

## ПОБУДОВА МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛООВОГО КОМФОРТУ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

© Машевська М., Ткаченко П., 2010

**Розглянуто основи побудови продукційної моделі нечіткої логіки для оцінювання температури внутрішньої поверхні зовнішньої огорожувальної конструкції. Обґрунтовано вибір входних параметрів моделі. Описано процедуру фазифікації входів і виходів та побудову правил логічних висновків.**

**Ключові слова:** лінгвістична змінна, продукційні правила, моделювання, параметри мікроклімату.

**The stages of creation production model of fuzzy logic for estimation temperature of the internal surface of external construction are considered. Choice of entrance parameters of model is shown. The procedure of fuzzification inputs and outputs and construction of rules is described.**

**Keywords:** linguistic variable, production rules, modeling, microclimate parameters.

### Вступ

Пошук реальних параметрів комфортного житла уможливується за наявності адекватних інформаційних або математичних моделей середовище-будівля. Будь-яка будівля потребує вивчення на етапі будівництва та експлуатації з метою формулювання вимог та рекомендацій залежно від наявних умов та цільових параметрів. Забезпечення комфортних параметрів у приміщенні чи будівлі передбачає передовсім підтримання умов теплового мікроклімату. До найважливіших параметрів мікроклімату належать: температура повітря та огорожувальних конструкцій, відносна вологість повітря, швидкість циркуляції повітря. Значення параметрів мікроклімату можна підтримувати на оптимальному рівні завдяки системам опалення, вентиляції, а також покращенню теплоізоляційних характеристик конструкції. Найбільше залежить від інших параметрів температура огорожувальних конструкцій, оскільки прямо впливати на зміну цього показника складно. Побудова нечіткої продукційної моделі для оцінювання впливу інших параметрів і кліматичних факторів на зміну температури внутрішньої поверхні конструкції будівлі і є метою виконаних досліджень.

### Постановка проблеми

Для характеристики теплового мікроклімату необхідно оцінити низку параметрів, зокрема і середню температуру радіаційного режиму приміщення. Така процедура передбачає вимірювання температури внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції. Відомий метод для визначення радіаційної температури оснований на використанні шарового термометра. Зрозуміло, що цей процес є доволі складним та вимагає відповідних затрат часу та спеціального обладнання. Для зменшення затрат ресурсів запропоновано метод оцінювання температури внутрішньої поверхні зовнішньої огорожувальної конструкції на основі продукційної моделі нечіткої логіки. Факторами, що впливають на цей показник, є температура в приміщенні, теплоізоляційні характеристики огорожувальної конструкції, а також кліматичні параметри – температура зовнішнього повітря, швидкість вітру та вплив сонячної радіації, який зумовлений орієнтацією стінової конструкції та її коефіцієнтом поглинання сонячної радіації.

### Фактори впливу

У процесі забезпечення відповідного рівня теплового мікроклімату необхідно пам'ятати, що людина відчуває не температуру в приміщенні, а втрату тілом тепла. До зовнішніх (фізичних) факторів, що впливають на втрату тепла, належать: температура повітря, температура поверхні огорожувальних конструкцій (або середня радіаційна температура), швидкість руху повітря та вологість повітря всередині приміщення. Вибір та поєднання цих параметрів залежить від того, чи можливо забезпечити в приміщенні оптимальний (або комфортний) рівень мікроклімату або ж задовольнитися лише допустимим. Комфортні та допустимі умови визначаються передусім таким поєднанням температури повітря в приміщенні та середньої температури внутрішніх поверхонь огорожувальних конструкцій, за якого людина, що перебуває як всередині приміщення, так і безпосередньо біля поверхні стін, не має ані загального, ані локального відчуття дискомфорту. Досвід фахівців показує, що підвищення або зниження температури внутрішніх поверхонь стін на один градус має той самий ефект, що й рівнозначна зміна температури повітря в приміщенні. Звісно, якщо огорожувальна конструкція має недостатній рівень термічного опору (або опору теплопередачі), скільки б ми не збільшували температуру повітря в приміщенні за допомогою обігріву, комфортних умов все одно не досягти. Стіни з поганою ізоляцією пропускать тепло з приміщення назовні в холодний період року, а також сприятимуть проникненню додаткового тепла всередину під час спеки. Відповідно до [1] допустима різниця між температурою внутрішнього повітря і приведеною температурою внутрішніх поверхонь конструкцій стін житлових будівель становить  $4^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta t^H = 4^{\circ}\text{C}$  у формулі (1)). Якщо різниця температур більша за допустиму, в людини з'являється відчуття протягу, в зв'язку зі збільшенням інтенсивності циркуляції повітря у приміщенні

$$t_B - t_{ВП} \leq \Delta t^H, \quad (1)$$

де  $t_B$  – температура всередині приміщення,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{ВП}$  – розрахункова температура на внутрішній поверхні огорожувальної конструкції,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\Delta t^H$  – нормативний перепад між температурою внутрішнього повітря і температурою внутрішньої поверхні огорожувальних конструкцій, що приймається за додатком Б [1].

В ідеалі досягнення оптимальних умов теплового комфорту, температура повітря в приміщенні і температура внутрішньої поверхні стіни повинні збігатися. В реальному ж середовищі, окрім випадків, коли поверхні стін додатково обігріваються взимку або охолоджуються влітку, рівності температур досягти неможливо.

За законом стаціонарної теплопередачі маємо [2]:

$$t_{ВП} = t_B - \frac{t_B - t_3}{R_0 \times \alpha_B}, \quad (2)$$

де  $t_{ВП}$ ,  $t_B$  – те саме, що і у формулі (1);  $t_3$  – розрахункова температура зовнішнього повітря,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $R_0$  – загальний опір теплопровідності захисного шару,  $\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ ;  $\alpha_B$  – коефіцієнт тепловіддачі на внутрішній поверхні захисного шару, приймається за додатком В [1],  $\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ .

У формулі (2) показано залежність температури внутрішньої поверхні зовнішньої огорожувальної конструкції (ВП ЗОК) від температури повітря зовні та всередині досліджуваного середовища-приміщення, а також від теплових характеристик конструкції. Проте не можна забувати, що вплив кліматичних факторів не обмежується лише дією температури зовнішнього повітря. Зокрема, такі фактори, як швидкість вітру та інтенсивність сонячного випромінювання, особливо за спрямованої дії, доволі істотно впливають на зміну температури огорожувальної конструкції. Якщо теплоізоляційні властивості конструкції не відповідають вимогам, спостерігається прямий взаємозв'язок між температурами зовнішньої та внутрішньої поверхонь стіни. Відповідно до вимог [1] розрахунковий опір теплопередачі огорожувальної конструкції житлових будинків повинен бути більшим від мінімально допустимого значення ( $R_0 > R_{q \text{ min}}$ ).

За спрямованої дії на поверхню огорожувальної конструкції вітер, залежно від швидкості та зовнішньої температури, здатен знизити або підвищити температуру стіни через збільшення

повітряного тиску на неї. У зв'язку з цим потрібно враховувати „розу вітрів” території та правильно вибирати орієнтацію будівлі та приміщення.

Залежно від типу будівельного матеріалу та кольору зовнішнього шару огорожувальної конструкції, а також від інтенсивності сонячної радіації (СР), що діє на поверхню, її температура змінюється. Необхідність врахування такої залежності можна простежити, розглянувши табл. 1. За однакових значень інших параметрів можна побачити реальний вплив сонячної радіації.

Таблиця 1

Умова	Температура в будівлі	Температура зовнішня	Швидкість вітру	Вплив СР	Опір теплопередачі	Наслідок	Температура ВП ЗОК
якщо	холодно	спека	легкий	Малий	$> R_{q \min}$	то	низька
якщо	холодно	спека	свіжий	Малий	$< R_{q \min}$	то	низька
якщо	холодно	спека	легкий	середній	$> R_{q \min}$	то	середня
якщо	холодно	спека	свіжий	середній	$< R_{q \min}$	то	низька
якщо	холодно	спека	легкий	високий	$> R_{q \min}$	то	середня
якщо	холодно	спека	свіжий	високий	$< R_{q \min}$	то	середня

У такому разі доцільно розглядати не лише теплоізоляційні властивості стіни, але і такий параметр, як коефіцієнт поглинання сонячної радіації матеріалом зовнішньої поверхні огорожувальної конструкції. Цей показник коливається в межах [0,1] і відрізняється для різних матеріалів. Так, значення коефіцієнта поглинання сонячної радіації [1] для вапняної штукатурки темно-сірого або теракотового кольору  $\rho = 0.7$ , а для цементної штукатурки світло-блакитного кольору  $\rho = 0.3$ . Залежно від переважної орієнтації огорожувальної конструкції за сторонами світу спостерігається різна інтенсивність сонячної радіації. Для Львова цей показник збільшується від північного заходу до південного сходу. Для полегшення оцінки можна ввести сукупний показник впливу сонячної радіації. Залежність цього параметра від двох основних факторів впливу продемонстровано у нечіткій формі у табл. 2, де ІСР – інтенсивність сонячної радіації, а КПСР – коефіцієнт поглинання сонячної радіації.

Таблиця 2

ІСР	КПСР	Вплив СР на поверхню
мала	малий	малий
мала	середній	малий
мала	великий	середній
середня	малий	малий
середня	середній	середній
середня	великий	середній
висока	малий	середній
висока	середній	великий
висока	великий	великий

Отже, найважливішими факторами впливу на зміну температури поверхні огорожувальної конструкції у цій статті визначено: температури зовнішнього повітря та внутрішнього, швидкість вітру, інтенсивність сонячної радіації, переважна орієнтація поверхні та параметри використаних матеріалів під час будівництва. Саме ці чинники і будуть входними значеннями моделі оцінювання.

### Модель оцінювання

Побудова моделі обчислення на основі нечіткої логіки передбачає три етапи (рис. 1). На першому етапі потрібно визначити лінгвістичні змінні, базові терм-множини та функцію належності. Кількість термів лінгвістичних змінних зазвичай не перевищує 7. Для задавання функції належності існує більше від десяти типових форм кривих, наприклад трикутна, трапецієподібна, розподіл Гауса, сигмоїдальна, квадратичні та кубічні поліноміальні криві тощо. Другим етапом є

визначення правил нечітких висновків, під час якого складають продукційні правила та вибирають оператори нечіткої логіки. Ці правила використовують для задавання умовних операторів, що охоплюють нечітку логіку. Розробляючи продукційні правила, потрібно дотримуватись двох умов:

§ існує принаймні одне правило для кожного лінгвістичного терму вихідної змінної;

§ для будь-якого терму вхідної змінної є принаймні одне правило, в якому цей терм використовується як передумова (ліва частина правила).

В іншому разі база нечітких правил неповна.

Кінцевим, третім етапом моделювання є процес дефазифікації. На вході цього блока маємо нечітку множину (об'єднання вихідних нечітких множин), а на виході – конкретне (чітке) значення.

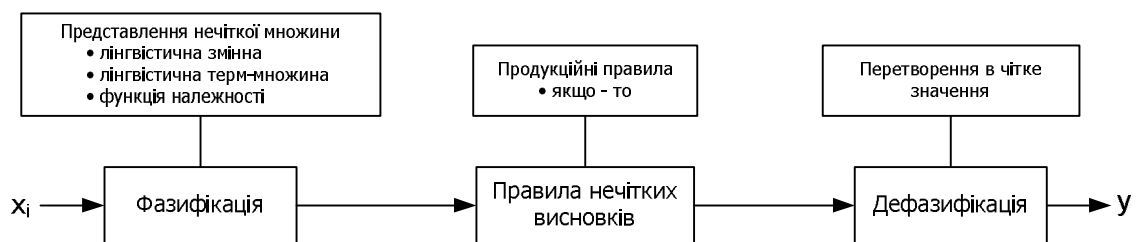


Рис. 1. Продукційна модель нечіткої логіки

Тепер, відповідно до поставленої задачі, розглянемо етапи моделювання температури внутрішньої поверхні зовнішньої огорожувальної конструкції на основі нечіткої логіки.

Для побудови моделі введено такі лінгвістичні змінні, як температура всередині приміщення ( $T_{in}$ ), зовнішня температура (або розрахункова температура зовнішнього повітря) ( $T_{out}$ ), опір теплопровідності огорожувальної конструкції ( $R$ ), швидкість вітру ( $V_w$ ) та вплив сонячної радіації ( $S_{inf}$ ), а також вихідна змінна – температура внутрішньої поверхні зовнішньої огорожувальної конструкції ( $T_{surf}$ ). Для кожної лінгвістичної змінної необхідно сформулювати базову терм-множину. Для змінної, наприклад, "температура всередині приміщення" (на рис. 2 – Air temperature) така множина складатиметься із чотирьох термів: "холодно", "нейтрально", "тепло", "гаряче" (на рис. 2 – "cold", "neutral", "warm", "hot" відповідно)

У процесі моделювання будуватиметься трикутна функція належності для кожного лінгвістичного терму із базової терм-множини. Трикутна функція належності визначається трійкою чисел ( $a, b, c$ ) (або трикутним нечітким числом [3]) і в аналітичному вигляді задається так:

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & \text{якщо } a \leq x \leq b, \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{якщо } b \leq x \leq c, \\ 0, & \text{в інших випадках.} \end{cases} \quad (3)$$

де  $x$  – елемент, для якого визначається ступінь належності; величини  $a$  і  $c$  – характеризують ступінь розмитості чіткого числа;  $b$  – чітке значення (або мода) нечіткого трикутного числа.

Сукупність функцій належності  $f(x)$  для кожного терму з базової терм-множини зазвичай зображають разом на одному графіку.

За допомогою пакета Fuzzy Logic Toolbox програмного середовища Matlab побудовано функції належності для кожної лінгвістичної змінної. Базові терм-множини та функції належності для заданих лінгвістичних змінних показано на рис. 2.

Терм-множина вихідної лінгвістичної змінної, температури внутрішньої поверхні (Surface temperature of wall – рис. 2), визначена чотирма термами: „низька” (low), „середня” (medium), „висока” (high), „дуже висока” (very high). Для терму „низька” ступінь належності дорівнює 1, якщо чітке значення змінної дорівнює 14 °С. При цьому, відповідно до (3),  $a = 11$ ,  $b = 14$ ,  $c = 17$ . Тоді для цього терму функцію належності можна записати у такому вигляді:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x-11}{3}, & \text{якщо } 11 \leq x \leq 14, \\ \frac{17-x}{3}, & \text{якщо } 14 \leq x \leq 17, \\ 0, & \text{в інших випадках.} \end{cases} \quad (4)$$

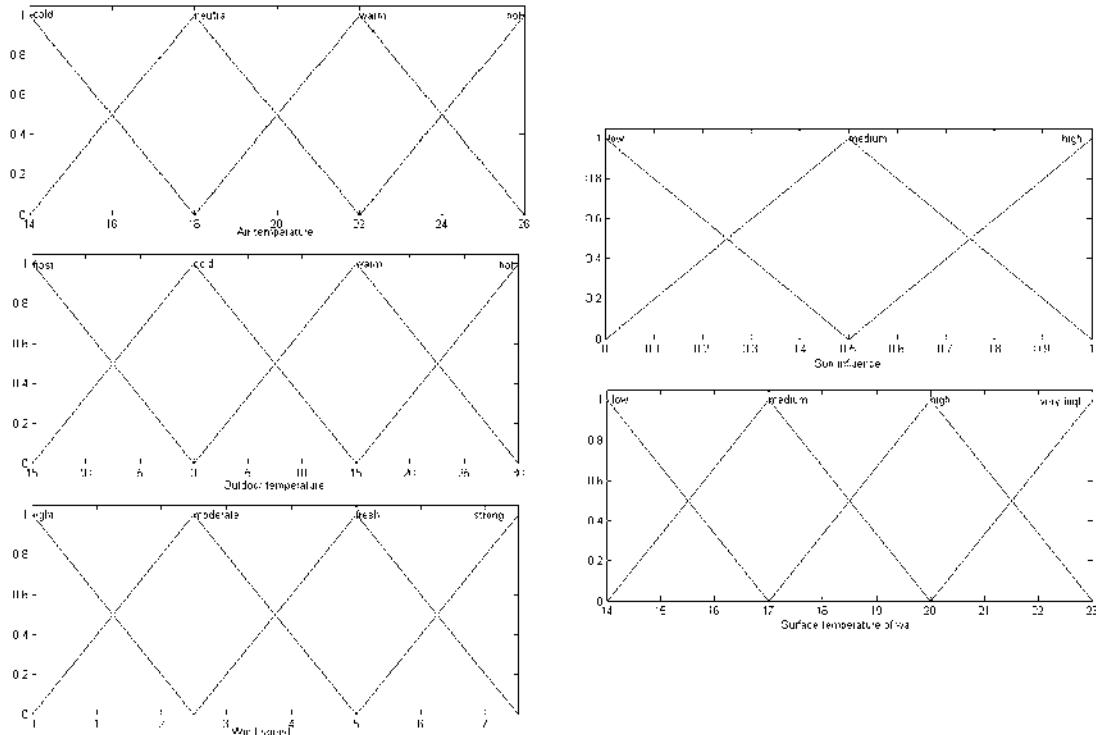


Рис. 2. Функції належності для лінгвістичних змінних

Після того, як вибрані лінгвістичні змінні, сформовані терм-множини та побудовано функції належності, необхідно скласти продукційні правила для моделі (правила виду якщо-то).

Приклади побудови правил показано у табл. 3. Деякі значення в таблиці відсутні – це означає, що у відповідному правилі вихід не залежить від цієї лінгвістичної змінної.

Таблиця 3

Продукційні правила								
Правило		Tin	Tout	Vw	Sinf	R		Tsurf
1	якщо	холодно	мороз		середній		то	низька
2	якщо	холодно	холодно	помірний	середній	високий	то	низька
3	якщо	холодно	тепло	сильний		низький	то	низька
4	якщо	комфортно	тепло	свіжий		високий	то	середня
5	якщо	комфортно	мороз	свіжий	високий	низький	то	низька
6	якщо	комфортно	холодно	помірний	високий	низький	то	середня
7	якщо	комфортно	спека	сильний	середній	низький	то	середня
8	якщо	комфортно	тепло	помірний	високий	високий	то	висока
...								
14	якщо	тепло	тепло	помірний				дуже висока
...								

Правила, подані в табл. 3, потрібно читати так:

1. Якщо Tin є „холодно”, i Tout є „мороз”, i Sinf є „середній”, то Tsurf є „низька”.
2. Якщо Tin є „холодно” i Tout є „холодно”, i Vw є „помірний”, i Sinf є „середній”, i R є „високий” Tsurf є „низька”.

Результат, отриманий після оцінки нечітких правил, звичайно є значенням нечітким. Функція належності використовується для перетворення нечіткого виходу на чітке значення. Цей процес називається дефазифікацією. Одним з методів, які для цього застосовують, є метод середнього центру або центроїдний метод, що і був використаний у нашому випадку.

Об'єднання отриманих відсічених функцій (згідно з алгоритмом Мамдані) відбувається за допомогою максимізації. На рис. 3 показано процес оцінювання нечітких правил за алгоритмом Мамдані в графічному вигляді.

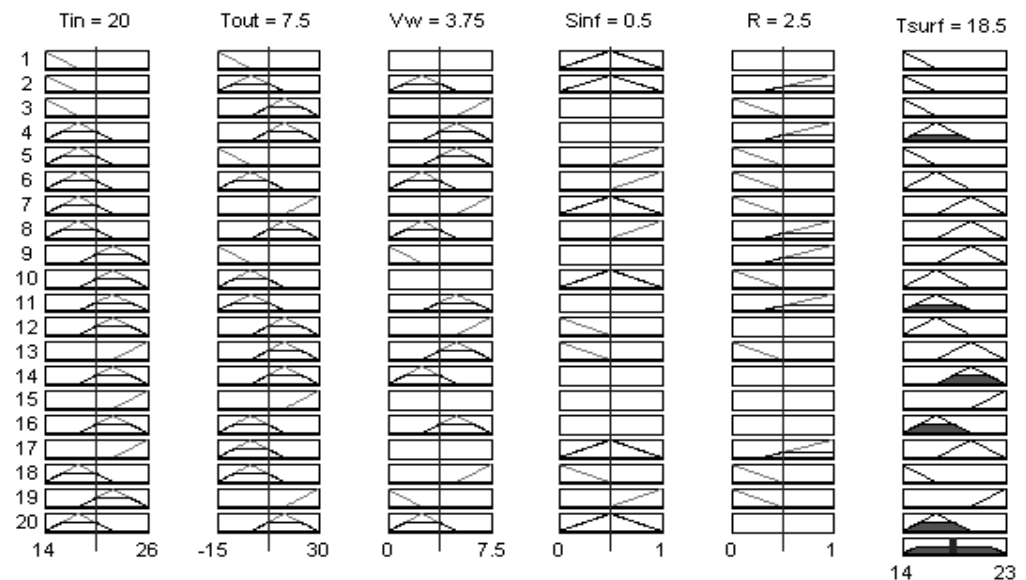


Рис. 3. Графічне відображення нечітких правил

Як видно з рис. 3, якщо: температура повітря у приміщенні становить 20 °С; зовнішня температура – 7.5 °С; швидкість вітру 3.75 м/с; вплив сонячної радіації – 0.5, тобто середній (згідно з табл. 2, за будь-якої орієнтації поверхні та високого коефіцієнта поглинання сонячної радіації); опір теплопровідності дорівнює 2.5 м<sup>2</sup>С/Вт, – то температура внутрішньої поверхні зовнішньої огорожувальної конструкції, за оцінкою правил, становитиме 18.5 °С.

### Висновки

Застосування розробленої моделі оцінювання дасть змогу ще на етапі проектування та будівництва спрогнозувати, якою буде температура внутрішньої поверхні зовнішньої огорожувальної конструкції залежно від кліматичних особливостей території (або пори року) та теплозберіжних властивостей приміщення чи будівлі загалом. Така оцінка дасть змогу правильно зрівноважити параметри для досягнення максимально комфортного рівня теплового мікроклімату.

1. ДБН В.2.6-31:2006 – Конструкції будівель і споруд. Теплова ізоляція будівель. 2. Ратушняк Г.С., Попова Г.С. Проектування захисних конструкцій будівель за теплофізичними параметрами / Навч. посіб. – Вінниця: ВДТУ, 2003. – 78 с. 3. Яхтьєва Г.Э., Нечеткие множества и нейронные сети: учеб. пособ., 2-е изд., испр. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 316 с.: ил., табл. – (Серия „Основы информационных технологий”). 4. Fanger P.O. Thermal Comfort. – McGraw-Hill Book Company, 1972. 5. ASHRAE handbook Fundamentals. – American Society of Heating and Air Conditioning Engineers, Atlanta 1993. 6. Маляренко В.А. Основы теплофизики будівель та енергозбереження: Підруч. – Харків: Видавництво САГА, 2006. – 484 с.