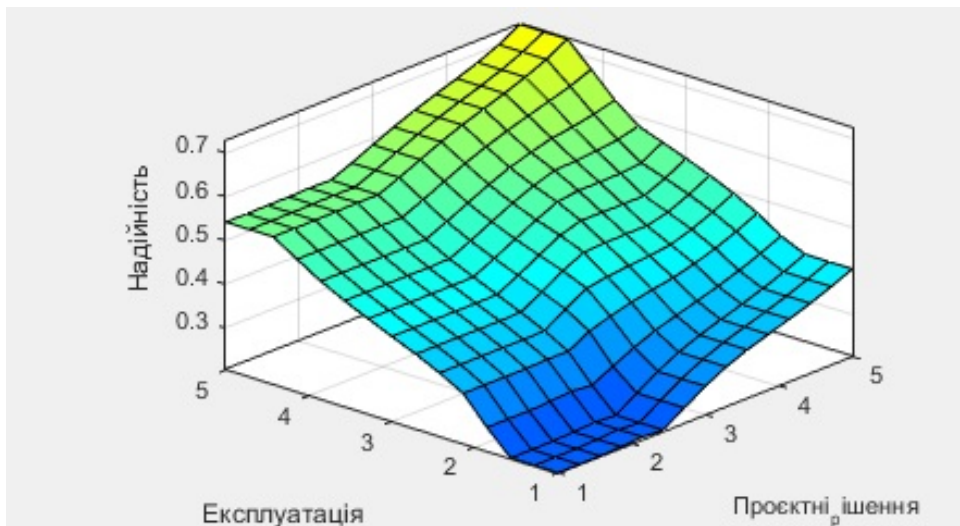
1. Farenjuk G. G. *Teplova nadiinist ohorodzhvalnykh konstruksii ta enerhoefektyvnist budinkiv pry novomu budivnytstvi ta rekonstruksii*. Diss. Abstract. Poltavskii natsionalnyi tekhnichniy universytet im. Yurii Kondratiuka, 2009.
2. Ratushniak G. S., Ratushniak O.G. *Upravlinnia proektamy enerhozberezhennia shliakhom termorenovatsii budivel*. VNTU, 2006.
3. Ratushniak G. S., Ocheretniy A. M., Materynska O. Yu. "Pidvyshchennia enerhooshchadnosti bahatopoverkhovykh budynkiv shliakhom vdoskonalennia vuzliv prylykannia ohorodzhvalnykh konstruksii." *Suchasni tekhnologii, materialy i konstruksii v budivnytstvi*. 2017, № 1, P. 113-119.
4. Koval A. A. "Lohiko-linhvistychni modeli v nechitkikh sistemakh". *Problemy prohramuvannia*, 2008, № 2-3, P. 375-378.
5. Rotshtein O. P., Chernovolyk G. O., Lariushkin E. P. "Metod pobudovy funktsii nalezhnosti nechitkykh mnozhyn". *Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu: nauk. zhurnal.*, 1996, № 3, P. 72–75.



а)



б)



в)

Рис. 2. Поверхні експертної системи для прийняття рішень на основі нечіткого логічного висновку:

- а) залежність надійності утеплення вузлів примикання від науково-технічних проектних рішень та якості будівельно-монтажних робіт;
- б) залежність надійності утеплення вузлів примикання від якості будівельно-монтажних робіт та експлуатаційних показників;
- в) залежність надійності утеплення вузлів примикання від науково-технічних проектних рішень та експлуатаційних показників



УДК 69.03

## Анализ влияния факторов на надёжность обеспечения энергоэффективности ограждающих конструкций узлов примыкания с использованием лингвистических переменных

Г. С. Ратушняк<sup>1</sup>, Е. Г. Лялюк<sup>2</sup>, О. Ю. Горюн<sup>3</sup>

<sup>1</sup> к.т.н., проф., Винницкий национальный технический университет, г. Вінниця, Украина, [ratusnak@gmail.com](mailto:ratusnak@gmail.com),  
ORCID:0000-0001-9656-5150

<sup>2</sup> к.т.н., доц., Винницкий национальный технический университет, г. Вінниця, Украина, [Lyalyuk74@gmail.com](mailto:Lyalyuk74@gmail.com),  
ORCID 0000-0001-6446-92443

<sup>3</sup> студ., Винницкий национальный технический университет, г. Вінниця, Украина, [oksana2718@ukr.net](mailto:oksana2718@ukr.net)

*Аннотация.* Применение инновационных энергосберегающих конструктивных узлов примыкания при строительстве позволит повысить энергоэффективность многоэтажных жилых домов и уменьшить затраты средств на оплату потребленных энергоносителей на отопление в холодный период года. Надёжность любой системы зависит от проектирования, изготовления и эксплуатации. Долговечность и надёжность конструкций может быть повышена на стадии проектирования, то есть во время научных исследований, конструирования, расчетов и проектных работ. Разработана иерархия факторов влияния на надёжность обеспечения энергоэффективности ограждающих конструкций в узлах примыкания. Проведен анализ влияния факторов на надёжность обеспечения энергоэффективности ограждающих конструкций в узлах примыкания с использованием лингвистических переменных. С целью оценки надёжности теплоизоляционного материала созданы экспертные базы знаний и написаны нечеткие логические уравнения, построены поверхности отклика.

*Ключевые слова:* математическая модель, надёжность, лингвистическая переменная, нечеткие логические уравнения, теплоизоляционный материал, узел примыкания.

УДК 69.03

## Analysis of the influence of factors on the reliability of energy efficiency of enclosing structures of adjustment units using linguistic variables

G. Ratushniak<sup>1</sup>, L. Lialyuk<sup>2</sup>, O. Horiun<sup>3</sup>

<sup>1</sup> PhD, professor., Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, Ukraine, [ratusnak@gmail.com](mailto:ratusnak@gmail.com),  
ORCID:0000-0001-9656-5150

<sup>2</sup> PhD, associate professor, Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, Ukraine, [Lyalyuk74@gmail.com](mailto:Lyalyuk74@gmail.com),  
ORCID 0000-0001-6446-92443

<sup>3</sup> Student, Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, Ukraine, [oksana2718@ukr.net](mailto:oksana2718@ukr.net)

*Abstract.* The use of innovative energy-saving structural units at the construction site will increase the energy efficiency of multi-storey residential buildings and reduce the cost of paying for energy consumed for heating in the cold season. The reliability of any system depends on the design, manufacture and operation. The durability and reliability of structures can be increased at the design stage, that is, during research, design, calculations and design development. A hierarchy of factors of influence on the reliability of ensuring energy efficiency of enclosing structures in the junction nodes has been developed. A tree of logical inference of hierarchical links has been built. The root of the tree of logical conclusions, as an integral indicator, allows, at the expert level, to provide intellectual support for the decisions made to choose a heat-insulating material and the design of the junction nodes. The analysis of the influence of factors on the reliability of ensuring the energy efficiency of the enclosing structures at three junction points using linguistic variables. In order to assess the reliability of thermal insulation material, expert knowledge bases were formed and fuzzy logical equations were written, as well as the response surface was constructed. Matrices of paired comparisons of scientific and technical design solutions for the terms "low", "medium", "high" have been created. Based on the solution of matrices of pairwise comparisons, accessory functions were obtained for all terms. The obtained results of membership functions are normalized by one by dividing by the highest degree of membership. The mathematical assessment of the process was carried out using the Matlab software. The surfaces of the expert system for decision-making based on fuzzy inference are built.

*Keywords:* mathematical model, reliability, linguistic variable, fuzzy logical equations, thermal insulation material, junction node.

Надійшла до редакції / Received 24.09.2021