

Патракеєв Ігор Михайлович

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

Денисюк Богдан Іванович

Старший викладач кафедри геоінформатики і фотограмметрії, orcid.org/0000-0003-1692-8551

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

ОЦІНЮВАННЯ МЕТАБОЛІЧНИХ ПОТОКІВ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА НА ОСНОВІ ЕКСПЕРТНИХ ЗНАНЬ

Анотація. Якість міського середовища визначається якістю його складових: антропогенного, природного та соціального середовища. Основною проблемою оцінювання стану міського середовища є розрізненість методичних підходів і адекватних інструментів для оцінювання її якісного стану. Пропонується розроблення інтелектуальної інформаційної системи оцінювання потенційних, реальних та втрачених можливостей міського середовища із застосуванням експертних знань в умовах використання нечислової, неточної та неповної інформації для забезпечення управління сталим розвитком міста. Розроблена методика оцінювання потенційних, реальних та втрачених можливостей міського середовища заснована на використанні нечітких логічних рівнянь та дає змогу оцінювати ефективність метаболічних трансформацій кожної з підсистем міського середовища.

Ключові слова: база знань; продукційні правила; нечітка логіка; експертна система; метаболізм міського середовища

Вступ

В останнє десятиліття проблема застосування сучасних інформаційних технологій в дослідженні проблем стійкого розвитку міст набуває особливої важливості. Це пов'язано як з посиленням ролі інформації і каналів зв'язку в світі в цілому, так і актуалізації впровадження інформаційних технологій в нормативно-правове поле державного та муніципального управління. Свого часу ще Аристотель стверджував, що в людському суспільстві однією з основних складових процесу розвитку є управління.

Вперше визначення "сталого розвитку" було обґрунтовано в 1987 році Всесвітньою комісією ООН з природного середовища і розвитку. Під стійким розвитком в загальному сенсі мається на увазі суспільний прогрес, який би задовольняв потреби нинішніх поколінь без обмеження можливостей існування майбутніх. З 1999 року на Міжнародних конференціях під егідою ООН обговорюється перехід до нової парадигми сталого розвитку такої, як *стале зростання вільної енергії*. В сучасних моделях сталого розвитку як вимір використовується потужність як здатність системи здійснювати роботу в одиницю часу [2; 11].

Особливої актуальності проблема сталого розвитку має для великих та малих міст України,

управління системами життєдіяльності яких не може задовільно здійснюватися поза цієї парадигми сталого розвитку.

В роботах [1; 3; 4] показано, що мовою простору $[L^R]$ і часу $[L^T]$ потужність – це величина як якісно-кількісна визначеність з розмірністю $[L^5, T^{-5}]$ та є мірою можливостей системи діяти в часі. Розрізняють три групи можливостей системи з мірою потужності [3]:

– потенційна можливість – визначається мірою повної потужності на вході в систему N ;

– реальна можливість – визначається мірою корисної (активної) потужності на виході із системи P ;

– втрачена можливість – визначається мірою втрат (пасивної) потужності на виході із системи L .

Закон збереження потужності це твердження про те, що при будь-яких перетвореннях відкритих систем зберігається величина як якісно-кількісна визначеність з розмірністю потужності [3; 5]:

$$N = P + L, [L^5 T^{-5}] = const,$$

де N – повна потужність (потенційні можливості системи); P – активна (корисна) потужність (реальні можливості системи); L – потужність втрат (втрачені можливості системи).

Закон збереження потужності для відкритих систем (Е.С. Бауер, В.І. Вернадський, П.Г. Кузнецов)

є універсальною мірою моделі сталого розвитку міського середовища (МС) [4; 5; 10]. Відповідно до закону збереження потужності сталий розвиток відкритої системи має місце при неспадному зростанні активної (корисної потужності). Сталий розвиток міського середовища може бути досягненим за допомогою ноосферного управління, узгодженого із законом збереження потужності.

Застосування інформаційних технологій в забезпеченні ноосферного управління сталим розвитком міського середовища допоможе вирішити такі завдання:

- моніторинг потенційних, реальних та втрачених можливостей кожного міського середовища та окремих його підсистем;
- прогноз наслідків запропонованих рішень щодо територіального розвитку;
- розрахунок нормативних параметрів і індикаторів стратегії ноосферного сталого розвитку на державному, регіональному і муніципальному рівнях;
- оцінку існуючого, необхідного стану, прогноз можливих проблемних ситуацій і забезпечення плану дій щодо їх усунення на державному, регіональному і муніципальному рівнях.

Для вимірювання сталого розвитку міського середовища використовуються різні, неадитивні, неспіввимірні показники, з якими не можна здійснювати арифметичні операції, в тому числі і коли ці показники нормовані і приведені до умовно безрозмірного вигляду, тобто до умовних частин, за якими стоять ті чи інші різні величини.

Підсумовуючи вищесказане, слід зазначити, що для забезпечення ноосферного управління сталим розвитком треба оцінювати потенційні, реальні та втрачені можливості МС на основі опрацювання *нечислової* (порядкової), *неточної* та *неповної* (наприклад, не для всіх вагових коефіцієнтів задані рівності і нерівності) інформації. Нечислова, неточна і неповна інформація ("ннн"-інформація) дає змогу застосувати множину наборів вагових коефіцієнтів для отримання інтегральної оцінки потенційних, реальних та втрачених можливостей МС.

Мета статті

Метою роботи є розроблення інтелектуальної інформаційної системизабезпечення оцінювання потенційних, реальних та втрачених можливостей МС із застосуванням нечітких експертних знань в умовах використання "ннн"-інформації для забезпечення управління сталим розвитком міста.

Виклад основного матеріалу

Концепція міського середовища, заснована на мережевому метаболізмі

МС – мережевий метаболічний організм [10]. МС здійснює перманентну трансформацію речовини, енергії, інформації, відходів та ін., які в сукупності змінюють форми соціальної організації його життєдіяльності населення.

З функціональної точки зору найбільш істотними підсистемами МС можна вважати [16;18]: транспортну підсистему, яка характеризує просторову мобільність населення; підсистему міського господарства, яка характеризує рівень комфорту міського середовища, соціально-економічну підсистему – визначає рівень здорового життя населення.

Підтримка життєдіяльності МС 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. Кожна 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 $L(t)$, і другий тип продукції, який використовується кожною підсистемою на забезпечення своєї життєдіяльності – потік корисної роботи $P(t)$ [1].

На рис. 1 показана інформаційна модель взаємодії транспортної підсистеми МС з довкіллям. Підтримка життєдіяльності міського середовища це кругообіг речовин, тобто, саме існування МС 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.

Кожна 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 $L(t)$, і другий тип продукції, який використовується кожною підсистемою на забезпечення своєї життєдіяльності – потік корисної роботи $P(t)$ [4; 12].

Кожна з підсистем МС має свою власну ефективність залежно від енергетичних витрат в кожній з них. Таким чином, МС є мережевим метаболічним організмом, який виконує перманентну трансформацію речовини, енергії, інформації, які в свою чергу в сукупності впливають на форми, види соціальної, економічної, екологічної організації самого міського середовища.

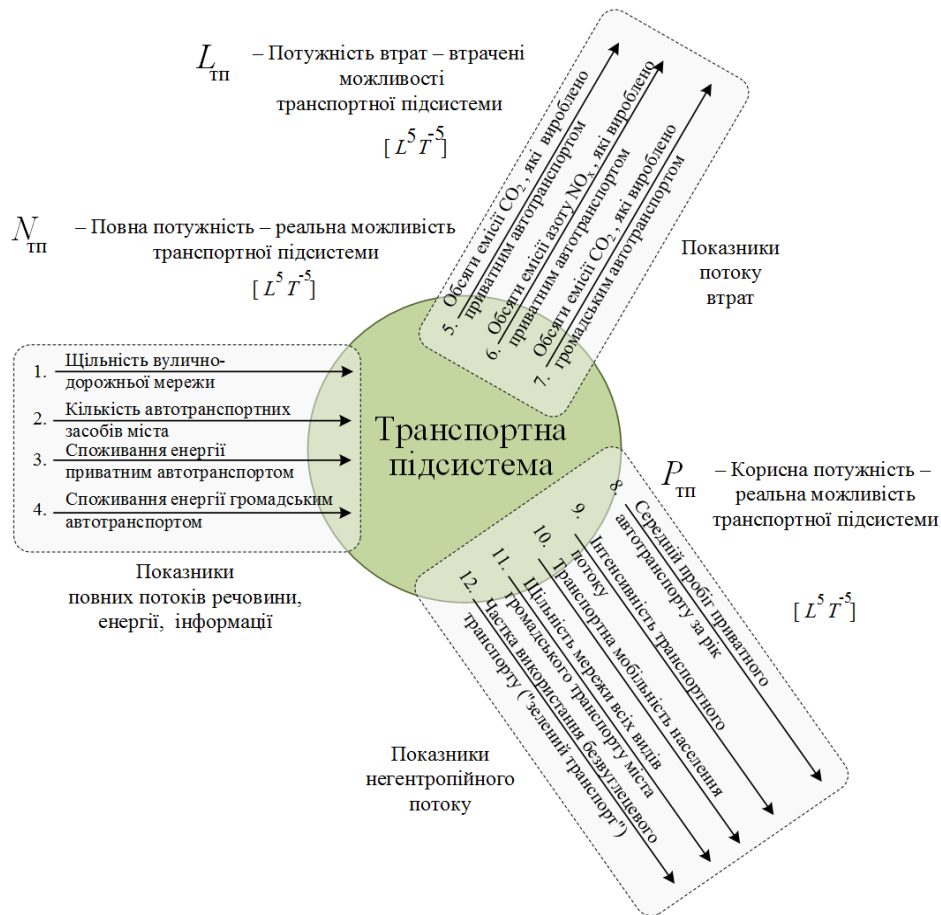


Рисунок 1 - Загальна інформаційна модель взаємодії транспортної підсистеми міського середовища з довкіллям

Показники повних потоків речовини, енергії, інформації, показники потоку втрат та показники продуктивного потоку транспортної підсистеми міського середовища мають гетерогенний та різномасштабний характер. Наприклад, для транспортної підсистеми її реальна можливість визначається такими показниками повних потоків речовини, енергії та інформації, як: щільність вулично-дорожньої мережі з розмірністю – $км/км^2$; кількість автотранспортних засобів міста з розмірністю – $шт$; споживання енергії приватним автотранспортом з розмірністю – $(МВт \cdot год)/(авто \cdot рік)$; споживання енергії громадським транспортом з розмірністю $(МВт \cdot год)/(нас \cdot рік)$. Таким чином, маємо виміряні потоки різної природи.

В сучасній теорії ідентифікації [7; 8] для отримання математичних моделей застосовується або детермінований, або статистичний підхід. Однак, як в першому, так і другому випадку математичні моделі ідентифікації, тобто встановлення зв'язку між входними та вихідними змінними за отриманими емпіричними даними, виявляється складним в інтелектуальних завданнях, які вирішуються особами, які приймають рішення. Математичним апаратом, який на відміну від класичних методів

приспосований до обліку лінгвістичні, тобто здатності виражати природною мовою знання, є теорія нечітких множин, яка має засоби формалізації природномовних висловлювань і логічного висновку.

Розглянемо побудову і налаштування нечіткої бази знань, яка являє собою сукупність лінгвістичних висловлювань типу ЯКЩО (входи) ТО (виходи), що допомагає оцінити потенційні, реальні та втрачені можливості МС.

Побудова нечіткої бази знань оцінювання потенційних, реальних та втрачених можливостей міського середовища

Ключовим поняттям будь-якої інтелектуальної інформаційної системи є база знань. Для подання експертних знань оцінювання повної, реальної потужності втрата кожної з підсистем міського середовища на основі застосування різнорідних, неадитивних та неспіввимірних первинних показників (ПП) використана продукційна модель подання знань [6; 7]. В системах з базами знань подання знань є фундаментальним поняттям, а рішення про вибір методу подання знань має великий вплив на будь-яку їх складову частину. Зазвичай вирізняють чотири групи способів подання знань [6]: логічне подання, мережеве, ієрархічне подання та

процедурне. Системи опрацювання знань, що використовують продукційні моделі, отримали назву "продукційних систем". Будь-яке продукційне правило, що міститься в базі знань, складається з двох частин: антецедента та консеквента. Антецедент є посилкою правила (умовна частина) і складається з елементарних пропозицій, з'єднаних логічними зв'язками "ТА", "АБО". Консеквент (висновок) включає одне або кілька пропозицій, які висловлюють або деякий факт, або вказівку на дію, яка підлягає виконанню. Продукційні правила прийнято записувати у вигляді антецедент-консеквент. Формально нечітке правило може бути представлено у вигляді кортежу:

$$FR = \langle NFR, \{FSVAR_i\} \rightarrow FSD, CF \rangle,$$

де NFR – ім'я нечіткого правила; $FSVAR_i$ – нечітке висловлювання вхідної змінної; FSD – нечітке висловлювання вихідної змінної; CD – коефіцієнт активності продукційного правила.

Формально, нечітке висловлювання однієї вхідної змінної може бути подано у вигляді кортежу:

$$FSVAR = \langle LV^{inp}, LT^{inp}, M^{inp} \rangle,$$

де LV^{inp} – лінгвістична вхідна змінна; LT^{inp} – лінгвістичний терм вхідної змінної; M^{inp} – модифікатор лінгвістичного терму вхідної змінної, якому відповідають слова "дуже", "більш-менш", "не дуже" та інші.

Формально нечітке висловлювання вихідної змінної може бути подано у вигляді кортежу:

$$FSD = \langle LV^{out}, LT^{out}, M^{out} \rangle,$$

де LV^{out} – лінгвістична вихідна змінна; LT^{out} – лінгвістичний терм вихідної змінної; M^{out} – модифікатор лінгвістичного терму вихідної змінної.

В загальному випадку формально лінгвістична змінна може бути подана у вигляді кортежу:

$$LV^{inp} \cup LV^{out} = LV = \langle NLV, TSLV, ULV, GLV, MLV, TLV \rangle,$$

де NLV – ім'я лінгвістичної змінної; $TSLV$ – терм-множина лінгвістичної змінної; ULV – область визначень функції кожного елемента $TSLV$; GLV – синтаксичні правила у вигляді формальної граматики, яка породжує найменування лінгвістичних термів; MLV – семантичні правила, які задають функції належності лінгвістичних термів, що генеруються синтаксичними правилами GLV ; TLV – тип лінгвістичної змінної (залежить від алгоритму нечіткого виводу).

Формально лінгвістичний терм змінної може бути подано у вигляді кортежу:

$$LT = \langle NLT, MF \rangle,$$

де NLT – ім'я лінгвістичного терму; MF – функція належності змінної лінгвістичного терму.

Як функцію належності для фазифікації нечітких змінних оцінювання потенційних, реальних та втрачених можливостей підсистем міського середовища пропонується використовувати кусково-лінійні функції. Прикладом таких функцій є трикутна та трапецієподібна, які визначаються виразами [6; 11]:

$$\mu(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x \leq c \\ 0, & c < x \end{cases},$$

де a, b, c – деякі числові параметри, які пов'язані відношенням $a < b < c$.

Трикутна функція належності використовується коли відомо, що нечітка змінна обмежується деяким діапазоном значень і відомо припущення про середнє значення змінної. Тоді a – це мінімальне значення змінної; b – середнє; c – максимальне значення.

Трапецієподібна функція належності задається виразом [6; 11]:

$$\mu(x; a, b, c, d) = \begin{cases} a, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x \leq d \\ 0, & d < x \end{cases},$$

де a, b, c, d – деякі числові параметри, які пов'язані відношенням $a < b < c < d$.

Трапецієподібна функція належності використовується, коли відомий діапазон зміни нечіткого параметра і діапазон можливої зміни середнього значення.

Ці параметри використовуються щоб задавати такі властивості множин, які характеризують невизначеність типу: "приблизно дорівнює", "середнє значення", "розташований в інтервалі", "подібний до об'єкта", "схожий на предмет".

Зупинимось детальніше на формуванні матриці знань (*KnowledgeMatrix*) [6; 8] для оцінювання потенційних, реальних та втрачених можливостей кожної з підсистем МС. Під матрицею знань визначимо таблицю, сформовану за такими правилами (табл. 1):

1. Розмірність цієї таблиці дорівнює $(n+1) \times N$, де $(n+1)$ – кількість стовпчиків, а $N = k_1 + k_2 + \dots + k_n$ – кількість рядків.

2. Перші n стовпчиків відповідають вхідним змінним $x_i, i = \overline{1, n}$, а $(n + 1)$ -й стовпчик відповідає значенням y_i вихідної змінної $y, j = \overline{1, m}$.

3. Кожен рядок матриці являє собою комбінацію значень вихідної змінної y . При цьому перші k рядків відповідають значенню вихідної змінної $y = y_1$, наступні l рядків відповідають значенню вихідної змінної $y = y_j$, останні p рядків відповідають значенню вихідної змінної $y = y_m$.

4. Елемент матриці A_i^{mp} , який перебуває на перетині i -го стовпчика та mp -го рядка відповідає лінгвістичній оцінці параметра x_i в рядку нечіткої бази знань з номером mp . При цьому лінгвістична оцінка A_i^{mp} отримується з терм-множини, яка відповідає змінній x_i , тобто $A_i^{mp} \in A_i, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, p = \overline{1, l}$.

Розглянута структура матриці знань допомагає визначити систему продукційних правил, які пов'язують значення вхідних показників стану МС $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ з оцінкою ефективності метаболізму МС. Кожному стану МС $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ відповідає значення індикатора ефективності метаболізму МС $I(X) = I\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$.

$$\{x_1, x_2, \dots, x_n\} \rightarrow I(X). \quad (1)$$

Розглянемо методику оцінювання потенційних, реальних та втрачених можливостей МС $I(X)$ за заданим вектором вхідних лінгвістичних змінних $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$.

Отримані значення вхідних змінних необхідно апроксимувати [6; 7]. З чисельного аналізу добре відомо, що будь-яку елементарну функцію можна апроксимувати лінійною функцією виду [6; 7]:

$$I(x_1, x_2, \dots, x_n) = I_0 + \sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot x_j,$$

де λ_j – коефіцієнт лінійної апроксимації, який характеризує зміну значення індикатора залежно від значення j -ї змінної:

$$\begin{aligned} \Delta I_j &= I(x_1, \dots, x_j + \Delta x_j, \dots, x_n) - \\ &- I(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n) = \lambda_j \cdot \Delta x_j. \end{aligned} \quad (2)$$

Відповідно до виразу (1) одночасна зміна двох змінних x_j і x_k , яка не впливає на зміну значення індикатора, характеризується такою умовою:

$$\begin{aligned} \Delta I &= \lambda_j \cdot \Delta x_j + \lambda_k \cdot \Delta x_k = 0; \\ \Delta x_j &= -\frac{\lambda_k}{\lambda_j} \cdot \Delta x_k. \end{aligned} \quad (3)$$

Таблиця 1 – Основні елементи матриці знань

Номер вхідної комбінації значень	Вхідні змінні				Вихідна змінна
	x_1	x_2	$\dots x_i \dots$	x_n	
11	A_1^{11}	A_2^{11}	$\dots A_i^{11} \dots$	A_n^{11}	y_1
12	A_1^{12}	A_2^{12}	$\dots A_i^{12} \dots$	A_n^{12}	
...	
1k	A_1^{1k}	A_2^{1k}	$\dots A_i^{1k} \dots$	A_n^{1k}	
...					
j1	A_1^{j1}	A_2^{j1}	$\dots A_i^{j1} \dots$	A_n^{j1}	y_j
j2	A_1^{j2}	A_2^{j2}	$\dots A_i^{j2} \dots$	A_n^{j2}	
...	
jl	A_1^{jl}	A_2^{jl}	$\dots A_i^{jl} \dots$	A_n^{jl}	
...					
m1	A_1^{m1}	A_2^{m1}	$\dots A_i^{m1} \dots$	A_n^{m1}	y_m
m2	A_1^{m2}	A_2^{m2}	$\dots A_i^{m2} \dots$	A_n^{m2}	
...	
mp	A_1^{mp}	A_2^{mp}	$\dots A_i^{mp} \dots$	A_n^{mp}	

Наприклад, якщо змінні x_j і x_k характеризують відповідно кількість приватних автотранспортних засобів міста та обсяги емісії CO₂, які вироблені приватним автотранспортом, то умова (3) має інтерпретацію як компроміс між зростанням кількості приватного автотранспорту і обсягами емісії CO₂: яким прийнятним повинен бути баланс між збільшенням емісії CO₂ і зростанням кількості приватного автотранспорту? Наразі, якщо такий баланс визначається експертом, то цей факт можна зафіксувати значенням відношення λ_k / λ_j .

Реально баланс, виражений в рівнянні (3), залежить від поточної ситуації. Наприклад, є обмеження на викид забруднюючих речовин, незалежно від кількості транспортних засобів в місті. З іншого боку, значення індикатора $I(X)$ не повинно значно змінюватися, якщо значення змінної x_j перебуває в діапазоні, заданих правовою нормою. В цьому випадку відповідно до виразу (3) коефіцієнт λ_j повинен наближатися до нуля.

Таким чином, вищевикладене дає змогу стверджувати, що знання експерта можуть бути корисними при підтримці різних балансів між показниками речовино-енергетичних потоків міського середовища λ_k / λ_j , залежно від досліджуваної ситуації, так і при обмеженнях на коефіцієнти лінійних наближень λ_i , які відображають чинні екологічні, соціальні, містобудівні, економічні та інші нормативи. Все це говорить про те, що продукційні правила, які визначають зміст бази знань повинні мати в якості вихідної змінної лінійні моделі у вигляді [8; 18]:

$$\begin{aligned}
 & \text{IF } x_1 \text{ IS } A_{11} \text{ AND } x_2 \text{ IS } A_{12} \text{ AND } \dots \\
 & \dots \text{ AND } x_n \text{ IS } A_{1n} \text{ THEN } I = I_{01} + \sum_{j=1}^n \lambda_{1,j} \cdot x_j \\
 & \dots \dots \dots \\
 & \text{IF } x_1 \text{ IS } A_{n1} \text{ AND } x_2 \text{ IS } A_{n2} \text{ AND } \dots \\
 & \dots \text{ AND } x_n \text{ IS } A_{nn} \text{ THEN } I = I_{0n} + \sum_{j=1}^n \lambda_{n,j} \cdot x_j
 \end{aligned}$$

Антецеденти системи продукційних правил визначають різні сфери дії для кожної з лінійних моделей, які визначаються послідовністю продукційних правил.

Розглянемо побудову матриці знань для оцінювання реальних можливостей (повної

потужності – P(t)) транспортної підсистеми МС. Визначимо як приклад лінгвістичні змінні для оцінювання реальних можливостей транспортної підсистеми таким чином:

– лінгвістична змінна "щільність вулично-дорожньої мережі", (км/км²): TSLV – {висока щільність; середня щільність; невисока щільність}; ULV – $x_1 \in [\underline{x}_1, \bar{x}_1]$; TLV – вихідна змінна $y \in [\underline{y}, \bar{y}]$;

– лінгвістична змінна "кількість автотранспортних засобів", (шт): TSLV – {велика кількість; середня кількість; незначна кількість}; ULV – $x_2 \in [\underline{x}_2, \bar{x}_2]$; TLV – вихідна змінна $y \in [\underline{y}, \bar{y}]$;

– лінгвістична змінна "обсяги споживання енергії приватним автотранспортом", ((МВт·год/(авто·рік)): TSLV – {велика кількість; середня кількість; незначна кількість}; ULV – $x_3 \in [\underline{x}_3, \bar{x}_3]$; TLV – оцінка вихідної змінної $y \in [\underline{y}, \bar{y}]$.

Графіки функцій належності лінгвістичної змінної x_3 "споживання енергії приватним автотранспортом" подано на рис. 2.

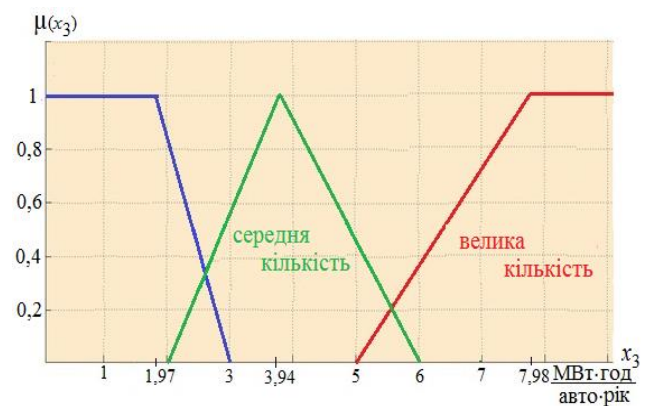


Рисунок 2 – Функції належності лінгвістичної змінної x_3 "споживання енергії приватним автотранспортом"

Вигляд матриці знань, яка побудована для вхідних показників x_1, x_2, x_3 та визначених на відповідних терм-множинах $A_{x_1}^j, A_{x_2}^j, A_{x_3}^j$, де $j = \{1, 2, 3\}$, подано в табл. 2.

Таблиця 2 – Вигляд матриці знань, яка побудована для вхідних показників x_1, x_2, x_3

Номер вхідної комбінації значень	Вхідні змінні			Вихідна змінна
	x_1	x_2	x_3	
11	$A_{x_1}^{11}$	$A_{x_2}^{11}$	$A_{x_3}^{11}$	$y_1 = I_{01} + \lambda_{11}x_1 + \lambda_{11}x_2 + \lambda_{11}x_3 + \lambda_{12}x_1 + \lambda_{12}x_2 + \lambda_{12}x_3 + \lambda_{13}x_1 + \lambda_{13}x_2 + \lambda_{13}x_3$
12	$A_{x_1}^{12}$	$A_{x_2}^{12}$	$A_{x_3}^{12}$	
13	$A_{x_1}^{13}$	$A_{x_2}^{13}$	$A_{x_3}^{13}$	
21	$A_{x_1}^{21}$	$A_{x_2}^{21}$	$A_{x_3}^{21}$	$y_2 = I_{02} + \lambda_{21}x_1 + \lambda_{21}x_2 + \lambda_{21}x_3 + \lambda_{22}x_1 + \lambda_{22}x_2 + \lambda_{22}x_3 + \lambda_{23}x_1 + \lambda_{23}x_2 + \lambda_{23}x_3$
22	$A_{x_1}^{22}$	$A_{x_2}^{22}$	$A_{x_3}^{22}$	
23	$A_{x_1}^{23}$	$A_{x_2}^{23}$	$A_{x_3}^{23}$	
31	$A_{x_1}^{31}$	$A_{x_2}^{31}$	$A_{x_3}^{31}$	$y_3 = I_{03} + \lambda_{31}x_1 + \lambda_{31}x_2 + \lambda_{31}x_3 + \lambda_{32}x_1 + \lambda_{32}x_2 + \lambda_{32}x_3 + \lambda_{33}x_1 + \lambda_{33}x_2 + \lambda_{33}x_3$
32	$A_{x_1}^{32}$	$A_{x_2}^{32}$	$A_{x_3}^{32}$	
33	$A_{x_1}^{33}$	$A_{x_2}^{33}$	$A_{x_3}^{33}$	

Побудована матриця знань допомагає визначити **систему логічних висловлювань** типу "IF – THEN, OTHERWISE", які пов'язують значення вхідних показників оцінювання реальних можливостей транспортної підсистеми таким чином:

$$\begin{aligned}
 & IF (x_1 = A_{x_1}^{11}) AND(x_2 = A_{x_2}^{11}) AND(x_3 = A_{x_3}^{11}) OR \\
 & (x_1 = A_{x_1}^{12}) AND(x_2 = A_{x_2}^{12}) AND(x_3 = A_{x_3}^{12}) OR \\
 & (x_1 = A_{x_1}^{13}) AND(x_2 = A_{x_2}^{13}) AND(x_3 = A_{x_3}^{13}) OR \\
 & THEN y_1 = I_{01} + \lambda_{11}x_1 + \lambda_{11}x_2 + \lambda_{11}x_3 + \lambda_{12}x_1 + \\
 & \quad + \lambda_{12}x_2 + \lambda_{12}x_3 + \lambda_{13}x_1 + \lambda_{13}x_2 + \lambda_{13}x_3 \\
 & OTHERWISE \\
 & IF (x_1 = A_{x_1}^{21}) AND(x_2 = A_{x_2}^{21}) AND(x_3 = A_{x_3}^{21}) OR \\
 & (x_1 = A_{x_1}^{22}) AND(x_2 = A_{x_2}^{22}) AND(x_3 = A_{x_3}^{22}) OR \\
 & (x_1 = A_{x_1}^{23}) AND(x_2 = A_{x_2}^{23}) AND(x_3 = A_{x_3}^{23}) OR \\
 & THEN y_2 = I_{02} + \lambda_{21}x_1 + \lambda_{21}x_2 + \lambda_{21}x_3 + \lambda_{22}x_1 + \\
 & \quad + \lambda_{22}x_2 + \lambda_{22}x_3 + \lambda_{23}x_1 + \lambda_{23}x_2 + \lambda_{23}x_3 \\
 & OTHERWISE \\
 & IF (x_1 = A_{x_1}^{31}) AND(x_2 = A_{x_2}^{31}) AND(x_3 = A_{x_3}^{31}) OR \\
 & (x_1 = A_{x_1}^{32}) AND(x_2 = A_{x_2}^{32}) AND(x_3 = A_{x_3}^{32}) OR \\
 & (x_1 = A_{x_1}^{33}) AND(x_2 = A_{x_2}^{33}) AND(x_3 = A_{x_3}^{33}) OR \\
 & THEN y_3 = I_{03} + \lambda_{31}x_1 + \lambda_{32}x_2 + \lambda_{33}x_3 + \lambda_{32}x_1 + \\
 & \quad + \lambda_{32}x_2 + \lambda_{32}x_3 + \lambda_{33}x_1 + \lambda_{33}x_2 + \lambda_{33}x_3.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Будемо називати подібну систему логічних висловлювань **нечіткою базою знань (Knowledge**

Matrix) оцінювання реальних можливостей транспортної підсистеми МС [7].

З використанням операцій \cup (AND) та \cap (OR) система логічних висловлювань (4) може бути переписана у більш компактному вигляді:

$$\bigcup_{p=1}^3 \left[\bigcap_{j=1}^3 (X = A_{x_j}^{jp}) \right] \rightarrow I = y_i, i = \overline{1,3},$$

де $X \in \{x_1, x_2, x_3\}$.

На основі описаних вище вихідних даних потрібно розробити метод, що дає змогу вектору вхідних змінних $X = (x_1, x_2, x_3)$, $x_1 \in [\underline{x}_1, \overline{x}_1]$, $x_2 \in [\underline{x}_2, \overline{x}_2]$, $x_3 \in [\underline{x}_3, \overline{x}_3]$ поставити у відповідність оцінку $I = y_i, i = \overline{1,3}$.

Методика оцінювання реальних можливостей (повної потужності – P(t)) транспортної підсистеми МС заснована на використанні **нечітких логічних рівнянь**, отриманих на основі **матриці знань системи логічних висловлювань**(4).

Розглянемо докладніше питання отримання **нечітких логічних рівнянь**. Лінгвістичні оцінки (див. табл. 1) A_i^{mp} змінних x_1, x_2, x_3 , які входять до логічних висловлювань про значення оцінки $I = y_i, i = \overline{1,3}$ розглядаються як нечіткі множини, визначені на універсальній множині $U_i = [\underline{x}_i, \overline{x}_i], i = \overline{1,3}$:

Позначимо:

– $\mu_{x_j}^{A_i^{mp}}$ – функція належності лінгвістичної змінної x_j "цільність вулично-

дорожньої мережі", де $x_1 \in [\underline{x}_1, \bar{x}_1]$, нечіткому терму $A_{x_1}^{mp}$, $m = \overline{1,3}$, $p = \overline{1,3}$, (див. табл. 2);

– $\mu^{A_{x_2}^{mp}}(x_2)$ – функція належності лінгвістичної змінної x_2 "кількість автотранспортних засобів", де $x_2 \in [\underline{x}_2, \bar{x}_2]$, нечіткому терму $A_{x_2}^{mp}$, $m = \overline{1,3}$, $p = \overline{1,3}$ (табл. 2);

– $\mu^{A_{x_3}^{mp}}(x_3)$ – функція належності лінгвістичної змінної x_3 "обсяги споживання енергії приватним автотранспортом", де $x_3 \in [\underline{x}_3, \bar{x}_3]$, нечіткому терму $A_{x_3}^{mp}$, $m = \overline{1,3}$, $p = \overline{1,3}$ (табл. 2);

– оцінка реальних можливостей транспортної підсистеми міського середовища y_i , $i = \overline{1,3}$ залежить від значень лінгвістичних змінних x_1, x_2, x_3 :

$$y_i = I_{0i} + \sum_{j=1}^n \lambda_{i,j} \cdot x_j.$$

Зв'язок між розглянутими функціями визначається нечіткою базою знань (1) та може бути подано у вигляді таких рівнянь:

$$\begin{aligned} y_1 &= I_{01} + \lambda_{11}x_1 + \lambda_{12}x_2 + \lambda_{13}x_3 = \\ &= \mu^{A_{x_1}^{11}}(x_1) \wedge \mu^{A_{x_2}^{11}}(x_2) \wedge \mu^{A_{x_3}^{11}}(x_3) \vee \\ &\vee \mu^{A_{x_1}^{12}}(x_1) \wedge \mu^{A_{x_2}^{12}}(x_2) \wedge \mu^{A_{x_3}^{12}}(x_3) \vee \\ &\vee \mu^{A_{x_1}^{13}}(x_1) \wedge \mu^{A_{x_2}^{13}}(x_2) \wedge \mu^{A_{x_3}^{13}}(x_3), \\ y_2 &= I_{02} + \lambda_{21}x_1 + \lambda_{22}x_2 + \lambda_{23}x_3 = \\ &= \mu^{A_{x_1}^{21}}(x_1) \wedge \mu^{A_{x_2}^{21}}(x_2) \wedge \mu^{A_{x_3}^{21}}(x_3) \vee \\ &\vee \mu^{A_{x_1}^{22}}(x_1) \wedge \mu^{A_{x_2}^{22}}(x_2) \wedge \mu^{A_{x_3}^{22}}(x_3) \vee \\ &\vee \mu^{A_{x_1}^{23}}(x_1) \wedge \mu^{A_{x_2}^{23}}(x_2) \wedge \mu^{A_{x_3}^{23}}(x_3), \\ y_3 &= I_{03} + \lambda_{31}x_1 + \lambda_{32}x_2 + \lambda_{33}x_3 = \\ &= \mu^{A_{x_1}^{31}}(x_1) \wedge \mu^{A_{x_2}^{31}}(x_2) \wedge \mu^{A_{x_3}^{31}}(x_3) \vee \\ &\vee \mu^{A_{x_1}^{32}}(x_1) \wedge \mu^{A_{x_2}^{32}}(x_2) \wedge \mu^{A_{x_3}^{32}}(x_3) \vee \\ &\vee \mu^{A_{x_1}^{33}}(x_1) \wedge \mu^{A_{x_2}^{33}}(x_2) \wedge \mu^{A_{x_3}^{33}}(x_3), \end{aligned} \quad (5)$$

де \wedge – логічне "І"; логічне "АБО".

Такі нечіткі логічні рівняння отримані з нечіткої бази знань (4) шляхом заміни лінгвістичних термів

A_i^{mp} на відповідні функції належності, а операції \cup та \cap – на логічні операції \vee та \wedge .

Більш коротко систему логічних рівнянь можна записати таким чином:

$$y_i(x_1, x_2, x_3) = \bigcup_{p=1}^3 \left[\bigcap_{j=1}^3 \mu^{A_{x_j}^{ip}}(X) \right],$$

де $p = \overline{1,3}$, $j = \overline{1,3}$, $X \in \{x_1, x_2, x_3\}$.

На завершення, розглянемо узагальнену методику оцінювання потенційних, реальних та втрачених можливостей міського середовища на основі використання нечітких логічних рівнянь.

Узагальнена методика оцінювання потенційних, реальних та втрачених можливостей підсистем міського середовища, яка відповідає вектору фіксованих значень вхідних змінних $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, буде здійснюватися в такій послідовності:

1. Визначити перелік лінгвістичних змінних, які впливають на оцінку потенційних, реальних та втрачених можливостей підсистем міського середовища.

2. Визначити вектор вхідних значень лінгвістичних змінних:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n).$$

3. Задати функції належності нечітких термів кожної лінгвістичної змінної, які будуть використовуватися в нечіткій базі знань (4) та визначити значення цих функцій для заданих значень лінгвістичних змінних:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n).$$

4. Використовуючи логічні рівняння (5), визначити багатовимірні функції належності вектора $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ для кожного значення вихідної змінної y_i . При цьому операції \wedge – логічне "І", \vee – логічне "АБО" над функціями належності замінюються на операції \min , \max :

$$\mu(a) \wedge \mu(b) = \min [\mu(a), \mu(b)],$$

$$\mu(a) \vee \mu(b) = \max [\mu(a), \mu(b)].$$

5. Визначимо значення вихідної змінної $I(x_1, x_2, \dots, x_n)$, для якої функція належності максимальна:

$$I(x_1, x_2, \dots, x_n) = \max_{j=1, m} (\mu^{y_i}(x_1, x_2, \dots, x_n)). \quad (6)$$

Вираз (6) і буде оцінкою потенційних, реальних та втрачених можливостей кожної з підсистем МС на основі використання вхідних гетерогенних, неадитивних та різновимірюваних показників.

Продукційні правила, які визначають зміст бази знань, є свого роду перемикачами, з одного лінійного закону "входи-вихід" на інший, теж лінійний (рис. 4).

Обчислювальна частина запропонованої методики легко реалізується на матриці значень функцій належності, отриманої з матриці знань шляхом виконання операцій \min , \max [6; 7].

Інтегральна оцінка ефективності метаболізму міського середовища

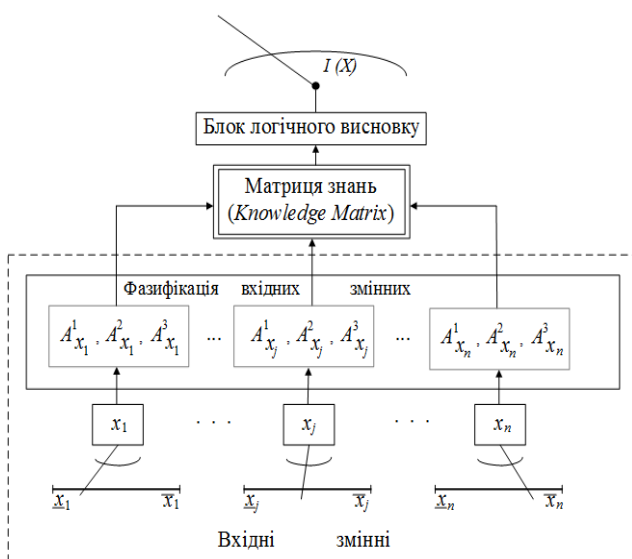


Рисунок 4 – Схема зв'язку між вхідними первинними показниками ($x_1, \dots, x_j, \dots, x_n$) та вихідною змінною $I(X)$ на основі матриці знань

Таким чином, запропонована методика заснована на визначенні значення лінгвістичного терму по максимуму функції належності, і допомагає узагальнювати цю ідею на всю матрицю знань.

Розглянута методика може бути використана як основа для реалізації алгоритму отримання інтегральної оцінки ефективності метаболізму МС в умовах використання "ннн"-інформації.

Програмна реалізація подання експертних знань для оцінювання метаболічних потоків міського середовища

На етапі проектування використано уніфіковану мову моделювання *UML*. Для реалізації об'єктів продукційної бази знань оцінювання метаболічних потоків міського середовища необхідно створити *UML*-діаграму програмних класів. *UML*-діаграма програмних класів продукційної бази знань оцінювання метаболічних потоків міського середовища подано на рис. 4.

На рис. 5 показана *UML*-діаграма програмних класів продукційної бази знань оцінювання метаболічних потоків міського середовища, яка налічує 14 програмних класів, в числі яких клас *Knowledge Matrix* є основним класом. Кожен клас складається з атрибутів і методів. Клас *Knowledge Matrix* забезпечує придбання знань від експертів, пов'язаних з містобудуванням, формування комфортного міського середовища, реформування сфери житлово-комунального господарства та покращення екологічних умов та інших.

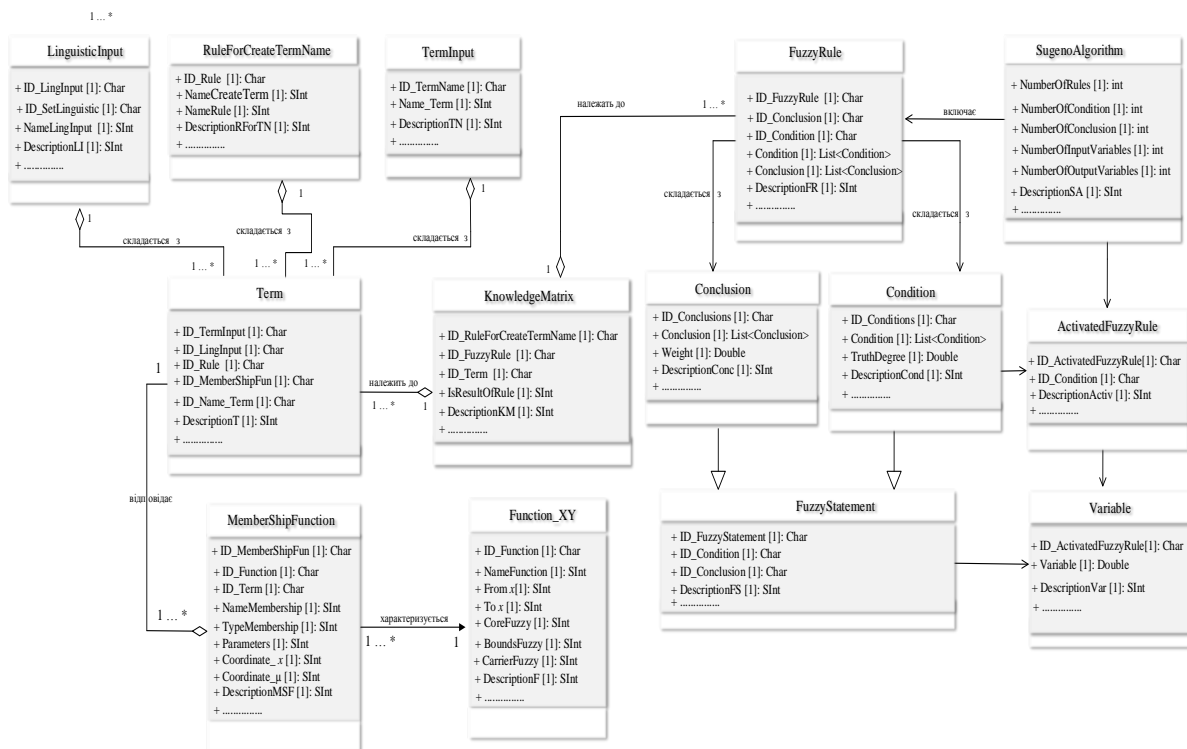


Рисунок 5 – *UML*-діаграма програмних класів продукційної бази знань оцінювання метаболічних потоків міського середовища

Крім того, клас забезпечує можливість збереження і завантаження знань в або з об'єктно-реляційної бази даних. Клас *Fuzzy Rule* використовується для зберігання інформації про правила бази знань.

Клас *Sugeno Algorithm* використовується для зберігання інформації про кількісні характеристики продукційних правил та вхідних і вихідних змінних, задіяних в алгоритмі нечіткого логічного висновку.

Класи *Condition* та *Conclusion* використовуються для зберігання інформації про умови виконання підзаключень продукційного правила та для зберігання інформації про умови заключення (консеквент) продукційного правила. Для зберігання інформації про сукупність активізованих нечітких множин для кожного з підзаключень бази правил використовується клас *Activated Fuzzy Rule*. Клас *Fuzzy Statement* використовується для зберігання нечітких висловлювань і клас *Variable* використовується для зберігання змінних, отриманих як результат виконання алгоритму нечіткого логічного висновку.

Розроблена *UML*-діаграма програмних класів продукційної бази знань оцінювання метаболічних потоків може використовуватись як інформаційне забезпечення геоінформаційного моніторингу метаболізму міського середовища. Розроблена продукційна база знань заснована на методах нечіткої логіки, що дає змогу спростити процес оцінювання якості трансформації одних субстанцій (речовинних, енергетичних, інформаційних) в інші, а отже, спростити процес оцінювання та прогнозування трансформації змін соціально-функціональної структури міста та забезпечити сталий розвиток МС за допомогою ноосферного управління, узгодженого із законом збереження потужності.

Висновки

Розроблена структура інтелектуальної інформаційної системи забезпечення оцінювання повної потужності (потенційних можливостей), корисної потужності (реальні можливості) та потужності втрат (втрачені можливості) МС з застосуванням нечітких експертних знань в умовах використання "нині" – інформації для забезпечення управління сталим розвитком міста.

Показано, що сталий розвиток МС може бути досягнуто за допомогою ноосферного управління, узгодженого із законом збереження потужності.

Особливо актуальною проблема ноосферного управління сталим розвитком є для великих та малих міст України. Запропонована методика оцінювання потенційних, реальних та втрачених можливостей МС допомагає оцінювати ефективність метаболічних трансформацій кожної з підсистем МС та інтегрувати отримані оцінки кожної з підсистем для отримання інтегральної оцінки ефективності метаболізму МС. Використання розробленої методики дає змогу на основі використання нечітких логічних рівнянь, отриманих з матриці знань вирішити труднощі, пов'язані з проблемою спільного використання різномірних, неадитивних та неспіввимірних первинних показників речовино-енергетичних, інформаційних потоків МС.

Наведено діаграму програмних класів, які беруть участь в поданні нечітких знань, що можуть використовуватися в системі прийняття рішень з управління сталим розвитком МС. Запропоновану схему зберігання нечітких знань можна розширити та використовувати для зберігання багатьох баз нечітких знань, внаслідок чого забезпечити їх інтеграцію.

Методика побудови *Knowledge Matrix* та реалізація бази нечітких знань може застосовуватися як основа інформаційного забезпечення геоінформаційного моніторингу метаболізму в експертній системі управління сталим розвитком МС.

Список літератури

1. Большаков Б.Е., Кузнецов О.Л. Устойчивое развитие: универсальный принцип синтеза естественных, технических и социальных знаний // *Вестник РАЕН*: т. 10, №3. – М.: РАЕН, 2010. – С. 3 – 9.
2. Большаков Б.Е. Теория и методология проектирования устойчивого развития социо-природных систем: уч.-мет. пособие. Электронное издание (0220712064), <http://it-nur.uni-dubna.ru> (гос. регистрация №11265 от 11.10.2006 г.), 2008 г., 143 с.
3. Большаков Б.Е., Рябкова С.А. Приложение к учебно-методическому комплексу «Теория и методология проектирования устойчивого развития социо-природных систем», 2009. – 210 с.
4. Урсул, А. Д. Устойчивое развитие: концептуальная модель // *Национальные интересы*. – 2005. – № 1.
5. Капица Л.М. Индикаторы мирового развития. – М.: Феникс, 2001.
6. Герасимов Б.М., Дивизинюк М.М., Субач И.Ю. Системы поддержки принятия решений: проектирование, применение, оценка эффективности. Монография, Севастополь, 2004. – 318 с.
7. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации. – Винница: Универсум-Винница, 1999. – 320 с.
8. Ротштейн А.П. Медицинская диагностика на нечеткой логике. – Винница: Континент-Прим. – 1996. – 132 с.

9. Патракеєв І.М. Онтологічне дослідження міського середовища // Збірник наукових праць "Управління розвитком складних систем". – К.: КНУБА, 2015. – Частина 1, – №23. – С. 159 – 168.
10. Янишин А.Л. Учение В.И.Вернадского о биосфере и современность / Янишин А.Л.– Сборник "На пути к устойчивому развитию". – М., 2007. – С. 39 – 61.
11. Urban development and urban metabolism: A spatial approach. Режим доступу: http://sume.at/project_downloads
12. Butera F. Planning eco-cities, the case of Huai Rou New Town /Butera F., Caputo P. // Proceedings of the 3rd International Solar Cities Congress, Adelaide – 2008.
13. Paola C., Giulia P., Marco B. Urban metabolism analysis as a support to drive metropolitan development world. Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning. Procedia Engineering 161 (2016) 1588 – 1595.
14. 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.
15. Kennedy, C. The Changing Metabolism of Cities / Kennedy C., Cuddihy J., Engel-Yan J // Journal of Industrial Ecology, v. 11 n. 2 – 2007.
16. Caputo P. Paradigm shift in urban energy systems through distributed generation. /Caputo P., Costa G., Manfredi M. // Methods and models, London: Paperback – 2010.
17. Newman P. Cities and automobile dependence / Newman P., Kenworthy J. // An International Sourcebook, Farnham: Gower – 1989.
18. Acebillo J. LNL – La Nuova Lugano, Visioni, sfide e territori della città / Acebillo J., Maggi R. // Lugano: CUP-IRE – 2008.

Стаття надійшла до редакції 16.09.2019

Патракеєв Игорь Михайлович

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

Денисюк Богдан Иванович

Старший преподаватель кафедры геоинформатики и фотограмметрии, orcid.org/0000-0003-1692-8551
Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

**ОЦЕНКА МЕТАБОЛИЧЕСКИХ ПОТОКОВ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ
НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ**

Аннотация. Качество городской среды определяется качеством его составляющих: антропогенной, природной и социальной сред. Основной проблемой оценки состояния городской среды является разрозненность методических подходов и адекватных инструментов для оценки ее качественного состояния. Предложена интеллектуальная информационная система оценки потенциальных, реальных и потерянных возможностей городской среды с применением экспертных знаний (при использовании нечисловой, неточной и неполной информации) для обеспечения управления устойчивым развитием города. Разработанная методика оценки потенциальных, реальных и упущенных возможностей городской среды основана на использовании нечетких логических уравнений и позволяет оценивать эффективность метаболитических трансформаций каждой из подсистем городской среды.

Ключевые слова: база знаний; продукционные правила; нечеткая логика; экспертная система; метаболизм городской среды

Patrakeyev Igor

PhD, associate Professor, Department of Geoinformatics and photogrammetry, orcid.org/0000-0002-0448-8790
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

Denysyuk Bohdan

Senior Lecturer, Department of Geoinformatics and photogrammetry, orcid.org/0000-0003-1692-8551
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

**ESTIMATION OF METABOLIC FLOWS OF URBAN ENVIRONMENT
ON THE BASIS OF FUZZY EXPERTS KNOWLEDGE**

Abstract. Quality and comfort of the urban environment act as one of the most important factors in ensuring the competitiveness of municipalities, regions and the country as a whole. The quality of the urban environment is determined by the quality of its components: anthropogenic, natural and social environment. The main problem of assessing the state of the urban environment is the disparity of methodological approaches and adequate tools for assessing its quality status. This objectively complicates the ability of municipal authorities to use assessment as one of the elements in the system of city-planning decisions

from the point of view of the population. It is proposed to develop an intellectual information system to assess the potential, actual and lost opportunities of the urban environment with the use of fuzzy expert knowledge in the use of non-numeric, inaccurate and incomplete information to ensure sustainable city management. The proposed method of estimating potential, real and lost opportunities of the urban environment is based on the use of fuzzy logic equations and allows evaluating the effectiveness of metabolic transformations of each subsystem of the urban environment. Estimation of metabolic flows of the urban environment on the basis of fuzzy expert knowledge allows realizing in practice the concept of sustainable development of the urban environment, which today is the development of the doctrine V.I. Vernadsky about the noosphere.

Key words: knowledge base; production rules, fuzzy logic, expert system; the metabolism of the urban environment

References

1. Bolshakov, B.E., & Kuznetsov, O.L., (2010). Sustainable Development: Universal Principle for the Synthesis of Natural, Technical and Social Knowledge. *Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences*, 10, 3, 3 – 9.
2. Bolshakov, B.E., (2008). *Theory and Methodology of Designing Sustainable Development of Socio-natural Systems*. Teaching aid. Electronic edition (0220712064), <http://lt-nur.uni-dubna.ru> (state registration No.11265 dated October 11, 2006), 143.
3. Bolshakov, B.E., & Ryabkova, S.A., (2009). Appendix to the educational-methodical complex "Theory and methodology of designing sustainable development of socio-natural systems", 210.
4. Ursul, A.D., (2005). *Sustainable Development: Conceptual Model*. National Interests, 1.
5. Kapitsa, L.M., (2001). *World Development Indicators*. Moscow. Phoenix.
6. Gerasimov, B.M., Divizinyuk, M.M., & Subach, I.Yu., (2004). *Decision Making Systems: Design, Application, Performance Evaluation*. Monograph. Sevastopol, 318.
7. Rotshtein, A.P., (1999). *Intelligent Identification Technology*. Vinnitsa: Universum-Vinnitsa, 320.
8. Rotshtein, A.P., (1996). *Medical Diagnostics on Fuzzy Logic*. Vinnitsa: Continent-Prim, 132.
9. Patrakeiev, I., (2015). *Ontological research of the urban environment*. *Management of Development of Complex Systems*, 23(1), 159–168 [in Ukrainian]. [dx.doi.org\10.13140/RG.2.1.1300.6809](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1300.6809).
10. Yanshin, A.L., (2007). *The doctrine of V. I. Vernadsky about biosphere and modernity*. Moscow, Russia: 39–61
11. *Urban development and urban metabolism: A spatial approach*. (2013). Retrieved from http://sume.at/project_downloads
12. Butera, F., (2008). *UN Habitat – State of the World's Cities 2008-2009. Harmonious cities*, Earthscan. 2008.
13. 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.
14. *European Green City Index*, (2009). *Assessing the environmental impact of Europe's major cities*. Research project conducted by the Economist Intelligence Unit – Munich: Siemens AG – 2009.
15. Kennedy, C., Cuddihy, J., & Engel-Yan, J., (2007). *The Changing Metabolism of Cities*. *Journal of Industrial Ecology*, 11, 2.
16. Caputo, P., Costa, G., & Manfren, M., (2010). *Paradigm shift in urban energy systems through distributed generation. Methods and models*. London: Paperback.
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 territori della città*. Lugano: CUP-IRE2008.

Посилання на публікацію

- APA Patrakeiev, I., & Denysyuk, B., (2019). Estimation of metabolic flows of urban environment on the basis of fuzzy experts knowledge. *Management of Development of Complex Systems*, 39, 187 – 198; [dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.11340734](https://doi.org/10.6084/m9.figshare.11340734).
- ДСТУ Патракеєв І.М. Оцінювання метаболічних потоків міського середовища на основі нечітких експертних знань [Текст] / І.М. Патракеєв, Б.І. Денисюк // *Управління розвитком складних систем*. – 2019. – №39. – С. 187 – 198; [dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.11340734](https://doi.org/10.6084/m9.figshare.11340734).