

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

**«ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ СТАЛИМ
РОЗВИТКОМ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА»**

на здобуття освітнього ступеня магістр
за спеціальності 124 Системний аналіз

(код, найменування спеціальності)

освітньо-професійної програми Інтелектуальні системи управління

(назва)

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело*

(підпис)

Ігор КУЖЕЛЬ

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Виконав:
здобувач вищої освіти
група САДМ-61

Ігор КУЖЕЛЬ

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник
*к.т.н.
доцент*

Ігор ПАТРАКЕСЬ

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Київ 2025

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій

Кафедра Інформаційних систем та технологій

Ступінь вищої освіти магістр

Спеціальність 124 Системний аналіз

Освітньо-професійна програма Інтелектуальні системи управління

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедру ІСТ

Каміла СТОРЧАК

“ ____ ” _____ 2025 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Кужелю Ігорю Леонідовичу

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: : Інтелектуальні системи управління сталим розвитком міського середовища.

керівник кваліфікаційної роботи: Ігор Патракеєв к.т.н., доцент

(ім'я, ПРИЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від “30” жовтня 2025 р. № 467

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «26» грудня 2025 р.

3. Вихідні дані кваліфікаційної роботи: «Інтелектуальні системи управління сталим розвитком міського середовища.»

1. Теоретичні засади сталого розвитку міського середовища.

2. Геоінформаційний моніторинг.

3. Методика оцінювання ефективності міського середовища на

основі системного підходу та моделі «чорної скриньки».

4. Алгоритм оцінювання ефективності міського середовища.

5. Реалізувати інтелектуальну технологію оцінювання сталого розвитку міського середовища в програмному середовищі MatLab.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Проаналізувати теоретичні засади сталого розвитку міського середовища.

2. Обґрунтувати роль геоінформаційного моніторингу, як інформаційної

- основи управління сталим розвитком міських територій.
3. Сформувати систему експертно-значущих індикаторів, які характеризують енергетичні, матеріальні та інформаційні потоки основних підсистем міського середовища.
 4. Розробити методiku оцінювання ефективності міського середовища, на основі системного підходу та моделі «чорної скриньки».
 5. Запропонувати структуру просторової об'єктно-реляційної бази даних.
 6. Розробити алгоритм оцінювання ефективності міського середовища, на основі нечіткої логіки та алгоритму логічного висновку Сутено.
 7. Реалізувати інтелектуальну технологію оцінювання сталого розвитку міського середовища в програмному середовищі MatLab.
 8. Провести апробацію запропонованої технології на прикладі міст Одеса та Кривий Ріг.
9. Перелік ілюстраційного матеріалу
10. Дата видачі завдання « ___ » _____ 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз індустрії та визначення стратегії		
2.	Розробка моделей інтеграції		
3.	Розробка моделі управління ризиками		
4.	Розробка методів впровадження		
5.	Практична апробація		
6.	Розробка демонстраційних матеріалів, доповідь.		
7.	Формулювання висновків та оформлення		

Здобувач вищої освіти

Керівник кваліфікаційної роботи

_____ (підпис)

_____ (підпис)

Ігор КУЖЕЛЬ

_____ (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Ігор ПАТРАКЕСВ

_____ (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня магістр: 74 стор., 21 рис., 6 табл., 50 джерела.

Мета роботи – дослідження концепцій перспективних напрямків управління міськими системами, такими як - метаболізм та геомоніторинг міського середовища.

Короткий зміст роботи.

У першому розділі магістерської роботи виконано аналіз такого визначення, як «міське середовище», та його роль у структурі муніципального утворення міста. Детально розібране поняття геоінформаційного моніторингу міського середовища, яке є інформаційною основою для дослідження та оцінювання метаболізму міського середовища.

У другому розділі окреслено чітке визначення – «метаболізму міського середовища», його сутність, узагальнену модель та взаємозв'язки потоків енергії і метаболізму міського середовища.

Третій розділ даної роботи присвячений методиці побудови - «індексу оцінки ефективності метаболізму міського середовища», використовуючи схему індикатора оцінки метаболізму на основі нечіткого логічного висновку та логічний висновок на основі алгоритму Такагі – Сугено – Канга (ТСК).

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

МІСЬКЕ СЕРЕДОВИЩЕ, МЕТАБОЛІЗМ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА, ГЕОІНФОРМАЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ, ІНДЕКС ОЦІНКИ, АЛГОРИТМ (ТСК), ТЕРМОДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ, ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ПОТОКІВ ЕНЕРГІЇ,

ABSTRACT

Text part of the qualification work for the degree of Master: 74 pages, 21 figures, 6 tables, 50 sources.

The purpose of the work is to study the concepts of promising areas of urban systems management, such as metabolism and geomonitoring of the urban environment.

Summary of the work.

In the first section of the master's work, an analysis of such a definition as "urban environment" and its role in the structure of the municipal formation of the city is performed. The concept of geoinformation monitoring of the urban environment, which is an information basis for the study and assessment of the metabolism of the urban environment, is analyzed in detail.

The second section outlines a clear definition of "metabolism of the urban environment", its essence, generalized model and relationships between energy flows and metabolism of the urban environment.

The third section of this work is devoted to the methodology for constructing - "the urban environment metabolism efficiency assessment index", using the metabolic assessment indicator scheme based on fuzzy logical inference and logical inference based on the Takagi-Sugeno-Kanga (TSK) algorithm.

KEYWORDS:

URBAN ENVIRONMENT, URBAN ENVIRONMENT METABOLISM, GEOINFORMATION MONITORING, ASSESSMENT INDEX, ALGORITHM (TSK), THERMODYNAMICAL MODEL, INTERCONNECTION OF ENERGY FLOWS,

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	13
ВСТУП.....	14
ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ СТАЛОГО РОЗВИТКУ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА.....	17
1.1. Міське середовище як складна кіберфізична система.....	17
1.2. Концепція сталого розвитку міського середовища.....	21
1.3. Геоінформаційний моніторинг МС як інформаційна основа управління.....	25
1.4. Система енергетичних, матеріальних та інформаційних потоків МС.....	31
1.5. Інтелектуальні підходи до управління сталим розвитком міста.....	33
РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МС НА ОСНОВІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОТОКІВ.....	40
2.1. Розробка інформаційної моделі МС на основі застосування "чорної скрині".....	41
2.2. Характеристика показників енергетичних та інформаційних потоків МС (на прикладі підсистеми міське господарство).....	45
2.3. Побудова структури просторової бази даних.....	51
2.4. Формування матриці знань та алгоритм оцінювання оцінювання ефективності МС.....	53
РЕЗУЛЬТАТИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА.....	63
3.1. Основні принципи побудови системи оцінювання ефективності МС на основі енергетичних потоків.....	63
3.2. Інтелектуальна технологія оцінювання сталого розвитку міського середовища.....	68
3.3. Концептуальна модель прийняття рішень в управлінні сталим розвитком МС в умовах невизначенності та неоднозначності.....	74
3.4. Результати інтелектуального оцінювання сталого розвитку міського середовища (на прикладі міст Одеса та Кривий Ріг).....	79
ВИСНОВКИ.....	83
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	85
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ.....	89

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

МС - міське середовище

ЯМС - якість міського середовища

ГІС - геоінформаційні системи

ГМ –геомоніторинг

СКБД – системи керування базами даних

БГД – база геопросторових даних

ТСК - алгоритм Такагі—Сугено—Канга (ТСК)

СФВ - систему фізичних величин

КСФВ - кінематична система фізичних величин

ВСТУП

Сучасний етап розвитку міст характеризується зростанням складності соціальних, економічних, екологічних та інфраструктурних процесів, що відбуваються в межах міського середовища. Інтенсивна урбанізація, збільшення чисельності населення, підвищення навантаження на природні ресурси, транспортні та інженерні системи зумовлюють необхідність переходу до нових підходів управління розвитком міських територій. У цих умовах особливої актуальності набуває концепція сталого розвитку міського середовища, яка передбачає узгоджений розвиток економічної, соціальної та екологічної складових з урахуванням довгострокових наслідків управлінських рішень.

Міське середовище є складною відкритою соціо-еколого-економічною системою, що функціонує в умовах постійної динаміки та невизначеності. Процеси, які відбуваються в місті, характеризуються великою кількістю взаємопов'язаних параметрів, нелінійними залежностями, просторово-часовою неоднорідністю та впливом випадкових факторів. Традиційні методи управління, що ґрунтуються на жорстко формалізованих моделях і експертних оцінках, не завжди забезпечують достатню точність та адаптивність у прийнятті управлінських рішень.

Ефективне управління сталим розвитком міського середовища потребує використання сучасних інформаційних технологій, зокрема геоінформаційного моніторингу, який забезпечує отримання, зберігання та аналіз просторово-часових даних про стан міської території. Дані геоінформаційного моніторингу формують інформаційну основу для аналізу енергетичних, матеріальних та інформаційних потоків, що визначають функціонування міського середовища та рівень його сталості.

В умовах зростання обсягів та різноманітності даних особливого значення набувають інтелектуальні системи управління, здатні здійснювати комплексний аналіз інформації, виявляти приховані закономірності та формувати обґрунтовані управлінські рішення. Одним із найбільш перспективних інструментів інтелектуального аналізу є штучні нейронні мережі, які

дозволяють моделювати складні нелінійні процеси, адаптуватися до змін зовнішнього середовища та навчатися на основі реальних даних.

Застосування нейронних мереж у задачах управління сталим розвитком міського середовища дає можливість перейти від експертно-орієнтованих моделей до дано-орієнтованих підходів, що базуються на результатах геоінформаційного моніторингу. Нейронні алгоритми забезпечують інтеграцію різнорідних показників, підвищують точність оцінювання стану міського середовища та створюють умови для прогнозування наслідків управлінських рішень.

В зв'язку з цим розробка інтелектуальної системи управління сталим розвитком міського середовища на основі нейронних мереж є актуальним науково-прикладним завданням, що має важливе значення для підвищення ефективності управління міськими територіями та забезпечення їх довгострокового розвитку.

Метою магістерської роботи є розробка та дослідження інтелектуальної системи управління сталим розвитком міського середовища на основі нейронних мереж з використанням даних геоінформаційного моніторингу.

Об'єктом дослідження є процеси функціонування та розвитку міського середовища.

Предметом дослідження є методи, моделі та алгоритми інтелектуального управління сталим розвитком міського середовища з використанням нейронних мереж.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати теоретичні засади сталого розвитку міського середовища;
- дослідити роль геоінформаційного моніторингу в управлінні міськими територіями;
- сформулювати систему показників оцінювання стану міського середовища;
- розробити архітектуру інтелектуальної системи управління сталим розвитком міста;

- побудувати модель оцінювання та прогнозування стану міського середовища;

- обґрунтувати переваги використання нейронних мереж у задачах управління сталим розвитком.

Методами дослідження є методи системного аналізу, геоінформаційного аналізу, математичного моделювання, теорії штучних нейронних мереж, методи аналізу та обробки даних.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для підтримки прийняття управлінських рішень у сфері сталого розвитку міських територій, а також для подальшого впровадження інтелектуальних систем управління в органах місцевого самоврядування та міському плануванні.

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ СТАЛОГО РОЗВИТКУ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА

1.1. Міське середовище як складна кіберфізична система

Сучасне міське середовище є результатом тривалого розвитку урбанізованих територій та характеризується високим рівнем складності, багатокomпонентністю і динамічністю процесів, що в ньому відбуваються. Умови функціонування міста визначаються взаємодією природних, техногенних, соціальних, економічних та інформаційних складових, що формують єдину цілісну систему. У зв'язку з активним впровадженням цифрових технологій, сенсорних мереж, автоматизованих систем управління та засобів обробки даних міське середовище доцільно розглядати як **складну кіберфізичну систему**.

Кіберфізична система поєднує фізичні об'єкти реального світу з кібернетичними компонентами — інформаційними, обчислювальними та керуючими підсистемами. У контексті міського середовища фізична складова включає будівлі, транспортну інфраструктуру, інженерні мережі, природні об'єкти, а також потоки енергії та ресурсів. Кібернетична складова представлена геоінформаційними системами, сенсорними мережами, системами збору та обробки даних, інтелектуальними алгоритмами аналізу та прийняття управлінських рішень.

Взаємодія між фізичною та кібернетичною складовими міського середовища реалізується через безперервний обмін інформацією. Дані, отримані в результаті моніторингу стану міської інфраструктури, довкілля, транспортних потоків і соціально-економічних процесів, надходять до інформаційних систем, де здійснюється їх аналіз, моделювання та прогнозування. Результати цього аналізу використовуються для формування керуючих впливів, які, у свою чергу, змінюють стан фізичних компонентів міського середовища.

Узагальнена ілюстрація МС як кіберфізичної системи показана на рис.1.1,

в межах якої фізичні об'єкти міської інфраструктури інтегровані з цифровими сервісами та системами централізованого моніторингу. Фізичний рівень включає будівлі, транспортну мережу, інженерну інфраструктуру, об'єкти житлової та соціальної забудови. На цьому рівні відбуваються реальні процеси споживання енергії, руху транспорту, забруднення довкілля та забезпечення міських сервісів.



Рис.1.1. Приклад міського середовища як кіберфізичної системи з централізованим моніторингом

Кібернетична складова системи реалізується через сенсорні мережі, системи збору даних та бездротові канали зв'язку, що забезпечують постійний моніторинг енергоспоживання, транспортних потоків, екологічних показників, паркування, відеоспостереження та роботи міських служб. Отримані дані передаються до централізованих інформаційно-аналітичних центрів, де здійснюється їх обробка та аналіз.

Таким чином, рисунок ілюструє ключову ознаку кіберфізичної системи — **безперервний зворотний зв'язок між фізичними процесами міського середовища та цифровими механізмами управління**, що створює основу для інтелектуального управління сталим розвитком міста.

Класична структурна модель кіберфізичної системи, яка адаптована до задач управління міським середовищем дпо рис1.2. Фізична підсистема представлена об'єктами, процесами та системами реального світу, які характеризуються динамічними параметрами стану. Взаємодія фізичної та кібернетичної підсистем здійснюється через інтерфейси аналого-цифрового (АЦП) та цифро-аналогового перетворення (ЦАП).

Кібернетична підсистема включає обчислювальні ресурси, програмне забезпечення та алгоритми обробки даних, що реалізують функції аналізу, прогнозування та прийняття управлінських рішень. Інформаційні потоки від фізичної системи надходять до кібернетичної частини у цифровому вигляді, де обробляються з використанням методів інтелектуального аналізу. Результати обчислень формують керуючі впливи, які через відповідні інтерфейси повертаються до фізичного середовища.

Дана схема наочно демонструє **замкнений контур управління**, характерний для кіберфізичних систем, та підкреслює принципову роль інформаційно-обчислювального рівня у забезпеченні адаптивності та ефективності управління міським середовищем.

На рисунку 1.3 представлено багаторівневу архітектуру кіберфізичної системи, що використовується для інтеграції різнорідних міських сервісів та технологій. Нижній рівень утворює рівень об'єктів і сенсорів, який включає фізичні пристрої, датчики та виконавчі механізми, розміщені на транспортних засобах, будівлях, інженерних мережах і об'єктах міської інфраструктури.

Над ним розташований комунікаційний рівень, що забезпечує передавання даних за допомогою бездротових сенсорних мереж та стандартів зв'язку, таких як ZigBee, Bluetooth та Wi-Fi. Наступний рівень формують системи доступу та керування, які відповідають за маршрутизацію даних, контроль доступу та взаємодію з телекомунікаційними мережами.

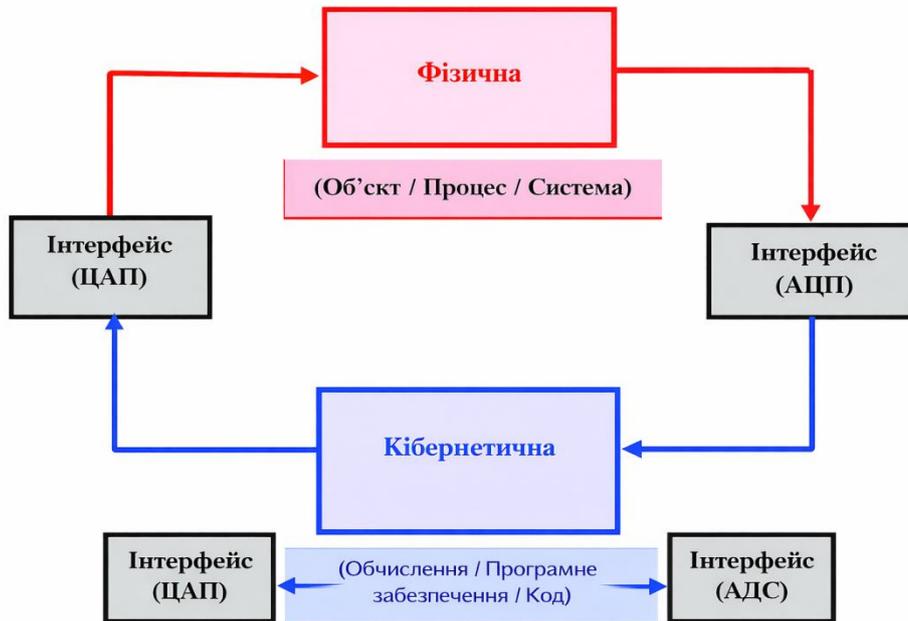


Рис.1.2. Узагальнена структурна схема кіберфізичної системи

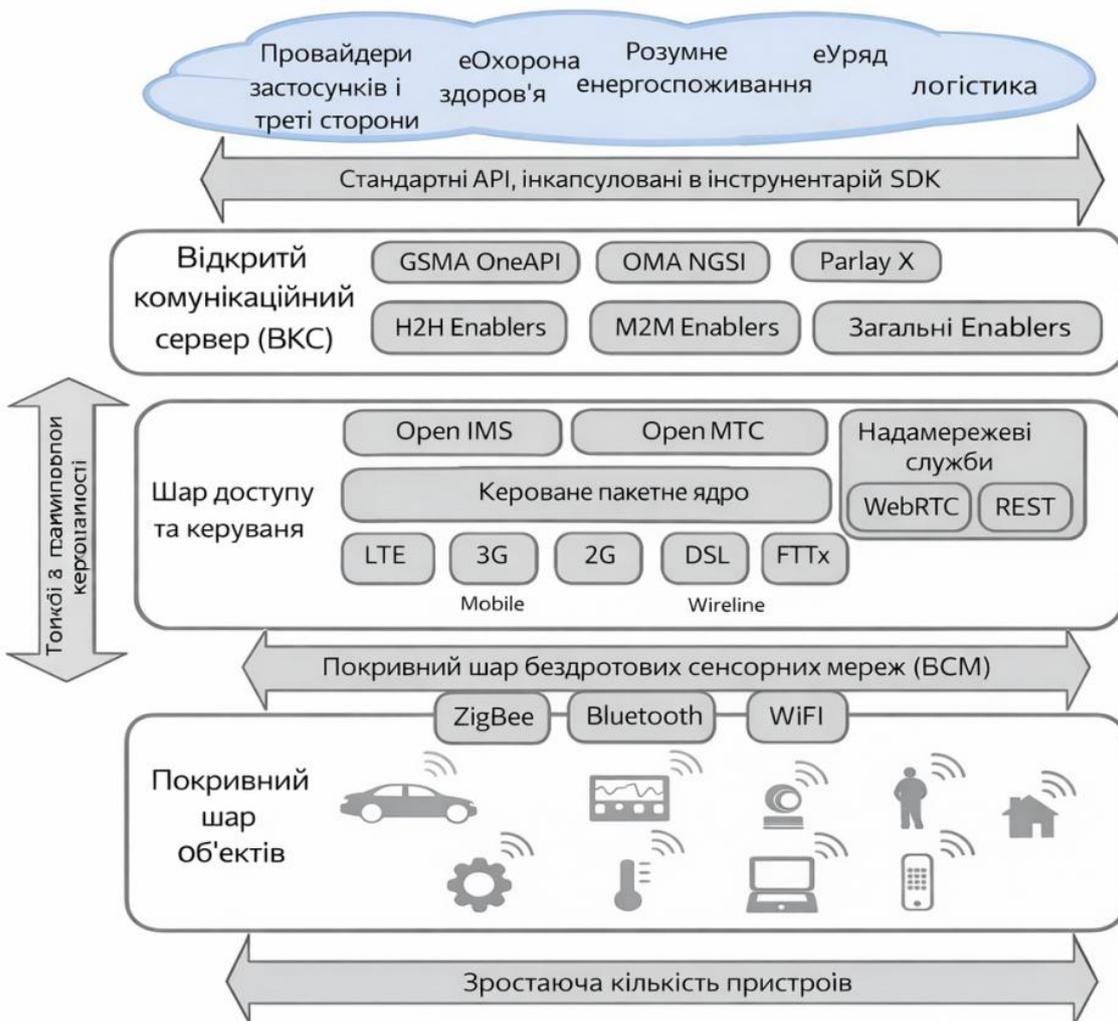


Рис.1.3 Багаторівнева архітектура кіберфізичної системи МС

Верхні рівні архітектури включають відкриті комунікаційні сервери, стандартизовані програмні інтерфейси (API) та прикладні сервіси, що реалізують функції електронного урядування, розумного енергоспоживання, охорони здоров'я, логістики та інших напрямів міського розвитку. Така архітектура забезпечує масштабованість, інтероперабельність та інтеграцію різних підсистем у єдине інформаційне середовище міста.

Наведені структурні схеми комплексно відображають МС як **складну кіберфізичну систему**, у якій фізичні об'єкти, сенсорні мережі, інформаційно-обчислювальні ресурси та прикладні сервіси утворюють багаторівневу ієрархічну структуру. Такий підхід дозволяє формалізувати процеси взаємодії між фізичним та цифровим простором міста і обґрунтовує доцільність застосування інтелектуальних методів аналізу та управління, зокрема нейронних мереж, у задачах сталого розвитку міського середовища.

1.2. Концепція сталого розвитку міського середовища

Концепція сталого розвитку міського середовища сформувалася як відповідь на зростання екологічних, соціальних та економічних викликів, що супроводжують процеси урбанізації. Сучасні міста концентрують значну частину населення, виробництва та інфраструктури, що зумовлює підвищене навантаження на природні ресурси, довкілля та соціальні системи. У цих умовах сталий розвиток міського середовища розглядається як стратегічний напрям, спрямований на забезпечення збалансованого розвитку міських територій у довгостроковій перспективі.

Відповідно до загальноприйнятого підходу, сталий розвиток базується на **гармонійному поєднанні трьох ключових складових**: економічної, соціальної та екологічної. Економічна складова передбачає ефективне використання ресурсів, розвиток міської економіки та інфраструктури. Соціальна складова орієнтована на підвищення якості життя населення, доступність послуг, безпеку та соціальну справедливість. Екологічна складова

спрямована на зменшення негативного впливу на довкілля, раціональне використання природних ресурсів та збереження екосистем.

В контексті МС сталого розвитку передбачає інтеграцію управління транспортними системами, енергетикою, житлово-комунальним господарством, землекористуванням та екологічним моніторингом у єдину узгоджену систему. При цьому місто розглядається не як сукупність окремих об'єктів, а як цілісна система з численними взаємозв'язками між її підсистемами. Порушення балансу в одній із підсистем неминуче впливає на загальний стан МС.

На рис.1.4 представлено концептуальну діаграму сталого розвитку міського середовища, яка відображає взаємозв'язок трьох ключових складових: **соціальної, економічної та екологічної**. Діаграма побудована у вигляді перетинних множин, у центрі яких знаходиться інтегральне поняття **сталого розвитку**, що формується лише за умови збалансованого розвитку всіх трьох компонентів.

Соціальна складова охоплює аспекти, пов'язані з якістю життя населення, рівнем освіти, зайнятістю та забезпеченням рівних можливостей. Вона відображає орієнтацію розвитку міського середовища на потреби людини, соціальну справедливість та підвищення добробуту громади.

Економічна складова характеризує процеси економічного зростання міста, отримання прибутку, оптимізації витрат та розвитку науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт. Ефективна економічна діяльність створює фінансові передумови для модернізації міської інфраструктури та впровадження інноваційних технологій.

Екологічна складова відображає необхідність раціонального використання природних ресурсів, запобігання забрудненню довкілля та збереження біорізноманіття. Вона спрямована на мінімізацію негативного впливу міської діяльності на природне середовище та забезпечення екологічної безпеки.

Зони перетину між складовими ілюструють комплексні аспекти сталого розвитку. Перетин соціальної та економічної складових відображає соціально-економічні аспекти, такі як етика бізнесу, справедлива торгівля та соціальні

гарантії для працівників. Перетин соціальної та екологічної складових характеризує соціально-екологічні аспекти, що включають політику збереження довкілля, екологічну справедливість та глобальне управління. Перетин економічної та екологічної складових відповідає еколого-економічним аспектам, серед яких енергоефективність, використання відновлюваних джерел енергії, стимули та розвиток «зелених» технологій.

Центральна частина діаграми, де поєднуються всі три складові, символізує сталий розвиток міського середовища як результат узгодженого управління соціальними, економічними та екологічними процесами. Дана діаграма наочно демонструє, що ігнорування будь-якої з цих складових призводить до порушення балансу розвитку міста та зниження його стійкості у довгостроковій перспективі.

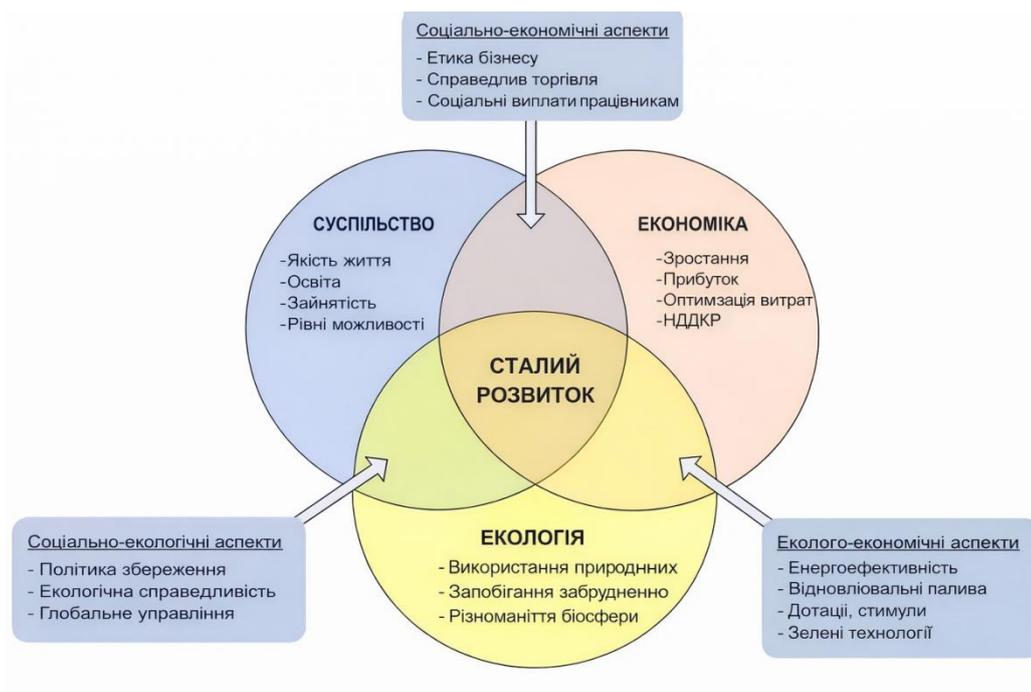


Рис. 1.4 Концептуальна діаграма сталого розвитку МС

Важливою особливістю сталого розвитку МС є **орієнтація на довгострокові наслідки управлінських рішень**. На відміну від традиційних підходів, що часто зосереджуються на короткостроковій ефективності, концепція сталого розвитку вимагає врахування майбутніх змін демографічної структури, кліматичних умов, технологічного розвитку та соціальних потреб

населення. Це зумовлює необхідність використання прогнозних моделей і сценарного аналізу.

З урахуванням складності міських процесів реалізація концепції сталого розвитку неможлива без застосування сучасних інформаційних технологій. Геоінформаційні системи та засоби моніторингу забезпечують збір і просторову прив'язку даних про стан міського середовища, тоді як інтелектуальні методи аналізу дозволяють інтегрувати різномірні показники та формувати узагальнені оцінки.

У межах сучасної концепції Smart City сталий розвиток міського середовища розглядається як результат **інтелектуального управління**, що ґрунтується на даних реального часу. Сенсорні мережі, системи моніторингу та аналітичні платформи формують інформаційну основу для оцінювання стану міського середовища. На основі отриманих даних здійснюється аналіз ефективності функціонування міських підсистем, виявляються проблемні зони та визначаються пріоритетні напрями розвитку.

Особливу роль у реалізації концепції сталого розвитку відіграють **інтегральні показники та індикатори**, які дозволяють кількісно оцінювати рівень сталості МС. Такі індикатори формуються шляхом агрегування економічних, соціальних та екологічних параметрів і використовуються для порівняльного аналізу, моніторингу динаміки розвитку та підтримки управлінських рішень.

На рисунку 1.X представлено концепцію Smart City та основні переваги впровадження сучасних цифрових технологій у процес управління міським середовищем. Візуалізація відображає інтеграцію ключових підсистем міста



Рис.1.5 Концепція Smart City як інструмент сталого розвитку МС

у єдину інтелектуальну структуру, що функціонує на основі збору, аналізу та використання даних.

Ліва частина рисунка ілюструє складові концепції Smart City, серед яких розумна енергетика, розумна мобільність, інтелектуальні будівлі, електронне урядування, освіта, охорона здоров'я та активна участь громадян. Кожна з цих складових спрямована на підвищення ефективності використання ресурсів, зменшення негативного впливу на довкілля та покращення якості життя населення. Зокрема, розумна енергетика орієнтована на оптимізацію споживання енергії та використання відновлюваних джерел, а розумна мобільність сприяє зменшенню транспортного навантаження та викидів забруднюючих речовин.

Права частина рисунка демонструє переваги впровадження Smart City-технологій для основних груп зацікавлених сторін. Для органів влади використання цифрових платформ і аналітичних інструментів забезпечує можливість виявлення ключових проблем міського розвитку, підвищує ефективність планування та обґрунтованість управлінських рішень. Для

приватного сектору створюються умови для розвитку інноваційних продуктів і сервісів, формування нових бізнес-моделей та партнерства з органами місцевого самоврядування. Мешканці міста виступають кінцевими бенефіціарами сталого розвитку, отримуючи доступ до якісних і економічно ефективних послуг, зростання рівня зайнятості та можливостей громадської участі.

Узагальнюючи, представлена концепція Smart City розглядається як практичний механізм реалізації сталого розвитку міського середовища, що забезпечує баланс між економічними, соціальними та екологічними аспектами розвитку міста. Використання інтелектуальних технологій у межах даної концепції створює передумови для підвищення адаптивності міських систем, зниження ресурсних витрат та формування комфортного й безпечного середовища проживання.

У зв'язку з цим зростає значення інтелектуальних систем управління, зокрема моделей на основі нейронних мереж, які здатні працювати з великими масивами даних, виявляти нелінійні залежності та адаптуватися до змін умов функціонування МС. Застосування таких систем створює передумови для переходу від реактивного управління до проактивного, орієнтованого на попередження негативних тенденцій і забезпечення сталого розвитку міських територій.

1.3. Геоінформаційний моніторинг МС як інформаційна основа управління

Ефективне управління сталим розвитком міського середовища неможливе без наявності достовірної, актуальної та просторово-орієнтованої інформації про стан міських територій. У зв'язку з цим ключову роль відіграє геоінформаційний моніторинг (ГМ), який забезпечує систематичний збір, зберігання, обробку та аналіз даних про соціальні, економічні, екологічні та інфраструктурні процеси, що відбуваються в межах міста.

Геоінформаційний моніторинг ґрунтується на використанні геоінформаційних систем (ГІС), які дозволяють інтегрувати різноманітні дані з

просторовою прив'язкою та відображати їх у вигляді карт, схем і аналітичних моделей. Такий підхід створює єдине інформаційне середовище для аналізу стану міського середовища та підтримки управлінських рішень.

На рисунку 1.6 представлено структурно-функціональну схему геоінформаційної системи, призначеної для моніторингу стану міського середовища та підтримки прийняття управлінських рішень. Діаграма відображає повний цикл роботи з геопросторовими даними — від їх надходження з різних джерел до формування результатів аналізу та візуалізації для користувачів.

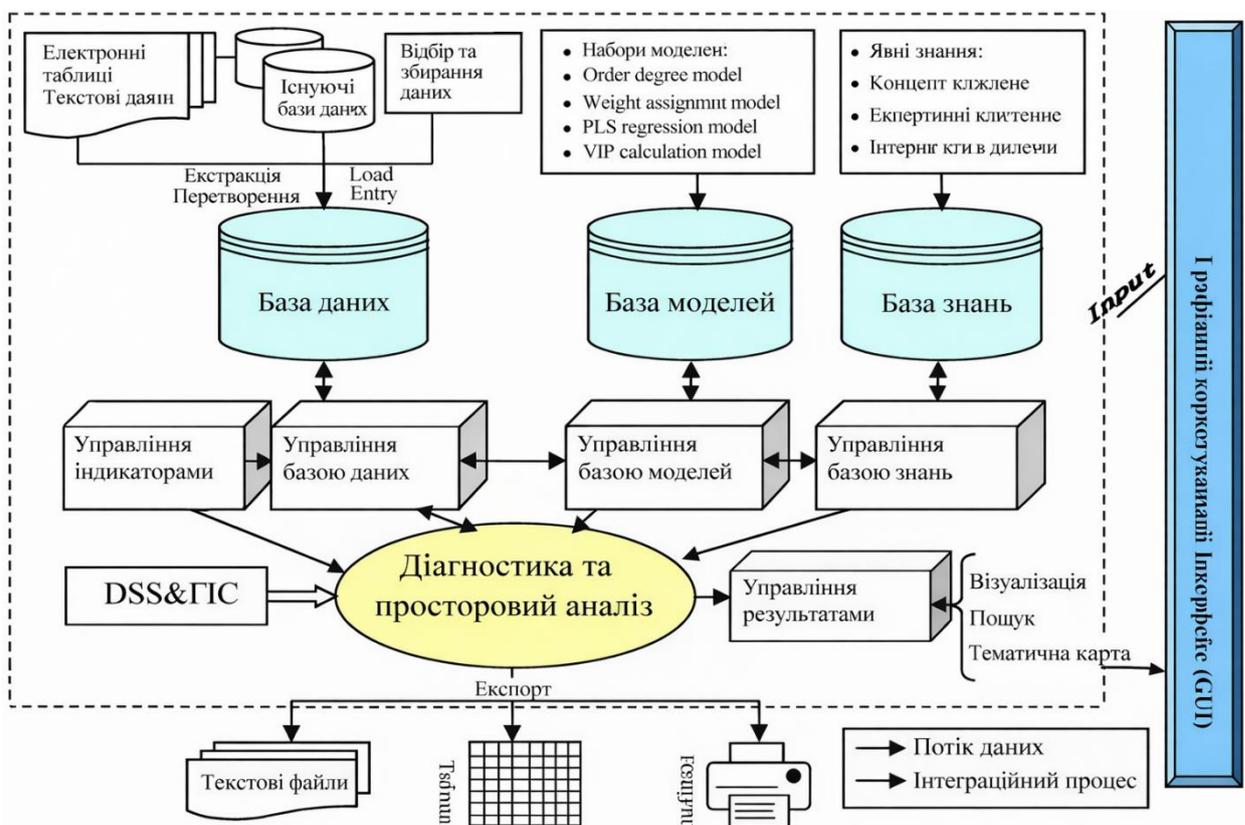


Рис.1.6 – Структурно-функціональна схема геоінформаційної системи моніторингу та підтримки управління МС

У верхній частині схеми показано джерела вхідної інформації, до яких належать електронні таблиці, текстові файли, результати відбору та збирання даних, а також існуючі бази даних. На цьому етапі реалізуються процеси

екстракції, перетворення та завантаження даних, що забезпечують уніфікацію та підготовку інформації до подальшої обробки.

Центральне місце у структурі системи займають три основні інформаційні компоненти: **база даних, база моделей та база знань**. База даних акумулює просторово-часову інформацію про стан міського середовища та його підсистем. База моделей містить аналітичні та математичні моделі, що використовуються для оцінювання та прогнозування параметрів міського розвитку. База знань включає концептуальні, експертні та інтерпретаційні знання, необхідні для підтримки прийняття управлінських рішень.

Функціонування зазначених компонентів забезпечується відповідними підсистемами управління: управління індикаторами, управління базою даних, управління базою моделей та управління базою знань. Їх взаємодія забезпечує узгоджене використання даних, моделей і знань у процесі аналізу міського середовища.

Ключовим аналітичним елементом системи є модуль «**Діагностика та просторовий аналіз**», який інтегрує інформацію з усіх компонентів та реалізує просторово-аналітичні операції, оцінювання стану міських територій і виявлення проблемних зон. Даний модуль тісно пов'язаний із системами підтримки прийняття рішень та геоінформаційними технологіями, що дозволяє формувати обґрунтовані управлінські рекомендації.

Результати аналізу передаються до підсистеми управління результатами, де здійснюється їх візуалізація, пошук та представлення у вигляді тематичних карт, таблиць, текстових файлів або друкованих матеріалів. Доступ користувачів до результатів забезпечується через графічний інтерфейс користувача, який виступає засобом взаємодії між людиною та інформаційною системою.

аким чином, представлена діаграма наочно демонструє роль геоінформаційного моніторингу як **інформаційної основи інтелектуального управління МС**, забезпечуючи інтеграцію даних, моделей і знань у єдину систему підтримки прийняття рішень для забезпечення сталого розвитку міських територій.

На поданій структурній схемі зображено архітектуру гібридної нейронної мережі, призначеної для аналізу та семантичної сегментації геопросторових зображень, які використовуються в системах геоінформаційного моніторингу МС. Схема ілюструє поєднання методів глибокого навчання для вилучення просторових ознак і їх подальшої інтеграції з метою підвищення точності аналізу міських територій.

Вхідними даними для системи є аерофотознімки або супутникові зображення міської території, які надходять до початкового блоку нейронної мережі. На першому етапі виконується виділення низькорівневих і середньорівневих ознак за допомогою згорткової мережі типу **VGG**, яка використовується як екстрактор ознак. Отримані карти ознак передаються паралельно до двох незалежних гілок обробки.

Перша гілка реалізована на основі архітектури **U-Net**, яка забезпечує детальне відновлення просторової структури об'єктів за рахунок симетричної енкодер-декодерної побудови та механізмів пропускових з'єднань. Ця гілка орієнтована на точну локалізацію об'єктів міської інфраструктури, таких як будівлі, дороги та зелені зони.

Друга гілка використовує модуль **DenseASPP**, який дозволяє ефективно враховувати багатомасштабний контекст за рахунок щільно з'єднаних атріозних згорток. Даний модуль забезпечує захоплення просторових залежностей на різних масштабах, що є особливо важливим для аналізу складної структури міського середовища.

Вихідні ознаки з обох гілок надходять до блоку **об'єднання (Fusion)**, де здійснюється інтеграція детальних просторових характеристик і глобального контексту. Для адаптивного зважування каналів

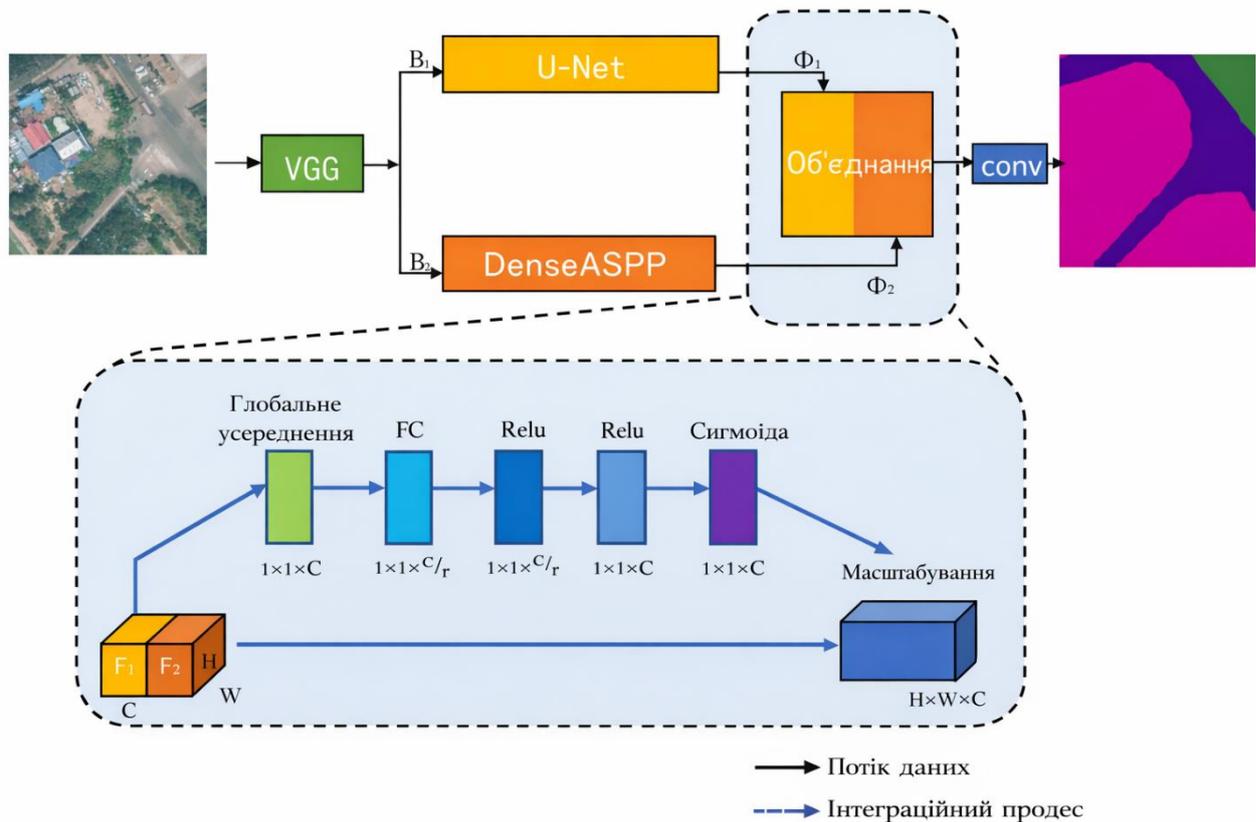


Рис.1.7. Структурна схема гібридної нейронної мережі для семантичної сегментації геопросторових зображень МС

використовується механізм уваги, реалізований у вигляді послідовності операцій глобального усереднення, повнозв'язних шарів, нелінійних функцій активації та сигмоїдної функції. Це дозволяє підсилити інформативні ознаки та зменшити вплив шумових компонентів.

Після етапу об'єднання застосовується згортковий шар, який формує кінцеву карту сегментації, де кожному пікселю вхідного зображення відповідає певний клас об'єкта міського середовища. Отриманий результат може бути використаний для подальшої інтеграції з геоінформаційними системами, побудови тематичних карт і підтримки прийняття управлінських рішень.

Таким чином, представлена схема демонструє приклад використання нейронних мереж у складі інтелектуальних систем геоінформаційного моніторингу, забезпечуючи високоточний аналіз просторових даних і створюючи інформаційну основу для управління сталим розвитком міського середовища.

1.4. Система енергетичних, матеріальних та інформаційних потоків МС

У межах системного підходу енергетичні, матеріальні та інформаційні потоки розглядаються як єдина взаємопов'язана система. Інформаційні потоки виконують роль керуючого та координуючого елемента, забезпечуючи оптимізацію енергетичних і матеріальних процесів.

На поданій діаграмі відображено концептуальну модель міського середовища як відкритої соціо-еколого-технічної системи, що функціонує в умовах багаторівневої взаємодії внутрішніх і зовнішніх факторів. Центральна частина діаграми окреслює межі МС, які відповідають адміністративним кордонам міста та системі міського управління.

В середині міських меж виділено ключові структурні компоненти міського середовища. До них належать фізичне середовище, населення, житлова забудова, підприємства, публічна інфраструктура та технічні мережі. Зазначені елементи перебувають у тісній взаємодії між собою, формуючи цілісну систему життєдіяльності міста. Публічна інфраструктура виступає центральною ланкою, що забезпечує зв'язок між населенням, бізнесом, житловим сектором і технічними мережами.

Діаграма підкреслює, що міське середовище не є ізольованим. На нього постійно впливають зовнішні чинники, зокрема природно-екологічні умови, економічне середовище, геополітичні процеси, інформаційний простір та глобальні медіа. Окремо показано взаємодію міста з іншими містами, сільськими територіями та зовнішніми мережами, що включають транспортні, енергетичні, інформаційні та логістичні зв'язки.

Стрілки на діаграмі відображають **потоки взаємодії та обміну**, які можуть мати як матеріальний, так і інформаційний характер. Ці потоки забезпечують циркуляцію ресурсів, інформації, людей та послуг між внутрішніми компонентами міста і зовнішнім середовищем. Таким чином, міське середовище постає як динамічна система з постійним обміном енергії, матеріалів та інформації.

Важливою особливістю представленої моделі є виділення рівня управління, який координує взаємодію всіх компонентів у межах адміністративних кордонів міста. Це підкреслює роль органів управління та інституційних механізмів у забезпеченні узгодженого розвитку міського середовища.

Загалом, дана діаграма наочно демонструє складність структури МС багатоканальність взаємодій та залежність міських процесів від зовнішніх факторів. Вона обґрунтовує необхідність застосування системного підходу та інтелектуальних методів управління для аналізу, прогнозування і підтримки сталого розвитку міських територій.

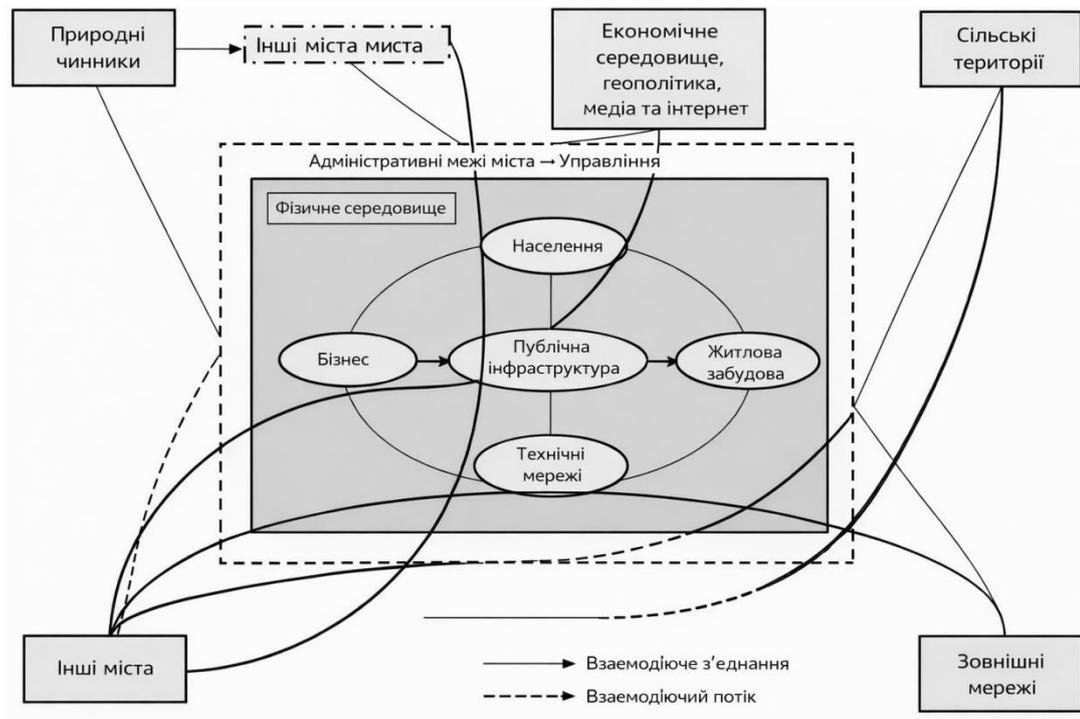


Рис. 1.8. Інтегрована система потоків МС

Такий підхід дозволяє перейти від фрагментарного управління окремими підсистемами до комплексного інтелектуального управління міським середовищем. Інтеграція потоків створює інформаційну основу для оцінювання

ефективності функціонування міста, прогнозування наслідків управлінських рішень і забезпечення сталого розвитку міських територій.

1.5. Інтелектуальні підходи до управління сталим розвитком міста

Сучасне міське середовище характеризується високою складністю та динамічністю процесів, що унеможлиблює ефективне управління виключно традиційними методами планування та контролю. **Енергетичні потоки є базовою складовою функціонування міського середовища**, оскільки саме вони визначають інтенсивність матеріальних процесів, рівень економічної активності та екологічне навантаження. У зв'язку з цим інтелектуальне управління сталим розвитком міста доцільно розглядати як процес **оцінювання, аналізу та оптимізації енергетичних потоків** із використанням сучасних інформаційних технологій.

1.5.1. Енергетичні потоки як об'єкт інтелектуального управління

Енергетичні потоки міського середовища мають складну просторово-часову структуру, що формується під впливом щільності забудови, функціонального призначення територій, поведінки споживачів та зовнішніх чинників. Вони характеризуються нелінійними залежностями, сезонними коливаннями та наявністю значних втрат у процесах передавання і споживання енергії.

Традиційні методи аналізу енергоспоживання, які базуються на агрегованих показниках, не дозволяють повною мірою врахувати просторову неоднорідність міського середовища. Тому виникає необхідність застосування **інтелектуальних підходів**, здатних працювати з великими обсягами детальних даних та виявляти приховані закономірності в енергетичних потоках.

1.5.2. Оцінювання ефективності МС на основі енергетичних показників

Оцінювання ефективності функціонування міського середовища в межах інтелектуального управління ґрунтується на аналізі системи енергетичних показників. До таких показників належать питомі витрати енергії, енергоємність міських територій, рівень втрат у мережах, частка відновлюваних джерел енергії та показники енергетичної ефективності будівель і транспортної інфраструктури.

Енергетичні показники виконують роль **інтегральних індикаторів**, які відображають стан міського середовища загалом. Зростання енергоспоживання або підвищення енергоємності, як правило, свідчить про неефективну організацію міських процесів, тоді як оптимізація енергетичних потоків супроводжується покращенням економічних та екологічних характеристик міста.

Інтелектуальна система управління енергетичними потоками включає кілька взаємопов'язаних рівнів. На нижньому рівні здійснюється збір даних про енергоспоживання за допомогою сенсорів, «розумних» лічильників та геоінформаційних систем. На аналітичному рівні виконуються обробка даних, оцінювання енергетичних показників і виявлення просторових закономірностей. Верхній рівень реалізує функції прогнозування та підтримки прийняття управлінських рішень.

Саме на аналітичному та прогнозному рівнях застосовуються методи штучного інтелекту, які дозволяють формувати адаптивні стратегії управління енергетичними потоками з урахуванням змін умов функціонування міського середовища

1.5.4. Інтелектуальні методи управління енергетичною ефективністю міста

Таблиця 1.1

Інтелектуальні методи управління енергетичними потоками

Метод	Призначення	Роль в управлінні містом
Нейронні мережі	Моделювання нелінійних залежностей	Прогноз енергоспоживання

Метод	Призначення	Роль в управлінні містом
Машинне навчання	Аналіз великих даних	Виявлення неефективних міських зон
Нечітка логіка	Робота з невизначеністю	Оцінка енергетичних ризиків
Гібридні моделі	Поєднання методів	Оптимізація енергетичних потоків

Застосування зазначених методів дозволяє перейти від реактивного управління до проактивного, орієнтованого на попередження перевитрат енергії та забезпечення сталого розвитку міського середовища.

1.5.5. Зв'язок управління енергетичними потоками зі сталим розвитком міста

Оптимізація енергетичних потоків позитивно впливає на всі складові сталого розвитку міста. Зменшення енергоспоживання сприяє скороченню викидів забруднюючих речовин, підвищує економічну ефективність та покращує якість життя населення. Таким чином, **енергетичні потоки виступають ключовим об'єктом інтелектуального управління**, а їх аналіз і регулювання є основою сталого розвитку міського середовища.

Сталий розвиток міста неможливий без раціонального управління енергетичними потоками, оскільки енергія є базовим ресурсом, що забезпечує функціонування всіх міських підсистем. Виробництво, розподіл та споживання енергетичних ресурсів визначають рівень економічної активності, екологічне навантаження та соціальний добробут населення. У цьому контексті управління енергетичними потоками виступає ключовим інструментом реалізації концепції сталого розвитку міського середовища.

Енергетичні потоки міста охоплюють електроенергію, теплову енергію, паливні ресурси та відновлювані джерела енергії. Їх структура та інтенсивність змінюються у просторі та часі, що зумовлено різним функціональним призначенням територій, режимами споживання та соціально-економічними факторами. Неефективне управління енергетичними потоками призводить до зростання витрат, підвищення викидів забруднюючих речовин та погіршення якості міського середовища.

Управління енергетичними потоками безпосередньо впливає на всі три складові сталого розвитку:

- **економічну**, через зменшення енергоємності міського господарства та оптимізацію витрат;
- **екологічну**, шляхом скорочення споживання викопних ресурсів і зниження рівня викидів;
- **соціальну**, завдяки підвищенню енергетичної безпеки та доступності енергоресурсів для населення.

Таким чином, ефективне управління енергетичними потоками є інтегральним фактором сталого розвитку міста.

Енергетичні показники як індикатори сталого розвитку. Для оцінювання ефективності управління енергетичними потоками використовуються кількісні показники, які одночасно виконують роль індикаторів сталого розвитку. До таких показників належать:

- загальне та питоме енергоспоживання;
- енергоємність міських територій;
- частка відновлюваних джерел енергії;
- рівень втрат у мережах;
- викиди CO₂, пов'язані з енергоспоживанням.

Сучасні системи управління енергетичними потоками базуються на використанні геоінформаційного моніторингу, сенсорних мереж і методів штучного інтелекту. Інтелектуальні алгоритми аналізують великі масиви даних про енергоспоживання, прогнозують навантаження та формують оптимальні сценарії розподілу ресурсів.

Застосування таких систем дозволяє:

- адаптувати енергетичні режими до реальних потреб міста;
- зменшити пікові навантаження;
- інтегрувати відновлювані джерела енергії;
- забезпечити баланс між попитом і пропозицією енергії.

На рис.1.9 зображено структуру циклічного процесу управління сталим енергоспоживанням МС, яка відображає послідовність дій, спрямованих на

підвищення енергоефективності та зниження негативного впливу енергетичних процесів на довкілля. Представлена структура ґрунтується на принципах безперервного вдосконалення та адаптивного управління.

Початковим етапом процесу є **вибір найбільш ефективних джерел енергії** з урахуванням різних видів їх використання. На цьому етапі здійснюється аналіз доступних енергоресурсів, їх економічної доцільності, екологічних характеристик і потенціалу інтеграції у міську енергетичну систему.

Наступним кроком є **прийняття зобов'язань** органами управління та іншими зацікавленими сторонами щодо раціонального використання енергії. Це передбачає формування політик та стратегічних орієнтирів, спрямованих на запобігання надмірному енергоспоживанню, підвищення енергоефективності та забезпечення надійності енергопостачання.

Ключовим елементом структури є етап **оцінювання ефективності та формулювання цілей**, на якому проводиться аналіз поточного стану енергетичних потоків і визначаються цільові показники сталого розвитку. При цьому враховуються вимоги щодо мінімізації тиску на природне середовище та підвищення частки місцевих і відновлюваних джерел енергії.

На основі визначених цілей здійснюється **розробка плану дій**, що включає комплекс технічних, організаційних та управлінських заходів. Особливий акцент робиться на впровадженні чистих технологій та використанні відновлюваних джерел енергії.

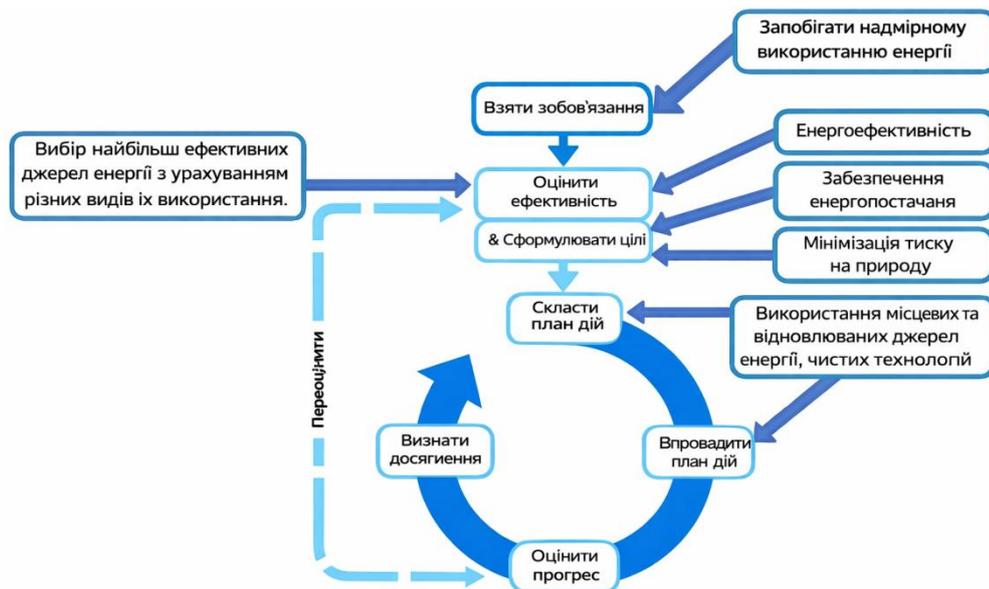


Рис. 1.9 Логічна схема зв'язку управління енергетичними потоками зі сталим розвитком міст

Подальший етап — **впровадження плану дій**, у межах якого реалізуються заплановані заходи та здійснюється управління енергетичними потоками відповідно до обраної стратегії. Результати реалізації підлягають постійному контролю.

Етап **оцінювання прогресу** передбачає аналіз досягнутих результатів шляхом порівняння фактичних енергетичних показників із запланованими. На цьому етапі визначається ступінь досягнення цілей сталого розвитку.

Завершальним елементом циклу є **визнання досягнень та повторна переоцінка**, що забезпечує зворотний зв'язок і коригування цілей та заходів. Таким чином формується замкнений цикл управління, орієнтований на постійне підвищення ефективності енергетичних процесів у міському середовищі.

Загалом, представлена структура демонструє, що управління енергетичними потоками є не одноразовою дією, а безперервним процесом, тісно пов'язаним зі сталим розвитком міста. Вона підкреслює необхідність системного підходу та створює концептуальну основу для впровадження інтелектуальних методів управління енергетичною ефективністю міського середовища.

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МС НА ОСНОВІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОТОКІВ

2.1. Розробка інформаційної моделі МС на основі застосування "чорної скрині"

В межах даного дослідження використовується метод «чорної скриньки», який ґрунтується на системному підході та дозволяє аналізувати функціонування політичної системи без детального розкриття її внутрішньої структури. Поняття "чорної скриньки" було запропоновано одним з перших дослідників в галузі кібернетики У.Р.Ешбі (*William Ross Ashby*). Основна увага зосереджується на **взаємозв'язку між вхідними імпульсами, процесом ухвалення рішень та вихідними результатами**, а також на ролі зворотного зв'язку у забезпеченні стабільності системи.

Сутність методу полягає в тому, що політична система розглядається як цілісний механізм, у межах якого **суспільні вимоги та підтримка трансформуються у політичні рішення і політики**. Внутрішні процеси управління, діяльність інститутів влади, політичних акторів та процедур не є безпосереднім об'єктом аналізу, а узагальнюються у вигляді функціонального блоку — «чорної скриньки».

Застосування методу «чорної скриньки» дає змогу:

- виявити залежність між суспільними запитами та результатами політичного управління;
- оцінити ефективність реагування політичної системи на зовнішні й внутрішні виклики;
- проаналізувати механізми адаптації системи через зворотний зв'язок;
- здійснювати порівняльний аналіз політичних систем незалежно від їхньої інституційної специфіки.

Таким чином, метод «чорної скриньки» виступає важливим інструментом узагальненого аналізу функціонування політичної системи та її взаємодії з соціальним середовищем.

На рис. 2.1. представлено модель системи як «чорної скриньки», що ілюструє процес перетворення вхідних сигналів у вихідні результати в умовах постійної взаємодії із зовнішнім середовищем.

Вхідними елементами системи виступають вимоги та підтримка, які надходять від суспільства та інших систем. Вони відображають потреби, очікування і рівень легітимності політичної влади. У центральній частині моделі розміщено блок «управління і ухвалення рішень», позначений як «чорна скринька», де відбувається узагальнена обробка вхідних імпульсів без деталізації внутрішніх механізмів.

Вихід системи представлений у вигляді політичних рішень або політик, які спрямовуються як усередину політичної системи, так і в зовнішнє середовище. Важливим елементом моделі є внутрішній та зовнішній зворотний зв'язок, що забезпечує реакцію системи на наслідки ухвалених рішень і формування нових вимог та підтримки.

Таким чином, подана схема наочно демонструє логіку методу «чорної скриньки», відповідно до якої політична система функціонує як механізм перетворення суспільних запитів у владні рішення за умови постійної адаптації до середовища.

Розглянемо подання окремих підсистем (компонент) МС на основі використання методу системного аналізу "чорна скринька" (рис.2.2.), який дозволяє більше зосередитися на балансі енергії, речовини та менше на сукупності та механізмах взаємодій, які забезпечують цей баланс. В кібернетиці такий підхід дозволяє вивчати поведінку складних систем в залежності від різноманітних зовнішніх впливів, шляхом абстрагування від внутрішнього устрою самої системи. Таким чином, МС розглядається як сукупність взаємопов'язаних компонентів, в кожній з яких увага



Рис. 2.1. Модель системи як "чорної скрині" з механізмами входів, виходів і зворотного зв'язку
зосереджується на балансі речовинно-енергетичних потоків і в меншій мірі на множині взаємодій, які забезпечують цей баланс.

Визначемо відповідний набір підсистем МС, які з функціональної точки зору мають найбільше значення для забезпечення концепції сталого розвитку міської території. Такими підсистемами та компонентами можна визначити [:

– транспортну підсистему: забезпечує **мобільність населення** та характеризує переміщення в місті і умови переміщень в рамках особливостей просторової організації міста; характеризується кількістю спожитої енергії і кількістю вироблених відходів (наприклад, кількістю вуглеводню C_6H_6 , сажи, оксиду сірки, оксиду азоту NO , NO_x , вуглецю CO_2 та інше);

– підсистему міського господарства: характеризує **умови комфортного життя** населення в залежності від кількості спожитої електроенергії,

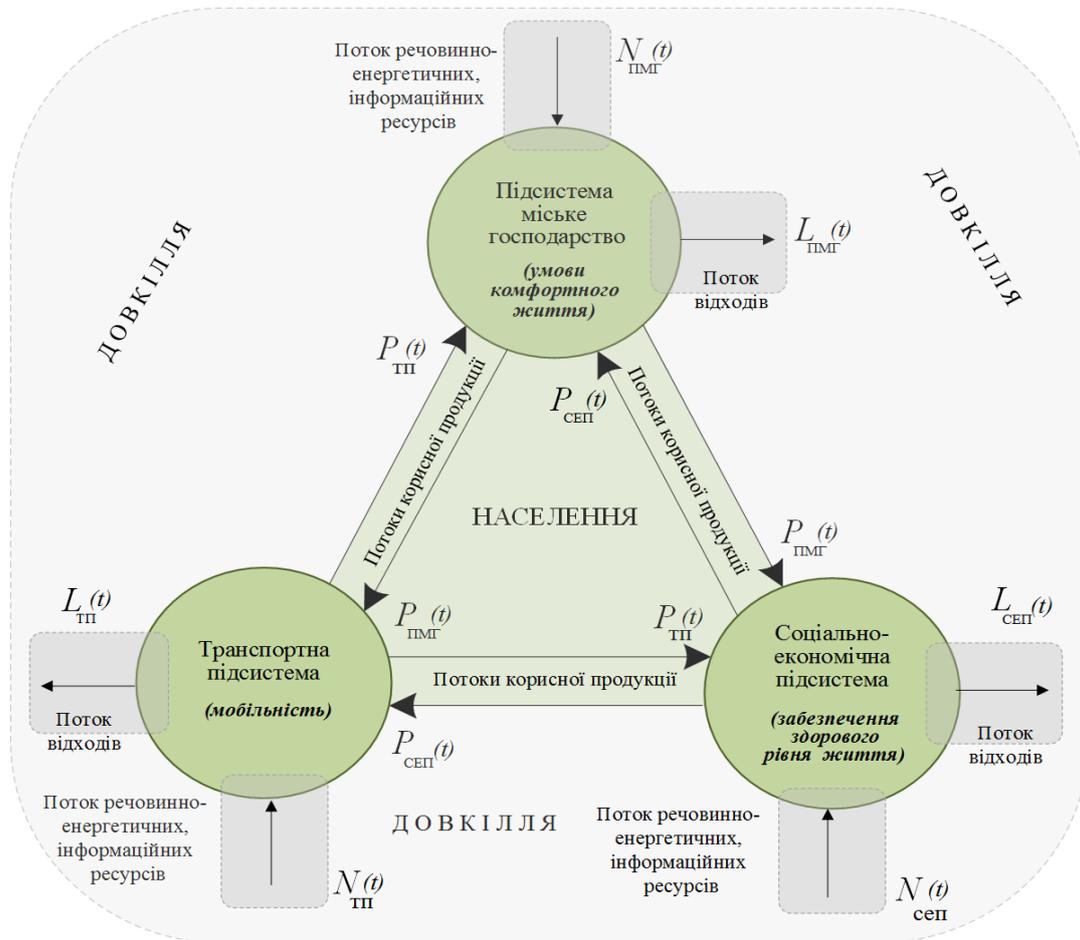


Рис. 2.2. Схема взаємодії шляхом обміну матеріальними ресурсами, інформацією та енергією з довкіллям та між підсистемами МС

теплової енергії, матеріальних ресурсів, обсягами спожитих комунальних послуг, кількості території на душу населення. Підсистема міського господарства повинна забезпечити комфорт проживання на міській території та оперативно вирішувати завдання інженерного забезпечення

– транспортну підсистему: забезпечує **мобільність населення** та характеризує переміщення в місті і умови переміщень в рамках особливостей просторової організації міста; характеризується кількістю спожитої енергії і кількістю вироблених відходів (наприклад, кількістю вуглеводню C_6H_6 , сажи, оксиду сірки, оксиду азоту NO , NO_x , вуглецю CO_2 та інше);

– підсистему міського господарства: характеризує **умови комфортного життя** населення в залежності від кількості спожитої електроенергії, теплової енергії, матеріальних ресурсів, обсягами спожитих комунальних послуг, кількості території на душу населення. Підсистема міського господарства

повинна забезпечити комфорт проживання на міській території та оперативно вирішувати завдання інженерного забезпечення життєдіяльності населення відповідно до економічних умов і потреб міської території; характеризується, головним чином кількістю відходів, які виробляються в процесі забезпечення комфортного проживання населення міста;

– культурну, соціально-економічну підсистему: характеризує та забезпечує *здоровий рівень життя* та пов'язана з кількістю валового внутрішнього продукту виробленого, як промисловістю так і сферою надання послуг міста, кількістю робочих місць, кількістю студентів, кількістю спожитої енергії, матеріальних ресурсів, води промисловими підприємствами міста, загальної сумою податків на душу населення тощо.

Кожна з підсистем отримує з довкілля в якості вхідних даних певну речовину, енергію і має два типи виходів — позитивні та негативні. Будемо враховувати, що "негативні виходи" це певний тип відходів, які створюються кожною підсистемою в процесі свого функціонування та життєдіяльності, а "позитивний вихід" — визначає корисну потужність системи, яка аналогічна корисній роботі.

Тому можна стверджувати, що МС є мережа двигунів, які виробляють корисну роботу в різних її формах, яка реалізується в продуктивності окремої підсистеми. Підсистеми МС взаємодіють шляхом обміну речовиною, енергією, матеріальними ресурсами, з довкіллям та між іншими підсистемами МС. Зокрема, підсистеми, які не мають результатів у вигляді продуктивності називаються "виключно дисипативними системами".

Кожна з цих підсистем має свою особисту ефективність в залежності від ступіню оцінювання за результатами моделювання балансової моделі "витрати-випуск". В сукупності показники ефективності кожної з підсистем вносять вклад в узагальнене визначення ефективності МС.

Основна мета побудови концептуальної потокової моделі МС є необхідність визначення основні підсистеми з функціональної точки зору та основні потоки речовинно-енергетичних ресурсів, потоки відходів та потоки продуктивності для кожної з розглянутих підсистем МС (також в залежності від наявних

даних).

Тепер можна перейти до аналізу кожної з перерахованих підсистем МС, з метою визначення можливого набору вхідних і вихідних експертно-значущих індикаторів речовино-енергетичних потоків метаболізму МС. Вочевидь, що підсистеми можна розглядати, спираючись на наявні дані (доступні дані) та рівень деталізації підсистем міського середовища.

2.2. Характеристика показників енергетичних та інформаційних потоків МС (на прикладі підсистеми міське господарство)

Індикатори (показники) є основним інструментом для підготовки звітності та прийняття управлінських рішень у сфері охорони навколишнього середовища. Відповідним чином підібрані індикатори, що ґрунтуються на часових рядах даних достатньої тривалості, здатні відображати ключові тенденції, характеризувати причини та наслідки стану навколишнього середовища, а також відстежувати й оцінювати реалізацію проваджуваної політики.

Індикатори (показники) можуть бути отримано безпосередньо з відомчих автоматизованих баз даних, баз геопросторових даних, прямим способом вимірювання або отримано на основі обчислення за індикаторами поданими в таблиці 2.1. Таблиця налічує 18 індикаторів або показників які згруповано відповідно за належністю до відповідних потоків: матеріального потоку на вході підсистеми міського господарства, який характеризує повну потужність, матеріальний потік, характеризуючий корисну потужність підсистеми та потік, який характеризує потужність втрат. Перелік показників та їх коротка характеристика:

1. **Площа міста** — характеризує просторові межі функціонування міського господарства.
2. **Щільність населення** — відображає інтенсивність антропогенного навантаження на територію.
3. **Кількість населення** — визначає масштаб споживання ресурсів і утворення відходів.

4. **Чисельність житлових приміщень** — характеризує розвиток житлової забудови міста.
5. **Питома річна витрата енергії на опалення житлових будівель** — показує енергоефективність житлового фонду.
6. **Питоме водопостачання житлових будівель** — відображає рівень водоспоживання населення.
7. **Загальне споживання електроенергії в житлових будівлях** — характеризує енергетичне навантаження житлового сектору.
8. **Частка «екраноземів» та запечатаних ґрунтів** — показує рівень трансформації природної поверхні міста.
9. **Кількість муніципальних побутових відходів** — характеризує інтенсивність утворення відходів населенням.
10. **Обсяги емісії CO₂ від опалення житлових будівель** — відображають внесок житлового сектору у зміну клімату.
11. **Обсяги емісії оксидів азоту (NO_x) від опалення житлових будівель** — характеризують забруднення атмосферного повітря.
12. **Обсяги емісії CO₂ від виробництва електроенергії** — показують екологічні наслідки енергогенерації.
13. **Обсяги емісії CO₂ від складування твердих побутових відходів** — відображають вплив полігонів відходів на довкілля.
14. **Концентрація забруднення побутових стічних вод** — характеризує навантаження на водні екосистеми.
15. **Площа зелених насаджень міста** — показує рівень екологічної стабільності та рекреаційний потенціал.
16. **Частка перероблених непромислових відходів** — характеризує ефективність системи поводження з відходами.
17. **Частка використання відновлюваних джерел енергії** — відображає рівень екологізації енергоспоживання.
18. **Частка озелених територій** — показує збалансованість міського розвитку та якість міського середовища.

Таблиця 2.1.

Групування показників за блоками

Блок	Показник	Коротка характеристика
Ресурси	Площа міста	Визначає просторові межі функціонування міського господарства
	Кількість населення	Характеризує масштаб споживання ресурсів
	Щільність населення	Відображає інтенсивність антропогенного навантаження
	Чисельність житлових приміщень	Показує рівень розвитку житлової забудови
	Питоме водопостачання житлових будівель	Характеризує використання водних ресурсів
Енергія	Питома річна витрата енергії на опалення	Показник енергоефективності житлового фонду
	Загальне споживання електроенергії	Відображає енергетичне навантаження житлового сектору
	Частка використання відновлюваних джерел енергії	Характеризує рівень переходу до сталих джерел енергії
Відходи та викиди	Кількість муніципальних побутових відходів	Інтенсивність утворення відходів населенням
	Частка перероблених непромислових відходів	Ефективність системи поводження з відходами
	Емісія CO ₂ від складування ТПВ	Кліматичний вплив полігонів відходів
	Емісія CO ₂ від опалення будівель	Вплив житлового сектору на атмосферу
	Емісія NO _x від опалення будівель	Рівень локального забруднення повітря
	Емісія CO ₂ від виробництва електроенергії	Екологічні наслідки енергогенерації
Екологічний стан	Частка запечатаних ґрунтів («екраноземів»)	Рівень трансформації природного середовища
	Концентрація забруднення стічних вод	Навантаження на водні екосистеми
	Площа зелених насаджень	Рекреаційний та екологічний потенціал міста
	Частка озелених територій	Показник екологічної збалансованості

Оцінювання ефективності МС відноситься до типу слабоструктурованих задач. Необхідно враховувати велику кількість різномірних і взаємопов'язаних показників, коли ці взаємозв'язки не чіткі та не всі показники очевидні. Для опису слабоструктурованих завдань застосовуються когнітивні карти, які є різновидом математичних моделей. Вперше термін "когнітивні карти"

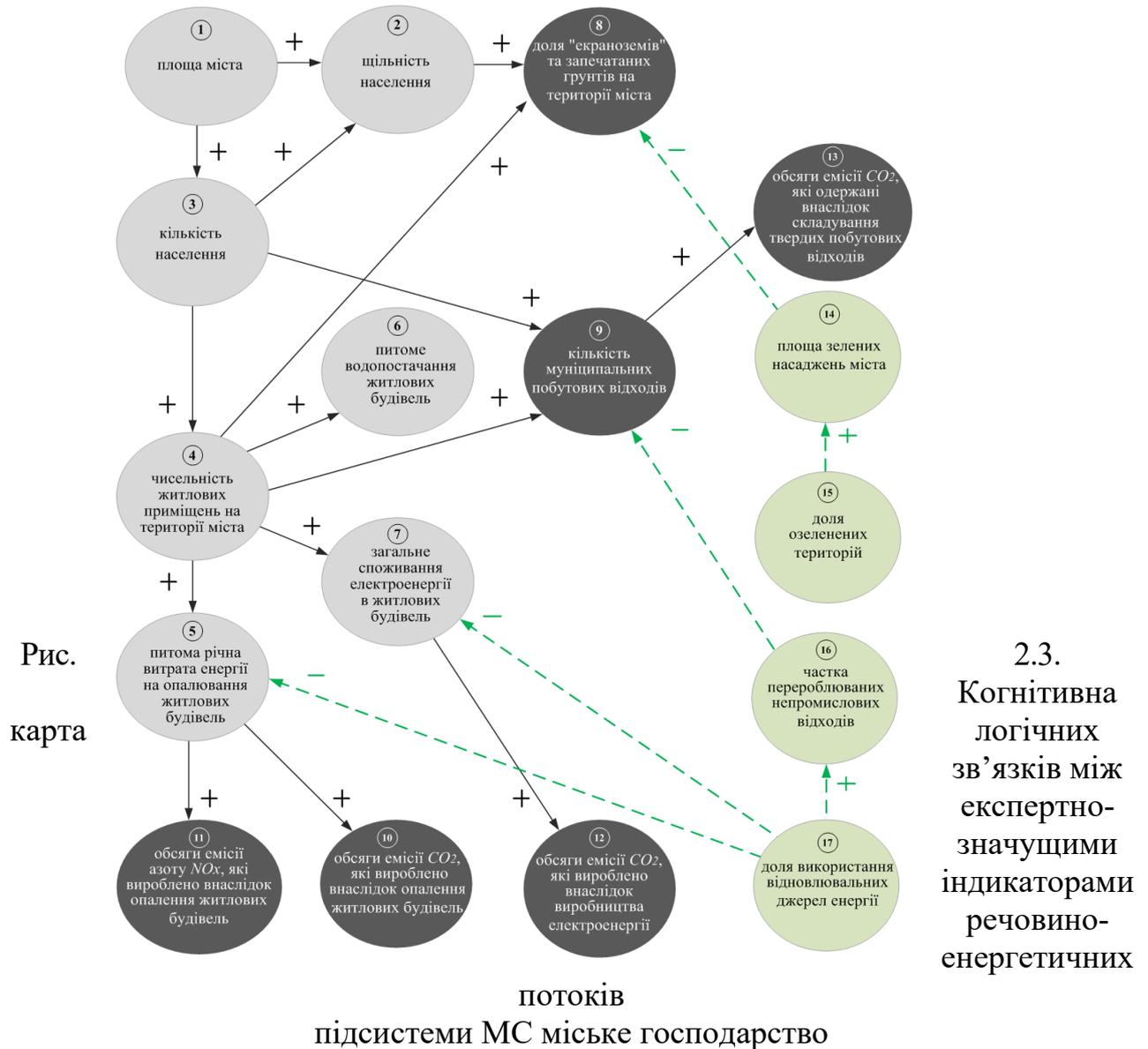
(Cognitive Maps) запропонував Е. Толмен в роботі. Традиційним методом когнітивного моделювання є побудова та аналіз когнітивних карт, спрямований на виявлення причинно-наслідкових зв'язків між індикаторами або показниками речовинно-енергетичних потоків підсистеми міського господарства міської середовища. Формально когнітивна карта подається як орієнтований граф, вузли якого відповідають індикаторам, а дуги навантажені знаками "+" або "-" (знаковий орієнтований граф). Когнітивні карти можуть бути отримані шляхом прямого опитування експертів і відображають декларативний тип мислення, при якому основна увага приділяється індикаторами, а зв'язки між ними визначаються на основі експертних знань. Логічні зв'язки між індикаторами можуть бути представлені у вигляді орієнтованого навантаженого графа $G(F, W)$, де F — множина концептів, $W \subseteq F \times F$ — орієнтовані дуги графа, навантажені значеннями впливів $w_i \in W$. Такий граф, в силу суб'єктивності його складання, називають *когнітивною картою*. Прості когнітивні моделі являють собою знакові орієнтовані графи, в яких вага дуги w_i — це знаки "+" або "-". Від індикатора (показника) u до індикатора (показника) v проводиться дуга, якщо значення індикатора (показника) u має суттєвий вплив на значення індикатора (показника) v . Така модель дозволяє розглядати систему індексів і показників речовинно-енергетичних потоків ПМГ МС, яка складається з множини концептів, які впливають один на одного.

Поданий на рис.2.3. знаковий орграф є спрощеною суб'єктивною когнітивною моделлю логічних взаємозв'язків між концептами та відображає основні закономірності між індикаторами (показниками) речовинно-енергетичних потоків МС. Аналіз знакового орграфа дає можливість виявити та перевірити основні залежності між показниками і індикаторами, які згодом можуть використовуватися для коригування та доповнення когнітивної моделі.

Таким чином, застосування когнітивних карт у процесі оцінювання ефективності МС дозволяє формалізувати складні причинно-наслідкові зв'язки між експертно-значущими індикаторами речовинно-енергетичних потоків підсистеми міського господарства. Когнітивне моделювання дає змогу перейти

від якісного опису взаємодій між показниками до їх структурованого подання у вигляді знакового орієнтованого графа, що є основою для подальшого аналітичного та обчислювального аналізу.

Використання когнітивних моделей є доцільним саме для слабоструктурованих задач, до яких належить оцінювання ефективності МС, оскільки воно дозволяє врахувати як кількісні дані, так і експертні знання.



Побудована когнітивна карта створює передумови для формування матриці знань, аналізу сценаріїв розвитку системи та визначення найбільш впливових індикаторів, що, у свою чергу, забезпечує методологічну основу для наступних етапів дослідження, зокрема побудови алгоритму оцінювання ефективності МС.

2.3. Побудова структури просторової бази даних

Загальна характеристика бази даних Розроблена база даних призначена для зберігання, формалізації та обробки знань, що використовуються в межах когнітивного та нечіткого моделювання. Вона забезпечує підтримку процесів лінгвістичного опису змінних, формування нечітких термів, задання функцій належності, побудови бази знань у вигляді нечітких правил, а також реалізації алгоритму нечіткого логічного виводу.

База даних є логічною основою когнітивної моделі та забезпечує зв'язок між експертно-значущими індикаторами, їх лінгвістичною інтерпретацією та механізмами формування управлінських висновків. Структура бази даних орієнтована на підтримку слабоструктурованих задач, де значну роль відіграють експертні знання та причинно-наслідкові залежності.

Структура бази даних. Структурно база даних складається з декількох логічно пов'язаних підсистем:

- 1. Підсистема лінгвістичних змінних і термів**
- 2. Підсистема функцій належності**
- 3. Підсистема нечітких правил і тверджень**
- 4. Підсистема бази знань**
- 5. Підсистема логічного виводу (Sugeno)**

Кожна з підсистем реалізована у вигляді набору взаємопов'язаних таблиць (сутностей), що відображають основні елементи когнітивної та нечіткої моделі.

Формальний (структурно-логічний) опис. З формальної точки зору база даних подається у вигляді множини сутностей

$$DB = \{E_i, R_{ij}\},$$

де E_i — множина таблиць (сутностей), а R_{ij} — відношення між ними типу один-до-одного, один-до-багатьох та багато-до-багатьох.

Основні сутності бази даних:

- *LinguisticInput* — описує вхідні лінгвістичні змінні;
- *TermInput* — множина термів, що формують лінгвістичну змінну;
- *Term* — окремий терм з посиланням на функцію належності;
- *MembershipFunction* — функції належності термів;

- *Function_XY* — параметричний опис функцій належності;
- *Condition* — умови нечітких правил;
- *Conclusion* — висновки нечітких правил;
- *FuzzyRule* — нечіткі правила типу «ЯКЩО–ТО»;
- *FuzzyStatement* — формалізовані твердження, що об'єднують умови та висновки;

висновки;

- *KnowledgeMatrix* — матричне представлення бази знань;
- *ActivatedFuzzyRule* — активовані правила після фазифікації;
- *Variable* — вихідні змінні;

Зв'язки між сутностями забезпечують цілісність даних і відображають логіку когнітивного та нечіткого моделювання.

Детальний пояснювальний опис структури бази даних:

1. **Лінгвістичні змінні та терми.** Сутність *LinguisticInput* використовується для зберігання опису вхідних змінних, що відповідають індикаторам системи. Кожна лінгвістична змінна пов'язана з множиною термів (*TermInput*, *Term*), які відображають якісні стани показника (наприклад, низький, середній, високий).
2. **Функції належності.** Таблиці *MembershipFunction* та *Function_XY* описують математичний апарат нечіткої логіки. Вони містять параметри функцій належності, які визначають ступінь належності числового значення змінної до відповідного терму.
3. **Нечіткі правила та твердження.** Сутність *FuzzyRule* реалізує базу правил виду ЯКЩО (*Condition*) ТО (*Conclusion*). Умови (*Condition*) та висновки (*Conclusion*) зберігаються окремо, що забезпечує гнучкість моделі. *FuzzyStatement* формує логічні твердження на основі цих елементів.
4. **База знань.** *KnowledgeMatrix* є формалізованим поданням знань експертів у матричному вигляді та використовується для аналізу взаємозв'язків між змінними.
5. **Логічний вивід.** Сутність описує параметри алгоритму нечіткого виводу, включаючи кількість правил, умов, вихідних змінних та параметри агрегації.

Таким чином, розроблена база даних забезпечує повний цикл підтримки когнітивного та нечіткого моделювання — від лінгвістичного опису

індикаторів до формування кількісних управлінських висновків. Її структура є універсальною, розширюваною та придатною для використання в задачах оцінювання ефективності складних слабоструктурованих систем, зокрема міських систем.

2.4. Формування матриці знань та алгоритм оцінювання ефективності МС

Важливим етапом оцінювання ефективності МС є формування **матриці знань**, яка використовується для аналізу матеріально-енергетичних потоків у міському середовищі. Матриця знань слугує формалізованим інструментом представлення експертних уявлень про взаємозв'язки між показниками, що характеризують функціонування підсистем МС, та дозволяє перейти від якісного опису до структурованого аналітичного подання інформації.

В межах даного дослідження під матрицею знань розуміється таблиця, сформована за визначеними правилами (табл. 4.1), у якій відображаються напрямки та характер впливу між індикаторами матеріально-енергетичних потоків міського середовища. Такий підхід забезпечує узгодження когнітивної моделі з подальшими етапами алгоритмічного оцінювання ефективності МС та створює основу для формування кількісних показників результативності.

1. Розмірність цієї матриці дорівнює $(n + 1) \times N$, де $(n + 1)$ — число стовпців, а $N = k_1 + k_2 + \dots + k_1$ — число рядків.

Таблиця 4.1

Номер вхідної комбінації значень	Вхідні змінні				Вихідна змінна
	x_1	x_2	... x_i	x_n	
11	A_1^{11}	A_2^{11}	... A_i^{11} ...	A_n^{11}	y_1
12	A_1^{12}	A_2^{12}	... A_i^{12} ...	A_n^{12}	
...	
1k	A_1^{1k}	A_2^{1k}	... A_i^{1k} ...	A_n^{1k}	
...					
$j1$	A_1^{j1}	A_2^{j1}	... A_i^{j1} ...	A_n^{j1}	y_j

$j2$	A_1^{j2}	A_2^{j2}	$\dots A_i^{j2} \dots$	A_n^{j2}	
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	
jl	A_1^{jl}	A_2^{jl}	$\dots A_i^{jl} \dots$	A_n^{jl}	
\dots					
$m1$	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}	
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	
mp	A_1^{mp}	A_2^{mp}	$\dots A_i^{mp} \dots$	A_n^{mp}	

2. Перші n стовпців відповідають вхідним змінним $x_i, i = \overline{1, n}$, а $(n + 1)$ -ий стовпець відповідає вхідним змінним $x_i, i = \overline{1, n}$, а $(n + 1)$ -ий стовпець 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 $y = y_j$ і останні p рядків відповідають значенню вихідної змінної $y = y_m$.

4. Елемент A_i^{mp} , що знаходиться на пересіченні i -го стовпчика і mp -го рядка, відповідає лінгвістичній оцінці параметра x_i у рядку нечіткої бази знань із номером mp . При цьому лінгвістична оцінка A_i^{mp} вибирається з терм-множини відповідної змінної

$$x_i, \text{ тобто } A_i^{mp} \in A_i, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, p = \overline{1, l}.$$

Дана матриця знань дозволяє визначити систему продукційних правил, що пов'язують значення вхідних показників стану міського середовища $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ з оцінкою ефективності метаболізму міського середовища. Кожному стану міського середовища $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ відповідає значення індикатора ефективності метаболізму міського середовища $I(X) = I\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$.

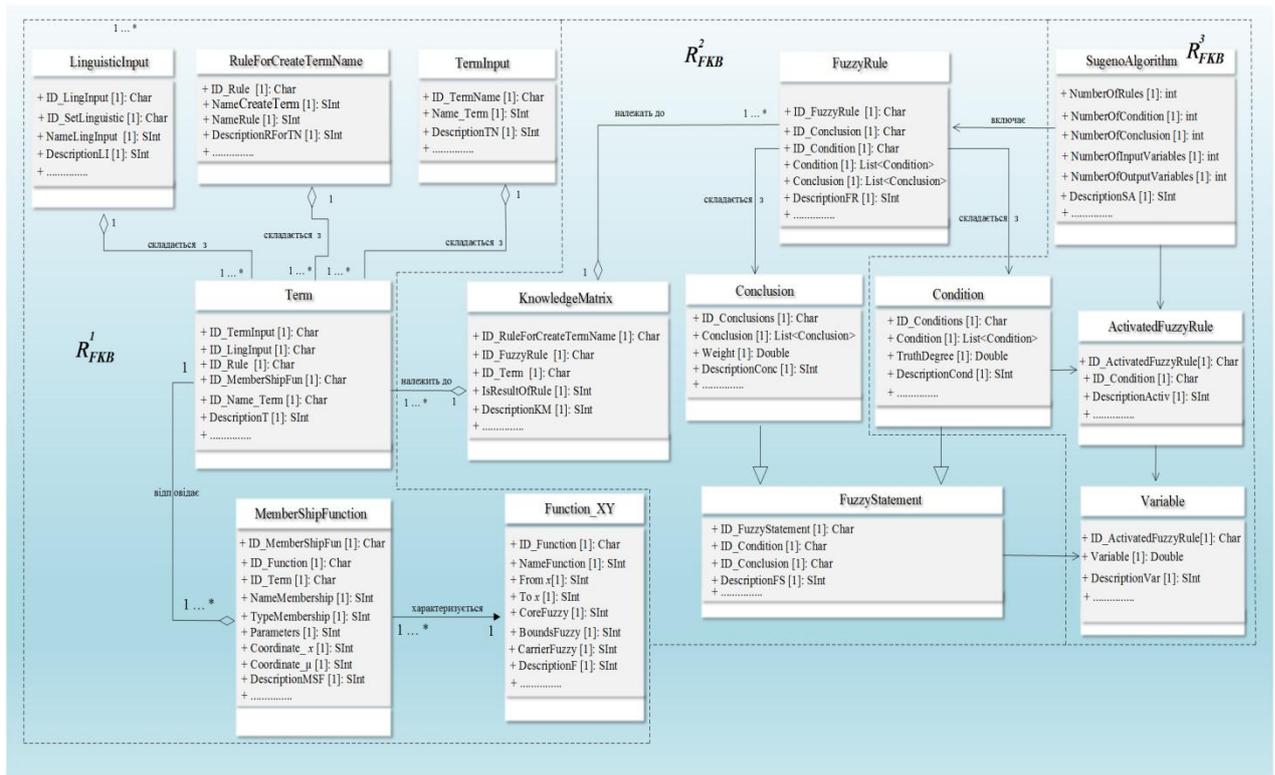


Рис. 2..4. Логічна структура об'єктно-реляційної бази даних у вигляді діаграми наборів класів в методології *UML*

Розглянемо методику формування значень індикатора $I(X)$ по заданому вектору фіксованих значень вхідних змінних $X = \{x_1, \dots, x_n\}$. Отримані значення вхідних змінних необхідно апроксимувати [xx]. З числового аналізу добре відомо, що елементарну функцію можна апроксимувати лінійною функцією у вигляді:

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

де λ_j — коефіцієнт лінійної апроксимації, який характеризує зміну значення індикатора в залежності від значення змінної:

$$\Delta I_j = I(x_1, \dots, x_j + \Delta x_j, \dots, x_n) - I(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n) = \lambda_j \cdot \Delta x_j \quad (4.1)$$

Відповідно до виразу (4.1), одночасна зміна двох змінних x_j та x_k , не впливає на зміну значення індикатора і характеризується умовою:

$$\Delta I = \lambda_j \cdot \Delta x_j + \lambda_k \cdot \Delta x_k = 0;$$

$$\Delta x_j = -\frac{\lambda_k}{\lambda_j} \cdot \Delta x_k \quad (4.2)$$

Наприклад, якщо змінні x_j і x_k характеризують відповідно, кількість приватних автотранспортних засобів міста та обсяги емісії CO_2 , які вироблені приватним автотранспортом міста, то умова (4.2) має ясну інтерпретацію як компроміс між зростанням приватного автотранспорту та обсягами емісії CO_2 . Яким прийнятним має бути баланс між збільшенням емісії CO_2 та зростанням приватного автотранспорту? Якщо такий баланс наданий експертом, то цей факт можна зафіксувати значенням відношення λ_k/λ_j .

Реальний баланс виражений у рівнянні (4.1) залежить від поточної ситуації: наприклад, існує обмеження викиду забруднюючих речовин, незалежно від кількості транспортних засобів у місті.

З іншого боку, значення індикатора $I(X)$ не повинно значно змінюватися, якщо значення змінної x_i знаходиться в діапазоні значень, заданих правою нормою. У цьому випадку відповідно до виразу (4.1) коефіцієнт λ_j має прямувати до нуля.

Таким чином, вище сказане дозволяє стверджувати, що знання експерта можуть бути ефективними як за підтримки різних балансів між показниками матеріальних потоків міського середовища (λ_k/λ_j), залежно від досліджуваної ситуації, так і при обмеженні коефіцієнтів лінійних наближень λ_i , які відображають діючі екологічні, соціальні, містобудівні, економічні нормативи. Все це говорить про те, що продукційні правила, що визначають зміст бази знань повинні мати як вихідну змінну лінійні моделі у вигляді:

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

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

Функції належності дозволяють представляти вхідні змінні x_i , $i = \overline{1, n}$ у вигляді нечітких множин. Кожне значення показника потоку енергетичних втрат в транспортній підсистемі міського середовища може належати до одного з трьох терм-множин [12]:

– значення x_i може відповідати терм-множині "мала кількість" з відповідною функцією належності μ_i^1 ;

– значення x_i може відповідати терм-множині "середня кількість" з відповідною функцією належності μ_i^2 ;

– значення x_i може відповідати терм-множині "велика кількість" з відповідною функцією належності μ_i^3 .

Кожна з терм-множин A_i^j має відповідну функцією належності:

$$A_i^j = \int_{\underline{x}_i}^{\bar{x}_i} \mu^{A_i^j}(x_i) / x_i$$

де $\mu^{A_i^j}(x_i)$ — функція належності значення вхідної змінної (b_{29} , b_{210} , b_{211}) та характеризує належність $\mu^{A_i^j}$ до термів "мала кількість", "середня кількість", та "велика кількість", $j \in \{1, 2, 3\}$.

Вихідна змінна, що відповідає значенню оцінки потоку неперетвореної енергії в транспортній підсистемі міського середовища, подана у вигляді лінійної моделі:

$$I_{L_{mnc}}(i) = I_{0i} + \sum_{j=1}^i \lambda_{i,j} \cdot x_j;$$

Вид матриці знань, побудованої для вхідних показників b_{29} , b_{210} , b_{211} , та визначених відповідних терм-множин $A_{b_{29}}^j$, $A_{b_{210}}^j$, $A_{b_{211}}^j$, де $j \in \{1, 2, 3\}$ подано в табл. 4.2.

Таблица 4.2.

Номер вхідної комбінації значень	Вхідні змінні			Вихідна змінна
	b_{29}	b_{210}	b_{211}	
11	$A_{b_{29}}^{11}$	$A_{b_{210}}^{11}$	$A_{b_{211}}^{11}$	$I_{L_{mnc}}(1) = I_{01} + \lambda_{11} b_{29} + \lambda_{11} b_{210} + \lambda_{11} b_{211} +$ $+ \lambda_{12} b_{29} + \lambda_{12} b_{210} + \lambda_{12} b_{211} +$ $+ \lambda_{13} b_{29} + \lambda_{13} b_{210} + \lambda_{13} b_{211}$
12	$A_{b_{29}}^{12}$	$A_{b_{210}}^{12}$	$A_{b_{211}}^{12}$	
13	$A_{b_{29}}^{13}$	$A_{b_{210}}^{13}$	$A_{b_{211}}^{13}$	
21	$A_{b_{29}}^{21}$	$A_{b_{210}}^{21}$	$A_{b_{211}}^{21}$	$I_{L_{mnc}}(2) = I_{02} + \lambda_{21} b_{29} + \lambda_{21} b_{210} + \lambda_{21} b_{211} +$

22	$A_{b_{29}}^{22}$	$A_{b_{210}}^{22}$	$A_{b_{211}}^{22}$	$+\lambda_{22} b_{29} + \lambda_{22} b_{210} + \lambda_{22} b_{211} +$ $+\lambda_{23} b_{29} + \lambda_{23} b_{210} + \lambda_{23} b_{211}$
23	$A_{b_{29}}^{23}$	$A_{b_{210}}^{23}$	$A_{b_{211}}^{23}$	
31	$A_{b_{29}}^{31}$	$A_{b_{210}}^{31}$	$A_{b_{211}}^{31}$	$I_{L_{тпс(3)}} = I_{03} + \lambda_{31} b_{29} + \lambda_{31} b_{210} + \lambda_{31} b_{211} +$ $+\lambda_{32} b_{29} + \lambda_{32} b_{210} + \lambda_{32} b_{211} +$ $+\lambda_{33} b_{29} + \lambda_{33} b_{210} + \lambda_{33} b_{211}$
32	$A_{b_{29}}^{32}$	$A_{b_{210}}^{32}$	$A_{b_{211}}^{32}$	
33	$A_{b_{29}}^{33}$	$A_{b_{210}}^{33}$	$A_{b_{211}}^{33}$	

Подана структурна схема на рис. 2.5. відображає **алгоритм формування інтегральної оцінки ефективності** на основі показників енергетичних та інформаційних потоків МС. Схема демонструє послідовність перетворення

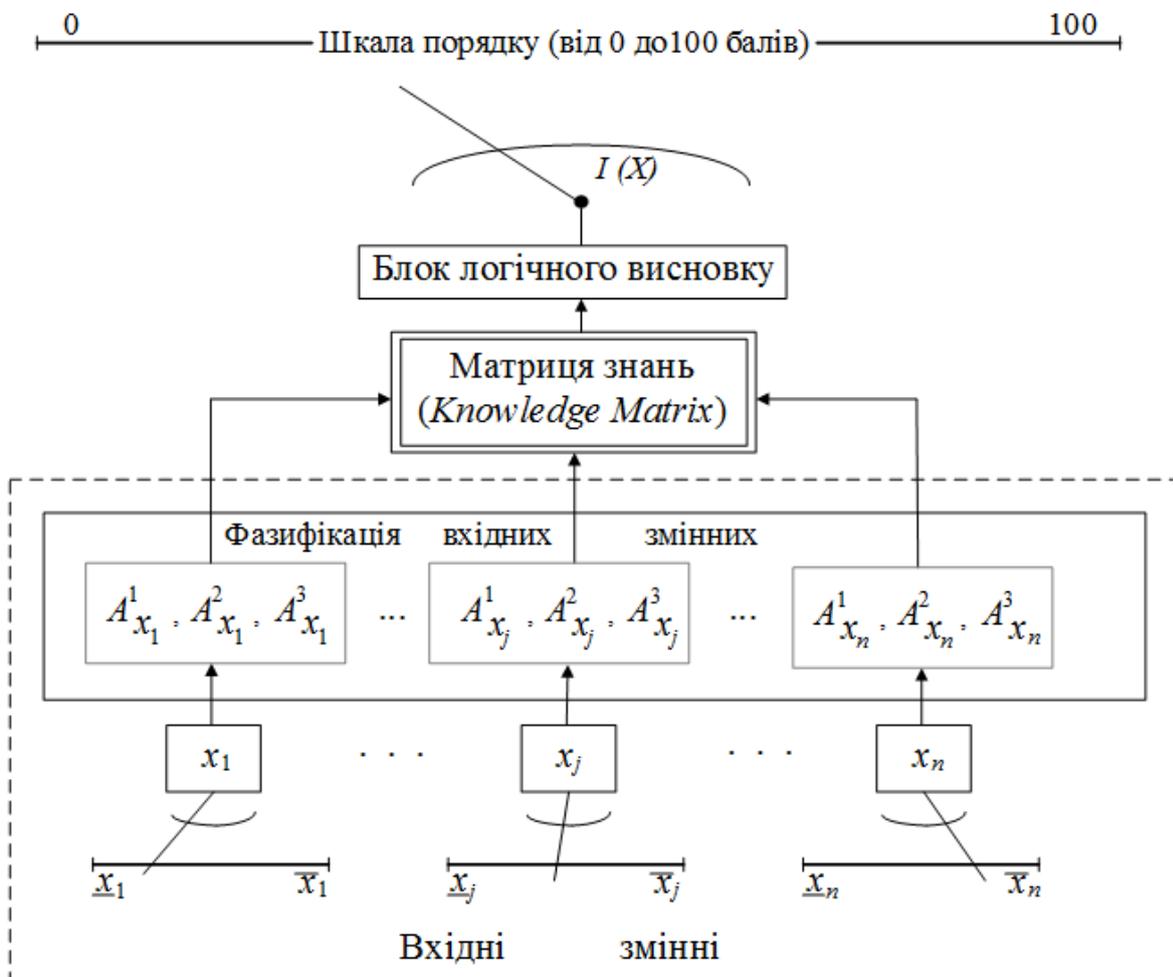


Рис.2.5. Структурна схема формування інтегральної оцінки ефективності на основі показників енергетичних та інформаційних потоків МС

значень вхідних показників у узагальнений інтегральний індикатор ефективності.

На нижньому рівні схеми розміщено **вхідні змінні** x_1, x_2, \dots, x_n , які відповідають кількісним показникам стану міського середовища та

матеріально-енергетичних потоків. Значення кожної змінної знаходяться у визначеному діапазоні $[\underline{x}_i, \overline{x}_i]$, що відповідає допустимим або нормативним межам.

Наступним етапом є **фазифікація**, у межах якої кожне числове значення вхідної змінної перетворюється у набір **лінгвістичних оцінок**. Для кожної змінної x_i формується множина нечітких термів:

$$A_i^1, A_i^2, A_i^3 \dots$$

що описують якісні стани показника (наприклад, *низький, середній, високий*). Результатом фазифікації є ступені належності вхідних змінних відповідним нечітким множинам.

Фазифіковані значення вхідних змінних надходять до **матриці знань**, яка містить систему продукційних правил нечіткої бази знань. Матриця знань формалізує **причинно-наслідкові зв'язки** між вхідними змінними та інтегральною оцінкою ефективності МС.

Кожен рядок матриці знань відповідає окремому правилу типу:

$$\text{IF } x_1 \text{ IS } A_1^k \text{ AND } \dots \text{ AND } x_n \text{ IS } A_n^m \text{ THEN } I(X)$$

Блок логічного висновку здійснює агрегацію результатів активованих правил на основі матриці знань. У цьому блоці відбувається обчислення узагальненого значення інтегрального показника

$$I(X),$$

який є результатом нечіткого логічного виводу.

Результатом роботи системи є **інтегральна оцінка ефективності МС**, що відображається на **шкалі порядку від 0 до 100 балів**. Значення 0 відповідає критично низькій ефективності, тоді як значення 100 характеризує максимально ефективний стан МС.

Подана структурна схема на рис.2.5. дозволяє:

- інтегрувати різномірні кількісні показники у єдиний індикатор;
- враховувати нечіткість і невизначеність експертних знань;
- формалізувати процес оцінювання ефективності міського метаболізму;
- використовувати отриману оцінку для підтримки управлінських рішень.

Таким чином, розроблено методику оцінювання ефективності МС на основі аналізу матеріально-енергетичних та інформаційних потоків.

Методологічною основою дослідження обрано системний підхід, який дозволив розглядати МС як складну багатокomпонентну систему з множиною взаємопов'язаних підсистем.

Обґрунтовано доцільність застосування методу «чорної скриньки» для формування інформаційної моделі МС. Показано, що такий підхід дозволяє абстрагуватися від внутрішньої структури окремих підсистем та зосередитися на балансі речовинно-енергетичних потоків, а також на взаємодії між входами, виходами і зворотними зв'язками. Це створило підґрунтя для подальшого формалізованого опису функціонування МС у контексті сталого розвитку.

Сформовано систему експертно-значущих індикаторів, які характеризують енергетичні та матеріальні потоки підсистем МС. Показники згруповано за функціональними блоками (ресурсний, енергетичний, відходів та викидів, екологічного стану), що забезпечує комплексність оцінювання та можливість інтеграції різнорідних даних у межах єдиної моделі.

Розроблено структуру просторової об'єктно-реляційної бази даних, яка забезпечує зберігання, формалізацію та обробку знань, необхідних для когнітивного та нечіткого моделювання. Запропонована структура бази даних охоплює лінгвістичні змінні, терми, функції належності, нечіткі правила, матрицю знань та механізми логічного виводу, що забезпечує повний цикл підтримки процесу оцінювання ефективності МС.

Розроблено підхід до формування матриці знань та алгоритм оцінювання ефективності МС на основі нечітких продукційних правил. Показано, що використання лінійних моделей у якості вихідних змінних продукційних правил дозволяє враховувати компроміси між різними матеріально-енергетичними потоками та обмеження, зумовлені екологічними, соціальними та економічними нормативами. Запропонована структурна схема формування інтегральної оцінки забезпечує перехід від множини вхідних показників до узагальненого індикатора ефективності, представленого на уніфікованій шкалі від 0 до 100 балів.

В цілому отримані результати створюють методологічну та алгоритмічну основу для подальшого практичного застосування запропонованої методики,

зокрема для сценарного аналізу, порівняльної оцінки ефективності функціонування МС та підтримки управлінських рішень у сфері сталого розвитку міських територій.

РЕЗУЛЬТАТИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА

3.1. Основні принципи побудови системи оцінювання ефективності МС на основі енергетичних потоків

Суть геоінформаційного моніторингу міського середовища зводиться до оцінки ефективності метаболізму міського середовища та полягає у пошуку відображення:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow r_i \in R,$$

де X — множина параметрів, що характеризують речовинно-

енергетичні та інформаційні потоки у міському середовищі;

r_i — значення ефективності метаболізму міського середовища;

$$R \in [0, 100].$$

Проблеми вирішення завдання оцінювання ефективності метаболізму міського середовища для міст України зумовлені такими причинами:

1. Для оцінки ефективності функціонування міського середовища між її підсистемами та природним середовищем необхідно враховувати величезну кількість параметрів, що характеризують речовинно-енергетичні та інформаційні потоки, які не зможе запам'ятати та врахувати, навіть, найкваліфікованіша група експертів.

2. У явному вигляді відсутня аналітична залежність між параметрами речовинно-енергетичних та інформаційних потоків у міському середовищі (причини) та оцінкою ефективності функціонування міського середовища (наслідки). Складність побудови таких залежностей визначається як великою кількістю параметрів так і різномірним їх характером. Параметри можуть мати кількісний (щорічні статистичні дані по містах) і якісний характер.

За цих умов актуальною стає проблема створення системи, що забезпечує інтелектуалізацію геоінформаційного моніторингу міського середовища. Основними засадами функціонування інтелектуальної системи геоінформаційного моніторингу міського середовища є:

1. Принцип лінгвістичності параметрів, що характеризують речовинно-енергетичні та інформаційні потоки у міському середовищі.

Відповідно до цього принципу параметри речовинно-енергетичних та інформаційних потоків у міському середовищі (вхідні змінні) розглядаються як лінгвістичні змінні з якісними термами.

Наприклад: *доля "екраноземів" та запечатаних ґрунтів на території міста* ("велика", "середня", "не значна"), *кількість муніципальних побутових відходів* ("велика кількість", "середня кількість", "не значна кількість"), *витрати енергії приватним автотранспортом* ("велика кількість", "середня кількість", "не значна кількість").

Використовуючи поняття функції належності, кожен з лінгвістичних термів можна формалізувати у вигляді нечіткої множини, заданої на відповідній універсальній множині.

2. Принцип лінгвістичності оціночних знань.

Відповідно до цього принципу причинно-наслідкові зв'язки між параметрами речовинно-енергетичних та інформаційних потоків (причинами) та оцінкою ефективності (наслідком) повинні бути описані природною мовою, а потім формалізовані у вигляді сукупності нечітких логічних висловлювань у вигляді IF... THEN... ELSE.

Джерелами отримання таких висловлювань (правил, знань) можуть бути фахівці, які мають досвід та експертні знання, необхідні для проведення оцінки ефективності метаболізму міського середовища.

3. Принцип ієрархічності оціночних знань.

За великої кількості параметрів матеріальних потоків міського середовища побудова системи висловлювань про причинно-наслідкові зв'язки системи "параметри матеріальних потоків – оцінка ефективності" стає доволі складною. У зв'язку з цим доцільно провести класифікацію вхідних параметрів і

відповідно до класифікації будувати дерево виведення, що визначає систему вкладених один в одного висловлювань — знань меншої розмірності.

Загальне дерево логічного висновку оцінки ефективності метаболізму міського середовища наведено на рис. 3.1.

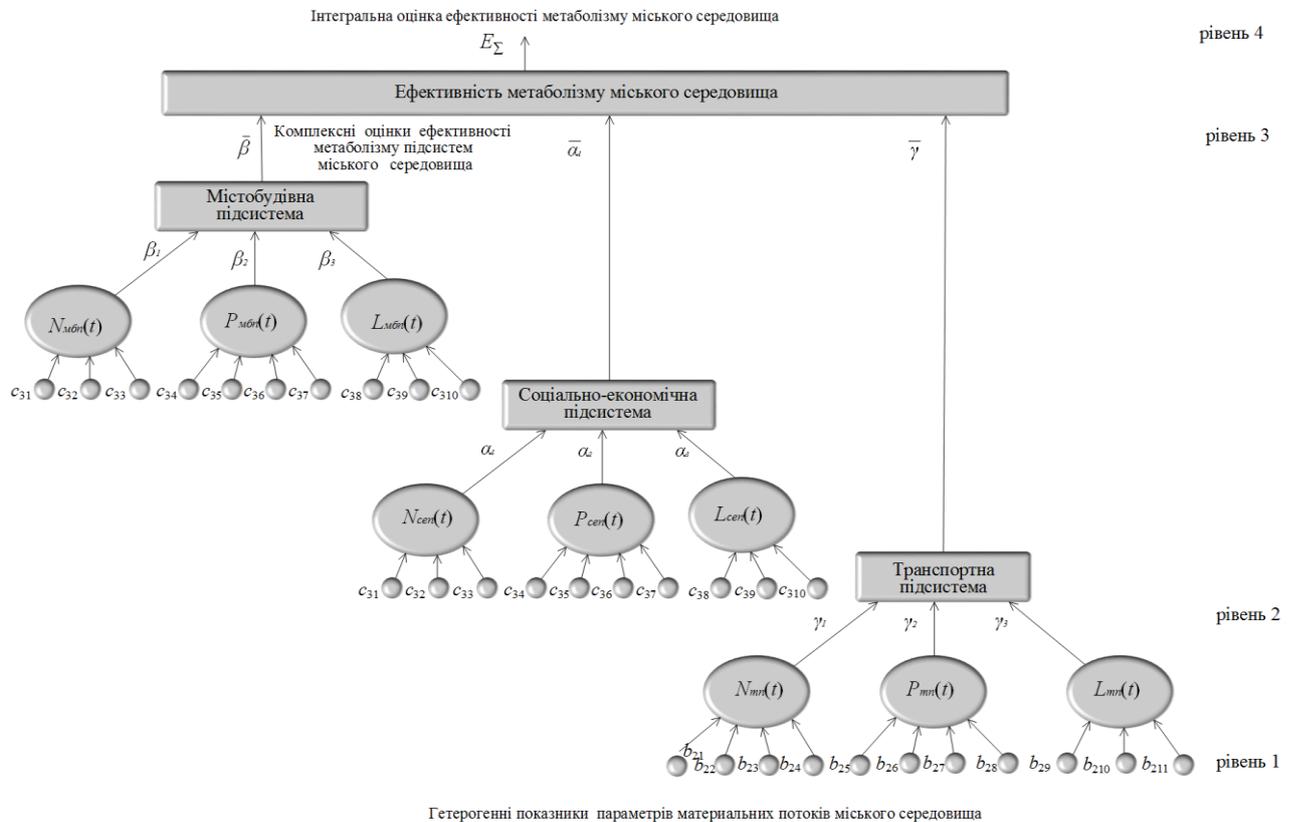


Рис. 3.1. Дерево логічного висновку оцінки ефективності метаболізму міського середовища

Основні діагностичні показники матеріальних потоків міського середовища наведено в табл. 3. 1.

Таблиця 3. 1

Базові показники параметрів матеріальних потоків міського середовища

Показники стану міського середовища		Позначення			Одиниці виміру
1		2			3
1. Показники підсистеми – містоутворююча база					
1.	1.1. Кількість населення	a_{11}			тис. Осіб
2.	1.2. Щільність населення	a_{12}			$\frac{\text{осіб}}{\text{км}^2}$
3.	1.3. Загальна чисельність житлових приміщень на території міста	a_{13}			м^2

4.	1.4. Питома річна витрата енергії на опалювання житлових будівель	a_{14}				$\frac{\text{кВт} \cdot \text{рік}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{діб} \cdot \text{р}}$
5.	1.5. Питоме водоспоживання в житлових будівлях	a_{15}				$\frac{\text{л}}{\text{особа} \cdot \text{доба}}$
6.	1.6. Загальне споживання електроенергії в житлових будівлях	a_{16}				$\frac{\text{кВт} \cdot \text{годин}}{\text{м}^2 \cdot \text{рік}}$
7.	1.7. Доля використання відновлювальних джерел енергії	a_{17}				%
8.	1.8. Площа природних територій міста під особливою охороною	a_{18}				м^2
9.	1.9. Площа зелених насаджень міста	a_{19}				м^2
10.	1.10. Частка перероблювальних непромислових відходів	a_{110}				%
11.	1.11. Доля "екраноземів" та запечатаних ґрунтів на території міста	a_{111}				%
12.	1.12. Кількість муніципальних побутових відходів	a_{112}				$\frac{\text{кг}}{\text{особа} \cdot \text{доба}}$
1.	1.13. Обсяги емісії CO_2 , що одержані внаслідок опалення житлових будівель	a_{113}				$\frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{діб} \cdot \text{р}}$
1.	1.14. Обсяги емісії NO_x , що одержані внаслідок опалення житлових будівель	a_{114}				$\frac{\text{мг}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{діб} \cdot \text{р}}$
13.	1.15. Обсяги емісії CO_2 , що одержані внаслідок виробництва електроенергії	a_{115}				$\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{рік}}$
14.	1.16. Обсяги емісії CO_2 , що одержані внаслідок складування твердих побутових відходів	a_{116}				$\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{рік}}$
2. Показники транспортної підсистеми						
15.	2.1. Щільність вулично-дорожньої мережі	b_{21}				$\frac{\text{км}}{\text{км}^2}$
16	2.2. Кількість автотранспортних засобів міста	b_{22}				шт
17	2.3. Витрати енергії приватним автотранспортом	b_{23}				$\frac{\text{кВт} \cdot \text{годин}}{\text{авто} \cdot \text{рік}}$
18	2.4. Витрати енергії громадським автотранспортом	b_{24}				$\frac{\text{кВт} \cdot \text{годин}}{\text{осіб} \cdot \text{рік}}$
19	2.5. Інтенсивність транспортного потоку	b_{25}				%
20	2.6. Середній пробіг легкового автотранспорту за рік	b_{26}				км
21	2.7. Загальна протяжність мережі всіх видів громадського транспорту в місті	b_{27}				км
22	2.8. Частка використання безвуглецевого транспорту ("зелений транспорт")	b_{28}				%
23	2.9. Обсяги емісії CO_2 , які вироблено приватним автотранспортом	b_{29}				$\frac{\text{тонн}}{\text{авто} \cdot \text{рік}}$
24	2.10. Обсяги емісії азоту NO_x , що вироблені легковим автотранспортом	b_{210}				$\frac{\text{кг}}{\text{авто} \cdot \text{рік}}$
25	2.11. Обсяги емісії CO_2 , що вироблена громадським автотранспортом	b_{211}				$\frac{\text{тонн}}{\text{осіб} \cdot \text{рік}}$

3.Показники соціально-економічної підсистеми						
26.	3.1. Загальна площа промислового призначення на території міста	c_{31}				%
27.	3.2. Питоме водоспоживання підприємствами міста	c_{32}				$\frac{\text{л}}{\text{доба}}$
28.	3.3. Річна витрата енергії промисловими підприємствами міста	c_{33}				$\frac{\text{кВт} \cdot \text{годин}}{\text{рік}}$
29.	3.4. Валовий внутрішній продукт	c_{34}				$\frac{\text{грн}}{\text{рік}}$
30.	3.5. Кількість місць додатка праці	c_{35}				%
31.	3.6. Очікуєма тривалість здорового життя	c_{36}				роки
32.	3.7. Частка перероблювальних промислових відходів	c_{37}				%
33.	3.8. Кількість промислових відходів	c_{38}				$\frac{\text{тонн}}{\text{рік}}$
34.	3.9. Обсяги емісії CO ₂ , що вироблено промисловими підприємствами міста	c_{39}				$\frac{\text{тонн}}{\text{рік}}$
35.	3.10. Обсяги емісії азоту NO _x , що вироблено промисловими підприємствами міста	c_{310}				$\frac{\text{кг}}{\text{рік}}$

Міське середовище розглядається як сукупність взаємодіючих підсистем. З функціональної точки зору найбільш істотними підсистемами міського середовища можна вважати:

– транспортну підсистему: характеризує просторову мобільність і мультимодальних переміщень населення, а також кількість енергії, що витрачається на забезпечення просторової мобільності населення та обсяги емісії CO₂, NO_x та інших супутних забруднювачів міського середовища;

– підсистема містобутворююча база: 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-економічна підсистема: 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 так далі.

Табл. 3. 1 налічує 35 базових параметрів, які характеризують матеріальні

потоки для трьох вказаних підсистем міського середовища.

З урахуванням слабоформалізованих завдань існують два способи отримання початкових нечітких даних — безпосередній і як результат оброблення чітких даних. В основі обох способів лежить необхідність суб'єктивної оцінки функцій належності нечітких множин.

Для базових параметрів визначено функції належності $\mu(x)$, які перетворюють чіткі значення або порядкову шкалу оцінки параметрів в значення ступенів належності оцінюваних процесів (явищ) (табл. 6.3). Доменом значень нечіткої оцінки належності є інтервал дійсних чисел від 0 до 1.

3.2. Інтелектуальна технологія оцінювання сталого розвитку міського середовища

Запропонована інтелектуальна технологія оцінювання сталого розвитку міського середовища, заснована на показнику ефективності міського метаболізму, наведена на рис. 3.2



Рис.3.2. Структура інтелектуальної технології оцінювання сталого

розвитку міського середовища.

Дана технологія складається з чотирьох основних етапів.

1. Моніторинг та спостереження

На першому етапі використовуються різні типи інформаційної взаємодії Φ з об'єктом геоінформаційного моніторингу, а саме:

$$\{\varphi^1, \varphi^2, \varphi^3, \varphi^4, \varphi^5, \varphi^6, \varphi^7, \dots, \varphi^d\} \in \Phi,$$

де φ^1 — фотограмметрична зйомка;

φ^2 — аерокосмічна зйомка;

φ^3 — супутникові вимірювання;

φ^4 — геодезичні вимірювання на місцевості;

φ^5 — обробка інформації з використанням геоінформаційних технологій;

φ^6 — обробка даних польових вимірювань;

φ^7 — інфрачервона та радарна зйомка;

d — потужність множини Φ .

В процесі комплексної інформаційної взаємодії з об'єктом моніторингу визначаються характеристики поточного стану міського середовища:

$$\{X_i^P\} \supseteq \{X_i^{PA}\}, \quad l \in L,$$

де X_i^P — множина визначених параметрів,

X_i^{PA} — множина значущих характеристик стану МС.

2. Оцінювання та прогнозування сталого розвитку міського середовища

На даному етапі використовуються три взаємопов'язані компоненти: просторово-об'єктна реляційна база даних, нечітка база знань та методи, орієнтовані на знання, для обчислення оцінки якості міського середовища.

Схема просторово-об'єктної реляційної бази даних формально описується як:

$$SBD = \langle R, L, C \rangle,$$

де $R = \{r_q \mid q = 1, n\}$ — множина відношень бази даних, для яких визначено атрибути $A_q = \{a_{qp} \mid p = 1, m\}$ та обмеження $Sq = \{s_{qk} \mid k = 1, h\}$;

$L = \{l_v \mid v = 1, z\}$ — множина зв'язків між відношеннями R ;

C — множина правил та обмежень, що забезпечують цілісність бази даних і підтримують узгодженість даних.

Фрагмент класів об'єктів просторової бази даних та класів об'єктів нечіткої бази знань для оцінювання якості МС було розглянуто в розділі 2. Окрім класів просторових об'єктів, на схемі відображено атрибути класів, операції класів, а також обмеження, що накладаються на зв'язки між класами просторових об'єктів.

Формування обґрунтованих управлінських рішень щодо сталого розвитку міських територій потребує можливості аналізу та оптимізації потоків енергії, води та матеріальних ресурсів з метою зменшення споживання природних ресурсів. Тому просторова база даних орієнтована на відображення просторового розподілу великої кількості будівель і домогосподарств за функціональними зонами та вуличними кварталами.

Класи просторових об'єктів визначено відповідно до вимог специфікації *INSPIRE Data Specification*. Використання детальної інформації про житлові будівлі, зокрема типу забудови, розмірів, місця розташування, року побудови, а також застосування методів регресійного аналізу дає змогу визначити інтенсивність споживання води, електроенергії та палива для опалення, що дозволяє компенсувати нестачу детальних первинних даних.

З метою уніфікації процесів збору, зберігання та обчислення показників матеріальних і енергетичних потоків міського середовища в базі даних запропоновано створення додаткових класів тематичних об'єктів для зберігання відповідних показників. Ці класи поділяються на три групи: показники повного потоку енергії, що споживається міським середовищем; показники корисного (продуктового) потоку енергії; показники потоку втрат енергії.

Наприклад, такі класи об'єктів, як *DomesticWaterConsum*, *HeatingInBuildingGas*, *ElectricityBuildingCup*, характеризують відповідно споживання води, споживання природного газу для опалення та споживання електроенергії кожним домогосподарством або мешканцями житлових будівель протягом року. Розглянуті тематичні класи об'єктів моделюють спожиті потоки ресурсів, які протягом певного часу та з певною ефективністю

використовуються суспільством для задоволення власних потреб.

Тематичні класи об'єктів *WasteRecycled* та *RenewableBuildingEnergy* визначають загальний обсяг виробленого продукту, тобто негентропійний потік енергії, за певний період часу, а також технологічні можливості підсистеми міської економіки. Тематичні класи об'єктів *EmissionCO2DomesticWaste*, *DomesticWaste*, *EmissionCO2HeatingBuild* моделюють потік енергетичних втрат, який характеризує втрачені можливості підсистеми міської економіки. Запропоновані тематичні класи об'єктів підсистеми міської економіки формують систему індикаторів сталого розвитку, що відображає технологічні, економічні, екологічні, соціальні та інші можливості міського середовища в цілому.

Нечітка база знань (*Fuzzy Knowledge Base, FKB*) забезпечує зберігання, пошук та генерацію знань для оцінювання якості міського середовища.

Знання задаються експертами у вигляді продукційних правил. В базі знань реалізовано алгоритм нечіткого логічного виведення Сугено.

Для реалізації алгоритму Сугено було використано об'єктно-орієнтований підхід. На діаграмі показано найбільш суттєві зв'язки та взаємозв'язки між класами об'єктів, що беруть участь у роботі алгоритму. Нечіткі правила складаються з умов та висновків, які, у свою чергу, представлені нечіткими висловлюваннями.

Нечітке висловлювання включає лінгвістичну змінну (*SetLinguisticVariable*) та терм, який подається у вигляді нечіткої множини (*TermSetOfLinguisticVariable*). Для нечіткої множини визначається функція належності, значення якої може бути отримане за допомогою методу *getValue*. Зв'язок між нечіткою базою знань (FKB) та просторовою базою даних (SDB) забезпечується через клас об'єктів *LinguisticVar*.

В загальному вигляді нечітка база знань забезпечує зберігання продукційних правил такого виду:

$$\prod_{k=1}^n (p_k = A_k^j) \rightarrow y_i (p_1, \dots, p_n), \quad i = 1, m$$

На основі нечіткої бази знань та експертних уявлень щодо важливості значень характеристик здійснюється фазифікація показників, які

характеризують повний потік матеріальних, енергетичних та інформаційних ресурсів за певний проміжок часу.

На рис.3.3 наведено приклад фазифікації показника щільності населення міста I_1 з використанням відповідних терм-множин: $A_{p_1}^1$ — «низька щільність», $A_{p_1}^2$ — «середня щільність», $A_{p_1}^3$ — «висока щільність».

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

$$\mu_{p_1}^1(p) = \begin{cases} 1, & p \leq 200 \\ \frac{p-400}{200}, & 200 \leq p \leq 400 \\ 0, & p \geq 400 \end{cases} ;$$

$$\mu_{p_1}^2(p) = \begin{cases} 0, & p \leq 250 \\ \frac{580-p}{330}, & 250 \leq p \leq 580 \\ \frac{p-580}{220}, & 580 \leq p \leq 800 \\ 0, & p \geq 600 \end{cases} ;$$

$$\mu_{p_1}^3(p) = \begin{cases} 1, & p \geq 960 \\ \frac{960-p}{260}, & 700 \leq p \leq 900 \\ 0, & p \leq 600 \end{cases} .$$

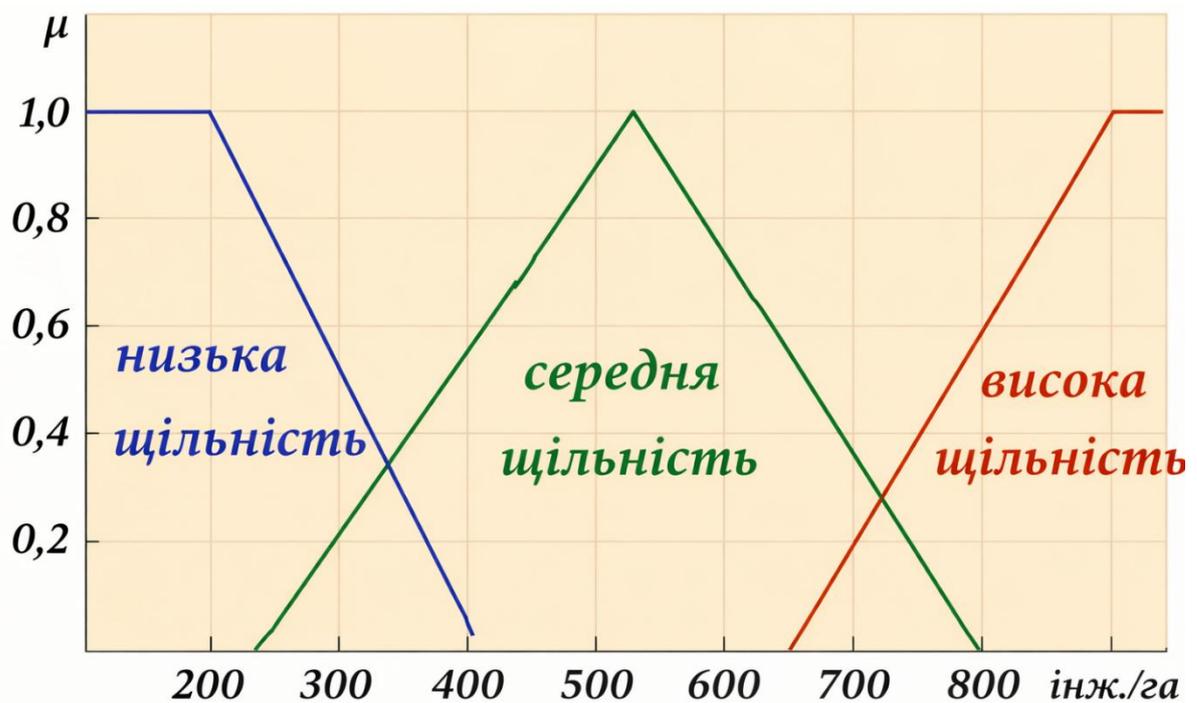


Рис. 3.3. Приклад фазифікації показника щільності населення міста.

3 — Прийняття рішень щодо управління сталим розвитком міського середовища.

На цьому етапі показник ефективності метаболізму міського середовища використовується як інструмент підготовки та прийняття управлінських рішень, спрямованих на підвищення якості життя населення. Зазначений показник забезпечує багатовимірний і багатофакторний підхід до прийняття рішень у сфері управління сталим розвитком міста.

4 — Регулювання міського середовища.

На даному етапі здійснюється вибір альтернативних сценаріїв містобудівного планування, що дає змогу користувачам змінювати цілі та індикатори сталого розвитку міста.

3.3. Концептуальна модель прийняття рішень в управлінні сталим розвитком МС в умовах невизначеності та неоднозначності

Вимірювання значень змінних для кожного з компонентів, що входять до досліджуваної предметної області, потребує розроблення емпіричного індикатора, який виступає інструментом моніторингу та збору інформації.

Проблема отримання емпіричного значення індикатора пов'язана з можливістю встановлення зв'язку між значенням індикатора та певною

вимірюваною величиною. Індикатор оцінювання ефективності метаболізму міського середовища не є простою функцією кількох вимірюваних величин. Такий індикатор являє собою складну конструкцію, яка інтегрує сукупність різноманітних показників міського середовища з метою оцінювання ефективності метаболічних процесів.

Ефективність метаболізму є реакцією на розвиток речовинно-енергетичних та інформаційних потоків у міському середовищі й оцінюється на основі даних, наведених у таблиці 3.1.

Прийняття рішень експертами у більшості випадків полягає в генерації можливих альтернативних рішень, їх оцінюванні та виборі найкращої альтернативи. Прийняти «правильне» рішення означає обрати таку альтернативу з-поміж можливих, яка максимально сприятиме досягненню поставленої мети.

Експерти враховують велику кількість суперечливих вимог і, відповідно, оцінюють варіанти рішень за багатьма критеріями, аналізуючи економічні та екологічні наслідки різних сценаріїв. Суперечливість вимог, неоднозначність оцінювання ситуацій, а також помилки у виборі пріоритетів суттєво ускладнюють процес прийняття рішень.

Іншою невід'ємною особливістю процесу прийняття рішень є наявність невизначеностей, які зазвичай поділяють на три класи:

- невизначеності, пов'язані з неповнотою знань про проблему;
- нечітке усвідомлення власних цілей особою, що приймає рішення;
- невизначеність під час урахування реакції навколишнього середовища на прийняте або прийняті рішення.

Невизначеності не дають змоги точно сформулювати цілі прийняття рішень. Єдиним можливим способом їх подолання є суб'єктивна експертна оцінка.

Моделі поведінки експертів зазвичай ґрунтуються на припущенні, що кожен експерт надає свої оцінки з певними похибками. При цьому оцінки групи експертів розглядаються як сукупність незалежних однаково розподілених випадкових величин, значення яких належать відповідному простору об'єктів

числової або нечислової природи. Оскільки вважається, що кваліфікований експерт частіше обирає рішення, більш або менш адекватне реальності, щільність розподілу випадкових величин в оцінках множини експертів монотонно зменшується зі збільшенням відстані від центра розподілу думок, тобто істинного значення оцінки.

Перевага при цьому надається непараметричним моделям експертних оцінок, оскільки параметричні моделі потребують більш жорстких припущень, перевірити які зазвичай не вдається. Зокрема, під час використання параметричних моделей неможливо обґрунтувати нормальність розподілу оцінок навіть за допомогою ефективних статистичних критеріїв, оскільки кількість експертів, як правило, є обмеженою та часто не перевищує 10–12 осіб.

За такої вибірки здійснити надійну перевірку нормальності розподілу навіть із використанням сучасних статистичних критеріїв є неможливим.

Непараметричні моделі ґрунтуються лише на припущеннях загального характеру щодо можливості ймовірно-статистичного опису поведінки експертів за допомогою неперервних функцій розподілу, параметрами яких слугують нечіткі множини, тобто вектор імовірностей позитивних відповідей. Тому в багатьох практичних ситуаціях такі моделі вважаються адекватними.

Діяльність експертів може бути представлена у вигляді «чорної скриньки», на вхід якої надходить сукупність гетерогенних показників стану міського середовища або можливі прогнозовані зміни цих показників, а на виході формуються функції, що характеризують сценарії розвитку міського середовища. Подальший вибір сценаріїв ґрунтується на преференціях експертів.

Якщо для експертів є складним або лише частково можливим узгоджене врахування всіх критеріїв вибору сценарію, то можна очікувати, що кінцевий результат їхньої роботи буде частково передбачуваним.

Звідси виникає задача моделювання процесів прийняття рішень. Така задача є еквівалентною формалізованому поданню знань експерта з використанням спеціалізованих обчислювальних інструментів.

Вибір рішення полягає у формуванні робочих гіпотез, виборі найкращої гіпотези та визначенні послідовності дій для реалізації рішення відповідно до

обраної гіпотези. Концептуальну схему процесу прийняття рішень з використанням індикатора оцінювання метаболізму міського середовища наведено на рис. 3.4.

Загальну концептуальну схему подано у вигляді орієнтованого графа $G(H, \omega)$, де H — множина елементів прийняття рішень, а ω — множина відповідних відображень: $\omega: H_i \rightarrow H_j, i, j = 1, 2, \dots, i \neq j$.

Зміст основних етапів прийняття містобудівних рішень пояснюється у таблиці 3.2.

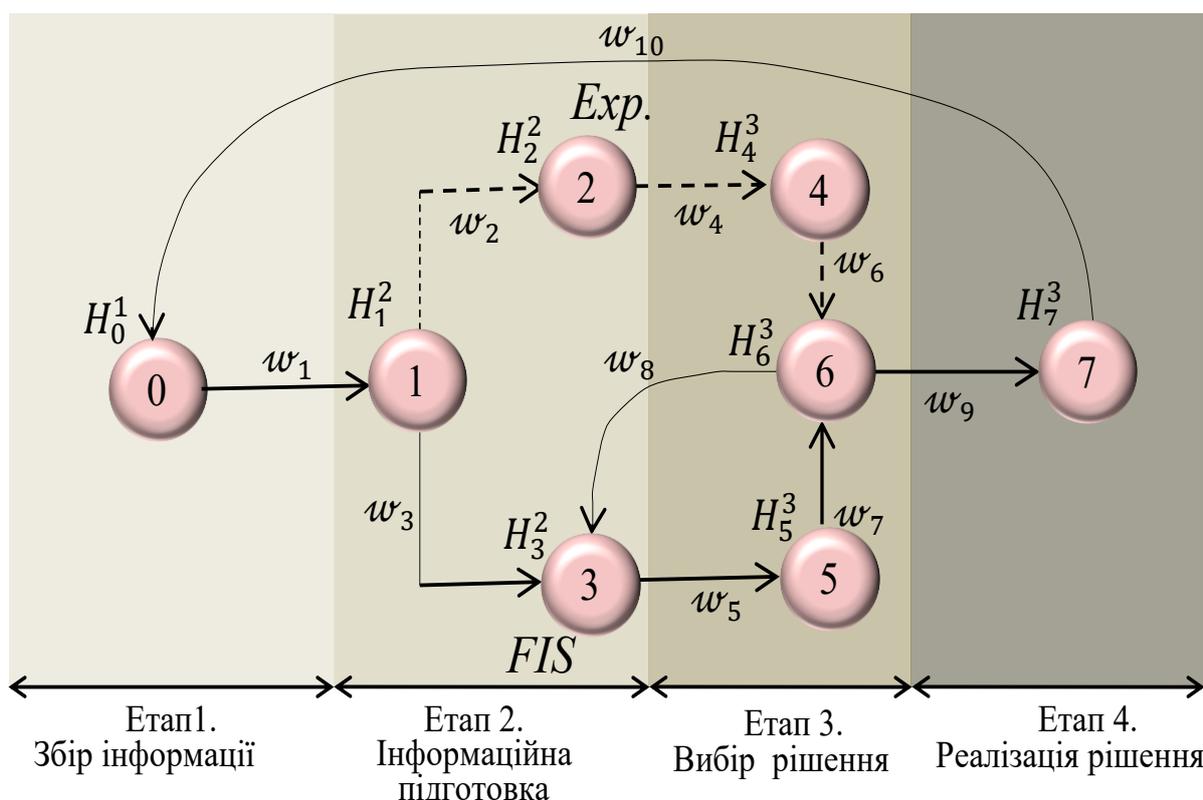


Рис.3.4. Концептуальна модель процесу прийняття рішення експертами

Таблиця 3.2

Зміст основних етапів прийняття рішень

Етап прийняття рішення	Формальне подання	Зміст етапу
1	2	3
Етап1. Збір інформації	$\omega_1: H_0^1 \rightarrow H_1^2$	Збір інформації, та інформаційна підготовка рішення

Етап 2. Інформаційна підготовка	$\omega_2: H_1^2 \rightarrow H_2^2$	Генерація робочої гіпотези сценарія експертами
	$\omega_3: H_1^2 \rightarrow H_3^2$	Генерація робочої гіпотези сценарія на основі використання нечіткого логічного висновку (НЛВ)
Етап 3. Вибір рішення	$\omega_4: H_2^2 \rightarrow H_4^3$	Оцінювання робочої гіпотези сценарія сформованого експертами
	$\omega_5: H_3^2 \rightarrow H_5^3$	Оцінювання робочої гіпотези сценарія сформованого на основі НЛВ
	$\omega_6: H_4^3 \rightarrow H_6^3$	Оцінка результатів порівняння робочої гіпотези сформованої експертами та гіпотези сформованої НЛВ
	$\omega_7: H_5^3 \rightarrow H_4^3$	
$\omega_8: H_6^3 \rightarrow H_3^2$	Удосконалення робочої гіпотези при виникненні труднощів при прийнятті рішення	
Етап 4. Реалізація рішення	$\omega_9: H_6^3 \rightarrow H_7^3$	В умовах узгодження робочої гіпотези сценарію – реалізація рішення та перехід до вирішення нового завдання
	$\omega_{10}: H_7^3 \rightarrow H_0^1$	

Якщо індикатор оцінювання ефективності метаболізму забезпечує ранжування сценаріїв сталого розвитку міського середовища, то такий індикатор може бути інтерпретований як інструмент представлення знань експерта.

Така точка зору на індикатор оцінювання ефективності МС дає змогу зробити кілька висновків.

По-перше, індикатор інтегрує гетерогенні показники, що характеризують стійкість МС та продуктивність його підсистем, а саме:

- економічні показники розвитку міста;
- нормативні вимоги, що стосуються екологічної політики;
- соціальні показники, пов'язані з якістю життя з точки зору людини.

Всі показники зважуються та порівнюються з позицій балансу «витрати-вигоди». З цієї причини індикатор не є об'єктивною оцінкою стану й функціонування міського середовища, а виступає інструментом, який інкапсулюється в нечіткій системі логічного виведення та має приписовий характер для осіб, що приймають рішення.

По-друге, індикатор ефективності метаболізму міського середовища завжди відображає певну точку зору експертів, які вносять суб'єктивність у визначення вхідних параметрів. Унаслідок цього вся конструкція індикатора має відкритий характер і може бути постійно вдосконалена шляхом упровадження нових знань і нормативних вимог.

3.4. Результати інтелектуального оцінювання сталого розвитку міського середовища (на прикладі міст Одеса та Кривий Ріг)

Для апробації запропонованої інтелектуальної технології оцінювання ефективності МС на основі енергетичних потоків було обрано два міста — Одесу та Кривий Ріг. Надзвичайно різні за розмірами та чисельністю населення, ці міста були вибрані з огляду на їхню специфіку: Одеса є яскравим прикладом туристичного прибережного міста, тоді як Кривий Ріг репрезентує типовий постіндустріальний центр зі складною екологічною ситуацією. Надійність і достовірність отриманих інтегральних оцінок сталого розвитку міст Одеси та Кривого Рогу підтверджуються подібними показниками сталого розвитку для міст Барселона та Лугано.

Для підготовки вихідних даних було використано можливості геоінформаційних систем (ГІС) з метою формування геопросторових моделей було використано 37 базових показників, які характеризують метаболізм кожної з трьох підсистем міського середовища міст Кривий Ріг та

Одеса. Базовим компонентом ефективності МС є просторові дані, які подано в цифровій формі і такі, що містять інформацію про їхні непросторові властивості. Інтелектуальну технологію реалізовано в програмному середовищі MatLab (The MathWorks Inc.).

На рис.3.5 - 3.6 показано зміну показника ефективності МС залежно від змін частки безвуглецевого транспорту та середнього пробігу транспортних засобів у міському циклі для міст Одеса та Кривий Ріг. Отримані поверхні можна інтерпретувати як ландшафт ефективності для сценарію, який передбачає зміну лише двох з розглянутих вхідних змінних.

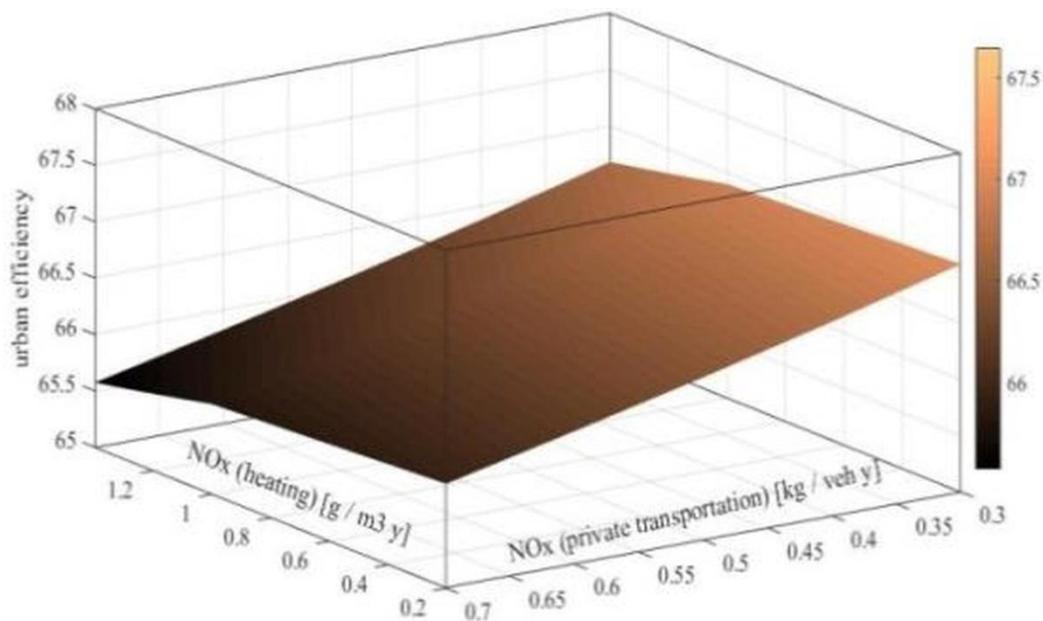


Рис.3.5 Зміна показника ефективності МС залежно від змін частки безвуглецевого транспорту та середнього пробігу транспортних засобів в міському циклі для міста Кривий Ріг.

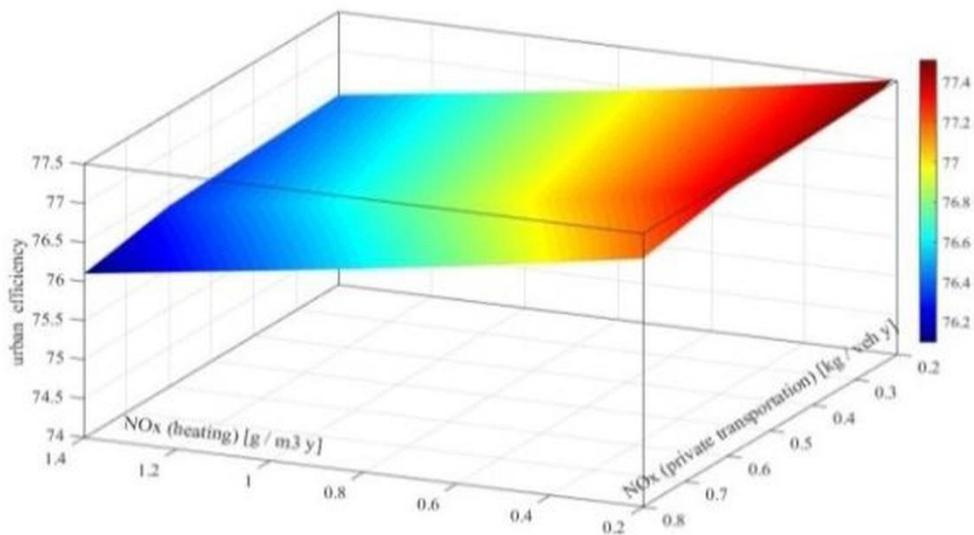


Рис.3.6. Зміна показника ефективності МС залежно від змін частки безвуглецевого транспорту та середнього пробігу транспортних засобів в міському циклі для міста Одеса.

На рисунку рис. 3.7 подано порівняльну радарну діаграму оцінки можливостей підсистем міського розвитку для міст Одеса, Кривий Ріг, Лугано та Барселона. Діаграма відображає сім інтегральних показників, що характеризують реальні та втрачені можливості транспортної, економічної та соціально-економічної підсистем МС.

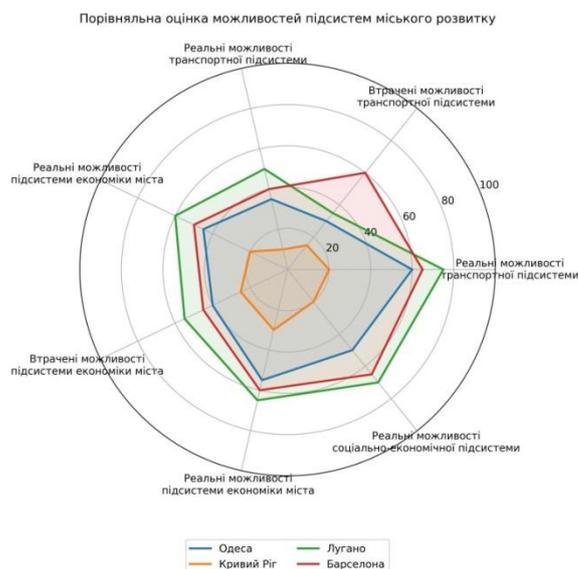


Рис. 3.7. Значення проміжних показників ефективності підсистем МС для міст Одеса та Кривий Ріг у порівнянні з містами Лугано та Барселона.

Аналіз діаграми свідчить, що міста Лугано та Барселона демонструють вищі значення реальних можливостей за більшістю підсистем, що відповідає їх

високому рівню сталого розвитку. Особливо помітною є перевага за показниками реальних можливостей транспортної та соціально-економічної підсистем, що відображає ефективну організацію міського простору та транспортної інфраструктури.

Місто Одеса займає проміжне положення, демонструючи відносно високі значення реальних можливостей транспортної та економічної підсистем за одночасної наявності помірних втрачених можливостей, що свідчить про наявність резервів для підвищення ефективності міського розвитку.

Для міста Кривий Ріг характерні найнижчі значення реальних можливостей і відносно високі втрачені можливості, особливо в межах економічної та транспортної підсистем, що зумовлено його постіндустріальною спеціалізацією та складною екологічною ситуацією.

Загалом діаграма наочно відображає **диференціацію рівнів розвитку міських підсистем** та дозволяє виявити **сильні сторони й проблемні зони** кожного з досліджуваних міст, що є основою для формування управлінських рішень у сфері сталого міського розвитку.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розв'язано актуальне науково-прикладне завдання, що полягає у **розробці та апробації інтелектуальної системи оцінювання сталого розвитку міського середовища** на основі аналізу енергетичних, матеріальних та інформаційних потоків із використанням даних геоінформаційного моніторингу та методів штучного інтелекту.

У процесі виконання роботи отримано такі основні результати та висновки:

1. Проаналізовано теоретичні засади сталого розвитку міського середовища, у межах яких місто обґрунтовано розглянуто як складну відкриту кіберфізичну систему. Показано, що ефективність сталого розвитку визначається узгодженістю економічних, соціальних та екологічних процесів, які реалізуються через систему матеріально-енергетичних та інформаційних потоків.

2. Обґрунтовано роль геоінформаційного моніторингу як інформаційної основи управління сталим розвитком міських територій. Встановлено, що ГІС забезпечують інтеграцію різнорідних просторово-часових даних та створюють умови для комплексного аналізу функціонування міського середовища й підтримки управлінських рішень.

3. Сформовано систему експертно-значущих індикаторів, які характеризують енергетичні, матеріальні та інформаційні потоки основних підсистем міського середовища (містоутворююча база, транспортна та соціально-економічна підсистеми). Запропоновано їх групування за функціональними блоками, що забезпечує комплексність та узгодженість оцінювання.

4. Розроблено методику оцінювання ефективності міського середовища на основі системного підходу та моделі «чорної скриньки», що дозволяє абстрагуватися від внутрішньої структури підсистем і зосередитися на балансі потоків «витрати–результат». Показано доцільність використання когнітивних карт для формалізації слабоструктурованих причинно-наслідкових зв'язків між індикаторами.

5. Запропоновано структуру просторової об'єктно-реляційної бази даних, яка забезпечує зберігання, формалізацію та обробку знань для когнітивного та нечіткого моделювання. База даних охоплює лінгвістичні змінні, терми, функції належності, нечіткі правила, матрицю знань і механізми логічного виводу, що забезпечує повний цикл інтелектуального оцінювання.

6. Розроблено алгоритм оцінювання ефективності міського середовища на основі нечіткої логіки та алгоритму логічного висновку Сугено. Показано, що використання лінійних моделей у якості вихідних змінних продукційних правил дозволяє враховувати компроміси між різними матеріально-енергетичними потоками та нормативні обмеження екологічного, соціального й економічного характеру.

7. Реалізовано інтелектуальну технологію оцінювання сталого розвитку міського середовища в програмному середовищі MatLab із використанням даних геоінформаційного моніторингу. Запропонована технологія охоплює етапи моніторингу, оцінювання, прийняття рішень і регулювання міського розвитку.

8. Проведено апробацію запропонованої технології на прикладі міст Одеса та Кривий Ріг. Отримані інтегральні оцінки ефективності міського середовища та ландшафти ефективності за сценаріями розвитку підтвердили чутливість моделі до змін ключових параметрів транспортної та соціально-економічної підсистем. Порівняння з містами Лугано та Барселона підтвердило достовірність і адекватність отриманих результатів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Batty M. The New Science of Cities. Cambridge : MIT Press, 2013. 520 p.
2. Newman P., Kenworthy J. Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence. Washington : Island Press, 1999. 442 p.
3. Kennedy C., Cuddihy J., Engel-Yan J. The changing metabolism of cities // Journal of Industrial Ecology. 2007. Vol. 11, No. 2. P. 43–59.
4. Wolman A. The metabolism of cities // Scientific American. 1965. Vol. 213, No. 3. P. 179–190.
5. Girardet H. Cities, People, Planet: Urban Development and Climate Change. Chichester : Wiley, 2008. 296 p.
6. United Nations. World Urbanization Prospects. New York : UN DESA, 2019. 126 p.
7. United Nations. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. New York : UN, 2015. 41 p.
8. European Commission. INSPIRE Data Specification. Brussels : EC, 2016. 198 p.
9. OECD. Green Growth in Cities. Paris : OECD Publishing, 2013. 156 p.
10. Angelidou M. Smart cities: A conjuncture of four forces // Cities. 2015. Vol. 47. P. 95–106.
11. Zadeh L. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8, No. 3. P. 338–353.
12. Zadeh L. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning // Information Sciences. 1975. Vol. 8. P. 199–249.
13. Mamdani E. Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis // IEEE Transactions on Computers. 1977. Vol. C-26, No. 12. P. 1182–1191.
14. Sugeno M. Industrial Applications of Fuzzy Control. Amsterdam : Elsevier, 1985. 336 p.
15. Ross T. Fuzzy Logic with Engineering Applications. 3rd ed. Chichester : Wiley, 2010. 585 p.
16. Klir G., Yuan B. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications. New Jersey : Prentice Hall, 1995. 574 p.

17. Pedrycz W. Fuzzy Modelling: Paradigms and Practice. New York : Springer, 1993. 286 p.
18. Dubois D., Prade H. Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications. New York : Academic Press, 1980. 393 p.
19. Zimmermann H.-J. Fuzzy Set Theory and Its Applications. 4th ed. Boston : Springer, 2001. 514 p.
20. Kosko B. Neural Networks and Fuzzy Systems. Englewood Cliffs : Prentice Hall, 1992. 449 p.
21. Longley P. et al. Geographic Information Systems and Science. 4th ed. Chichester : Wiley, 2015. 560 p.
22. Burrough P., McDonnell R. Principles of Geographical Information Systems. Oxford : Oxford University Press, 1998. 333 p.
23. Goodchild M. GIS and spatial analysis // Geographical Information Science. 2000. Vol. 14, No. 4. P. 305–319.
24. De Smith M., Goodchild M., Longley P. Geospatial Analysis. 6th ed. London : Troubador Publishing, 2018. 800 p.
25. ESRI. ArcGIS Desktop Documentation. Redlands : ESRI Press, 2017.
26. Tomlin C. Geographic Information Systems and Cartographic Modeling. Englewood Cliffs : Prentice Hall, 1990. 249 p.
27. Batty M. Spatial entropy // Geographical Analysis. 1974. Vol. 6, No. 1. P. 1–31.
28. Peuquet D. Representations of Space and Time. New York : Guilford Press, 2002. 384 p.
29. Cheng J. GIS-based urban sustainability indicators // Environmental Modelling & Software. 2011. Vol. 26. P. 722–735.
30. Huang S. Urban indicators and sustainability // Landscape and Urban Planning. 1998. Vol. 42. P. 229–242.
31. Forrester J. Urban Dynamics. Cambridge : MIT Press, 1969. 285 p.
32. Sterman J. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling. New York : McGraw-Hill, 2000. 982 p.
33. Voinov A. Systems Science and Modeling for Ecological Economics. London : Academic Press, 2008. 400 p.

34. Funtowicz S., Ravetz J. Uncertainty and Quality in Science for Policy. Dordrecht : Kluwer, 1990. 229 p.
35. Saaty T. The Analytic Hierarchy Process. New York : McGraw-Hill, 1980. 287 p.
36. Roy B. Multicriteria Methodology for Decision Aiding. Dordrecht : Springer, 1996. 292 p.
37. Keeney R., Raiffa H. Decisions with Multiple Objectives. New York : Wiley, 1976. 569 p.
38. Belton V., Stewart T. Multiple Criteria Decision Analysis. Boston : Springer, 2002. 372 p.
39. Zeleny M. Multiple Criteria Decision Making. New York : McGraw-Hill, 1982. 563 p.
40. Kahneman D. Thinking, Fast and Slow. New York : Farrar, Straus and Giroux, 2011. 499 p.
41. Качинський А. Б. Стійкий розвиток: методологія аналізу. Київ : НАДУ, 2011. 312 с.
42. Данилишин Б. М. Екологічна політика України. Київ : Наук. думка, 2008. 364 с.
43. Герасимчук З. В. Сталий розвиток регіонів України. Луцьк : Надстир'я, 2010. 280 с.
44. Мельник Л. Г. Основи сталого розвитку. Суми : Університетська книга, 2006. 367 с.
45. Ляшенко О. М. Геоінформаційні системи в екології. Київ : ВПЦ, 2014. 240 с.
46. Трофимчук О. М. Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень. Київ, 2012. 290 с.
47. Шевченко О. Г. Моделювання міських систем. Харків : ХНУ, 2015. 256 с.
48. Кузьмін О. Є. Управління розвитком міських територій. Львів : ЛНУ, 2013. 312 с.
49. Стратегія сталого розвитку України до 2030 року : затв. Указом Президента України. Київ, 2017.
50. Державна служба статистики України. Офіційні статистичні дані. Київ, 2022.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

Мета роботи та актуальність

Мета роботи - розробка та дослідження інтелектуальної системи управління сталим розвитком міського середовища на основі нейронних мереж з використанням даних геоінформаційного моніторингу.

Об'єкт дослідження - процеси функціонування та розвитку міського середовища.

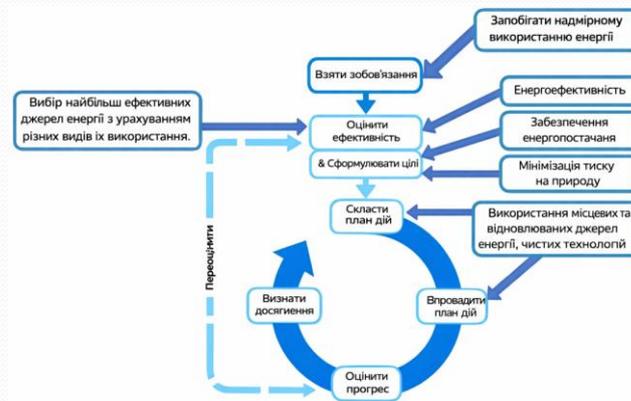
Предмет дослідження - методи, моделі та алгоритми інтелектуального управління сталим розвитком міського середовища з використанням нейронних мереж.

Актуальність теми - зумовлена об'єктивною потребою у створенні методів управління міським середовищем в умовах реалізації принципів сталого розвитку, а також необхідністю підвищення енергоефективності, зниження антропогенного навантаження на довкілля та адаптації міст до кліматичних змін.

Завдання проєкту

1. Проаналізувати теоретичні засади сталого розвитку міського середовища.
2. Обґрунтувати роль геоінформаційного моніторингу, як інформаційної основи управління сталим розвитком міських територій.
3. Сформувати систему експертно-значущих індикаторів, які характеризують енергетичні, матеріальні та інформаційні потоки основних підсистем міського середовища.
4. Розробити методiku оцінювання ефективності міського середовища, на основі системного підходу та моделі «чорної скриньки».
5. Запропонувати структуру просторової об'єктно-реляційної бази даних.
6. Розробити алгоритм оцінювання ефективності міського середовища, на основі нечіткої логіки та алгоритму логічного висновку Сугено.
7. Реалізувати інтелектуальну технологію оцінювання сталого розвитку міського середовища в програмному середовищі MatLab.
8. Провести апробацію запропонованої технології на прикладі міст Одеса та Кривий Ріг.

Енергетичні, матеріальні та інформаційні потоки основних підсистем міського середовища



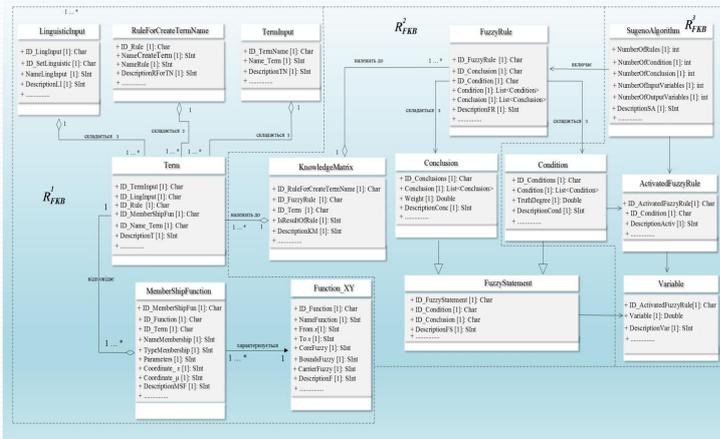
Логічна схема зв'язку управління енергетичними та інформаційними потоками зі сталим розвитком міст

Методика оцінювання ефективності міського середовища, на основі системного підходу та моделі «чорної скриньки»



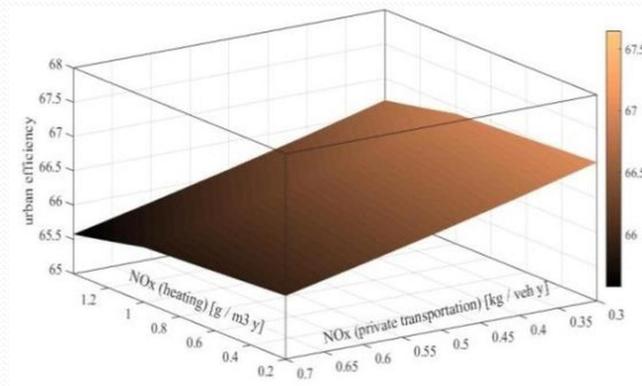
Модель системи "чорної скрині" з механізмами входів, виходів і зворотного зв'язку, яка зосереджується на балансі речовинно-енергетичних потоків.

Структура просторової об'єктно-реляційної бази даних



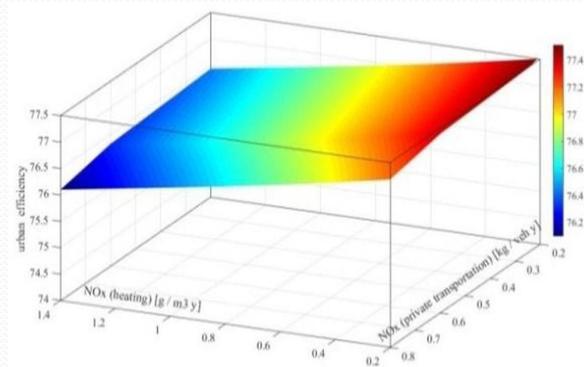
Логічна структура об'єктно-реляційної бази даниху вигляді діаграми наборів класів в методології UML

Інтелектуальна технологія оцінювання сталого розвитку міського середовища в програмному середовищі MatLab



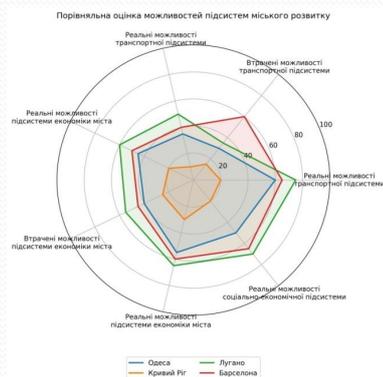
Зміна показника ефективності МС залежно від змін частки безвуглецевого транспорту та середнього пробігу транспортних засобів у міському циклі для міста Кривий Ріг.

Інтелектуальна технологія оцінювання сталого розвитку міського середовища в програмному середовищі MatLab



Зміна показника ефективності МС залежно від змін частки безвуглецевого транспорту та середнього пробігу транспортних засобів у міському циклі для міста Одеса.

Інтелектуальна технологія оцінювання сталого розвитку міського середовища та апробація запропонованої технології на прикладі міст Одеса та Кривий Ріг.



Значення проміжних показників ефективності підсистем МС для міст Одеса та Кривий Ріг у порівнянні з містами Лугано та Барселона.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розв'язано актуальне науково-прикладне завдання, що полягає у розробці та апробації інтелектуальної системи оцінювання сталого розвитку міського середовища на основі аналізу енергетичних, матеріальних та інформаційних потоків із використанням даних геоінформаційного моніторингу та методів штучного інтелекту.

У процесі виконання роботи отримано такі основні результати та висновки:

1. Проаналізовано теоретичні засади сталого розвитку міського середовища.
2. Обґрунтовано роль геоінформаційного моніторингу, як інформаційної основи управління сталим розвитком міських територій.
3. Сформовано систему експертно-значущих індикаторів, які характеризують енергетичні, матеріальні та інформаційні потоки основних підсистем міського середовища.
4. Розроблено методику оцінювання ефективності міського середовища, на основі системного підходу та моделі «чорної скриньки».
5. Запропоновано структуру просторової об'єктно-реляційної бази даних.
6. Розроблено алгоритм оцінювання ефективності міського середовища на основі нечіткої логіки та алгоритму логічного висновку Сугено.
7. Реалізовано інтелектуальну технологію оцінювання сталого розвитку міського середовища в програмному середовищі MatLab.
8. Проведено апробацію запропонованої технології на прикладі міст Одеса та Кривий Ріг.