

**Патракеєв Ігор Михайлович**

Кандидат технічних наук, доцент кафедри геоінформатики і фотограмметрії, [orcid.org/0000-0002-0448-8790](https://orcid.org/0000-0002-0448-8790)  
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

## НЕЧІТКА МОДЕЛЬ ІНДИКАТОРА ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТАБОЛІЗМУ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА

***Анотація.** Міське середовище – мережевий метаболічний організм, який здійснює перманентну трансформацію речовини, енергії і виробляє відходи, які в сукупності змінюють міське середовище, в якому існує населення. Нові умови господарського функціонування українських міст, мінливі умови життя міського населення вимагають вироблення адекватних методів управління містами. На прикладі м. Полтави показано, що індикатор оцінки ефективності метаболізму міського середовища може застосовуватися як один з інструментів прийняття рішень щодо сталого розвитку міст України. Розробка нових індикаторів – є важливим завданням щодо реалізації концепції сталого розвитку, яка є логічним продовженням вчення В. І. Вернадського про ноосферу.*

***Ключові слова:** потоки ресурсів; енергетичний баланс; вільна енергія; метаболізм міського середовища; речовино-енергетичні потоки; нечітка логіка*

### Вступ

Людство переживає "урбаністичну еру", а тому особливій гостроті набувають питання, пов'язані з ефективним управлінням енергією споживання та енергією, яка витрачається на утилізацію відходів у містах. У зв'язку з цим особливої уваги набуває концепція "енергетичного балансу" у міському середовищі (МС), яка була запропонована робочою групою Всесвітньої енергетичної ради: вироблена енергія повинна покривати споживану енергію.

Місто – це неврівноважена система. Стан неврівноваженості визначається масштабом антропогенних навантажень на довкілля. Показниками антропогенних навантажень можуть бути: щільність населення, площа забудованих та заощених територій, навантаження від ваги будинків та споруджень, обсяги промислового виробництва, рівень автомобілізації і т. д. [1; 2].

Сучасні дослідження спрямовані на створення індикаторів, визначення показників та розробку інструментів підтримки прийняття рішень щодо реалізації стратегій низьковуглецевого розвитку суспільства і зменшення виснаження природних ресурсів [2; 5].

### Мета статті

Питанням оцінки якості міського середовища присвячена велика кількість вітчизняних і зарубіжних досліджень [2; 6]. Згідно з індексом процвітання міст, розробленому *McKinsey Global Institute*, містобудівне середовище характеризується використанням показників щільності населення, інтенсивності використання громадського транспорту

і мірою озеленення громадського простору.

Ще одним комплексним індикатором, що включає оцінку якості міського середовища, є індекс міського розвитку (*City Development Index – CDI*), що формується на основі показників виробництва валового внутрішнього продукту, якості системи охорони здоров'я і освіти, стану інфраструктури і кількості твердих побутових відходів. Також якість міського середовища – це комплексна оцінка розвиненості системи взаємодій і взаємовідносин жителів міста в межах міського середовища. Все більш широке використання оцінок метаболізму міського середовища обумовлюється необхідністю радикального скорочення використання копалинних ресурсів, необхідних для забезпечення сталого розвитку і високої якості життя населення. Аналіз зарубіжного досвіду показує різноманіття підходів до виявлення параметрів стану міського середовища, які характеризують його сталий розвиток [9; 10; 18].

Метою статті є розгляд методики побудови індикатора ефективності метаболізму міського середовища (ММС), який дає змогу враховувати взаємозв'язок між міською структурою, споживанням енергії, викидами забруднюючих речовин та інтенсивністю споживання природних ресурсів з урахуванням неповних і неточних знань та апробація цієї методики на прикладі міст України.

### Виклад основного матеріалу

#### Методика оцінювання ефективності метаболізму міського середовища

Методика базується на науковому підході "чорного ящика", при якому акцент робиться на балансі матеріально-енергетичних та інформаційних

потоків і менше приділяється увага до взаємодії цих процесів, які генерують цей баланс.

Згідно з поглядами Г. Одума, Г. Дейлі, А. Лотки кожна соціальна або жива система регулюється фундаментальними законами збереження потужності [1]. Згідно із законом збереження потужності – повна потужність на вході в систему дорівнює сумі активної потужності і потужності втрат на виході системи:

$$N = P + L,$$

де  $N$  – повна потужність системи;  $P$  – активна (корисна) потужність системи;  $L$  – потужність втрат системи.

З цього закону випливає, що будь-яка зміна активної потужності компенсується зміною потужності втрат і знаходиться під контролем повної потужності системи.

Міське середовище можна розглядати як сукупність взаємодіючих підсистем. З функціональної точки зору найбільш істотними підсистемами міського середовища можна вважати [5; 6]:

- транспортну підсистему, яка характеризує просторову мобільність і мультимодальні переміщення населення, а також кількість енергії, що витрачається на забезпечення просторової мобільності населення, обсяги емісії CO<sub>2</sub> та інших супутніх забруднювачів міського середовища;

- підсистему міського господарства, що характеризується загальною кількістю витрачених матеріально-енергетичних потоків, житлової території, що припадає на одного мешканця, та забезпечує даний рівень комфорту міського середовища і кількістю відповідних відходів, породжуваних процесами життєдіяльності в міському середовищі;

- соціально-економічну підсистему, що характеризується кількістю валового внутрішнього продукту, виробленого підприємствами міста, кількістю пропозицій робочих місць, кількістю студентів, кількістю енергії, води, відходів, що витрачається галузями промисловості, кількістю податків на душу населення і т. д.

Кожна з розглянутих підсистем може бути абстрактною представлена у вигляді потокової схеми взаємодії з довкіллям, як показано на рис. 1. Підтримка життєдіяльності міського середовища це кругообіг речовин, тобто, саме існування міського середовища залежить від постійного припливу зовнішнього потоку енергії  $N(t)$ , який необхідний для життєдіяльності як живим організмам, так і для виробництва матеріалів, речовин, продуктів, ресурсів та послуг.

Підсистема отримує певну кількість різного виду енергії, речовини, інформації  $N(t)$  і виробляє два види продукції – один з яких є негативною продукцією, яка визначається потоком втрат  $L(t)$ , а другий тип продукції використовується кожною

підсистемою на забезпечення своєї життєдіяльності – потік корисної роботи  $P(t)$  [1].

Кожна з розглянутих вище підсистем міського середовища має свою власну ефективність ( $\xi_1$ ), залежно від енергетичних витрат в кожній з них. В сукупності кожна з підсистем вносить свій внесок в комплексну оцінку ефективності метаболізму міського середовища (ММС) –  $E$ .

Таким чином, виникає два питання: по-перше, як виміряти ефективність кожної з підсистем міського середовища і, по-друге, яким чином інтегрувати оцінки ефективності кожної з підсистем ( $\xi_1$ ) для отримання загальної комплексної оцінки ефективності ММС. Інтеграція різнотипних даних в єдиний інформаційний простір забезпечує можливість їх комплексного аналізу і дає змогу отримати нові знання про об'єкт дослідження – міське середовище.

### Нечітка модель оцінювання метаболізму міського середовища

Для моделювання багатовимірних залежностей типу MISO (*Multiple Input Single Output*) "багато входів – один вихід" доцільно використовувати ієрархічну систему нечіткого логічного виведення (НЛВ). Перевагою ієрархічних систем НЛВ є їх компактність: адекватно описати багатовимірні залежності "багато входів – один вихід" можна невеликою кількістю нечітких правил [12]. Використання ієрархічної системи НЛВ дає змогу подолати "прокляття розмірності", коли при великій кількості входів експерту важко описати причинно-наслідкові зв'язки у вигляді нечітких правил [12; 18]. Експерт одночасно може зберігати не більше 7±2 понять-ознак, тому при великій кількості вхідних змінних необхідно їх класифікувати у вигляді ієрархічного дерева.

В ієрархічних системах НЛВ вихід однієї бази знань подається на вхід іншої бази знань. На рис. 2 бази знань описують відношення:

$$Q_{\Sigma} = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$$

за допомогою трьох баз знань. Такі бази знань описують залежності:

$$y_1 = f_1(x_1, x_2, x_3), \quad y_2 = f_2(x_4, x_5, x_6),$$

$$Q_{\Sigma} = f_0(y_1, y_2, y_3).$$

У таких системах вихідна змінна однієї бази знань є вхідною для іншої бази знань.

Найбільшу популярність серед систем НЛВ отримала модель висновку по Такагі – Сугено – Канга (ТСК) [18]. В ТСК функція заключення визначається нечітким, але точковим способом. Різні аспекти, які пов'язані з теорією проектування та використанням систем НЛВ, досить докладно розглянуто в численних монографіях [3; 4 – 6].



Рисунок 1 – Схема взаємодії шляхом обміну матеріальними ресурсами, інформацією та енергією з довкіллям та підсистемами міського середовища

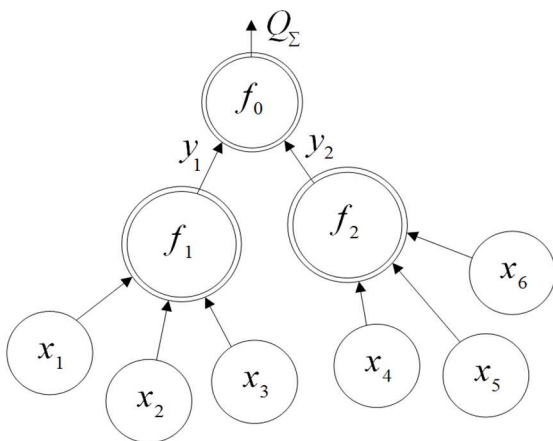


Рисунок 2 – Приклад нечіткої ієрархічної бази знань

Під нечіткою моделлю індикатора оцінювання ефективності ММС визначається математична модель, в основі обчислень якої є нечітка логіка. Нечіткі моделі, засновані на нечіткій логіці, використовуються наразі, коли предмет дослідження має слабку формалізацію та його точний математичний опис складний або просто невідомий. Якість вихідних значень нечітких математичних моделей (похибка нечіткої моделі) безпосередньо залежить тільки від експерта, який складав та налаштував нечітку модель. Для мінімізації помилки складають максимально повну модель з подальшим її налаштуванням засобами машинного навчання.

Основні заходи щодо побудови нечіткої математичної моделі індикатора оцінювання ефективності метаболізму міського середовища можна поділити на три етапи:

- визначення вхідних і вихідних параметрів нечіткої моделі;
- побудова бази знань;
- вибір та обґрунтування одного з методів нечіткого логічного висновку.

Розглянемо завдання оцінювання вхідних вимірних первинних показників  $x_1, \dots, x_k, \dots, x_n$  (листя деревоподібної структури), як нечітких змінних, для кожної з яких можна поставити у відповідність три функції приналежності  $\mu_k^1, \mu_k^2, \mu_k^3$ . Кожне з вимірних значень первинних показників речовино-енергетичних та інформаційних потоків міського середовища може належати до одного з трьох нечітких висловлювань [13]:

- значення  $x_k$  відповідає малій кількості;
- значення  $x_k$  відповідає середній кількості;
- значення  $x_k$  може відповідати великій кількості.

Кожне нечітке висловлювання характеризується відповідною терм-множиною  $A_k^j$  та має відповідну функцію належності  $\mu_k^j$ , де  $j \in \{1, 2, 3\}$ . Функція приналежності  $\mu_k^j$  характеризує ступінь належності значення  $x_k$  до термів "мала кількість", "середня кількість", "велика кількість". На основі цього можна побудувати  $m = 3^n$  антецедентів продукційних правил TSK у вигляді [18]:

$$R^{(1)} IF x_1 ISA_1^1 AND x_2 ISA_2^1 AND \dots$$

$$\dots AND x_n ISA_n^1 THEN y_1 = f(x_1, \dots, x_n),$$

$$\dots \dots \dots \dots \dots$$

$$\mu_{c_{39}}^1 = \begin{cases} 1, & 0 < c_{39} < 1 \\ \frac{1,5 - c_{39}}{0,5}, & 1 < c_{39} \leq 1,5 \\ 0, & 1,5 < c_{39} \end{cases}$$

$$R^{(m)} IF x_1 ISA_n^1 AND x_2 ISA_n^2 AND \dots$$

$$\dots AND x_n ISA_n^n THEN y_m = f(x_1, \dots, x_n).$$

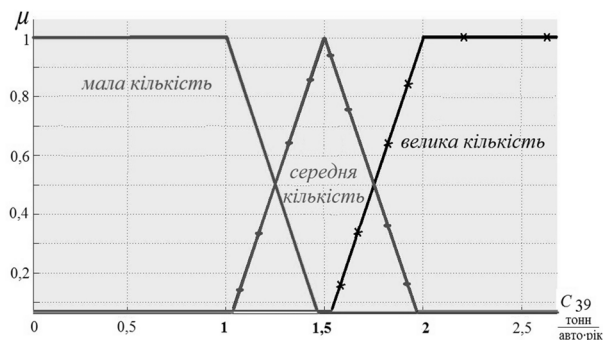
$$\mu_{c_{39}}^2 = \begin{cases} 0, & c_{39} \leq 1 \\ \frac{c_{39} - 1}{0,5}, & 1 < c_{39} < 1,5 \\ \frac{2 - c_{39}}{0,5}, & 1,5 < c_{39} < 2 \\ 0, & 2 < c_{39} \end{cases}$$

З використанням операції  $\wedge$  (AND) система НЛВ TSK може бути переписана в більш компактному (векторному) вигляді:

$$\left[ \prod_{k=1}^n (x_k = A_k^j) \right] \rightarrow y_i = f(x_1, \dots, x_n), \quad i = \overline{1, m}$$

$$\mu_{c_{39}}^3 = \begin{cases} 0, & c_{39} \leq 1,5 \\ \frac{1,5 - c_{39}}{0,5}, & 1,5 < c_{39} \leq 2 \\ 1, & 2 < c_{39} \end{cases}$$

На цьому етапі виконується фазифікація первинних показників, які характеризують повний потік речовинно-енергетичних та інформаційних ресурсів, спожитих міським середовищем протягом певного терміну часу –  $N(t)$ , потік вільної енергії, яка забезпечує життєдіяльність міста –  $P(t)$  та потік енергетичних втрат міського середовища –  $L(t)$ .



На рис. 3 подано приклад фазифікації обсягів емісії  $CO_2$ , вироблених приватним автотранспортом (табл. 1, змінна  $c_{39}$ ) із застосуванням відповідних терм-множин  $A_{c_{39}}^1$  – "мала кількість",  $A_{c_{39}}^2$  – "середня кількість",  $A_{c_{39}}^3$  – "велика кількість".

Рисунок 3 – Приклад фазифікації обсягів емісії  $CO_2$ , які вироблено приватним автотранспортом (первинний показник  $c_{39}$ )

Кожна з терм-множин характеризується відповідною функцією належності, яка може бути задана аналітично таким виразом:

Таблиця 1 – Фрагмент первинних показників речовинно-енергетичних потоків міського середовища (на прикладі транспортної підсистеми)

| Первинні показники речовинно-енергетичних потоків міського середовища |   | Позначення | $N(t)$ | $P(t)$ | $L(t)$ | Одиниці виміру     |
|---|---|------------|--------|--------|--------|--------------------|
| 2. Транспортна підсистема   |   |            |        |        |        |                    |
| 1   | 3.1. Щільність вулично-дорожньої мережі                                     | $c_{31}$   |        |        |        | км/м <sup>2</sup>  |
| 2   | 3.2. Кількість автотранспортних засобів міста                               | $c_{32}$   |        |        |        | шт                 |
| 3   | 3.3. Витрати енергії приватним автотранспортом                              | $c_{33}$   |        |        |        | кВт·годин/авто рік |
| 4   | 3.4. Витрати енергії громадським автотранспортом                            | $c_{34}$   |        |        |        | кВт·годин/осіб рік |
| 5   | 3.5. Інтенсивність транспортного потоку                                     | $c_{35}$   |        |        |        | %                  |
| 6   | 3.6. Середній пробіг легкового автотранспорту за рік                        | $c_{36}$   |        |        |        | км                 |
| 7   | 3.7. Загальна протяжність мережі всіх видів громадського транспорту в місті | $c_{37}$   |        |        |        | км                 |
| 8   | 3.8. Частка використання без вуглецевого транспорту ("зелений транспорт")   | $c_{38}$   |        |        |        | %                  |
| 9   | 3.9. Обсяги емісії $CO_2$ , які вироблено приватним автотранспортом         | $c_{39}$   |        |        |        | тонн/авто рік      |
| 10  | 3.10. Обсяги емісії азоту $NO_x$ , що вироблені легковим автотранспортом    | $c_{310}$  |        |        |        | кг/авто рік        |
| 11  | 3.11. Обсяги емісії $CO_2$ , що вироблена громадським автотранспортом       | $c_{311}$  |        |        |        | тонн/авто рік      |

Кожна функція належності  $\mu_{c_{39}}^1, \mu_{c_{39}}^2, \mu_{c_{39}}^3$  породжує нормально випуклі унімодалні нечіткі множини  $A_{c_{39}}^1, A_{c_{39}}^2, A_{c_{39}}^3$  з відповідними ядрами кожної нечіткої множини:

$w_{c_{39}} = \text{core}(A_{c_{39}}^1) = 1, m_{c_{39}} = \text{core}(A_{c_{39}}^2) = 1,5$  та  $b_{c_{39}} = \text{core}(A_{c_{39}}^3) = 2$ , де  $w_{c_{39}}, m_{c_{39}}, b_{c_{39}}$  – чіткі значення для визначення відповідно оцінок "мала кількість", "середня кількість", "велика кількість" для змінної  $c_{39}$ .

Чіткі значення  $w_{c_{39}}, m_{c_{39}}, b_{c_{39}}$  для кожного первинного показника  $X_k$  залежать від сукупності різноманітних факторів: нормативів якості навколишнього середовища, програм соціального та економічного розвитку міст України, нормативно-технічної документації та правових норм щодо розвитку інженерно-транспортної інфраструктури міст, нормативно-правової бази житлово-комунального господарства та надання житлово-комунальних послуг населенню. Залежно від значення первинного показника  $X_k$  можуть мати місце відношення  $w_{c_{39}} < m_{c_{39}} < b_{c_{39}}$  або  $b_{c_{39}} < m_{c_{39}} < w_{c_{39}}$ .

Відповідно до первинного показника  $c_{39}$  маємо виконання таких умов:

$$\mu_{c_{39}}^1(c_{39}) = 1 \text{ при умові } c_{39} \leq w_{c_{39}};$$

$$\mu_{c_{39}}^2(m_{c_{39}}) = 1;$$

$$\mu_{c_{39}}^3(c_{39}) = 1 \text{ при умові } c_{39} \geq b_{c_{39}}.$$

На наступному кроці необхідно врахувати внесок кожного з розглянутих вхідних первинних показників  $X_k$  в остаточний результат обчислення індикатора  $I$  ефективності ММС. Наприклад, забезпечення споживання енергії на опалення будівель і споруд вважається більш важливим і пріоритетним для комунальних служб, ніж забезпечення населення водою і каналізацією для північних міст і регіонів і навпаки, для забезпечення населення водою і каналізацією буде більш пріоритетним завданням комунальних служб для південних регіонів країни. Для забезпечення гнучкості в обчисленні індикатора оцінки ММС використовується рівень важливості ( $p_k$ ) для кожного первинного показника  $X_k$ . Чим більше значення  $i_k$ , тим важливіший вплив первинного показника  $X_k$  на індикатор оцінювання ефективності ММС.

Для оцінки індикатора ефективності ММС використовується п'ять рівнів важливості змінних  $p_k = 1, 2, 3, 4, 5$ .

Розглянемо випадок коли виконується умова  $w_k < m_k < b_k$ , аналогічно може бути випадок  $b_k < m_k < w_k$ . Остаточним вибором при побудові нечіткої математичної моделі індикатора ефективності ММС є визначення трьох кусково-лінійних функцій  $f_k^1, f_k^2, f_k^3$ , для кожного вхідного первинного показника вхідної змінної  $x_k$ .

Функція  $f_k^1$  відповідає внеску змінної  $X_k$  в кінцевий показник ефективності ММС, припускаючи, що ми оцінюємо випадок, відповідний тільки підумові продукційного правила  $IF x_k IS A_k^j$  де  $p_k > p_l$  для всіх  $l \neq k$ ; іншими словами, можна сказати, що  $f_k^j$  характеризує внесок змінної  $X_k$ , коли підумова продукційного правила  $IF x_k IS A_k^j$  приймає значення "істина" та змінна  $X_k$  вважається найбільш важливою.

Функції  $f_k^j$  вибираються узгоджено по відношенню до функцій приналежності  $\mu_k^j$ , наприклад, функції  $f_k^j$  мають задовольняти таким загальним обмеженням:

$$f_k^1(x_k) = 0, \forall x_k \leq m_k \vee \forall x_k \leq b_k. \quad (1)$$

$$f_k^2(x_k) = 50, \forall x_k \leq m_k \wedge \forall x_k \leq b_k \vee \forall x_k \leq m_k \wedge \forall x_k \leq w_k. \quad (2)$$

$$f_k^3(x_k) = 100, \forall x_k \geq b_k \vee \forall x_k \leq m_k. \quad (3)$$

Функція  $f_k^j$  неспадна і відповідає обмеженням:

$$0 \leq f_k^j(x_k) \leq 100 \quad (4)$$

(умова (4) вимагає, щоб інтервал значень індикатора оцінювання ефективності ММС знаходився між 0 та 100).

На рис. 4 подано кусково-лінійні функції,  $f_{c_{39}}^1, f_{c_{39}}^2, f_{c_{39}}^3$ , які задовольняють обмеженням (1) – (4) та погоджені з відповідними функціями приналежності  $\mu_{c_{39}}^1, \mu_{c_{39}}^2, \mu_{c_{39}}^3$ . Як видно (див. рис. 3), найбільший вклад в інтегральну оцінку вносить змінна  $c_{39}$ , коли підумова продукції ( $IF c_{39} IS A_{c_{39}}^1$ ) приймає значення "істина".

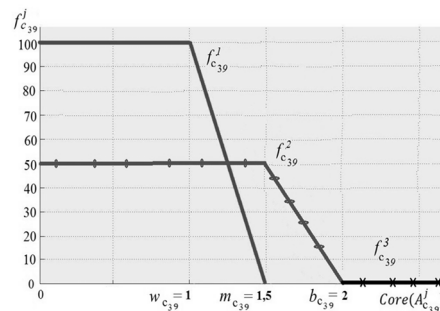


Рисунок 4 – Приклад функції  $f_{c_{39}}^j$ , яка узгоджена з функціями належності, показаними на рис. 3 і відповідає обмеженням (1) – (4)

Нечітка математична модель індикатора оцінювання ефективності ММС у вигляді сукупності продукційних правил *TSK* може бути подана у вигляді [12]:

$$R^{(i)} : IF \prod_{k=1}^m (x_k \text{ IS } A_k^j) \text{ THEN } y_i = \sum_{k=1}^n \frac{p_k}{P} \cdot f_k^j(x_k),$$

де  $i$  – кількість *TSK*-правил ( $i = \overline{1, m}$ );  $m$  – кількість підумов продукції;  $k$  – порядковий номер вхідної змінної;  $x_k$  – вхідна змінна ( $k = \overline{1, n}$ );  $A_k^j$  – нечітка множина, з відповідною функцією належності  $\mu_k^j, j \in \{1, 2, 3\}$ ;  $p_k$  – коефіцієнт важливості вхідної змінної  $x_k$ .

Відповідно до умови (4) треба забезпечити виконання нерівності:  $0 \leq y_i \leq 100$ .

Нечітке логічне заключення для  $m$  кількості *TSK*-правил подано у вигляді [8]:

$$y_\alpha = \frac{\sum_{i=1}^m w_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^m w_i} = \frac{\sum_{i=1}^m w_i \cdot \sum_{k=1}^n \frac{p_k}{P} \cdot f_k^j(x_k)}{\sum_{i=1}^m w_i},$$

де  $\alpha$  – проміжний рівень обчислювань загальної ієрархічної структури індикатора ефективності ММС після отриманих вхідних даних;  $w_i$  – ваговий коефіцієнт  $i$ -го правила, який характеризує рівень активації *TSK*-правила, якщо рівень активації правила визначається  $t$ -нормою від

$$w_i = \begin{cases} \mu_{A_1^1}(x_1), \mu_{A_2^1}(x_2), \mu_{A_3^1}(x_3), \dots, \mu_{A_n^1}(x_n) : \\ \min\{\mu_{A_1^1}(x_1), \mu_{A_2^1}(x_2), \dots, \mu_{A_n^1}(x_n)\} \\ \text{або} \\ \mu_{A_1^1}(x_1), \mu_{A_2^1}(x_2), \dots, \mu_{A_n^1}(x_n). \end{cases}$$

Проміжні оцінки на рівні  $\alpha$  удуть новими вхідними змінними для проміжних оцінок на рівні  $\alpha+1$ .

Розглянемо приклад використання кусково-лінійних функцій  $f_{c_{39}}^1, f_{c_{39}}^2, f_{c_{39}}^3$  для отримання заключення на проміжному  $\alpha$  рівні обчислювань загальної ієрархічної структури індикатора ефективності ММС. Припустимо, у найпростішому випадку, якщо значення первинного показника:

$$x_k \leq w_k, \mu_{A_k^2}(w_k)=0, \mu_{A_k^3}(w_k)=0, \forall k = \overline{1, n},$$

тоді  $y_i = y_\alpha = 0$ , відповідно до умови  $f_k^1(x_k) = 0$ ;

$$m_k \leq x_k \leq b_k, \mu_{A_k^1}(m_k)=0, \mu_{A_k^3}(b_k)=0, \forall k = \overline{1, n},$$

тоді  $y_i = y_\alpha = 50$ , відповідно до умови  $f_k^2(x_k) = 50$ ;

$$x_k \geq b_k, \mu_{A_k^1}(b_k)=0, \mu_{A_k^2}(b_k)=0, \forall k = \overline{1, n},$$

тоді  $y_i = y_\alpha = 100$ , відповідно до умови  $f_k^3(x_k) = 100$ .

В загальному випадку НЛВ на проміжному рівні  $\alpha$  обчислювання ефективності ММС буде залежить від рівня активації  $w_k$  кожного *TSK*-правила який визначається  $t$ -нормою.

Для оцінювання узагальнюючого індикатора ефективності ММС визначено рівними індекси важливості  $i_k$  для проміжних значень після першого рівня ( $\alpha > 1$ ) ієрархії.

На рівні ієрархії  $\alpha > 1$  обчислюється середнє арифметичне зважене для отриманого набору дійсних чисел  $\bar{y}_{\alpha+1}$  з позитивними дійсними ваговими коефіцієнтами для кожної з досліджуваних підсистем міського середовища  $(v_1, \dots, v_l)_{\alpha+1}$ :

$$\bar{y}_{\alpha+1} = \frac{\sum_{l=1}^v v_l \cdot \bar{y}_l}{\sum_{l=1}^v v_l},$$

де  $\bar{y}_l$  – кількість виходів на рівні ієрархії  $\alpha$ ;  $v_l$  – позитивні дійсні вагові коефіцієнти для кожної з підсистем міського середовища.

Елементи ієрархічної структури інтегральної оцінки ефективності ММС показано на рис. 5 та інтерпретуються наступним чином:

– корінь дерева ієрархії – інтегральної оцінка ефективності ММС ( $I_\Sigma$ );

–  $\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \bar{\gamma}$  – дуги графа, які виходять з нетермінальних вершин – оцінки ефективності метаболізму для кожної з досліджуваних підсистеми міського середовища;

–  $\bar{\alpha}_1, \bar{\alpha}_2, \bar{\alpha}_3, \bar{\beta}_1, \bar{\beta}_2, \bar{\beta}_3, \bar{\gamma}_1, \bar{\gamma}_2, \bar{\gamma}_3$  – дуги графа, які характеризують метаболічні трансформації та впливають на підсумкову оцінку ефективності ММС – ( $I_\Sigma$ );

– термінальні вершини дерева ієрархії – первинні показники, які характеризують енергетичні, речовинні та інформаційні потоки міського середовища.

Кожна з підсистем міського середовища має три рівні даних: виміряні первинні показники, проміжні оцінки, які характеризують потік енергії, що споживається, тобто повної потужності, яка є мірою потенційних можливостей відповідної підсистеми міського середовища, потік вільної енергії, тобто корисної потужності, яка є мірою реальних можливостей міського середовища та потік втрат, тобто потужність втрат, яка є мірою втрачених можливостей міського середовища. На завершення три оцінки ефективності кожної з підсистем синтезуються в кінцевій інтегральній оцінці ефективності ММС. Тому структура інтегральної оцінки ефективності ММС налічує чотири рівня ієрархії.

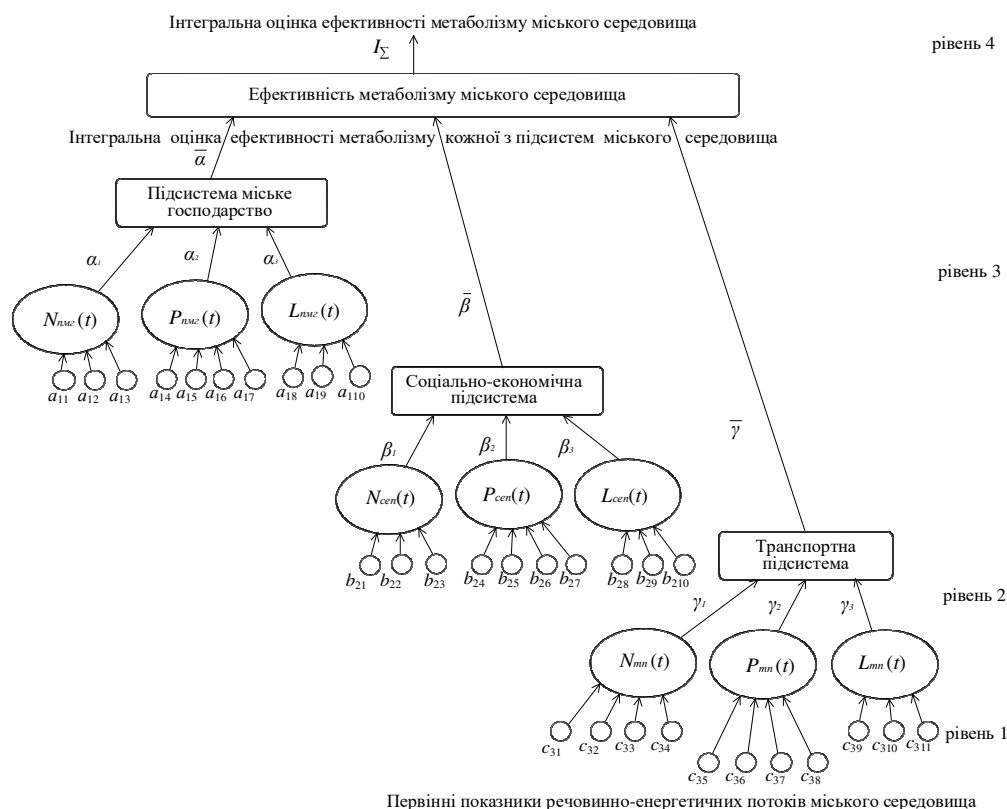


Рисунок 5 – Ієрархічна структура інтегральної оцінки ефективності метаболізму міського середовища на прикладі транспортної підсистеми, підсистеми міського господарства та соціально-економічної підсистеми

Міста України є типовою моделлю сучасного промислового міста. Сильне зонування території привело до використання землі в двох основних напрямках: одна зона призначена для промисловості, інша призначена для житла. Причому такі зони навмисно розташовані на відстані, що має на увазі необхідність існування ефективної транспортної системи, яка з'єднує житлові будівлі і робочі місця [4], створюючи таким чином форму "обов'язкової мобільності". Сьогодні пострадянські міста дуже далекі від міст ЄС в питаннях ефективності метаболізму міського середовища.

#### Апробація нечіткої моделі індикатора ефективності метаболізму міського середовища

Для підготовки вихідних даних в першу чергу були використані можливості ГІС для формування геопросторових моделей і тематичних шарів відповідно до 37 базових первинних, які характеризують метаболічні трансформації трьох підсистем міського середовища м. Полтави. Базовим компонентом оцінки якості міського середовища є географічні або просторові дані, подані у вигляді цифрових даних про просторові об'єкти і включають відомості про їх місцезнаходження, властивості та просторові і непросторові атрибути.

Одним із заходів взаємодії моделі оцінювання ефективності ММС та геоінформаційних систем є інтерфейс, розроблений в програмному середовищі

MatLab (*The MathWorks Inc*) з поширеною ГІС ArcGIS 10 [17].

Результатом такого зв'язку є той факт, що модельні дослідження (розрахунки) в MatLab-середовищі, можуть бути подано як характеристики просторових об'єктів з усіма перевагами географічного подання та інтеграції з іншими можливостями використання геоінформаційних технологій. Такий підхід забезпечує гнучкий спосіб використання характеристик обох програмних середовищ [18].

Вихідні дані для міста Полтави були сформовані на основі використання відкритих джерел: "Полтава 2030. Інтегрований розвиток міста" (<http://www.2030.poltava.ua>), регіональні доповіді про стан навколишнього середовища в Полтавській області 2016, 2015 роки.

На рис. 6, 7 відображена чутливість оцінки ефективності ММС міста Полтави до змін від кількості твердих побутових відходів, що формуються населенням міста та від кількості енергії, що витрачається на опалення будівель і споруд.

Наведені графіки показують, що чутливість оцінки ефективності ММС різна, залежно від зміни досліджуваних вхідних показників. Наприклад, зменшення твердих побутових відходів, що формуються населенням в умовах щільної міської забудови на 0,1 тонн / осіб·рік забезпечує збільшення

ефективності міського середовища на 5%, в той час як зменшення кількості спожитої енергії на опалення будівель та споруджень на 10 кВт·год / м<sup>2</sup> забезпечує збільшення ефективності ММС на 8-10%.

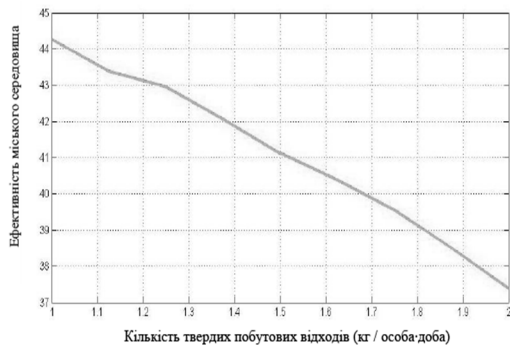


Рисунок 6 – Залежність ефективності метаболізму міського середовища м. Полтава від кількості твердих побутових відходів

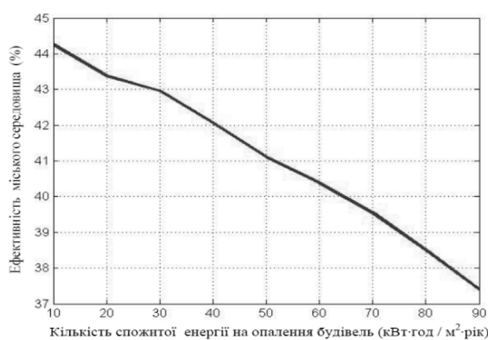


Рисунок 7 – Залежність ефективності метаболізму міського середовища м. Полтава від кількості спожитої енергії на опалення будівель

На рис. 8 показано ландшафт ефективності ММС залежно від кількості енергії, спожитої на опалення будівель та вироблених твердих побутових відходів, яку можна інтерпретувати як свого роду ландшафт ефективності ММС міста Полтави в залежності від факторів впливу.

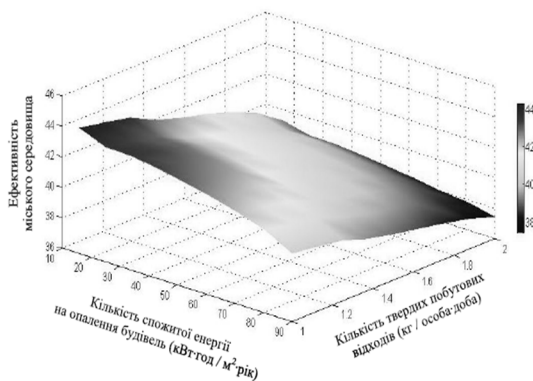


Рисунок 8 – Ландшафт ефективності метаболізму міського середовища м. Полтава в залежності від кількості спожитої енергії на опалення будівель та вироблених твердих побутових відходів

На рис. 9 показано порівняння обчислених оцінок ефективності ММС м. Полтави з аналогічними оцінками для міст Барселона та

Лугано, отриманих в рамках програми моніторингу метаболізму міст Європейського союзу [16; 18].



Рисунок 9. – Порівняння обчислених оцінок ефективності метаболізму міського середовища міст Полтава, Барселона, Лугано

### Висновки

Перспективним підходом для зниження впливу на навколишнє середовище є аналіз метаболічних трансформацій речовинних, водних, енергетичних, інформаційних потоків у міському середовищі. В статті запропонована нечітка модель індикатора оцінювання ефективності метаболізму міського середовища, заснована на нечіткій логіці.

Застосування індикатора ефективності ММС надає змогу значно розширити можливості підсистем прийняття містобудівних рішень.

Наприклад, виконати кластеризацію функціональних зон міста на основі вибраних показників, що допоможе визначити кадастрові райони або адміністративні одиниці міста з аналогічними характеристиками або порівняти за однаковими характеристиками (споживання енергії до щільності населення, частину використання відновлюваної енергії до валового внутрішнього продукту, річну витрату енергії промисловими підприємствами до обсягів емсії CO<sub>2</sub>, яка вироблена такими підприємствами і так далі).

Запропонований індикатор може використовуватися як інструментарій містобудівника для обґрунтування заходів, які дадуть змогу зберегти продуктивність міського середовища (вирішити задачу забезпечення виконання стратегії побудови без вуглецевого та ресурсоефективного міського середовища). Необхідно відзначити, що майбутній напрям вдосконалення та тестування індикатора оцінювання ефективності ММС зв'язано з оцінюванням метаболічних трансформацій на прикладі інших міст України та порівнянні результатів отриманих оцінок з аналогічними результатами моніторингу метаболізму міст Європейського союзу, виконаних в рамках програми SUME – Sustainable Urban Metabolism for Europe [8; 9].



## Список літератури

1. Большаков Б.Е. Научные основы проектирования в системе "природа – общество – человек" // Б.Е. Большаков. – М. – СПб. – Дубна: Гуманистика, 2002. – 616 с.
2. Караваєва Н.В. Аналіз підходів до формування систем індикаторів сталого розвитку / Н.В. Караваєва, Л.О. Левченко, Я.М. Трохименко // Управління розвитком складних систем. – 2011. – № 7. – С. 126 – 131.
3. Тістол Н.В. Концептуальний підхід до оцінки якості житлового середовища // Управління розвитком складних систем. – 2013. – №13. – С. 130 – 135.
4. Сорокин П.А. Человек, цивилизация, общество. – М., 1992. – 234 с.
5. Патракеєв І.М. Онтологічне дослідження міського середовища // Управління розвитком складних систем. – 2015. – Частина 1, №23. – С. 159 – 168.
6. Янин А.Л. Учение В.И. Вернадского о биосфере и современность / А.Л. Янин: Сб. "На пути к устойчивому развитию". – М., 2007. – С. 39 – 61.
7. Чекмарев А. Н. Квалиметрия и управление качеством. Ч. 1. Квалиметрия. учебное пособие // А. Н. Чекмарев. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та. 2010. – 172 с.
8. European Commission Directorate – General for Environment. Режим доступу: <http://ec.europa.eu/environment/climat>
9. Urban development and urban metabolism: A spatial approach. Режим доступу: [http://sume.at/project\\_downloads](http://sume.at/project_downloads)
10. Bettencour L.A., Lobo J., Helbing D. (2007). Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities // *Proceedings of the National Academy of Sciences*, n. 104.
11. Butera F., Caputo P. (2008). Planning eco-cities, the case of Huai Rou New Town // *Proceedings of the 3rd International Solar Cities Congress, Adelaide*.
12. Paola C., Giulia P., Marco B., (2016). Urban metabolism analysis as a support to drive metropolitan development world. *Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning. Procedia Engineering* 161, 1588 – 1595.
13. European Green City Index, Assessing the environmental impact of Europe's major cities. Research project conducted by the Economist Intelligence Unit – Munich: Siemens AG – 2009.
14. Kennedy, C., Cuddihy J., Engel-Yan J., (2007). The Changing Metabolism of Cities. *Journal of Industrial Ecology*, 11, 2.
15. Caputo P., Costa G., Manfren M. (2010). Paradigm shift in urban energy systems through distributed generation // *Methods and models*, London: Paperback.
16. Lozano S, E. Non-parametric frontier approach to modelling the relationships among population, GDP, energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions / Lozano S., Gutierrez E. // *Ecological Economics* n. 66 – 2008.
17. Newman P., Kenworthy J., (1989). Cities and automobile dependence // *An International Sourcebook*, Farnham: Gower.
18. Acebillo J., (2008). Maggi R. LNL – La Nuova Lugano, Visioni, sfide e territorio della città // Lugano: CUP-IRE – 2008.

Стаття надійшла до редколегії 06.02.2019 р.

### Патракеєв Игорь Михайлович

Кандидат технических наук, доцент кафедры геоинформатики и фотограмметрии, [orcid.org/0000-0002-0448-8790](https://orcid.org/0000-0002-0448-8790)  
 Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

### НЕЧЕТКАЯ МОДЕЛЬ ИНДИКАТОРА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТАБОЛИЗМА ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

**Аннотация.** Городская среда – сетевой метаболический организм, осуществляющий перманентную трансформацию вещества, энергии и производит отходы, которые в совокупности меняют городскую среду, в которой существует население. Новые условия хозяйственного функционирования украинских городов, меняющиеся условия жизни городского населения требуют выработки адекватных методов управления городами. На примере г. Полтавы показано, что индикатор оценки эффективности метаболизма городской среды может применяться как один из инструментов принятия решений по устойчивому развитию городов Украины. Разработка новых индикаторов является важной задачей по реализации концепции устойчивого развития, которая является логическим продолжением учения В.И. Вернадского о ноосфере.

**Ключевые слова:** потоки ресурсов; энергетический баланс; свободная энергия; метаболизм городской среды; вещественно-энергетические потоки; нечеткая логика

### Patrakeiev Igor Mikhailovich

PhD, associate Professor, Department of Geoinformatics and photogrammetry, [orcid.org/0000-0002-0448-8790](https://orcid.org/0000-0002-0448-8790)  
 Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

### FUZZY MODEL OF THE INDICATOR OF EFFICIENCY OF METABOLISM OF URBAN ENVIRONMENT

**Abstract.** The urban environment is a networked metabolic organism. The urban environment is everywhere permeated with networks that feed it with energy, resources, people, goods and information coming from the environment. Urban environment – performs a permanent transformation of matter, energy and produces waste, which together change the urban environment in which there is a population, forms of social organization of its life. New conditions for the economic functioning of Ukrainian

cities, changing living conditions of the urban population require the development of adequate methods of urban management, which stimulate the most effective implementation of urban resources in order to harmonize the lives of the urban population. These requirements put forward at the first level the tasks of improving the system of strategic management of sustainable development of urban areas. As a tool for predicting the sustainable development of cities, it has been proposed to use the indicator for assessing the metabolic efficiency of the urban environment, which allows to take into account the relationship between the urban structure, energy consumption, pollutant emissions and the intensity of natural resources consumption. Using the example of Poltava, it is shown that the indicator for assessing the metabolic efficiency of the urban environment can be used as one of the decision-making tools for the sustainable development of Ukrainian cities. Improvement of existing and development of new indicators is an important task towards the implementation of the concept of sustainable development, which is a logical continuation of the teachings of V.I. Vernadsky on the noosphere.

**Keywords:** resource flows; energy balance; free energy; metabolism of the urban environment; material and energy flows; fuzzy logic

#### References

1. Bolshakov, B.Y. (2002). *Scientific groundwork for design in the system "nature – society – man"*. M. – SPb. – Dubna: Gumanistika, 616.
2. Karavaeva, N., Levchenko, L.A., & Trohimenko, J.M. (2011). *Analysis of approaches to formation of systems of indicators of sustainable development. Management of development of complex systems*. Kiev: KNUBA, 7, 126 – 131.
3. Tistol, N. (2013). *Conceptual approach to evaluating the quality of the residential environment. Management the development of complex systems*. Kiev: KNUBA, 13, 130 – 135.
4. Sorokin, P. (1992). *Man, civilization, society*, 234.
5. Patrakeyev, I.M. (2015). *An Ontological study of an urban environment. Management the development of complex systems*. Kiev: KNUBA, 1, 23 159-168.
6. Yanshin, A.L. (2007). *The Doctrine of V.I. Vernadsky about biosphere and modernity. The book "towards sustainable development"*. Moscow, 39 – 61.
7. Chekmarev, A.N. (2010). *Qualimetry and quality management. Part 1. Qualification*. Samara: Samara Publishing House. state aerospace. University, 172.
8. European Commission Directorate – General for Environment. Access mode: <http://ec.europa.eu/environment/climat>
9. Urban development and urban metabolism: A spatial approach. Access mode: [http://sume.at/project\\_downloads](http://sume.at/project_downloads)
10. Bettencour L.A., Lobo J., Helbing D., (2007). *Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities. Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104.
11. Butera, F. (2008). *Planning eco-cities, the case of Huai Rou New Town / Butera F., Caputo P. // Proceedings of the 3rd International Solar Cities Congress, Adelaide*.
12. Paola, C., Giulia, P., Marco, B. (2016). *Urban metabolism analysis as a support to drive metropolitan development world. Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning. Procedia Engineering*, 161, 1588 – 1595.
13. *European Green City Index, Assessing the environmental impact of Europe's major cities. Research project conducted by the Economist Intelligence Unit. Munich: Siemens AG, 2009.*
14. Kennedy, C., Cuddihy J., & Engel-Yan J. (2007). *The Changing Metabolism of Cities // Journal of Industrial Ecology*, 11, 2.
15. Caputo, P., Costa G., & Manfren, M., (2010). *Paradigm shift in urban energy systems through distributed generation // Methods and models, London: Paperback*.
16. Lozano, S.E. Gutierrez E. (2008). *Non-parametric frontier approach to modelling the relationships among population, GDP, energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions. Ecological Economics*, 66.
17. Newman, P., & Kenworthy, J., (1989). *Cities and automobile dependence // An International Sourcebook, Farnham: Gower*.
18. Acebillo, J. & Maggi R. (2008). *LNL – La Nuova Lugano, Visioni, sfide e territorio Della citta // Lugano: CUP-IRE*.
19. Bertalanffy, L.V. (2004). *Teoria generate dei sistemi: fondamenti, sviluppo, applicazioni. Milano: Mondadori*.

#### Посилання на публікацію

- APA Patrakeyev, I. (2019). *Fuzzy model of the indicator of efficiency of metabolism of urban environment. Manager of development of complex system*, 37, 185 – 194. [in Ukrainian], [dx.doi.org\10.6084/m9.figshare.9783242](https://doi.org/10.6084/m9.figshare.9783242).
- ДСТУ Патракеєв, І.М. Нечітка модель індикатора ефективності метаболізму міського середовища [Текст] / І.М. Патракеєв // Управління розвитком складних систем. – 2019. – № 37. – С. 185 – 194, [dx.doi.org\10.6084/m9.figshare.9783242](https://doi.org/10.6084/m9.figshare.9783242).