

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Система прийняття рішень для управління сталим розвитком
транспортної системи міста»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 124 Системний аналіз
освітньо-професійної програми «Інтелектуальні системи управління»

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

_____ Олександр ДОВГАЛЕНКО
(підпис)

Виконав: здобувач вищої освіти групи САДМ-61

_____ Олександр ДОВГАЛЕНКО

Керівник: _____ Віталій СВАТКО
к.т.н., доцент

Рецензент: _____
науковий ступінь, Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
вчене звання

Київ 2024

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій

Кафедра інформаційних систем та мереж

Ступінь вищої освіти магістр

Спеціальність 124 Системний аналіз

Освітньо-професійна програма Інтелектуальні системи управління

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедру ІСТ

Каміла СТОРЧАК

«_____» ____20__р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Довгаленко Олександр Костянтинович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Система прийняття рішень для управління міським транспортом

керівник кваліфікаційної роботи: Віталій СВАТКО к.т.н, доцент кафедри ТЦР,

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій

від «_____» _____20__р. № _____

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «_____» _____20__р.

3. Вхідні дані до кваліфікаційної роботи: нечітка логіка, методологія оцінювання енергетичних потоків з використанням нечіткої логіки та матриць знань, дані про обсяги викидів CO₂, NO_x і інші екологічні показники, програмні інструменти для моделювання енергетичних процесів в транспортній підсистемі.

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

1. Розробка методології оцінювання ефективності міської транспортної підсистеми.

2. Оцінка впливу транспортної системи на екологічну ефективність міського середовища.

3. Розробка рекомендацій щодо впровадження інноваційних рішень для управління міським транспортом.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: *презентація*

6. Дата видачі завдання «_____» _____20__р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Визначення теми та завдань		
2	Літературний огляд		
3	Підготування даних та матеріалів		
4	Написання основної частини диплому		
5	Висновки, презентація		
6	Перевірка роботи на анти плагіат		
7	Передзахист		
8	Захист роботи		

Здобувач(ка) вищої освіти

(підпис)

Олександр ДОВГАЛЕНКО

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник
кваліфікаційної роботи

(підпис)

Віталій СВАТКО

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра:
111 стор., 13 рис., 4 табл., 58 джерел.

Мета роботи – підвищення ефективності функціонування транспортної підсистеми міського середовища шляхом застосування нечіткої логіки для оцінки енергетичних потоків.

Об'єкт дослідження – транспортна підсистема міського середовища.

Предмет дослідження – методики, моделі та інструменти оцінювання ефективності транспортної підсистеми на основі аналізу енергетичних потоків.

Короткий зміст роботи: У роботі розглянуто підходи до аналізу транспортних потоків та їх енергетичної ефективності. Розроблено методику оцінювання потоку неперетворюваної енергії з використанням нечіткої логіки. Методика базується на матриці знань та враховує обсяги викидів CO₂ і NO_x, а також інші ключові параметри транспортної системи. Практична реалізація включає алгоритм розрахунку та інструмент моделювання, що дозволяє зменшити похибку оцінки енергетичних втрат і оптимізувати витрати енергії в транспортній системі.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ТРАНСПОРТНА ПІДСИСТЕМА, ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОТОКИ, НЕЧІТКА ЛОГІКА, МАТРИЦЯ ЗНАНЬ, ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ, ВИКИДИ CO₂, ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА, ОПТИМІЗАЦІЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ.

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work:

111 pages, 13 pictures, 4 table, 58 sources.

The purpose of the work to improve the efficiency of the transport subsystem of the urban environment by applying fuzzy logic to assess energy flows.

Object of research is the transport subsystem of the urban environment.

Subject of research – methods, models and tools for assessing the efficiency of the transport subsystem based on the analysis of energy flows.

Summary of the work: The paper considers approaches to the analysis of traffic flows and their energy efficiency. A methodology for assessing the flow of non-transformable energy using fuzzy logic is developed. The methodology is based on a knowledge matrix and takes into account CO₂ and NO_x emissions, as well as other key parameters of the transport system. The practical implementation includes a calculation algorithm and a modelling tool that reduces the error in estimating energy losses and optimises energy consumption in the transport system.

KEYWORDS: TRANSPORT SUBSYSTEM, ENERGY FLOWS, FUZZY LOGIC, KNOWLEDGE MATRIX, PERFORMANCE ASSESSMENT, CO₂ EMISSIONS, ENVIRONMENTAL SAFETY, OPTIMISATION OF TRANSPORT FLOWS.

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій

**ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на здобуття освітнього ступеня магістра**

Направляється здобувач(ка) Довгаленко О. К. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)
за спеціальністю 124 Системний аналіз
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Інтелектуальні системи управління
(назва)
на тему: «Система прийняття рішень для управління міським транспортом».

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

Директор ННІТ

(підпис)

Катерина НЕСТЕРЕНКО

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач(ка) Здобувач Олександр ДОВГАЛЕНКО виконав роботу на високому рівні. Магістерська робота "Система прийняття рішень для управління міським транспортом" має практичну значущість, оскільки пропонує сучасні підходи до оптимізації транспортних систем у контексті сталого розвитку. Здобувач продемонстрував високий рівень теоретичних знань, вміння працювати з математичними моделями та застосовувати методи нечіткої логіки для вирішення складних задач. Робота повністю відповідає поставленим завданням.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу здобувача(ки) Олександра Довгаленка на оцінку «_____» та присвоїти йому(їй) кваліфікацію магістр з системного аналізу.

Керівник кваліфікаційної роботи _____

(підпис)

Віталій СВАТКО

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

«_____» ____20____року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач(ка) Довгаленко О. К. допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедру ІСТ

(назва)

(підпис)

Каміла СТОРЧАК

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА
на кваліфікаційну роботу
на здобуття освітнього ступеня магістра

здобувача(ки) вищої освіти Довгаленко Олександр Костянтинович
(прізвище, ім'я, по батькові)

на тему «Система прийняття рішень для управління міським транспортом»

Актуальність.

Магістерська робота на тему "Система прийняття рішень для управління міським транспортом" виконана відповідно до завдання і присвячена актуальній темі сталого розвитку міської транспортної системи. У роботі розглянуто теоретичні основи, сучасні підходи до управління транспортом та впровадження інтелектуальних транспортних систем.

Позитивні сторони.

1. Детальний аналіз методів оптимізації транспортних потоків та їх впливу на міське середовище.
2. Розробка системи індикаторів, які дозволяють оцінити ефективність міської транспортної системи.
3. Використання сучасних підходів, таких як нечітка логіка, для моделювання сценаріїв управління.

Недоліки.

1. Недостатньо практичних прикладів застосування розроблених моделей в реальних умовах українських міст.
2. В роботі присутні незначні стилістичні недоліки.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку кваліфікаційної роботи магістерської

Висновок: *кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра заслуговує оцінку "_____", а здобувач(ка) Олександр ДОВГАЛЕНКО заслуговує присвоєння кваліфікації магістр з системного аналізу*

Рецензент:

науковий ступінь, вчене звання

підпис

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	10
ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ СТАЛОГО РОЗВИТКУ І УПРАВЛІННЯ МІСЬКОЮ ТРАНСПОРТНОЮ ПІДСИСТЕМОЮ	13
1.1 Теоретичні засади сталого розвитку та управління міською транспортною підсистемою	13
1.2 Транспортна підсистема міста як об'єкт дослідження	16
1.3 Підходи та альтернативи сталого розвитку транспортної підсистеми	21
1.4 Системи підтримки прийняття рішень (СППР) в управлінні міською транспортною підсистемою	24
1.5 Метаболізм та енергетичні потоки в транспортній підсистемі міста..	30
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ І УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНОЮ ПІДСИСТЕМОЮ В КОНТЕКСТІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА.....	38
2.1 Методологічний підхід та структура індикаторів для оцінювання міського середовища.....	38
2.2 Методики оцінювання ефективності міського середовища за допомогою нечіткої логіки.....	52
2.3 Ієрархічні системи та алгоритми нечіткого логічного виведення	68
2.4 Математична модель оцінювання ефективності метаболізму міського середовища на основі підходу ТСК.....	77
РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ВПЛИВУ МІСЬКОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА	86

3.1. Лінгвістичні змінні які характеризують повну, корисну та втрачену потужність транспортної підсистеми міського середовища	86
3.2 Оцінка впливу викидів NO _x від опалення та приватного транспорту на ефективність міського середовища	91
3.3 Аналіз впливу викидів CO ₂ від приватного та громадського транспорту на ефективність міського середовища	93
3.4 Вплив частки відновлюваної енергії та загального енергоспоживання на ефективність міського середовища	95
ВИСНОВКИ.....	98
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	100
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ	106

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

СППР - Система підтримки прийняття рішень

ДСТУ - Державний стандарт України

МС - Міська система

НБЗ - Нечітка базова змінна

ІНБЗ - Ієрархічна нечітка базова змінна

НЛВ - Нечітка логіка висновків

ММС - Математична модель системи

ВДЕ - Відновлювані джерела енергії

ВСТУП

Сталий розвиток міст є одним із найважливіших викликів сучасності, що обумовлено стрімкою урбанізацією, обмеженістю природних ресурсів та необхідністю мінімізації впливу людської діяльності на довкілля. Особливу роль у цьому процесі відіграє міська транспортна система, яка є невід'ємною складовою інфраструктури міст та одним із найбільших споживачів енергії й джерел забруднення. Ефективне управління транспортною системою має вирішальне значення для забезпечення балансу між економічними, соціальними та екологічними аспектами розвитку міського середовища.

Наукові дослідження вказують, що транспортна підсистема є основним джерелом викидів вуглекислого газу (CO_2) та оксидів азоту (NO_x), які негативно впливають на якість повітря, здоров'я населення та загальну ефективність міського середовища. Крім того, зростання енергоспоживання в містах і недостатнє використання відновлюваних джерел енергії створюють додатковий тиск на природні ресурси та екосистеми.

Дослідженнями в галузі сталого розвитку міської транспортної системи займалися такі відомі вчені, як Джей Форрестер, який розробив концепцію системного підходу до управління міськими процесами, та Пітер Тоджер, який акцентував увагу на оптимізації транспортних потоків. Джон Тібо та його колеги досліджували вплив транспортної інфраструктури на соціально-економічний розвиток міст. Серед українських дослідників значний внесок зробили В. Барановський, Л. Застенна, С. Ковальчук та О. Ткаченко, які акцентували увагу на інтеграції інноваційних транспортних технологій в умовах урбанізації.

Актуальність даного дослідження обумовлена необхідністю інтеграції сучасних підходів до управління міською транспортною системою, які дозволяють не лише знизити негативний вплив транспорту на довкілля, але й підвищити загальну ефективність міського середовища. Особливу увагу

заслужують питання зменшення викидів шкідливих речовин, оптимізації транспортних потоків та впровадження альтернативних джерел енергії.

Метою дипломної роботи є розробка науково-методичних підходів до оцінювання ефективності та управління міською транспортною системою в контексті сталого розвитку.

Для досягнення цієї мети було поставлено такі завдання:

Вивчити вплив викидів CO₂ та NO_x від різних джерел транспорту на ефективність міського середовища;

Дослідити взаємозв'язок між загальним енергоспоживанням, часткою відновлюваних джерел енергії та екологічною стійкістю міст;

Розробити рекомендації для оптимізації міської транспортної системи з урахуванням сучасних технологій та принципів сталого розвитку.

Об'єктом дослідження є міська транспортна підсистема як складова частина міського середовища. Предметом дослідження є методи та моделі оцінювання ефективності транспортної системи з точки зору екологічної, енергетичної та соціальної складових.

Практична значущість роботи полягає в можливості використання результатів дослідження для розробки стратегій розвитку міської транспортної системи, які спрямовані на підвищення якості життя населення та забезпечення екологічної безпеки.

Таким чином, дипломна робота є спробою комплексно дослідити ключові аспекти впливу транспортної системи на ефективність міського середовища та надати рекомендації для сталого розвитку міських територій.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ СТАЛОГО РОЗВИТКУ І УПРАВЛІННЯ МІСЬКОЮ ТРАНСПОРТНОЮ ПІДСИСТЕМОЮ

1.1 Теоретичні засади сталого розвитку та управління міською транспортною підсистемою

Поняття сталого розвитку міст виникло як відповідь на глобальні виклики, такі як зміна клімату, урбанізація та обмеженість природних ресурсів. Уперше концепція сталого розвитку була окреслена у звіті Брундтландської комісії ООН під назвою "Наше спільне майбутнє" (1987), де сталий розвиток визначався як "розвиток, що задовольняє потреби сьогодення без шкоди для можливостей майбутніх поколінь задовольняти свої власні потреби". У міському середовищі сталий розвиток фокусується на досягненні балансу між економічним зростанням, соціальною справедливістю та захистом довкілля. Це означає, що міста мають розвиватися так, щоб підвищувати якість життя своїх мешканців, покращуючи інфраструктуру та доступ до ресурсів, водночас знижуючи вплив на природу та мінімізуючи забруднення. У доповіді ООН "Цілі сталого розвитку" (Sustainable Development Goals, SDGs), затвердженій 2015 року, цьому підходу приділяється значна увага, особливо в рамках Цілі 11, що спрямована на "стійкі міста і спільноти".

Місто, як складна система, зазнає значного навантаження, пов'язаного з щільністю населення та інтенсивним використанням ресурсів. Згідно з дослідженнями Світового банку, міста, займаючи менш як 2% поверхні Землі, споживають понад 75% світових природних ресурсів. Це підкреслює підкреслюваність впровадження принципів сталого розвитку в управління містами. Наприклад, проєктування та розвиток інфраструктури мають враховувати принципи екологічної стійкості, такі як зниження споживання енергії та води, переробка відходів, створення зелених зон і підтримка екологічно чистого транспорту.

Крім того, згідно зі звітами UN Habitat, сталий розвиток міського середовища передбачає забезпечення інклюзивності та доступності. У стійких містах мають створюватися умови, які дадуть змогу всім жителям, незалежно від їхнього соціального та економічного статусу, брати участь у житті міста і користуватися його ресурсами. Це включає в себе доступне житло, безпечні та екологічні громадські простори, а також зручні транспортні системи, які мінімізують викиди CO₂.

Згідно з публікаціями Єврокомісії, стійкі міста також розглядають питання цифровізації та розумного управління ресурсами як важливу частину сталого розвитку. Застосування технологій дає змогу підвищити ефективність міських систем, як-от транспорт, водопостачання та управління відходами, що сприяє зниженню навантаження на навколишнє середовище і підвищенню якості життя містян.

Міська Транспортна підсистема відіграє ключову роль у забезпеченні сталого розвитку міст, оскільки її якість і організація безпосередньо впливають на екологію, економіку і соціальну структуру міста. У рамках сталого розвитку транспортні системи мають бути спроектовані таким чином, щоб мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище, а також забезпечити доступність, безпеку та ефективність пересування для всіх верств населення.

Однією з основних цілей сталої міської транспортної системи є зниження рівня забруднення навколишнього середовища. Згідно з даними Європейської комісії, транспорт у містах є основним джерелом викидів CO₂ та інших забруднюючих речовин, таких як оксиди азоту та тверді частинки. У відповідь на цю проблему стійкі транспортні системи спрямовані на інтеграцію низьковуглецевих і поновлюваних джерел енергії, а також на скорочення кількості приватних автомобілів на користь громадського транспорту, велосипедів і пішого руху.

Ефективна Транспортна підсистема також сприяє поліпшенню якості життя та економічному розвитку міста. У звіті Світового банку йдеться про те, що висока доступність транспорту дає змогу поліпшити доступ до освіти, робочих місць та інших важливих послуг, що безпосередньо впливає на соціально-економічне благополуччя жителів. Крім того, ефективний транспорт знижує час поїздки і підвищує мобільність городян, що також позитивно впливає на продуктивність і задоволеність населення життям у місті.

Соціальна інклюзивність є ще одним важливим аспектом сталого розвитку транспортної системи. Стійкий міський транспорт має бути доступним для всіх жителів, включно з людьми з обмеженими можливостями, літніми громадянами та незаможними верствами населення. У цьому контексті UN Habitat наголошує на необхідності розроблення транспортної інфраструктури, орієнтованої на всі групи населення, що сприяє соціальній справедливості та зміцненню зв'язків у спільноті.

Крім того, стійкі транспортні системи прагнуть до оптимального використання простору. В умовах щільної забудови міст виділення місць для парковок і автомобільних доріг часто йде на шкоду громадським і зеленим зонам. Стале планування пропонує розвивати такі види транспорту, як громадський транспорт, велосипедні та пішохідні доріжки, що дає змогу зменшити потребу в автомобілі та вивільнити простір для інших потреб суспільства.

Для успішного досягнення цілей сталого розвитку транспортних систем важливу роль відіграють технології та інновації. Європейська комісія та Світовий банк підтримують використання інтелектуальних транспортних систем (ITS), які допомагають оптимізувати управління транспортними потоками, знижувати затори та зменшувати витрати на експлуатацію транспортної мережі. Ці технології сприяють зменшенню забруднення та споживання енергії, а також підвищують надійність і безпеку транспортної системи.

Таким чином, цілі сталого розвитку міської транспортної системи полягають у зниженні негативного екологічного впливу, поліпшенні доступності

та соціальної справедливості, а також підвищенні ефективності використання міського простору. Ці цілі допомагають місту досягти балансу між економічним зростанням, соціальною стабільністю та захистом довкілля.

1.2 Транспортна підсистема міста як об'єкт дослідження

Транспортна підсистема міста є однією з ключових складових міської інфраструктури, що забезпечує пересування людей, товарів і послуг. Ефективна Транспортна підсистема сприяє поліпшенню зв'язності міста, скороченню часу поїздок і підвищенню доступності соціальних та економічних ресурсів. У дослідженнях Світового банку транспорт визначається як основа міської структури, що має значний вплив на економічний розвиток, соціальну взаємодію та екологічну стійкість.

Транспортна підсистема міста включає в себе різні види транспорту - громадський (автобуси, трамваї, метро), особистий (автомобілі, велосипеди), а також інфраструктуру (дороги, мости, зупинки, залізничні станції). Кожен із цих елементів виконує важливі функції, забезпечуючи безперервний рух і взаємозв'язок усіх районів міста. Європейська комісія зазначає, що, окрім фізичної інфраструктури, сучасна Транспортна підсистема містить у собі інтелектуальні транспортні системи (ITS), які допомагають координувати потоки та підвищувати ефективність пересування.

Роль транспортної системи також полягає в забезпеченні доступу до життєво важливих ресурсів, таких як медичні установи, освітні та культурні центри, робочі місця. Доступність і мобільність населення, на думку експертів UN Habitat, безпосередньо пов'язані з якістю транспортної системи. Важливим аспектом транспортної інфраструктури є її здатність інтегрувати різні верстви населення, забезпечуючи рівні умови для пересування незалежно від рівня доходу, віку або фізичних можливостей.

Транспортна підсистема також відіграє значну роль в економічному житті міста. Добре організована транспортна мережа підвищує ефективність бізнесу, оскільки забезпечує надійну логістику для доставки товарів і послуг. У звіті Всесвітнього економічного форуму йдеться про те, що транспорт впливає на конкурентоспроможність міст, оскільки сприяє їхній привабливості для інвесторів і нових бізнесів. Транспортна підсистема також підтримує малий і середній бізнес, надаючи доступ до ринків і клієнтів, що особливо важливо для міст, які прагнуть сталого розвитку.

В екологічному плані Транспортна підсистема має значний вплив на рівень забруднення повітря та шумове забруднення. За даними Європейського агентства з охорони довкілля, транспорт є одним із найбільших джерел викидів вуглекислого газу в містах Європи. Це підкреслює важливість застосування екологічно чистих видів транспорту та оптимізації міських транспортних систем для зниження негативного впливу на навколишнє середовище.

Транспортна підсистема виконує центральну роль у житті міста, забезпечуючи мобільність і доступність, підтримуючи економічний розвиток і покращуючи якість життя городян. Її інтеграція в міську інфраструктуру та ефективне управління сприяють сталому розвитку міських територій.

Транспортна підсистема міста являє собою складну структуру, що складається із взаємопов'язаних елементів, які забезпечують пересування людей, товарів і послуг міськими та приміськими територіями. Структурна схема транспортної системи охоплює три основні рівні: інфраструктуру, транспортні засоби та системи управління. Ці рівні працюють у тісному взаємозв'язку, створюючи цілісну систему, яка підтримує мобільність і доступність у міському середовищі.

Інфраструктурний рівень включає дороги, мости, тунелі, залізничні та трамвайні колії, зупинки громадського транспорту, станції, а також велосипедні та пішохідні доріжки. Ці елементи створюють фізичну основу транспортної системи, якою переміщуються люди і вантажі. Світовий банк зазначає, що

інфраструктура відіграє центральну роль у забезпеченні зв'язності міських районів і доступності послуг.

Рівень транспортних засобів включає різні види транспорту - особисті автомобілі, автобуси, трамваї, метро, велосипеди та інші. Ці транспортні засоби є засобами пересування, а їх різноманітність забезпечує гнучкість транспортної системи. Європейська комісія підкреслює важливість мультимодальної структури транспортної системи, коли різні види транспорту (особистий, громадський та активний) інтегруються для максимальної зручності пересування.

Рівень систем управління та координації охоплює інтелектуальні транспортні системи (ITS), що регулюють дорожній рух, контролюють сигнали світлофорів, системи моніторингу громадського транспорту та аналітики потоків. Ці системи збирають дані про транспортні потоки в реальному часі і допомагають керувати міським рухом, знижуючи затори і забезпечуючи безперебійне пересування транспорту. Згідно з даними UN Habitat, інтелектуальні транспортні системи допомагають підвищувати безпеку дорожнього руху, знижувати час поїздок і мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище.

Взаємодія між рівнями.

Ці три рівні транспортної системи тісно взаємопов'язані, що дозволяє їм функціонувати як єдина структура. Наприклад, інфраструктурні елементи визначають, які транспортні засоби можна використовувати на певних маршрутах (наприклад, для трамвайних колій або велосипедних доріжок), а системи управління допомагають координувати рух транспорту і скорочувати затори. Публікації Європейської комісії підкреслюють важливість координації між рівнями для сталого управління транспортними потоками, оптимізації використання ресурсів і зниження навантаження на дороги.

Приклади структурних схем транспортних систем.

У великих містах структурні схеми транспортних систем часто відображають інтеграцію різних типів транспорту і перехід на екологічно чисті види транспорту. У публікаціях Світового банку та UN Habitat розглядаються приклади структурних схем для таких міст, як Лондон, Париж та Амстердам, де Транспортна підсистема проєктується таким чином, щоб підтримувати мульти-модальні поїздки та стимулювати використання громадського та екологічного транспорту. Це дає змогу знизити викиди, поліпшити доступність і оптимізувати використання міського простору.

Таким чином, структурна схема міської транспортної системи об'єднує інфраструктуру, транспортні засоби та системи управління, формуючи основу для сталого, ефективного та доступного пересування. Ефективне функціонування транспортної системи потребує інтеграції всіх рівнів та їхньої злагодженої роботи для забезпечення сталого розвитку міста.

Транспортна підсистема міста відіграє найважливішу роль у забезпеченні життєдіяльності міського простору, зв'язності його елементів і стійкості міського розвитку. Забезпечуючи мобільність людей і переміщення товарів, транспорт сприяє економічному розвитку, соціальній інтеграції та підтримці повсякденних процесів у міському середовищі.

У контексті міської життєдіяльності Транспортна підсистема є ключовим компонентом міської інфраструктури, впливаючи на доступ до робочих місць, медичних та освітніх закладів, торгових точок і зон відпочинку. За даними Світового банку, доступність різних ресурсів через транспортні мережі впливає на якість життя та можливості для соціального й економічного зростання. Міська Транспортна підсистема, таким чином, визначає ступінь включеності мешканців у міське життя та їхній доступ до послуг, які становлять основу міської життєдіяльності.

Транспортна підсистема також відіграє важливу роль в економічній сфері, забезпечуючи логістику та переміщення товарів і послуг, що підтримує роботу бізнесів і підприємств. Європейська комісія підкреслює, що ефективна

Транспортна підсистема покращує ділове середовище і сприяє підвищенню привабливості міста для інвестицій і туризму. Наприклад, доступність якісного громадського транспорту допомагає скоротити транспортні витрати для бізнесу і поліпшити доступ до ринків, що позитивно позначається на міській економіці.

Соціальний вплив транспортної системи також величезний: вона сприяє інтеграції різних груп населення, надаючи доступ до міських ресурсів незалежно від рівня доходу, віку або фізичних можливостей. У доповідях UN Habitat наголошується, що транспортні системи, які враховують потреби всіх громадян, допомагають створювати інклюзивні міста, де кожен мешканець може брати участь у суспільному житті та отримувати доступ до ключових послуг. Це особливо важливо для малозабезпечених і вразливих груп населення, для яких доступний і надійний громадський транспорт - це ключовий спосіб переміщення містом.

В екологічному плані міська Транспортна підсистема чинить значний вплив на здоров'я городян і якість навколишнього середовища. Згідно з Європейським агентством з охорони довкілля, транспорт є одним із найбільших джерел викидів забруднювальних речовин і парникових газів у містах. Перехід на стійкі види транспорту, як-от громадський транспорт і велоінфраструктура, дає змогу знизити рівень забруднення, поліпшити якість повітря і зробити міське середовище здоровішим і комфортнішим для життя.

Таким чином, Транспортна підсистема міста виконує центральну роль у підтримці життєдіяльності міського простору. Вона не тільки забезпечує доступ до важливих ресурсів і послуг, а й сприяє економічному розвитку, соціальній інтеграції та поліпшенню екологічної ситуації, що в кінцевому підсумку впливає на стійкість і привабливість міста для його жителів і бізнесу.

1.3 Підходи та альтернативи сталого розвитку транспортної підсистеми

Основні підходи до сталого розвитку транспортних систем спрямовані на зниження негативного впливу транспорту на навколишнє середовище, підвищення його ефективності та доступності для населення. Ці підходи допомагають містам досягати цілей сталого розвитку та покращувати якість життя.

1. Розвиток громадського транспорту та мульти-модальних систем

Розвиток і пріоритетне використання громадського транспорту - один із найважливіших підходів до сталого розвитку транспортних систем. Згідно з даними Світового банку, розвинена система громадського транспорту сприяє зниженню викидів забруднювальних речовин і зменшує кількість приватних автомобілів на дорогах, що допомагає мінімізувати затори та скорочує витрати часу на поїздки. Цей підхід включає модернізацію наявних громадських транспортних систем, будівництво нових ліній та інтеграцію різних видів транспорту (автобуси, трамваї, метро) для забезпечення зручних пересадок і створення єдиної транспортної мережі.

2. Заохочення екологічно чистих видів транспорту

Екологічно чисті види транспорту, такі як велосипедний і пішохідний транспорт, відіграють важливу роль у сталому розвитку міст. Організація UN Habitat рекомендує містам розвивати велоінфраструктуру, включно з будівництвом велосипедних доріжок і створенням умов для безпечного пересування пішки. Цей підхід не тільки знижує викиди вуглекислого газу, а й сприяє поліпшенню здоров'я населення, оскільки заохочує активні форми пересування.

3. Впровадження інтелектуальних транспортних систем (ITS)

Інтелектуальні транспортні системи (ITS) використовують технології для підвищення ефективності транспортних потоків і поліпшення безпеки на дорогах. ITS включають системи управління світлофорами, моніторинг руху і прогнозування заторів, що дає змогу оптимізувати транспортні потоки і

знижувати затори. Європейська комісія зазначає, що ITS допомагають скорочувати споживання пального, мінімізувати викиди і покращувати якість життя, оскільки скорочують час, проведений у дорозі.

4. Компактне міське планування та зонування

Компактне планування, спрямоване на створення багатофункціональних районів із доступом до громадського транспорту, допомагає зменшити залежність від автомобілів. Світовий банк підкреслює, що раціональне зонування та розвиток районів з можливістю дістатися пішки до робочих місць, торговельних центрів і зон відпочинку допомагають знизити кількість автопоїздок, що своєю чергою сприяє поліпшенню екологічної ситуації в містах.

5. Перехід на низьковуглецеві та відновлювані джерела енергії

Використання альтернативних джерел енергії, таких як електромобілі, є одним із ключових елементів сталого розвитку транспортних систем. Європейське агентство з охорони довкілля повідомляє, що електрифікація транспорту допомагає знизити викиди парникових газів і шумове забруднення. Перехід на електричні та водневі транспортні засоби допомагає містам мінімізувати вплив на навколишнє середовище, а також знизити залежність від викопного палива.

Ці підходи допомагають створювати транспортні системи, які підтримують сталий розвиток міста, знижують вплив на навколишнє середовище і покращують умови життя для всіх жителів.

У рамках сталого розвитку міських транспортних систем існує кілька альтернативних варіантів, які міста можуть розглядати залежно від своїх економічних можливостей, екологічних цілей і соціальної структури. Ці альтернативні підходи спрямовані на мінімізацію впливу на навколишнє середовище, поліпшення мобільності та доступності для населення, а також створення комфортніших умов життя в містах.

1. електрифікація транспорту

Один з альтернативних варіантів розвитку - це електрифікація транспортних засобів. Електричні автобуси, тролейбуси та легкові електромобілі стають дедалі популярнішими, адже дають змогу значно скоротити викиди вуглекислого газу та інші забруднювальні речовини. Світовий банк зазначає, що електрифікація транспорту - це ефективний захід для міст, які прагнуть до зниження вуглецевого сліду і зменшення залежності від викопних видів палива. Важливою частиною цього варіанту є створення інфраструктури для зарядки електромобілів, а також перехід громадського транспорту на електричні моделі.

2 Інтеграція безпілотного та автономного транспорту

Автономні транспортні засоби можуть стати важливою альтернативою традиційному транспорту. Автономні автобуси і таксі здатні знизити кількість автомобілів на дорогах, оптимізувати маршрути і скоротити час у дорозі, що позитивно позначається на транспортній ситуації в місті. Згідно з Європейською комісією, інтеграція автономного транспорту може знизити затори, поліпшити безпеку і зменшити кількість аварій, а також знизити викиди за рахунок більш плавного і передбачуваного руху транспорту. Цей підхід вимагає значних інвестицій у технології та правові зміни, проте потенціал його використання для сталого розвитку високий.

3. Розвиток мікромобільності

Мікромобільність, що включає електросамокати, велосипеди та скутери, стає дедалі популярнішим альтернативним варіантом транспорту у великих містах. Мікромобільність допомагає скоротити залежність від автомобілів і поліпшити екологічну ситуацію в містах, особливо в центрі, де інтенсивність руху висока. UN Habitat підкреслює, що для ефективного використання мікромобільності міста повинні розвивати безпечні велосипедні та пішохідні доріжки, а також створювати зони з обмеженим доступом для автомобілів. Це також сприяє поліпшенню здоров'я городян, оскільки підтримує активні види пересування.

4. Впровадження каршерінгу та райдшерінгу

Каршерінг і райдшерінг (спільне використання автомобілів) - це ще одна альтернатива, яка знижує потребу в особистих автомобілях і зменшує навантаження на дороги та паркувальні простори. Європейська комісія зазначає, що спільне використання автомобілів дає змогу скоротити загальну кількість машин у місті, а отже, зменшити викиди вуглекислого газу та витрати на утримання автопарку. Каршерінг підтримує концепцію "економіки спільного споживання", де транспортні ресурси використовуються більш раціонально та ефективно.

5. Створення "міст для людей" та обмеження приватного транспорту

Деякі міста переходять до стратегії, відомої як "місто для людей", за якої приватний автотранспорт обмежується або забороняється в центральних районах міста. Цей підхід передбачає створення громадських і зелених зон, широких пішохідних доріжок і велосипедних доріжок, які замінюють автодороги. Європейське агентство з охорони довкілля стверджує, що таке рішення сприяє поліпшенню якості повітря і робить міста приємнішими для життя, водночас зменшуючи шумове забруднення і підвищуючи безпеку на дорогах. Такі міста, як Осло, Мадрид і Париж, уже активно реалізують цю стратегію, створюючи автомобільні зони та розширюючи громадські простори для містян.

Аналіз цих альтернативних варіантів показує, що міста можуть обирати відповідні рішення, виходячи зі своїх потреб і можливостей, щоб створити стійке і комфортне міське середовище. Кожна з цих стратегій пропонує свої переваги і вимагає певних інвестицій, але вони допомагають досягти цілей сталого розвитку і поліпшити якість міського життя.

1.4 Системи підтримки прийняття рішень (СППР) в управлінні міською транспортною підсистемою

Система підтримки ухвалення рішень (СППР) - це програмно-технічний комплекс, що допомагає користувачам аналізувати дані, генерувати альтернативні варіанти рішень і обирати найкращі з них. СППР

активно використовують у соціально-технічних системах, де рішення ухвалюють в умовах невизначеності, багатоваріантності та обмеженості ресурсів. Соціально-технічні системи включають взаємодію людей і технологій, і успішне функціонування таких систем вимагає оперативного та зваженого ухвалення рішень.

У соціально-технічних системах, таких як міські транспортні системи, СППР надає аналітичні інструменти для опрацювання та інтерпретації великого обсягу даних, пов'язаних із транспортними потоками, станом інфраструктури та запитами користувачів. За даними Світового банку, застосування СППР у транспортних системах допомагає прогнозувати затори, оцінювати наслідки змін у транспортній інфраструктурі та підвищувати загальну ефективність транспортних потоків. СППР також дає змогу аналізувати та моделювати поведінку транспортної системи, з огляду на різноманітність чинників, таких як погодні умови, час доби та обсяги трафіку.

Основні функції СППР у соціально-технічних системах:

Збір і обробка даних: СППР збирає дані в реальному часі з різних джерел, таких як сенсори, системи відеоспостереження та історичні записи. Ця інформація є основою для аналізу поточної ситуації та прогнозування подальших подій. Європейська комісія підкреслює, що збір даних та їх оперативне опрацювання дають змогу міським службам швидко реагувати на зміни та ухвалювати обґрунтовані рішення.

Моделювання та прогнозування: Системи підтримки ухвалення рішень дають змогу моделювати різні сценарії та прогнозувати їхні можливі результати. Це особливо важливо в транспортних системах, де необхідно враховувати поведінку учасників руху та зовнішні умови. На думку UN Habitat, моделювання дає змогу оцінити, як нові транспортні маршрути або зміни в дорожній інфраструктурі вплинуть на транспортні потоки та якість обслуговування громадян.

Оцінка альтернативних варіантів: СППР допомагає користувачам аналізувати альтернативні варіанти дій, вибираючи найкращі рішення на основі заданих критеріїв. Це дає змогу врахувати економічні, екологічні та соціальні аспекти під час розроблення транспортних рішень. Наприклад, можна оцінити, який вид транспорту і маршрут оптимальний з погляду витрат, часу та екологічності.

Підтримка ситуаційного управління: СППР забезпечує можливості ситуаційного управління, що особливо важливо в умовах невизначеності. У разі виникнення аварій, заторів або інших непередбачуваних ситуацій СППР допомагає швидко оцінити ситуацію, визначити оптимальні дії та координувати заходи у відповідь. Європейське агентство з охорони довкілля зазначає, що ця функція СППР допомагає мінімізувати затримки, знизити екологічний збиток і підвищити загальну стійкість транспортної системи.

Таким чином, СППР виконує ключову роль у соціально-технічних системах, надаючи можливості для оперативного аналізу та прогнозування, вибору найкращих рішень і ситуаційного управління. Ці функції допомагають адаптувати транспортні системи до мінливих умов і поліпшити якість міського середовища, забезпечуючи сталий розвиток і підвищення комфорту для жителів.

Система підтримки ухвалення рішень (СППР) відіграє важливу роль в управлінні стійким розвитком транспортної системи міста, надаючи аналітичні та прогнозні інструменти для ухвалення обґрунтованих рішень. Сталий розвиток вимагає від транспортних систем мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище, забезпечення доступності та підвищення ефективності, і СППР допомагають міським адміністраціям досягати цих цілей за рахунок оперативного аналізу даних і ситуаційного управління.

1. Зниження екологічного впливу

СППР сприяють досягненню екологічної стійкості транспортних систем завдяки аналізу даних про викиди, споживання палива та якість повітря. З їхньою допомогою можна відстежувати вплив різних видів транспорту на навколишнє середовище і розробляти стратегії щодо його зниження. Світовий банк зазначає, що СППР дають змогу моделювати сценарії зі зниження викидів CO₂ та інших забруднювачів, а також обирати альтернативні рішення, як-от використання електротранспорту та розробка маршрутів, що сприяють зниженню навантаження на довкілля.

2. Оптимізація транспортних потоків і підвищення ефективності

Одним із ключових завдань сталого розвитку транспортної системи є оптимізація транспортних потоків. СППР допомагають аналізувати транспортні потоки в реальному часі, виявляти проблемні зони і розробляти заходи для запобігання заторів. Європейська комісія підкреслює, що за допомогою СППР можна адаптувати маршрути громадського транспорту, оптимізувати розклади та перерозподіляти транспортні ресурси, що допомагає зменшити затори і скоротити час у дорозі. Це особливо актуально для великих міст, де надмірна кількість автомобілів призводить до серйозних затримок і погіршення якості повітря.

3. Підтримка прийняття рішень в умовах невизначеності

СППР допомагають ухвалювати рішення в умовах високого ступеня невизначеності та мінливих умов. Це важливо для сталого управління транспортною системою, оскільки дає змогу враховувати різні чинники, як-от погодні умови, аварійні ситуації та мінливі потреби пасажирів. Згідно з даними UN Habitat, можливість моделювання різних сценаріїв дає змогу швидко реагувати на зміни та мінімізувати можливі негативні наслідки для міської транспортної системи.

4. Участь громадян та інклюзивність

СППР також відіграють роль у забезпеченні інклюзивного управління, оскільки дають змогу враховувати потреби різних груп населення. Це може включати аналіз доступності транспорту для людей з обмеженими можливостями,

незаможних верств населення та інших груп, які потребують особливої підтримки. Публікації Європейської комісії зазначають, що СППР можуть підтримувати збір і аналіз даних про доступність транспорту і маршрути, щоб створювати більш інклюзивні та зручні транспортні рішення.

5. Довгострокове планування та сталий розвиток

Для довгострокового сталого планування транспортної системи міста СППР відіграють незамінну роль, надаючи можливості прогнозування та аналізу на основі великих даних. Європейське агентство з охорони довкілля підкреслює, що за допомогою СППР міська влада може проводити довгострокові дослідження щодо поліпшення транспортної інфраструктури, скорочення залежності від викопних видів палива і розвитку альтернативних джерел енергії. Ці дані дають змогу розробляти стратегічні плани з досягнення сталого розвитку та екологічної безпеки на роки вперед.

Таким чином, СППР чинять значний вплив на управління сталим розвитком транспортної системи, сприяючи зниженню екологічних збитків, підвищенню ефективності транспортних потоків і підтримці інклюзивності. Використання СППР в управлінні міською транспортною системою дає змогу реалізувати стратегічні цілі сталого розвитку, створюючи комфортніші, доступніші та екологічно чистіші умови для всіх жителів міста.

Структурно-логічна діаграма ухвалення рішень у системі управління транспортом є візуальною моделлю, яка описує основні етапи аналізу, оброблення даних і вибору оптимальних рішень в управлінні транспортною системою. Ця діаграма відображає взаємозв'язок між ключовими елементами, такими як збирання та оброблення даних, моделювання сценаріїв, оцінювання альтернатив та ухвалення рішень, що дає змогу міським адміністраціям ефективно управляти транспортними потоками та забезпечувати сталий розвиток міської транспортної системи.

Основні елементи структурно-логічної діаграми

Збір і обробка даних Перший етап діаграми передбачає збір даних з різних джерел, таких як дорожні сенсори, системи GPS, відеоспостереження і метеорологічні станції. Ці дані служать основою для аналізу поточного стану транспортної системи. Європейська комісія підкреслює, що збір даних у реальному часі дає змогу отримувати актуальну інформацію про транспортні потоки, затори і дорожні умови, що необхідно для оперативного реагування та ситуаційного управління.

Моделювання та прогнозування на другому етапі проводиться моделювання різних сценаріїв на основі зібраних даних. СППР аналізує поточні умови і за допомогою прогнозних алгоритмів оцінює потенційні зміни в транспортних потоках. Світовий банк зазначає, що моделювання дає змогу прогнозувати наслідки різних рішень, як-от зміна маршрутів або впровадження нових видів транспорту, що допомагає ухвалювати зважені рішення.

Оцінка альтернативних рішень на наступному етапі проводиться оцінка можливих варіантів дій з урахуванням економічних, екологічних і соціальних чинників. Це може включати порівняння різних маршрутів, видів транспорту або стратегій регулювання руху. UN Habitat підкреслює, що на цьому етапі враховуються потреби різних верств населення та екологічні аспекти, щоб обране рішення було найефективнішим та інклюзивним.

Ухвалення рішення На цьому етапі ухвалюється оптимальне рішення, яке має враховувати результати попередніх етапів аналізу. Рішення може стосуватися оперативних змін у транспортній системі (наприклад, регулювання світлофорів для зменшення заторів) або довгострокових стратегій (наприклад, розширення громадського транспорту). Європейське агентство з охорони довкілля вказує, що пріоритет віддається рішенням, які сприяють сталому розвитку та мінімізують екологічний вплив.

Впровадження та моніторинг Заключний етап діаграми передбачає реалізацію ухваленого рішення та моніторинг його виконання. Система продовжує збирати дані, щоб відстежувати ефективність обраного варіанту і за

необхідності вносити коригування. Це забезпечує адаптивне управління, яке дає змогу оперативно реагувати на зміни в умовах міського середовища і транспортних потоків.

Приклад структурно-логічної діаграми

Приклад структурно-логічної діаграми для управління транспортом може включати такі елементи та етапи:

Збір даних → 2. Моделювання → 3. Оцінювання альтернатив → 4. Ухвалення рішення → 5. Впровадження та моніторинг.

Такий підхід забезпечує систематичне та логічне проходження всіх етапів аналізу та прийняття рішень, що допомагає мінімізувати ризики та підвищити ефективність управління транспортною системою. Структурно-логічна діаграма також дає змогу ефективно розподілити ресурси та враховувати вплив кожного етапу на стійкість міської транспортної системи.

1.5 Метаболізм та енергетичні потоки в транспортній підсистемі міста

Концепція "міського метаболізму" використовується для опису потоків ресурсів, енергії та матеріалів, необхідних для підтримання життєдіяльності міста та його систем, зокрема транспортної. Міський метаболізм розглядає місто як комплексну систему, що споживає ресурси (енергію, воду, матеріали) і продукує відходи та викиди, аналогічно біологічному організму. У контексті транспортної системи це поняття допомагає зрозуміти, як транспорт споживає ресурси, перетворює їх на послуги для мешканців і створює вплив на навколишнє середовище.

Згідно з дослідженнями Світового банку, Транспортна підсистема міста є одним із найбільш значущих споживачів енергії та джерел викидів забруднювальних речовин, таких як вуглекислий газ та оксиди азоту. Метаболізм транспортної системи включає не тільки споживання палива, а й створення інфраструктури (доріг, мостів, станцій), яка потребує значних

матеріальних та енергетичних ресурсів. У результаті утворюються відходи, такі як викиди вихлопних газів, знос шин і забруднення доріг, що впливає на якість повітря і ґрунту.

Основні компоненти метаболізму міської транспортної системи

Енергетичні потоки Енергетичні потоки становлять основу метаболізму транспортної системи, оскільки транспорт споживає значну кількість енергії. Це включає в себе використання палива в приватних автомобілях, автобусах, вантажівках, а також електрику для роботи електротранспорту, такого як трамваї і метро. Європейське агентство з охорони довкілля вказує, що перехід на поновлювані джерела енергії та електрифікація транспорту можуть істотно знизити навантаження на метаболізм транспортної системи, зменшуючи вуглецевий слід і забруднення.

Матеріальні потоки до матеріальних потоків входять ресурси, що використовуються для створення і підтримки інфраструктури: метали, бетон, асфальт та інші матеріали, необхідні для будівництва доріг, станцій і транспортних засобів. Ці матеріали схильні до зносу і вимагають регулярної заміни, що вносить додаткове навантаження на міський метаболізм. Згідно з даними UN Habitat, постійне оновлення транспортної інфраструктури вимагає значних вкладень і планування, щоб мінімізувати вплив на навколишнє середовище.

Відходи і викиди Одним із ключових аспектів метаболізму транспортної системи є відходи і викиди, що утворюються в процесі використання транспорту. До них належать вихлопні гази, тверді частинки і шумове забруднення, які негативно позначаються на здоров'ї городян і якості навколишнього середовища. Європейська комісія наголошує на важливості скорочення викидів у транспортному секторі для поліпшення якості повітря і досягнення стійкості міст.

Роль метаболізму в стійкому управлінні транспортом

Концепція метаболізму допомагає зрозуміти, як міська Транспортна підсистема взаємодіє з навколишнім середовищем і як вона може бути зроблена

більш стійкою. Вивчення метаболізму транспортної системи дає змогу оцінити загальну потребу міста в ресурсах, виявити неефективні ділянки, де витрачаються зайві матеріали та енергія, і впровадити заходи для оптимізації транспортних потоків. Світовий банк зазначає, що аналіз метаболізму допомагає розробити стратегії для переходу на більш екологічні види транспорту, як-от громадський транспорт, велосипеди та пішохідні маршрути.

Таким чином, метаболізм міської транспортної системи - це комплексний процес, що включає споживання ресурсів, виробництво викидів і створення транспортної інфраструктури. Вивчення цих процесів дає змогу розробити більш стійкі рішення, знизити екологічне навантаження і підвищити ефективність використання ресурсів.

Енергетичні та матеріально-речовинно-матеріальні потоки становлять основу функціонування міської транспортної системи, оскільки забезпечують її здатність підтримувати мобільність і доступність ресурсів для жителів міста. Ці потоки включають споживання палива та електроенергії, використання матеріалів для будівництва та підтримання інфраструктури, а також утворення відходів і викидів, що впливають на навколишнє середовище.

Енергетичні потоки в транспортній системі

Енергетичні потоки транспортної системи являють собою споживання різних видів енергії для руху транспортних засобів і підтримки роботи інфраструктури. У міських умовах це включає бензин, дизельне паливо, електрику і, в деяких випадках, альтернативні джерела енергії, такі як водень. За даними Європейського агентства з охорони довкілля, транспорт є одним із найбільш енерговитратних секторів, на який припадає значна частина викидів вуглекислого газу в містах. Перехід на електричний транспорт і використання поновлюваних джерел енергії в громадському

транспорті може істотно скоротити вуглецевий слід і знизити залежність від викопних видів палива.

Системи громадського транспорту, такі як трамваї, метро та електричні автобуси, мають відносно низький вуглецевий слід порівняно з особистим транспортом, оскільки можуть перевозити велику кількість людей, споживаючи при цьому менше енергії на одного пасажера. Світовий банк підкреслює, що електрифікація транспорту і перехід на низьковуглецеві джерела енергії є одними з ключових заходів зі зниження впливу транспортної системи на навколишнє середовище і підвищення її стійкості.

Речовинно-матеріальні потоки в транспортній системі

Речовинно-матеріальні потоки в транспортній системі включають використання будівельних матеріалів для зведення та підтримки інфраструктури, а також витратні матеріали для транспортних засобів. Ці потоки включають метали, бетон, асфальт, пластик та інші матеріали, необхідні для будівництва доріг, мостів, станцій і зупинок. Європейська комісія підкреслює, що постійна експлуатація та оновлення транспортної інфраструктури вимагає значних матеріальних ресурсів, що створює навантаження на навколишнє середовище і збільшує відходи.

Крім будівництва та підтримки інфраструктури, матеріальні потоки також включають витратні матеріали для обслуговування транспортних засобів, як-от мастильні матеріали, шини та гальмівні колодки. Ці матеріали схильні до зносу і вимагають регулярної заміни, що призводить до утворення твердих відходів і мікропластику, який забруднює ґрунт і водні ресурси. За даними UN Habitat, перехід на більш стійкі та довговічні матеріали може знизити обсяг відходів і поліпшити екологічну ситуацію в містах.

Вплив енергетичних і матеріальних потоків на стійкість транспортної системи

Енергетичні та матеріальні потоки в міській транспортній системі мають значний вплив на її стійкість. Надмірне споживання викопного палива і

матеріалів, а також утворення великої кількості відходів негативно позначаються на екології та вимагають високих витрат. Світовий банк наголошує на важливості комплексного підходу до управління енергетичними та матеріальними потоками для мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище та оптимізації використання ресурсів.

Оптимізація цих потоків може включати впровадження більш ефективних транспортних засобів, використання екологічно чистих матеріалів, перехід на поновлювані джерела енергії та впровадження принципів замкнутого циклу в інфраструктурних проєктах. Такі заходи дають змогу знизити споживання енергії та матеріалів, мінімізувати утворення відходів і знизити викиди, сприяючи сталому розвитку міської транспортної системи.

Продукція і споживання ресурсів у транспортній системі міста являють собою процеси, пов'язані з виробництвом послуг транспорту (перевезення пасажирів і вантажів) і необхідними для цього витратами ресурсів. Міська Транспортна підсистема споживає значні обсяги енергетичних і матеріальних ресурсів, що безпосередньо впливає на екологічну стійкість міста. Розуміння цих процесів допомагає краще оцінити навантаження на екологію та виявити шляхи для підвищення ефективності та стійкості.

Продукція в транспортній системі

Продукція транспортної системи полягає в наданні послуг з перевезення пасажирів і вантажів. У міських умовах це включає роботу громадського транспорту, особистого автотранспорту, вантажних автомобілів та альтернативних видів транспорту, таких як велосипеди та електросамокати. Взаємодія всіх цих видів транспорту створює складну систему переміщення людей і товарів, яка підтримує економічне та соціальне життя міста.

Згідно з даними Європейської комісії, Транспортна підсистема міста виробляє значний обсяг послуг, забезпечуючи мобільність, доступ до робочих місць, освіти та інших необхідних ресурсів. Однак для забезпечення цих послуг Транспортна підсистема споживає значну кількість ресурсів, що створює навантаження на міську інфраструктуру та потребує ефективного управління.

Споживання ресурсів у транспортній системі

Споживання ресурсів у транспортній системі міста включає енергоресурси, такі як паливо та електрика, а також матеріали для будівництва та підтримки інфраструктури (наприклад, асфальт, бетон, метал). Світовий банк зазначає, що Транспортна підсистема є одним із найбільших споживачів ресурсів у містах, особливо викопного палива, що веде до значних викидів CO₂ та інших забруднювальних речовин.

Енергоресурси необхідні для роботи транспортних засобів, особливо приватного автотранспорту та автобусів, а електрика - для метро, трамваїв і електричних автобусів. Європейське агентство з охорони довкілля наголошує, що для зниження впливу транспортної системи на навколишнє середовище важливо підвищувати енергоефективність і переходити на поновлювані джерела енергії, як-от електрика із сонячних і вітрових джерел.

Крім того, матеріальні ресурси потрібні для будівництва та ремонту доріг, мостів, станцій та інших елементів транспортної інфраструктури. Знос інфраструктури призводить до постійної потреби в ремонті та модернізації, що вимагає значних матеріальних витрат. UN Habitat стверджує, що впровадження стійких матеріалів і технологій будівництва може знизити споживання ресурсів і мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище.

Вплив споживання ресурсів на стійкість транспортної системи

Високий рівень споживання ресурсів чинить тиск на екологічну стійкість міської транспортної системи. Постійне використання палива, матеріалів та енергії веде до значних викидів, утворення відходів і забруднення повітря. Щоб

знизити негативний вплив на навколишнє середовище, міста можуть застосовувати стратегії ресурсозбереження, такі як підвищення енергоефективності транспортних засобів, перехід на альтернативні види пального, скорочення використання особистих автомобілів і розвиток громадського транспорту.

Світовий банк підкреслює, що оптимізація споживання ресурсів у транспортній системі може значно підвищити її стійкість та економічну ефективність. Це досягається завдяки впровадженню екологічно чистих видів транспорту, використанню поновлюваних джерел енергії та переробці матеріалів, що дає змогу зменшити викиди та знизити витрати на підтримання транспортної інфраструктури.

Таким чином, продукція і споживання ресурсів у міській транспортній системі тісно пов'язані з її ефективністю і стійкістю. Управління ресурсами та їхня оптимізація є важливими аспектами сталого розвитку, оскільки вони допомагають зменшувати навантаження на навколишнє середовище і підвищувати якість життя в місті.

Висновки до розділу 1.

Отже, на основі аналізу теоретичних засад сталого розвитку та управління міською транспортною системою можна зробити наступні висновки:

1. Концепція сталого розвитку міської транспортної системи виникла як відповідь на глобальні виклики, такі як урбанізація, обмеженість ресурсів та екологічні загрози. Вона орієнтується на досягнення балансу між економічними, екологічними та соціальними аспектами розвитку міста.

2. Однією з ключових цілей сталого розвитку є створення транспортної системи, яка мінімізує негативний вплив на довкілля шляхом зменшення викидів CO₂ та використання поновлюваних джерел енергії. Це досягається завдяки розвитку громадського транспорту, електрифікації і переходу на екологічно чисті види транспорту.

3. Міська Транспортна підсистема повинна забезпечувати соціальну інклюзивність та доступність для всіх верств населення, включно з людьми з обмеженими можливостями та іншими вразливими групами. Це сприяє соціальній справедливості та підвищенню якості життя.

4. Для ефективного управління транспортною системою важливо використовувати сучасні технології, такі як інтелектуальні транспортні системи (ITS), які дозволяють оптимізувати транспортні потоки, скорочувати затори та підвищувати безпеку на дорогах.

5. Сталий розвиток міської транспортної системи неможливий без інтеграції різних видів транспорту, раціонального використання міського простору та зменшення залежності від приватного автотранспорту. Це включає розвиток мультимодальних систем, пішохідної інфраструктури та велосипедних доріжок.

6. Концепція міського метаболізму дозволяє оцінити споживання енергетичних та матеріальних ресурсів транспортною системою, виявити неефективні процеси та оптимізувати потоки для досягнення стійкості.

7. Управління міською транспортною системою повинно враховувати довгострокове планування та використання систем підтримки прийняття рішень (СППР), які допомагають адаптувати транспортну інфраструктуру до змінних умов та забезпечують стаке функціонування міського середовища.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ І УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНОЮ ПІДСИСТЕМОЮ В КОНТЕКСТІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА

2.1 Методологічний підхід та структура індикаторів для оцінювання міського середовища

Якість — філософське поняття, термінології гуманітарних наук. В Арістотелівській логіці якість — одна з 10 категорій, на які Арістотель поділив усі речі реальності. Як одна з таких категорій, якість це — побічна обставина, за допомогою якої річ є якогось типу чи виду; побічна обставина, котра є зовнішньою оцінювальною формою.

Якість це складна багатоаспектна категорія, що розкриває через систему зовнішніх і внутрішніх аспектів не може бути визначена однозначно одним яким-небудь показником.

Визначення. Категорія (*Cat*) якості (*Q*) є система часткових суджень–визначень [2, 7]:

$$Cat(Q) = \langle \Theta, \Psi, \Omega, \Sigma, Y \rangle,$$

де Θ — аспект властивостей, який визначає якість як сукупність властивостей системи;

Ψ — аспект структурності, який визначає якість як ієрархічну систему властивостей системи;

Ω — аспект динамічності, який визначає якість як динамічну систему властивостей;

Σ — аспект визначеності, який визначає як істотна визначеність частини системи або об'єкту (*аспект визначеності*);

Y — аспект існування, який визначає основу існування будь-якої частини системи або об'єкту.

Згідно з ДСТУ ISO 9000-2001 якість це ступінь, до якої сукупність власних або присвоєних характеристик задовольняє сформульованим потребам або очікуванням, загальнозрозумілим або обов'язковим.

Під оцінкою будемо розуміти відношення суб'єкта (дослідника) до об'єкта оцінювання (у нашому випадку — міського середовища), встановлення ступеню значимості для дослідника об'єкта оцінювання в цілому або окремих його властивостей на основі відповідності властивостей об'єкта окремим вимогам та нормам [7].

У наведеному визначенні важливим є зіставлення значимості властивостей об'єкта з деякою нормою, рівнем, критичною величиною якого-небудь параметра ("критична концентрація", "ефективна концентрація", "безпечна концентрація"), що дозволяє виявити цінність об'єкта та його властивості для людини і суспільства.

Міське середовище це специфічна складна система і кількісно оцінити стан такого антропогенно-трансформованого середовища чи окремих його елементів та підсистем за сукупністю параметрів з урахуванням неповноти та неточності знань про важливість цих параметрів досить складно.

Оцінка якості МС спирається на комплекс гетерогенних показників, різних за своєю фізичною природою та заснованих на різних способах вимірювання та контролю. Сьогодні практично відсутні прості та об'єктивні методи і методики об'єднання різнорідних та гетерогенних показників та властивостей в єдину систему кількісних оцінок якості МС. Тобто, сьогодні складно визначити поняття оцінки гео-/еко-/соціо-/економ- та інших підсистем, які в сукупності складають єдине антропогенно-трансформоване середовище в якому знаходиться людина — МС.

Найбільше поширення отримали наступні методи визначення показників стану міського середовища: експериментальний (здійснюваний за допомогою технічних засобів вимірювання і контролю); розрахунковий (здійснюваний на основі статистичних та інших моделей обчислень із використанням значень

параметрів, знайдених іншими методами); експертний (заснований на врахуванні суджень та оцінок групи фахівців-експертів).

Сьогодні основним заходом оцінювання якості МС є зіставлення результатів визначення в окремих точках геопростору хімічного складу, фізичних властивостей, біологічних характеристик відповідно до регламентованих показниками якості (санітарно-гігієнічних, господарських гранично допустимих концентрацій (ГДК), Державних будівельних норм (ДБН) та інших нормативів і регламентів) або в порівнянні з фоном, за який береться відносно задовільний стан міської території.

Часткові оцінки (отримані прямим або непрямым шляхом) є оцінки за окремими вихідними характеристикам шляхом зіставлення з деякими рівнями і нормами (регламентами) [2]. Це оцінки, які визначають позитивну або негативну значимість властивостей підсистем МС. Часткові оцінки є традиційними в географо-екологічних дослідженнях. Наприклад, до часткових оцінок якості МС відносяться: стан повітряного басейну населеного пункту, якість питної води, стан ґрунтів, шумову обстановку, ветхість та аварійність житлового фонду, щільність зелених насаджень, щільність розміщення соціально-культурних об'єктів, стан інженерно-комунікаційної інфраструктури і так далі.

Так як оцінити якість МС за великим переліком критеріїв складно, багато авторів [1, 2, 34] рекомендують для оцінки використовувати *індекси*. Призначення індексів — вивчення динаміки складних явищ, процесів що складаються з відносно більш простих окремих елементів.

Розподіл індексів на дві умовні групи (індекси-маркери та аналітичні індекси) визначається різними способами їх отримання, але їх функції однакові.

Індекси-маркери — це натуральні параметри стану еко- (гео-) системи, кожен з яких може бути як одновимірним індексом так і складним багатовимірним індексом.

Аналітичні індекси — це індекси різноманітності, просторової неоднорідності і так далі. Найбільш популярними серед них є *індекс Сімпсона* і *інформаційна міра Шеннона*.

Частина аналітичних індексів базується на так званих *функціях бажаності*. Такі функції зазвичай позначаються d (фр. *desirable* — бажаний) та є спосіб відображення натуральних значень в єдину безрозмірну числову шкалу з фіксованими межами. При цьому значення функції (наприклад, 0 і 1; 0 і 100 і так далі) відповідають межам "погано – добре". Необхідність введення функцій бажаності визначається різною розмірністю змінних, що входять до індексу.

У більш простому випадку відповідність між натуральними показниками та числами з безрозмірною шкалою задається експертним шляхом. Експертні функції бажаності вимірюють стан складних систем в кількісних шкалах і дозволяють отримувати результати, які адекватно відображають дійсність. Це пояснюється тим, що функції бажаності базуються на досвіді експертів, генералізують велику кількість різnorodних процесів, характерних для МС.

Покомпонентне оцінювання становить основу комплексних оцінок природних, природно антропогенних, урбанізованих та соціально-економічних систем. Необхідність "згортки" окремих показників властивостей підсистем МС з метою отримання одного комплексного показника визначається практичною доцільністю. Комплексний показник сукупності властивостей залежить від показників окремих властивостей досліджуваної системи з урахуванням їх вагомості що демонструє значущість окремих властивостей для комплексної оцінки.

Для отримання комплексної оцінки якості використовуються середньозважені залежності адитивного та мультиплікативного виду: середньої арифметичної; середньої геометричної; коефіцієнтів; суми місць; відстаней тощо. Отже для отримання загального підсумкового результату використовують комплексну оцінку якості окремої підсистеми МС X_j як середньозважене арифметичне [2]:

$$X_j = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot y_i, \quad (2.2)$$

де X_j – комплексний показник якості j -ї підсистеми МС;

ω_i – ваговий коефіцієнт вихідної змінної y_i , значення якої характеризує окрему властивість j -ї підсистеми МС;

y_i – значення змінної, що характеризує окрему властивість j -ї підсистеми МС.

До комплексного показника якості, висуваються наступні вимоги:

– репрезентативність — представництво у комплексного показник всіх основних характеристик, за якими оцінюється якість МС;

– монотонність зміни комплексного показника якості при зміні будь-якого з одиничних показників якості при фіксованих значеннях інших показників;

– чутливість до варійованості параметрів. Така вимога полягає в тому, щоб комплексний показник якості повинен злагоджено реагувати на зміну кожного з одиничних показників. Значення комплексного показника повинно бути особливо відчутно в тих випадках, коли який-небудь одиничний показник виходить за допустимі межі;

– нормірованість — числове значення комплексного показника, має бути укладене між найбільшим і найменшим значеннями відносних показників якості;

– порівнянність результатів комплексної оцінки якості забезпечується однаковістю методів їх розрахунків, в яких показники властивостей системи повинні бути виражені в безрозмірних величинах.

Сьогодні методологія комплексної оцінки МС використовує переважно експертні методи і підходи, що призводить до того, що більшість досліджень в цій сфері носить суб'єктивний характер, так як результати комплексної оцінки істотно залежать від рівня підготовки експертів і специфіки експертних методів. Основні напрями в сфері комплексної оцінки якості МС пов'язані з накопиченням і створенням все більш великих

баз просторових даних показників стану та розвитку МС, удосконаленням методів комплексної оцінки, теорії ризиків і методів системної динаміки [3, 7].

Аналіз різних методик присвячених побудові комплексних оцінок, які виконано в роботах [2, 7] свідчить про те, що вибір комплексних показників, а також коефіцієнтів вагомості та часткових коефіцієнтів здійснюється без достатнього обґрунтування. Це призводить не тільки до грубих, а часто до невірних результатів.

З метою зниження суб'єктивізму в отриманні оціночних показників необхідно вміти отримувати інтегровані оцінки на основі великої кількості неточної, неповної та нечислової інформації.

Інтегральна оцінка якості МС передбачає наявність етапу, пов'язаного з об'єднанням в одне ціле різнорідних, гетерогенних показників або багатокритеріальних оцінок властивостей системи з урахуванням їх внеску в загальну оцінку.

Термін *інтегральний* передбачає об'єднання, внаслідок чого виникають нові якості й ознаки. Узагальнювальна оцінка дає змогу врахувати вплив різних чинників на якісний стан МС. Моделювання інтегральної оцінки якості складної системи спирається на дослідження системи вихідних гетерогенних даних, що лежать в основі оцінки, а одержані на базі узагальнювального показника висновки мають орієнтовний характер. Ідея інтегрованих індикаторів набуває поширення при побудові індексів і рейтингів складних систем. З зведенням ряду індикаторів у єдиний узагальнювальний показник можливо зробити висновок про поліпшення (погіршення) стану МС в досліджуваному періоді. Одержані на базі інтегрального індикатора значення стають показниками, які забезпечують прийняття обґрунтованих рішень з управління якістю МС.

Розробка такого узагальнюючого (інтегрального) показника становить одне з найважливіших завдань оцінювання якості на єдиній методологічній основі, яка забезпечить єдність всіх часткових, комплексних показників та однозначну оцінку рівня і динаміки сталого розвитку МС.

Інтегральна оцінка застосовується якщо з'являється необхідність обробки нечислової (порядкової), неточної (інтервальної) інформації. Нечислова, неточна і неповна інформація ("ннн" – інформація) дозволяє застосувати множину наборів вагових коефіцієнтів для отримання інтегральної оцінки.

Отже, проведена класифікація методів оцінювання якості МС дає можливість стверджувати, що за тих чи інших умов доцільно застосовувати певний метод оцінки, виходячи з цілей, умов, професіоналізму суб'єкту оцінки. При цьому переваги інтегрального методу оцінки полягають в можливості усунути неоднозначність оцінки впливу різноманітних чинників та отримати найбільш точний результат [46].

Наявність різних методик [46] проведення інтегральної оцінки вимагає необхідність вдосконалити методичні рекомендації, які повинні забезпечити використання об'єктивної та адекватної системи показників впливаючих на якість МС.

Моделювання інтегрального показника припускає дослідження системи показників, що лежать в основі оцінки, а висновки, отримані на базі інтегрального показника, хоча і мають орієнтований характер, виконують допоміжну роль в прийнятті рішень спрямованих на підвищення якості життя населення.

Вдосконалення існуючих та розробка нових індикаторів стану — є важливим напрямком аналізу інформації, що використовується як для оцінки якості МС так і для прогнозування його сталого розвитку.

Міське середовище, як складна організаційна і виробнича система може підтримувати свою життєдіяльність тільки завдяки постійному обміну матеріально-енергетичними та інформаційними потоками з навколишнім середовищем.

Дисипативні процеси МС можуть розглядатися як процеси впливу на довкілля з точки зору виснаження споживаних ресурсів і забруднення

навколишнього середовища. Продуктивність міського середовища в широкому сенсі включає економічну, культурну, соціальну, екологічну продуктивність, що в кінцевому рахунку впливає на якість та комфортність життя населення так і якість самого міського середовища. Тобто продуктивність міського середовища підтримується його метаболічної активністю.

В метаболічних системах під ефективністю розуміється здатність системи підтримувати свою продуктивність в умовах низького рівня дисипації [xx, xx]. В разі міського середовища ефективність цих процесів оцінюється як співвідношення виконуваної корисної роботи і вільної енергії, якою обмінюється міське середовище з навколишнім середовищем, тобто оцінюється ефективність міського середовища за допомогою балансу між витратами та вигодами, який буде відображати індикатор ефективності міського середовища .

Таким чином при побудові індикатора ефективності міського середовища необхідно відповісти на два питання:

- яким чином виміряти продуктивність міського середовища і як виміряти дисипативні процеси — процеси розсіювання енергії та трансформації її в навколишнє середовище;

- як зазначені заходи (заходи продуктивності міського середовища та дисипації) можна інтегрувати для одержання загальної міри ефективності міського середовища.

Основна складність одержання загальної міри ефективності полягає в надзвичайно різномірному характеру змінних, які описують стан такої гетерогенної і складної системи як міське середовище. Більш того через широку комплексність показника ефективності метаболізму міського середовища неможливо безпосередньо виміряти деякі соціально-економічні, екологічні, містобудівні, інфраструктурні, транспортні показники які в тій чи іншій мірі впливають на кінцеву оцінку ефективності метаболізму міського середовища.

У зв'язку з цим, загальний показник ефективності метаболізму міського середовища пропонується визначати як оцінка, яка приймає значення від 0 до 100

на умовній шкалі. Загальна оцінка складається з агрегованих локальних оцінок кожної з досліджуваних підсистем міського середовища, кожна з яких може характеризувати соціально-економічні, екологічні, містобудівні, інфраструктурні та транспортні аспекти функціонування міста, які в свою чергу залежать від інших оцінок. Таким чином, вся конструкція комплексної оцінки ефективності метаболізму міського середовища має форму ієрархії, яка дозволяє врахувати вплив багатьох показників функціонування міського середовища на різних рівнях ієрархії і, відповідно, на різних рівнях аналізу.

На вершині ієрархії знаходиться загальна комплексна оцінка індикатора ефективності метаболізму міського середовища (рис. 2.1), а нижній рівень ієрархії займають показники, які подано в додатку таблиці 1. Вся структура ієрархії еквівалентна логічному аналізу поняття ефективність метаболізму міського середовища.

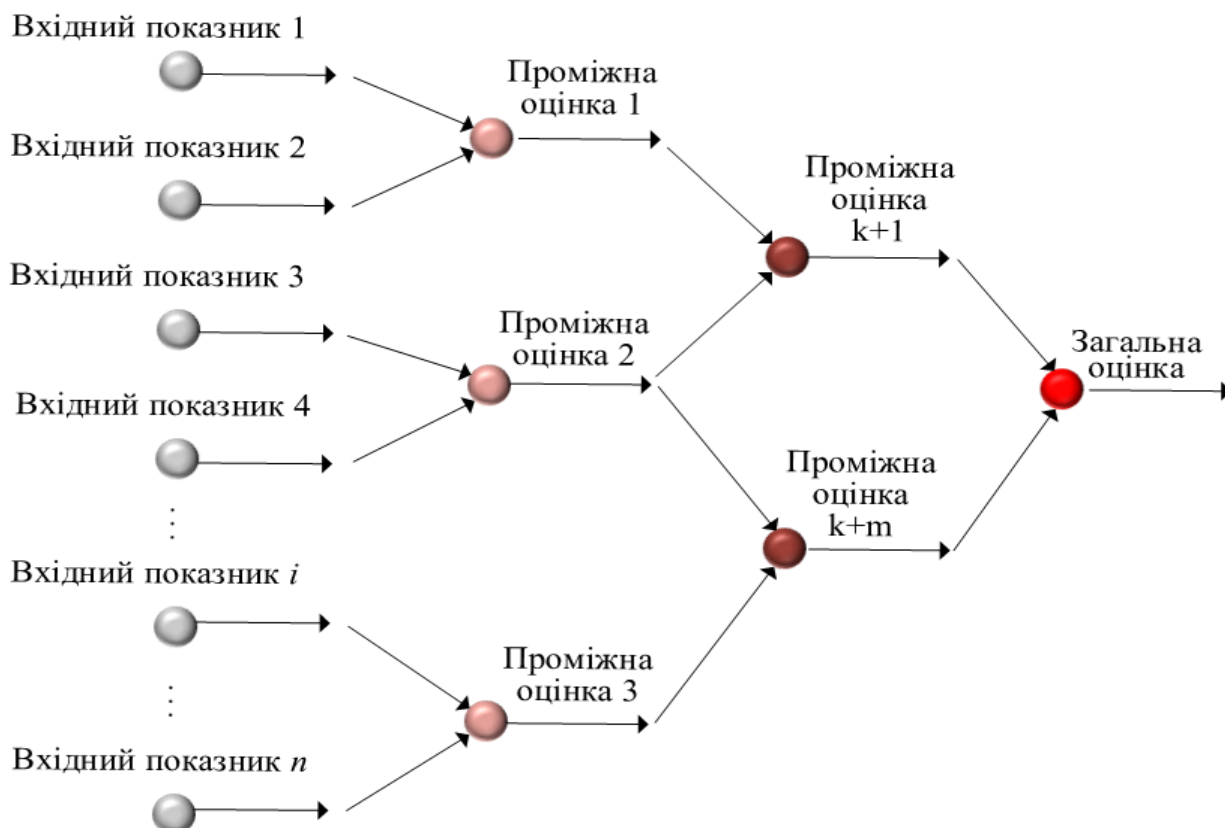


Рис. 2.1 Структура загальної інтегральної оцінки ефективності метаболізму міського середовища як ієрархічна послідовність проміжних оцінок

Логічний зв'язок між показниками якості міського середовища розглянемо на прикладі властивості P (ефективність метаболізму міського середовища), яке залежить від двох інших властивостей P_1 (продуктивність міського середовища) і P_2 (екологічна стійкість міського середовища). Під *екологічною стійкістю міського середовища* будемо розуміти здатність екологічної системи зберігати свою структуру і функції в процесі впливу внутрішніх та зовнішніх чинників.

Для оцінювання ефективності метаболізму міського середовища, тобто щоб оцінити властивість P , потрібно не тільки оцінити, чи задовольняє система властивостям P_1 і P_2 незалежно один від одного, але і той факт, який логічний зв'язок між властивостями P_1 і P_2 існує.

Наприклад, система може бути ефективною тоді і тільки тоді, коли, система показує високий рівень економічного виробництва і стійкий рівень споживання

ресурсів, тобто рівень споживання відповідає природно-ресурсному потенціалу певної території.

У цьому випадку кожна з властивості P_1 , P_2 незалежно один від одного є необхідною умовою, а спільно P_1 і P_2 є достатньою умовою, для того щоб система була оцінена як ефективна.

В іншому випадку, система може бути ефективною, якщо, щонайменше, одна з умов може бути виконана, не обов'язково дві умови: в цьому випадку умови P_1 і P_2 незалежно одна від одної будуть рахуватися як достатні.

Характерною рисою такої складної системи як міське середовище є той факт, що властивості такої системи характеризуються значною різноманітністю, гетерогенністю, великою кількістю параметрів, які оцінюються з певними наближеннями і припущеннями. Наприклад, ступінь концентрації емісії CO_2 може вважатися: 5 тон / (авто · рік) — високою, 1 тона / (авто · рік) — низькою, але 3,5 тон / (авто · рік) може вважатися високою лише в певній мірі. В цих умовах застосування нечіткої логіки дозволяє справлятися з невизначеністю понять і обчислити логічні відносини між показниками в умовах невизначеності.

Правильне визначення логічних відносин між змінними це важливий етап для обґрунтування надійності індикатора ефективності метаболізму МС. Метод, який пропонується застосовувати для отримання інтегральної оцінки ефективності метаболізму МС з проміжних оцінок — це використання зважених середніх значень. Основним аргументом у використанні методу зважених середніх значень є припущення можливості знаходження компромісу між проміжними оцінками. Наприклад, при визначенні

$$I = \alpha_1 \cdot I_1 + \alpha_2 \cdot I_2, \quad (2.2)$$

де I_1, I_2 — проміжні оцінки;

α_1, α_2 — вагові коефіцієнти проміжних оцінок,

отримаємо, що зменшення проміжної оцінки I_1 на величину ΔI_1 можна компенсувати збільшенням оцінки I_2 на величину

$$\Delta I_2 = -\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \Delta I_1, \quad (2.3)$$

Використання зваженого середнього засноване на припущенні, що зменшення однієї змінної завжди можна врівноважити збільшенням іншої змінної відповідно до формули (4.2). Більш того, відношення між ΔI_1 і ΔI_2 не залежить від значень індикаторів I_1 , I_2 : вони контекстно незалежні. Якщо замість виразу

$$I = \alpha_1 \cdot I_1 + \alpha_2 \cdot I_2 \quad (2.4)$$

записати відношення $I = \min \{I_1, I_2\}$, тоді значення інтегральної оцінки I визначається мінімальним значенням з множини проміжних оцінок, максимальне значення I буде мати місце за умови, якщо обидві проміжні оцінки I_1 і I_2 мають максимальні значення. І навпаки, $I = \max \{I_1, I_2\}$, якщо, принаймні, одна з проміжних оцінок буде мати максимальне значення (таким чином, існує два способи, щоб система була ефективною).

Концептуальний підхід, який розглянуто, робить зрозумілим зв'язок між змінною на вершині ієрархії з даними отриманими емпіричним шляхом. Застосування нечіткої логіки забезпечує той математичний інструмент, який найбільш підходить для рішення таких конструкцій. Фактично, нечітка логіка має як мінімум дві особливості, які особливо привабливі обчислення ієрархічної послідовності проміжних оцінок:

- нечітка логіка забезпечує гнучку структуру даних, зв'язок між якими існує у вигляді певного ступеню;
- емпіричні дані можуть бути подано в лінгвістичних термінах що легко можна порівняти з знаннями експертів.

Загальна інтегральна оцінка ефективності метаболізму МС як ієрархічна послідовність проміжних оцінок (рис. 2.2) може бути отримана на основі синтезу двох математичних моделей:

- математичного апарату нечіткої логіки;

- математичного апарату середньозважених оцінок.

Об'єднання різних областей простору вхідних змінних можна на основі застосування системи продукційних правил дозволяє вибирати відповідну математичну модель для кожного значення вхідних змінних. У наведеному вище прикладі продукційні правила можуть бути сформульовані наступним чином:

1. IF I_1 велика кількість AND I_2 велика кількість THEN $I = \alpha_1 \cdot I_1 + \alpha_2 \cdot I_2$.

2. IF I_1 велика кількість AND I_2 не велика кількість THEN $I = I_2$.

3. IF I_1 не велика кількість AND I_2 велика кількість THEN $I = I_1$

4. IF I_1 не велика кількість AND I_2 не велика кількість THEN $I = 0$

Особливістю систем з нечіткими висновками або систем правил, є той факт, що антецендент правил може бути достовірним з певним ступенем, та приймає значення від 0 до 1. Це є наслідком того, що такі поняття як "не велика кількість", "велика кількість" мають нечітку ступінь істинності та може бути представлена функцією яка приймає значення між 0 і 1.

Нечітка логіка дозволяє оцінити ступінь активації кожного правила, оцінюючи кожен складову антецедента правила, потім поєднуючи їх логічним зв'язком AND. У подальшому можна активувати декілько правил одним і тим же набором вхідних змінних. Як наслідок, різні логічні моделі, що описані продукційними правилами, можуть працювати одночасно.

Логічний висновок буде визначатися логічної процедурою, що дозволяє визначити внесок кожної логічної моделі в кінцевий результат, заснований на ступенях активації відповідних правил. На рис 2.1 показано приклад отримання значення показника I на основі використання системи продукційних правил

1-4, наведеної вище.

Завдяки структурі, що проілюстрована системою продукційних правил 1 -4, система нечіткого висновку має практичну цінність для подання знань експертів. Продукційні правила, які записано на природній мові, забезпечують сприятливий інтерфейс між знаннями експертів і складним математичним механізмом, необхідним для оцінки ІЕМ МС: лінгвістичні змінні автоматично зіставляються з математичними формулами та не вимагають від користувача конкретних знань про основні механізми логічного висновку. Крім того, можна контролювати рівень активації кожного продукційного правила, щоб отримати лінгвістичне пояснення того, як система логічного висновку виробила результуюче значення.

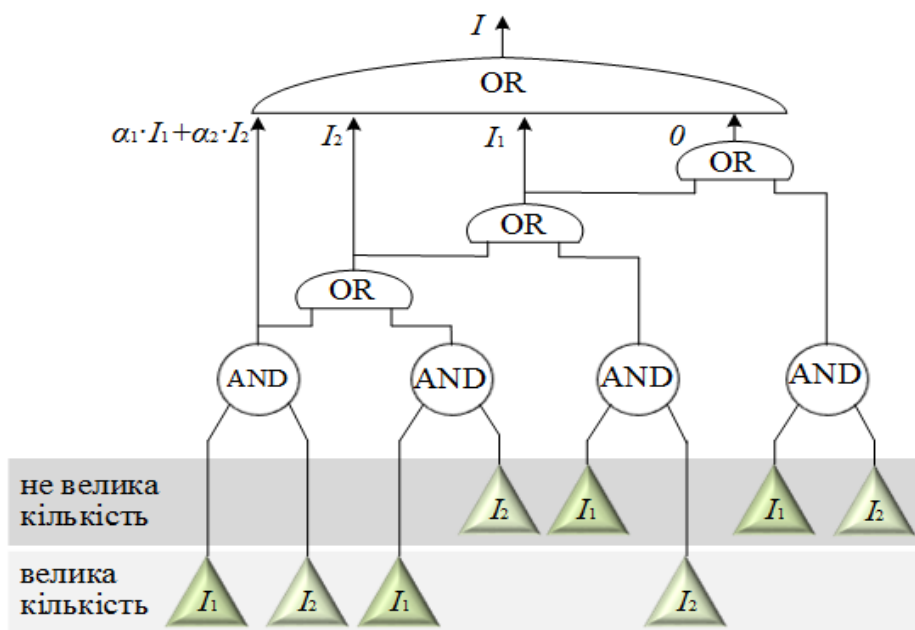


Рис. 2.2 Логічний зв'язок змінної на вершині ієрархії (I) з емпіричними даними (I_1, I_2)

2.2 Методики оцінювання ефективності міського середовища за допомогою нечіткої логіки.

Зупинимось більш детально на формуванні матриці знань (*Knowledge Matrix*) для оцінки матеріально-енергетичних і інформаційних потоків в МС. Під матрицею знань визначемо таблицю, сформовану за такими правилами (табл. 2.1):

Таблиця 2.1 Матриця знань

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

1. Розмірність цієї таблиці дорівнює $(n + 1) \times N$, де $(n + 1)$ — кількість стовпчиків, а $N = k_1 + k_2 + \dots + k_l$ — кількість строк.

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

3. Кожна строка матриці представляє собою комбінацію значень вихідної змінної y . При цьому перші k строк відповідають значенню вихідної змінної $y = y_1$, наступні l строк відповідають значенню вихідної змінної $y = y_j$, останні p строк відповідають значенню вихідної змінної $y = y_m$.

4. Елемент матриці A_i^{mp} , який знаходиться на перетині i -го стовпчика та mp -ї строки відповідає лінгвістичній оцінці параметру x_i в строці нечеткої бази знань с номером mp . При цьому лінгвістична оцінка A_i^{mp} отримується з терм-множини яке відповідає змінній x_i , тобто $A_i^{mp} \in A_i, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, p = \overline{1, l}$.

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

$$\{x_1, x_2, \dots, x_n\} \rightarrow I(X) \quad (2.5)$$

Розглянемо методику формування матриці знань індикатора оцінювання ефективності ММС $I(X)$ за заданим вектором вхідних змінних $X = \{x_1, \dots, x_n\}$. Отримані значення вхідних змінних необхідно апроксимувати [xx]. З чисельного аналізу добре відомо, що любую елементарну функцію можна апроксимувати лінійною функцією виду:

$$I\{x_1, x_2, \dots, x_n\} = I_0 + \sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot x_j, \quad (2.6)$$

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

$$\Delta I_j = I(x_1, \dots, x_j + \Delta x_j, \dots, x_n) - I(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n) = \lambda_j \cdot \Delta x_j \quad (2.7)$$

У відповідності до виразу (2.2), одночасна зміна двох змінних x_j і x_k , яка не впливає на зміну значення індикатора, характеризується наступною умовою:

$$\begin{aligned} \Delta I &= \lambda_j \cdot \Delta x_j + \lambda_k \cdot \Delta x_k = 0; \\ \Delta x_j &= -\frac{\lambda_k}{\lambda_j} \cdot \Delta x_k \end{aligned} \quad (2.8)$$

Наприклад, якщо змінні x_j і x_k характеризують відповідно кількість приватних автотранспортних засобів міста та обсяги емісії CO_2 , вироблені

приватним автотранспортом то умова (2.3) має інтерпретацію як компроміс між зростанням приватного автотранспорту і обсягами емісії CO₂: яким прийнятним повинен бути баланс між збільшенням емісії CO₂ і зростанням приватного автотранспорту? Наразі якщо такий баланс визначається експертом, то цей факт можна зафіксувати значенням відносини λ_k/λ_j .

Реально баланс виражений в рівнянні (2.2) залежить від поточної ситуації: наприклад, існує обмеження на викид забруднюючих речовин, незалежно від кількості транспортних засобів в місті. З іншого боку, значення індикатора $I(X)$ не повинно значно змінюватися, якщо значення змінної x_i знаходиться в діапазоні значень, заданих правовою нормою. В цьому випадку, відповідно до виразу (2.2) коефіцієнт λ_j повинен наближатися до нуля.

Таким чином, вищевикладене дозволяє стверджувати, що знання експерта можуть бути корисними при підтримці різних балансів між показниками матеріально-енергетичних потоків міського середовища (λ_k/λ_j), в залежності від досліджуваної ситуації, так і при обмеженнях на коефіцієнти 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 в якості вихідної змінної лінійні моделі у вигляді:

$$\begin{aligned}
 &\text{IF } x_1 \text{ IS } A_{11} \text{ AND } x_2 \text{ IS } A_{12} \text{ AND } \dots \text{ AND } x_n \text{ IS } A_{1n} \\
 &\text{THEN } I = I_{01} + \sum_{j=1}^n \lambda_{1,j} \cdot x_j \\
 &\dots \qquad \qquad \qquad \dots \qquad \qquad \dots \\
 &\text{IF } x_1 \text{ IS } A_{n1} \text{ AND } x_2 \text{ IS } A_{n2} \text{ AND } \dots \text{ AND } x_n \text{ IS } A_{nn} \\
 &\text{THEN } I = I_{0n} + \sum_{j=1}^n \lambda_{n,j} \cdot x_j
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

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

Розглянемо побудову матриці знань (табл. 2.1) для оцінки потоку енергетичних втрат $L(t)$ в транспортній підсистемі міського середовища.

Будемо вважати відомими:

1. Значення вхідних змінних, що характеризують потік енергетичних втрат в транспортній підсистемі міського середовища (табл. 2.1.):

– b_{29} — обсяги емісії вуглецю CO_2 , які вироблено приватним автотранспортом;

– b_{210} — обсяги емісії азоту NO_x , які вироблено легковим автотранспортом;

– b_{211} — обсяги емісії вуглецю CO_2 , які вироблено громадським автотранспортом.

2. Діапазони кількісних змін для кожної вхідної змінної:

$$x_{b_{29}} \in [\underline{x}_{b_{29}}, \bar{x}_{b_{29}}], x_{b_{210}} \in [\underline{x}_{b_{210}}, \bar{x}_{b_{210}}], x_{b_{211}} \in [\underline{x}_{b_{211}}, \bar{x}_{b_{211}}];$$

3. Функції належності, що дозволяють подавати вхідні змінні x_i , $i = \overline{1, n}$ в якості 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:

$$A_i^j = \int_{\underline{x}_i}^{\bar{x}_i} \mu^{A_i^j}(x_i) / x_i \quad (2.10)$$

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", $j \in \{1, 2, 3\}$.

4. Вихідна змінна, яка відповідає значенню оцінки потоку неперетвореної енергії в транспортній підсистемі міського середовища подано у вигляді лінійної моделі: $I_{L_{\text{тпс}}}(i) = I_{0i} + \sum_{j=1}^i \lambda_{i,j} \cdot x_j$.

Вид матриці знань, яка побудована для вхідних показників b_{29} , b_{210} , b_{211} , та визначених на відповідних терм-множинах $A_{b_{29}}^j$, $A_{b_{210}}^j$, $A_{b_{211}}^j$, де $j \in \{1, 2, 3\}$ подано в табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Матриця знань для вхідних показників b_{29} , b_{210} , b_{211}

Номер вхідної комбінації значень	Вхідні змінні			Вихідна змінна
	b_{29}	b_{210}	b_{211}	
11	$A_{b_{29}}^{11}$	$A_{b_{210}}^{11}$	$A_{b_{211}}^{11}$	$I_{L_{\text{тпс}}}(1) = I_{01} + \lambda_{11} b_{29}$ $+ \lambda_{11} b_{210} + \lambda_{11} b_{211} +$ $+ \lambda_{12} b_{29} + \lambda_{12} b_{210} + \lambda_{12} b_{211} +$ $+ \lambda_{13} b_{29} + \lambda_{13} b_{210} + \lambda_{13} b_{211}$
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	$A_{b_{29}}^{21}$	$A_{b_{210}}^{21}$	$A_{b_{211}}^{21}$	$I_{L_{\text{тпс}}}(2) = I_{02} + \lambda_{21} b_{29}$ $+ \lambda_{21} b_{210} + \lambda_{21} b_{211} +$ $+ \lambda_{22} b_{29} + \lambda_{22} b_{210} + \lambda_{22} b_{211} +$ $+ \lambda_{23} b_{29} + \lambda_{23} b_{210} + \lambda_{23} b_{211}$
22	$A_{b_{29}}^{22}$	$A_{b_{210}}^{22}$	$A_{b_{211}}^{22}$	
23	$A_{b_{29}}^{23}$	$A_{b_{210}}^{23}$	$A_{b_{211}}^{23}$	
31	$A_{b_{29}}^{31}$	$A_{b_{210}}^{31}$	$A_{b_{211}}^{31}$	$I_{L_{\text{тпс}}}(3) = I_{03} + \lambda_{31} b_{29}$ $+ \lambda_{31} b_{210} + \lambda_{31} b_{211} +$ $+ \lambda_{32} b_{29} + \lambda_{32} b_{210} + \lambda_{32} b_{211} +$ $+ \lambda_{33} b_{29} + \lambda_{33} b_{210} + \lambda_{33} b_{211}$
32	$A_{b_{29}}^{32}$	$A_{b_{210}}^{32}$	$A_{b_{211}}^{32}$	
33	$A_{b_{29}}^{33}$	$A_{b_{210}}^{33}$	$A_{b_{211}}^{33}$	

Побудована матриця знань дозволяє визначити *систему логічних висловлювань* типу "IF-IS, THEN", які пов'язують значення вхідних показників потоку енергетичних втрат з одним з можливих значень оцінки неперетворюваної енергії в транспортній підсистемі $I_{L_{\text{тпс}}}$:

$$\begin{aligned}
 & \text{IF } (b_{29} = A_{b_{29}}^{11}) \text{ AND } (b_{210} = A_{b_{210}}^{11}) \text{ AND } (b_{211} = A_{b_{211}}^{11}) \text{ OR} \\
 & (b_{29} = A_{b_{29}}^{12}) \text{ AND } (b_{210} = A_{b_{210}}^{12}) \text{ AND } (b_{211} = A_{b_{211}}^{12}) \text{ OR} \\
 & (b_{29} = A_{b_{29}}^{13}) \text{ AND } (b_{210} = A_{b_{210}}^{13}) \text{ AND } (b_{211} = A_{b_{211}}^{13}) \text{ OR} \\
 & \text{THEN } I_{L_{\text{тпс}}}(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}, \\
 & \text{OTHERWISE} \\
 & \text{IF } (b_{29} = A_{b_{29}}^{21}) \text{ AND } (b_{210} = A_{b_{210}}^{21}) \text{ AND } (b_{211} = A_{b_{211}}^{21}) \text{ OR} \\
 & (b_{29} = A_{b_{29}}^{22}) \text{ AND } (b_{210} = A_{b_{210}}^{22}) \text{ AND } (b_{211} = A_{b_{211}}^{22}) \text{ OR} \\
 & (b_{29} = A_{b_{29}}^{23}) \text{ AND } (b_{210} = A_{b_{210}}^{23}) \text{ AND } (b_{211} = A_{b_{211}}^{23}) \text{ OR} \\
 & \text{THEN } I_{L_{\text{тпс}}}(2) = I_{02} + \lambda_{21} b_{29} + \lambda_{21} b_{210} + \lambda_{21} b_{211} + \\
 & + \lambda_{22} b_{29} + \lambda_{22} b_{210} + \lambda_{22} b_{211} + \lambda_{23} b_{29} + \lambda_{23} b_{210} + \lambda_{23} b_{211}, \\
 & \text{OTHERWISE} \\
 & \text{IF } (b_{29} = A_{b_{29}}^{31}) \text{ AND } (b_{210} = A_{b_{210}}^{31}) \text{ AND } (b_{211} = A_{b_{211}}^{31}) \text{ OR} \\
 & (b_{29} = A_{b_{29}}^{32}) \text{ AND } (b_{210} = A_{b_{210}}^{32}) \text{ AND } (b_{211} = A_{b_{211}}^{32}) \text{ OR} \\
 & (b_{29} = A_{b_{29}}^{33}) \text{ AND } (b_{210} = A_{b_{210}}^{33}) \text{ AND } (b_{211} = A_{b_{211}}^{33}) \text{ OR} \\
 & \text{THEN } I_{L_{\text{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}. \tag{2.11}
 \end{aligned}$$

Будемо називати подібну систему логічних висловлювань *нечіткою базою знань (Knowledge Matrix)* оцінювання потоку неперетвореної енергії транспортної підсистеми міського середовища.

З використанням операцій $\cup$ (AND) та $\cap$ (OR) система логічних висловлювань (2.9) може бути переписано у більш компактному вигляді:

$$\cup_{p=1}^3 [\cap_{j=1}^9 (X = A_x^{jp})] \rightarrow I_{L_{\text{тпс}}}^p, \tag{2.12}$$

де $X \in \{b_{29}, b_{210}, b_{211}\}$.

Таким чином, співвідношення (2.4), яке встановлює зв'язок між вхідними параметрами x_j та вихідною змінною (значенням індикатора ефективності метаболізму) $I(X)$, формалізовано в вигляді системи нечітких логічних висловлювань (2.10), яка базується на розробленій матриці знань (табл. 2.2).

Спираючись на розроблену матрицю знань необхідно розробити методику оцінки потоку неперетвореної енергії в транспортній підсистемі міського середовища, що дозволить фіксованому вектору вхідних параметрів

$$X \in \{b_{29}, b_{210}, b_{211}\}, b_{29} \in [\underline{b}_{29}, \bar{b}_{29}], b_{210} \in [\underline{b}_{210}, \bar{b}_{210}], b_{211} \in [\underline{b}_{211}, \bar{b}_{211}]$$

поставити у відповідність значення оцінки $I_{L_{\text{тпс}}}$

Методика оцінювання потоку неперетворюваної енергії транспортної підсистеми міського середовища заснована на використанні *нечітких логічних рівнянь*, отриманих на основі *матриці знань системи логічних висловлювань* (2.4).

Розглянемо більше докладніше питання отримання нечітких логічних рівнянь. Лінгвістичні оцінки (табл.2.1) A_i^{mp} змінних b_{29}, b_{210}, b_{211} , які входять до логічних висловлювань про значення оцінки потоку втрат в транспортній підсистемі $I_{L_{\text{тпс}}}(i)$, розглядаються як нечіткі множини, визначені на універсальній множині $b_{29} \in [\underline{b}_{29}, \bar{b}_{29}], b_{210} \in [\underline{b}_{210}, \bar{b}_{210}], b_{211} \in [\underline{b}_{211}, \bar{b}_{211}]$.

Позначимо:

– $\mu^{A_{b_{29}}^{mp}}(b_{29})$ — функція належності показника $b_{29} \in [\underline{b}_{29}, \bar{b}_{29}]$ нечіткого терму $A_{b_{29}}^{mp}, m = \overline{1,3}, p = \overline{1,3}$ (табл. 2.2);

– $\mu^{A_{b_{210}}^{mp}}(b_{210})$ — функція належності показника $b_{210} \in [\underline{b}_{210}, \bar{b}_{210}]$ нечіткого терму $A_{b_{210}}^{mp}, m = \overline{1,3}, p = \overline{1,3}$ (табл. 2.2);

– $\mu^{A_{b_{211}}^{mp}}(b_{211})$ — функція належності показника $b_{211} \in [\underline{b}_{211}, \bar{b}_{211}]$ нечіткого терму $A_{b_{211}}^{mp}, m = \overline{1,3}, p = \overline{1,3}$ (табл. 2.2);

– оцінка потоку енергетичних втрат $I_{L_{\text{тпс}}}$ в транспортній підсистемі міського середовища залежить від вхідних змінних перемінних b_{29} , b_{210} , b_{211} :

$$I_{L_{\text{тпс}}} = f(b_{29}, b_{210}, b_{211}).$$

Зв'язок між розглянутими функціями визначається *нечіткою базою знань* (2.4) та може бути подано у вигляді наступних рівнянь:

$$\begin{aligned} I_{L_{\text{тпс}}}^1 &= f^1(b_{29}, b_{210}, b_{211}) = \mu^{A_{b_{29}}^{11}}(b_{29}) \wedge \mu^{A_{b_{210}}^{11}}(b_{210}) \wedge \mu^{A_{b_{211}}^{11}}(b_{211}) \vee \\ &\vee \mu^{A_{b_{29}}^{12}}(b_{29}) \wedge \mu^{A_{b_{210}}^{12}}(b_{210}) \wedge \mu^{A_{b_{211}}^{12}}(b_{211}) \vee \\ &\vee \mu^{A_{b_{29}}^{13}}(b_{29}) \wedge \mu^{A_{b_{210}}^{13}}(b_{210}) \wedge \mu^{A_{b_{211}}^{13}}(b_{211}), \\ I_{L_{\text{тпс}}}^2 &= f^2(b_{29}, b_{210}, b_{211}) = \mu^{A_{b_{29}}^{21}}(b_{29}) \wedge \mu^{A_{b_{210}}^{21}}(b_{210}) \wedge \mu^{A_{b_{211}}^{21}}(b_{211}) \vee \\ &\vee \mu^{A_{b_{29}}^{22}}(b_{29}) \wedge \mu^{A_{b_{210}}^{22}}(b_{210}) \wedge \mu^{A_{b_{211}}^{22}}(b_{211}) \vee \\ &\vee \mu^{A_{b_{29}}^{23}}(b_{29}) \wedge \mu^{A_{b_{210}}^{23}}(b_{210}) \wedge \mu^{A_{b_{211}}^{23}}(b_{211}), \\ I_{L_{\text{тпс}}}^3 &= f^3(b_{29}, b_{210}, b_{211}) = \mu^{A_{b_{29}}^{31}}(b_{29}) \wedge \mu^{A_{b_{210}}^{31}}(b_{210}) \wedge \mu^{A_{b_{211}}^{31}}(b_{211}) \vee \\ &\vee \mu^{A_{b_{29}}^{32}}(b_{29}) \wedge \mu^{A_{b_{210}}^{32}}(b_{210}) \wedge \mu^{A_{b_{211}}^{32}}(b_{211}) \vee \\ &\vee \mu^{A_{b_{29}}^{33}}(b_{29}) \wedge \mu^{A_{b_{210}}^{33}}(b_{210}) \wedge \mu^{A_{b_{211}}^{33}}(b_{211}) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Такі нечіткі логічні рівняння отримані з нечіткої бази знань (4.4) шляхом заміни лінгвістичних термів A_i^{mp} на відповідні функції належності, а операції

$\cup$ і $\cap$ — на операції $\vee$ та $\wedge$.

Більш коротко систему логічних рівнянь можливо записати наступним чином:

$$I_{L_{\text{тпс}}}^p = f^p(b_{29}, b_{210}, b_{211}) = \bigvee_{p=1}^3 \left[\bigwedge_{j=1}^3 \mu^{A_X^{jp}}(X) \right], \quad (2.14)$$

де $p = \overline{1, 3}$, $j = \overline{1, 3}$, $X \in \{b_{29}, b_{210}, b_{211}\}$.

На заключення розглянемо узагальнену методику оцінки потоку неперетворюваної енергії транспортної підсистеми міського середовища на основі використання нечітких логічних рівнянь.

Узагальнена методика оцінки потоку неперетворюваної енергії транспортної підсистеми ($I_{L_{\text{тпс}}}$) міського середовища, яка відповідає вектору фіксованих значень вхідних змінних $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, буде здійснюватися в такій послідовності:

1. Визначити вектор значень вхідних $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$;
2. Задати функцію належності нечітких термів, які будуть використовуватися в нечіткій базі знань (2.4) та визначити значення цих функцій для заданих значень вхідних змінних $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$;
3. Використовую логічні рівняння (2.5), визначити заключення для кожного продукційного правила y_j , які задаються значеннями лінійних функцій від вхідних змінних $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$:

$$y_j = I_{0j} + \sum_{j=1}^n \lambda_{1,j} \cdot x_j. \quad (2.15)$$

Продукційні правила, які визначають зміст бази знань є свого роду перемикачами, з одного лінійного закону "входи-вихід" на інший, теж лінійний (рис. 2.4).

Таким чином, запропонована методика оцінювання потоку неперетвореної енергії транспортної підсистеми ($I_{L_{\text{тпс}}}$) заснована на визначенні значення лінгвістичного терму по максимуму функції приналежності, і узагальнює цю ідею на всю матрицю знань. Обчислювальна частина запропонованої методики легко реалізується на матриці значень функцій належності, отриманої з матриці знань шляхом виконання операцій $\min$, $\max$.

Розглянута методика може бути використана як основа для оцінювання повного інформаційного потоку та потоку матеріально-енергетичних речовин, які споживаються міським середовищем за певний період часу, вільного потоку енергії (потoku ексергії), який забезпечується на підтримку життєдіяльності міського середовища (поток продуктивності) та потоку енергетичних втрат в міському середовищі за певний період часу.

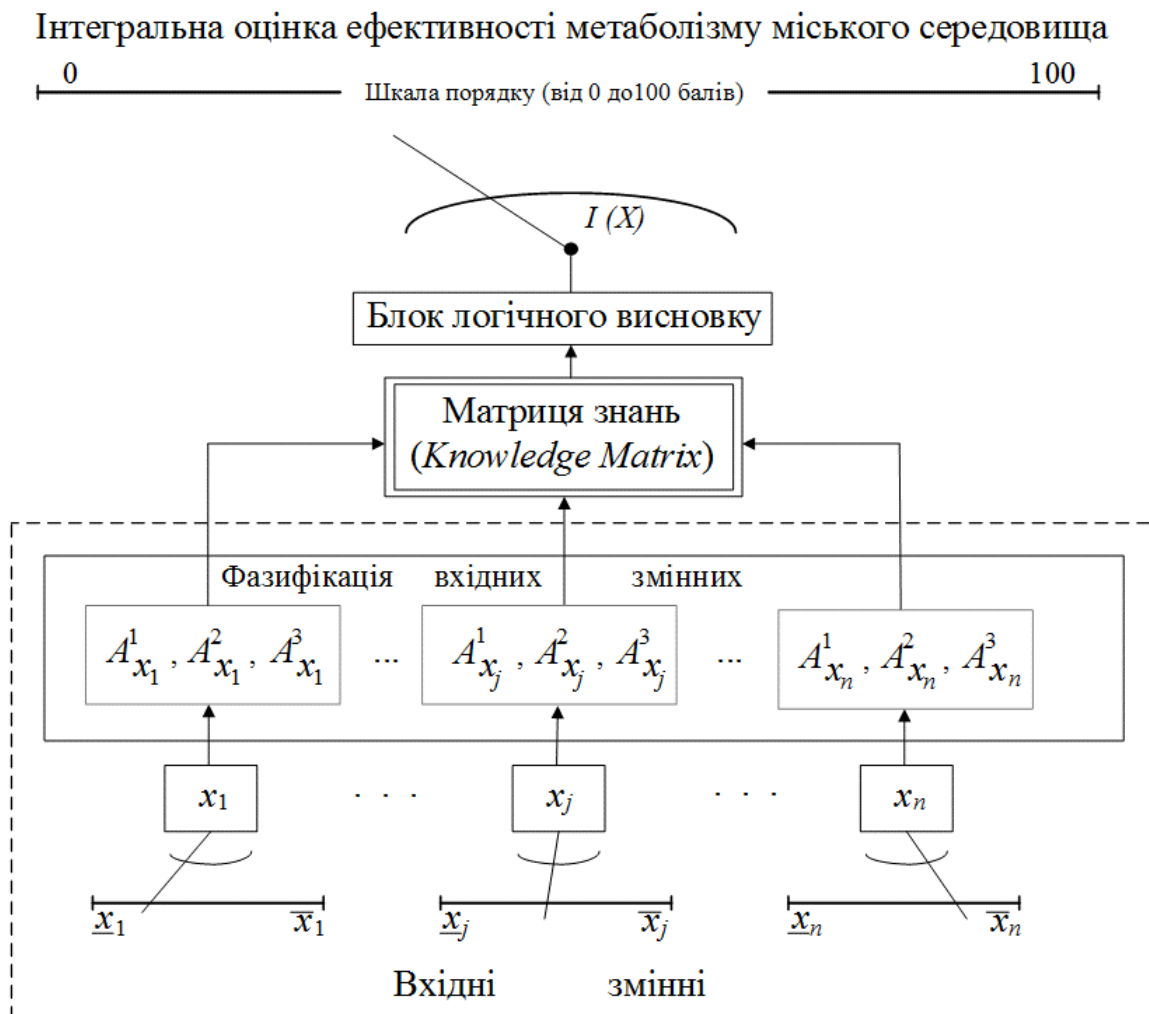


Рис. 2.3 Схема зв'язку між вхідними параметрами x_j та вихідною змінною $I(X)$ на основі матриці знань

Такі три основні потоки забезпечують матеріально-енергетичний обмін між міським середовищем та довкіллям та є як показано в розділі 3 мірою такої взаємодії. Розглянута методика оцінки таких енергетичних потоків дозволе не тільки оцінити відповідні енергетичні потоки в досліджуваних підсистемах міського середовища, але й забезпечити в подальшому оцінювання ефективності метаболізму міського середовища в умовах використання "ннн" – інформації.

Для більшості міських територій України характерна несприятлива екологічна ситуація, зумовлена підвищеними антропогенними навантаженнями, що виникають унаслідок функціонування промислових підприємств і містообслуговувальних систем. Якість природної складової

міських територій є чинником, що характеризує умови проживання населення та соціо-еколого-економічні аспекти функціонування міського середовища. Тому, в сучасних умовах для реалізації збалансованого розвитку суспільства важливим є оцінювання якості міського середовища, що має визначити основні проблеми розвитку міських територій. На сьогодні в більшості міських територій розвиток регулюється недостатньо, що призводить до цілої низки екологічних, санітарно-гігієнічних, економічних, містобудівних, транспортних проблем.

Досягнення мети сталого розвитку можливе тільки на основі застосування комплексу методів, що пояснює складність розв'язуваного завдання. Метод управління - це сукупність способів і засобів впливу суб'єкта управління на об'єкт управління щодо практичного здійснення стратегічних і тактичних цілей системи управління. У наукових дослідженнях міського управління найважливішими є три групи методів: адміністративні (організаційні або організаційно-розпорядчі), економічні та соціально-психологічні.

Адміністративні методи управління являють собою систему впливу на організаційні відносини для досягнення конкретних цілей. Вони залишаються дієвими й актуальними. До них належать організаційно-стабілізаційні, розпорядчі та дисциплінарні заходи впливу - нормативно-правові акти (заборони, дозволи, накази, розпорядження), добровільні угоди тощо. Однак такі методи не завжди розв'язують проблеми, які стоять перед ними, а також цілу низку проблем не можна розв'язати тільки за їхньою допомогою.

Економічні методи управління являють собою сукупність способів впливу шляхом створення певних економічних умов для виконання поставлених завдань міського управління. Вони покликані зробити реальним чинником регулювання розвитку великих міст, а також економічні відносини підприємств, об'єднань і міських органів управління, налагодити певне поєднання економічних інтересів усіх суб'єктів економічного життя на території, включно з власне інтересами міста як особливого економічного агента в умовах розвитку ринкових відносин. Їх можна здійснити за допомогою системи фінансово-економічних важелів,

складання економічних прогнозів, створення певного комплексу матеріальних стимулів. До таких інструментів належать податки, платежі, дотації, внески, пені, штрафи, неустойки тощо.

Соціально-психологічні методи управління являють собою способи впливу, що ґрунтуються на використанні соціально-психологічних чинників, до яких можна зарахувати оцінювання якості роботи муніципальних службовців, соціально-психологічного клімату окремих груп містян, а також можливості активізації мешканців у міському управлінні та територіальному самоврядуванні, у розв'язанні місцевих проблем та ін.

Методи міського управління доповнюють один одного. Економічні методи покликані виконувати здебільшого стимулюючу функцію щодо місцевих органів влади через введення плати за міські ресурси, а також щодо підприємств у напрямі стимулювання ефективного використання ресурсів. Контрольні та розпорядчі функції здійснюються переважно адміністративними методами. Адміністративні методи використовують у стратегічному плануванні під час постановки довгострокових цілей розвитку великих міст і в оперативній діяльності міської адміністрації.

Необхідним елементом управління є інформаційна база просторових даних про стан основних компонент і підсистем міського середовища. Отримані статистичні дані опрацьовуються за допомогою сучасних методів економетрики, зокрема, методів статистики об'єктів нечислової природи та статистики нечислових даних. Важливим моментом є той факт, що стан такої складної системи зі складною структурою та динамікою, як міське середовище, потребує для свого опису нечислових величин, передусім якісних ознак, а неминучі неточності під час вимірювання тих чи інших параметрів призводять до необхідності використовувати інтервальні дані та застосовувати відповідний економетричний апарат [50].

Наприклад, виразити в грошовому еквіваленті збитки, завдані аварією природному середовищу і здоров'ю людей, досить складно. Якщо ж одним із наслідків аварії є загибель людей, то з точки зору економіки з'являється необхідність висловити в грошовому еквіваленті життя людини, що практично неможливо. Тому розрахункові методи можуть відігравати лише обмежену роль при оцінюванні в екологічному управлінні.

Для подолання цієї проблеми нині широко використовують експертні методи, засновані на інтуїції фахівців і математичних методах збирання та аналізу їхніх думок.

У завданнях забезпечення екологічної безпеки, управління природокористуванням та охорони навколишнього природного середовища постійно використовуються різноманітні методи експертних оцінок.

Після другої світової війни в рамках кібернетики, теорії управління, менеджменту та дослідження операцій почала розвиватися самостійна дисципліна - теорія і практика експертних оцінок.

Методи експертних оцінок - це методи організації роботи з фахівцями-експертами та опрацювання думок експертів. Ці думки зазвичай виражені частково в кількісній, частково в якісній формі.

Фахівці широко використовують поняття так званої репрезентативної теорії вимірювань, що слугує основою теорії експертних оцінок, насамперед тієї її частини, що пов'язана з аналізом висновків експертів, виражених у якісному, а не в кількісному вигляді.

Репрезентативна (тобто пов'язана з представленням відношень між реальними об'єктами у вигляді відношень між числами) теорія вимірювань (надалі скорочено РТВ) є однією зі складових частин економетрики. А саме, вона входить до складу статистики об'єктів нечислової природи. У РТВ об'єкти оцінюються відповідно до якісних шкал, як правило, двох видів.

У шкалі найменувань (інша назва - номінальній шкалі) числа використовуються лише як мітки. У шкалі найменувань виміряні, наприклад, номери телефонів, автомашин, паспортів, студентських квитків.

У порядковій шкалі числа використовуються для встановлення порядку між об'єктами. Найпростішим прикладом є оцінки знань учнів. Так, у середній школі застосовують оцінки 2, 3, 4, 5, а у вищій рівно той самий сенс виражають словесно - «незадовільно», «задовільно», «добре», «відмінно». Цим підкреслюється нечисловий характер оцінок знань учнів.

Відповіді експертів набагато частіше мають якісний, ніж кількісний характер. Причина полягає в тому, що люди не мислять числами. У мисленні людини використовуються образи, слова, але не числа.

Експерт може порівняти два об'єкти, сказати, який із двох кращий (метод парних порівнянь), дати їм оцінки на кшталт «добрий», «прийнятний», «поганий», упорядкувати кілька об'єктів за привабливістю, але зазвичай не може відповісти, у скільки разів чи на скільки один об'єкт кращий за інший.

Інакше кажучи, відповіді експерта зазвичай виміряні в порядковій шкалі, або є ранжуваннями, результатами парних порівнянь та іншими об'єктами нечислової природи, але не числами. Поширена хибна думка полягає в тому, що відповіді експертів намагаються розглядати як числа, займаються «оцифруванням» їхніх думок, приписуючи цим думкам чисельні значення - бали, які потім обробляють за допомогою методів прикладної статистики як результати звичайних фізико-технічних вимірювань. У разі довільності «оцифрування» висновки, отримані в результаті опрацювання даних, можуть не мати стосунку до реальності.

Широкого поширення набуло парне порівняння. Експерту набагато легше на кожному кроці порівнювати тільки два об'єкти. Непараметрична теорія парних порівнянь (теорія люсіанів) [48] дає змогу розв'язувати складніші задачі, ніж статистика ранжирувань або розбиття.

Оцінки експертів, таким чином, слід вважати вимірними в порядковій шкалі. Використовується багато відомих прикладів порядкових шкал. Порядковими шкалами є: бофтортова шкала вітрів («штиль», «слабкий вітер», «помірний вітер» тощо), шкала сили землетрусів. У медицині порядковими шкалами є: шкала стадій гіпертонічної хвороби (за М'ясниковим), шкала ступенів серцевої недостатності (за Стражеськом-Василенком-Лангом), шкала ступеня вираженості коронарної недостатності (за Фогельсоном).

Під час оцінювання екологічних впливів початкова оцінка зазвичай порядкова: «природне середовище стабільне», «природне середовище пригнічене», «природне середовище деградує». Аналогічно в еколого-медичній шкалі: «немає вираженого впливу на здоров'я людей», «відзначається негативний вплив на здоров'я». Порядкову шкалу використовують і в інших галузях.

Порядкова шкала і шкала найменувань - основні шкали якісних ознак. Тому в багатьох конкретних галузях результати якісного аналізу можна розглядати як вимірювання за цими шкалами.

Для подальшого опрацювання результатів, отриманих за цими шкалами, застосовують різноманітні методи (метод середніх арифметичних рангів (балів), методів медіанних рангів, метод узгодження кластеризованих ранжирувань тощо), які докладно описано, наприклад, у [48]. Узагальнюючи вищенаведене, можна зробити висновок про те, що для ухвалення рішень з управління стійким розвитком міського середовища необхідно застосовувати спеціальні методи, які враховують як кількісні, так і якісні оцінки ситуацій, що виробляються групами фахівців - експертів.

Нечіткі моделі засновані на нечіткій логіці використовуються наразі коли об'єкт оцінювання має слабку формалізацію та його точний математичний опис складний або просто не відомий. Якість вихідних значень нечітких математичних моделей (похибка нечіткої моделі) безпосередньо залежить тільки від експерта, який складав та налаштовував нечітку модель. Для мінімізації помилки складають

максимально повну модель з подальшим її налаштуванням засобами машинного навчання.

2.3 Ієрархічні системи та алгоритми нечіткого логічного виведення

Ієрархічні (багаторівневі) нечіткі системи (ІНС) в даний час є активною сферою дослідження через їх природу, в основі якої лежить скорочення розміру бази правил та можливості до апроксимації. Це пов'язано з тим, що ІНС використовуються для дослідження складних систем, або окремих об'єктів, які мають велику розмірність.

В роботі проведено узагальнення в цій галузі досліджень і показано, що для подолання "прокляття розмірності" необхідно впорядкувати правила подання знань у вигляді ієрархічної структури — дерева, підпорядковуючи зростання числа можливих правил лінійної залежності від входів Авторами досліджень, викладених в роботах запропоновано використання генетичного алгоритму для оптимізації структури ІНС.

Для моделювання багатовимірних залежностей типу MISO (*Multiple Input Single Output*) "багато входів – один вихід" доцільно використовувати ієрархічну систему нечіткого логічного виведення (ІС НЛВ). Перевагою ІС НЛВ є їх компактність: адекватно описати залежності MISO можна невеликою кількістю нечітких правил [7].

В ІС НЛВ вихід однієї нечіткої бази знань (НБЗ) подається на вхід іншої НБЗ. На рис.2.4 наведено приклад узагальненої структури НБЗ, яка моделює залежність $y_0 = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ з застосуванням трьох НБЗ. Такі НБЗ описують залежності: $y_1 = f_1(x_1, x_2)$, $y_2 = f_2(x_4, x_5, x_6)$, $y_0 = f_0(x_3, y_1, y_2)$.

При великій кількості змінних експерту важко описати причинно-наслідкові зв'язки у вигляді нечітких правил. При великій кількості змінних експерту важко описати причинно-наслідкові зв'язки у вигляді нечітких правил.

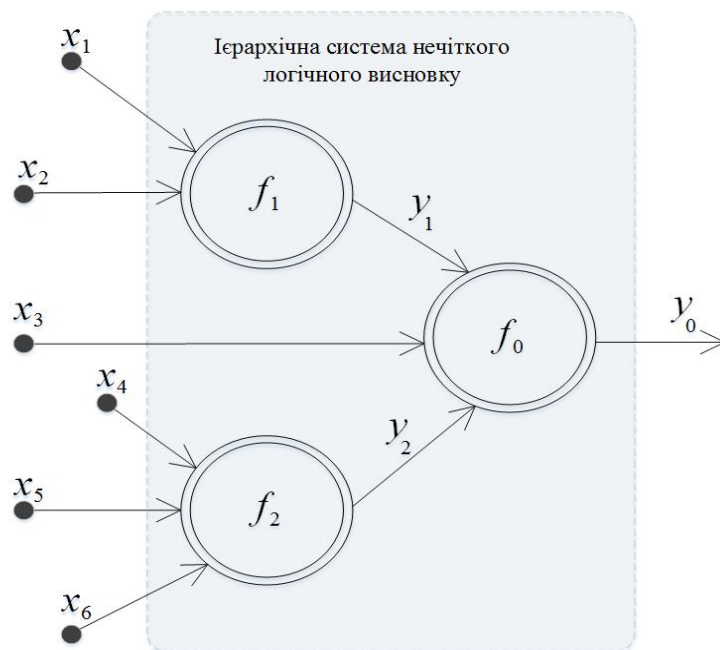


Рис.2.4 Приклад узагальненої структури ієрархічної нечіткої бази знань для моделювання залежностей MISO

Це обумовлено тим, що в оперативній пам'яті людини може одночасно зберігатися не більше 7 ± 2 понять-ознак. Отже, кількість входних змінних в одній НБЗ не повинно перевищувати це число. Сучасні дослідження показали, що оптимальною кількістю входів у НБЗ є 5-6 показників. При більшій кількості входних показників необхідно їх ієрархічно класифікувати з урахуванням наведених вище рекомендацій. Зазвичай, виконання такої класифікації не становить труднощів для експерта, так як при прийнятті рішень людина ієрархічно враховує впливаючі фактори.

Перевага ІНБЗ полягає ще і в тому, що вони дозволяють невеликою кількістю нечітких правил адекватного описати багатовимірні залежності "входи-вихід". Наприклад, для лінгвістичної оцінки кожної з змінних використовується три терма. Тоді, максимальна кількість продукційних правил для завдання відношення

$$y = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) \quad (2.16)$$

з застосуванням одної бази знань буде складати $3^6 = 729$, тоді як для ієрархічної бази даних (рис.5.1.), яка описує ту ж залежність, максимальна кількість правил буде рівним $3^3 + 3^3 + 3^2 = 171$.

На сьогодні існує два підхода до створення ІНС:

– перший підхід складається з виконання нечіткого виведення для проміжних змінних з подальшою передачею чітких значень обчислених змінних в нечіткі системи наступного рівня ієрархії. Недолік цього способу полягає в тому, що над проміжними змінними (y_1, y_2 на рис.2.4.) послідовно виконуються операції дефазифікації (*defuzzification*) і фазифікації (*fuzzification*). Нечіткі результати проміжних логічних висновків дефазифікують, потім отримані чіткі значення подають на вхід нечітких систем наступного рівня ієрархії де вони фазифікуються, тобто стають нечіткими. Отже, для проміжних змінних треба задавати функції належності. Крім того, необхідно забезпечити еквівалентність нечітких множин до та після операцій дефазифікації і фазифікації.

– другий підхід на застосовує процедури дефазифікації і фазифікації для проміжних змінних. Результат логічного висновку у вигляді нечіткої множини безпосередньо передається на наступний рівень ієрархії. Тому, для опису проміжних змінних в ІНБЗ досить задати терм-множини, без визначення функцій належності. Переваги другого підходу беззаперечні.

Під системою нечіткого логічного виведення (НЛВ) будемо розуміти процес отримання нечітких висновків про необхідному управлінні об'єктом на основі нечітких умов або передумов, що є інформацію про поточний стан об'єкта управління або спостереження. Цей процес поєднує в собі всі основні концепції теорії нечітких множин: функції приналежності, лінгвістичні змінні, методи нечіткої імплікації та інше. Розробка і застосування систем НЛВ включає в себе низку етапів, реалізація яких виконується на основі положень нечіткої логіки (рис.2.5).

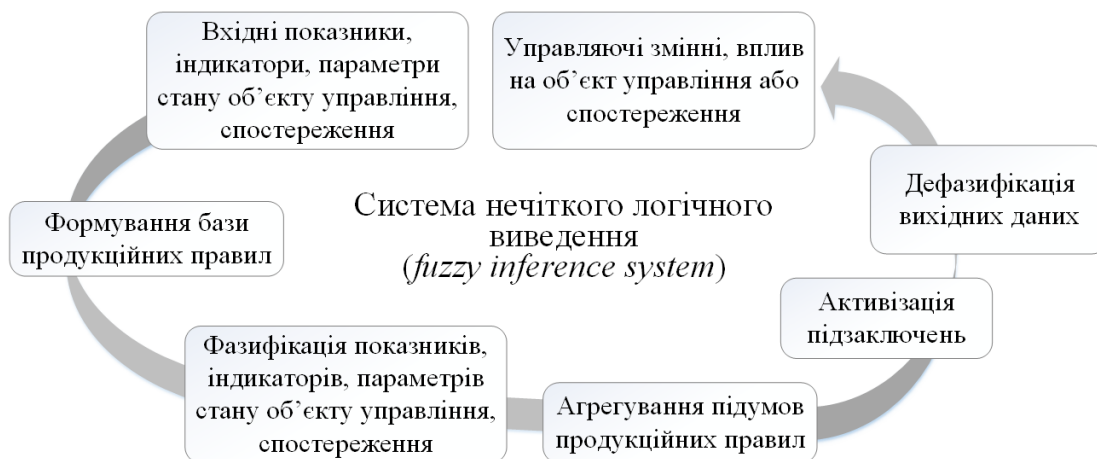


Рис.2.5. Діаграма процесу нечіткого логічного виведення

Розглянуті окремі складові процесу НЛВ можуть бути реалізовані неоднозначним чином: агрегування може проводитися не тільки з застосуванням нечіткої логіки Заде, активізація може проводитися різними методами нечіткої композиції, на етапі акумуляції об'єднання може виконуватися відмінним від тах-об'єднання способом, дефазифікація може проводитися різними методами.

Таким чином, вибір конкретних способів реалізації окремих етапів нечіткого виведення визначає той або інший алгоритм нечіткого виводу. В даний час залишається відкритим питання критеріїв та методів вибору алгоритму нечіткого виведення в залежності від конкретних завдань. В теперішній час в системах НЛВ частіше застосовуються алгоритми Мамдані (*Mamdani*), Цукамото (*Tsukamoto*), Ларсена, Такагі-Сугено-Канга (*Sugeno*).

Класична структура моделі НЛВ показана на рис. 2.4. Структура моделі складається з наступних компонентів: бази правил, блока фазифікації, блока вироблення рішення, блоку дефазифікації. База правил, яка в літературі називається лінгвістичною моделлю, є множина нечітких продукційних правил $R^{(k)}$, $k = 1, \dots, N$, у вигляді:

$$R^{(k)}: IF (x_1 IS A_1^k AND x_2 IS A_2^k \dots AND x_n IS A_n^k) \\ THEN (y_1 IS B_1^k AND y_2 IS B_2^k \dots AND y_m IS B_m^k), \quad (2.17)$$

де N – кількість нечітких продукційних правил,

A_i^k – нечіткі множини $A_i^k \subseteq X_i \subset R, i = 1, \dots, n$;

B_j^k – нечіткі множини $B_j^k \subseteq Y_j \subset R, j = 1, \dots, m$;

$x_1, x_2, \dots, x_n$ – вхідні змінні лінгвістичної моделі,

$$(x_1, x_2, \dots, x_n) = x \in X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n ;$$

$y_1, y_2, \dots, y_m$ – вихідні змінні лінгвістичної моделі,

$$(y_1, y_2, \dots, y_m) = y \in Y_1 \times Y_2 \times \dots \times Y_m .$$

Символи $X_i, i = 1, \dots, n$ та $Y_j, j = 1, \dots, m$ визначають відповідно простір вхідних та вихідних змінних. Необхідно взяти до уваги, що продукційні правила $R^{(k)}, k = 1, \dots, N$ зв'язані між собою логічним оператором OR.

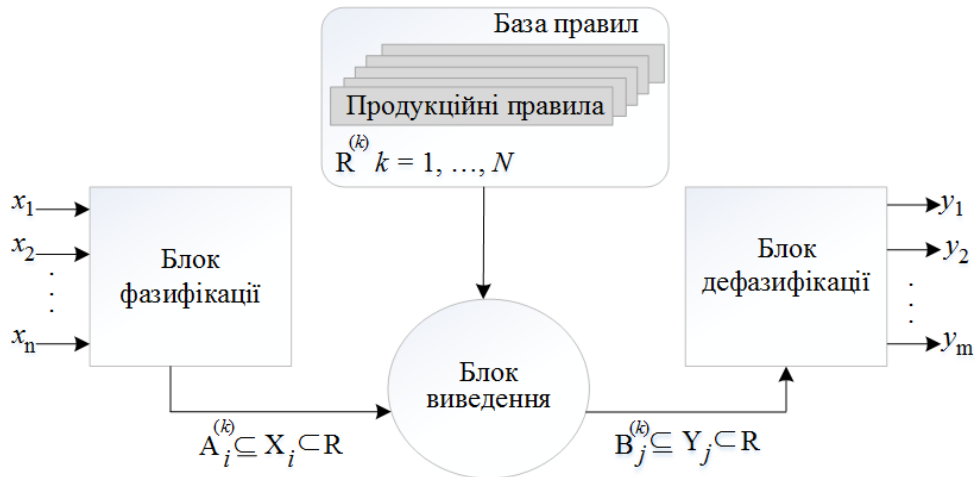


Рис.2.6. Класична структура моделі нечіткого логічного виведення

З огляду на той факт, що виходи $y_1, y_2, \dots, y_m$ взаємно незалежні, то без втрати спільності можна використовувати нечіткі правила з скалярним виходом в формі:

$$R^{(k)}: \text{ IF } (x_1 \text{ IS } A_1^k \text{ AND } x_2 \text{ IS } A_2^k \dots \text{ AND } x_n \text{ IS } A_n^k) \text{ THEN } (y \text{ IS } B^k), \quad (2.18)$$

де $B_j^k \subseteq Y_j \subset R$ та $j = 1, \dots, m, k = 1, \dots, N$.

Кожне з правил виду (2.18) складається з частини *IF*, яка називається *посиланням (antecedent)*, та частини *THEN*, яка називається *наслідком*

(consequent). Змінні $x_1, x_2, \dots, x_n$ та y можуть приймати як лінгвістичні так і числові значення [5]. Якщо ввести позначення:

$$X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n, \quad (2.19)$$

$$A^k = A_1^k \times A_2^k \times \dots \times A_n^k, \quad (2.20)$$

то правило (2.18) можна подати у вигляді імплікації:

$$R^{(k)} : A^k \rightarrow B^k, k = 1, \dots, N. \quad (2.21)$$

Необхідно врахувати, що правило $R^{(k)}$ можна інтерпретувати як нечітке відношення, визначене на множині $X \times Y$, тобто $R^{(k)} \subseteq X \times Y$ — це нечітка множина з функцією належності

$$\mu_{R^{(k)}}(x, y) = \mu_{A^k \rightarrow B^k}(x, y). \quad (2.22)$$

При розробці системи оцінювання ефективності метаболічних трансформацій в міському середовищі з використанням нечіткої логіки необхідно оцінити достатність кількості нечітких правил, їх несуперечливість та наявність кореляції між окремими правилами. Ці проблеми детально обговорені в роботах [5, 7, 28].

Блок фазифікації оперує нечіткими множинами. Тому конкретне значення $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X$ первинного показника підлягатиме операції фазифікації, в результаті якої буде сопоставлено нечітке множество $A \subseteq X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$. Нечітка множина A подається на вхід блоку виведення. На виході блоку відповідно до узагальненого нечіткого правила *modus ponens* можуть бути отримано або N нечітких множин $B^k \subseteq Y$ або одне нечітке безліч $B \subseteq Y$. Конкретна форма функції $\mu_{B^k}(y)$ або $\mu_B(y)$ залежить від типу застосованої трикутної норми — т-норми або s-норми.

На сьогодні на практиці в системах НЛВ найбільш частіше застосовується алгоритм виведення ТСК [57], де функція заключення визначається нечітким, але точковим чином. Завдяки цьому етап дефазифікації не потрібен, а система НЛВ значно спрощується. Загальна форма моделі ТСК може бути подана у вигляді наступних функціональних відносин:

$$R^{(1)}: IF (x_1 \text{ IS } A_1^1 \text{ AND } x_2 \text{ IS } A_2^1 \dots \text{ AND } x_n \text{ IS } A_n^1)$$

$$\begin{aligned} \text{THEN } y_1 &= f^{(1)}(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ &\dots \qquad \dots \qquad \dots \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$R^{(N)}: \text{IF } (x_1 \text{ IS } A_1^N \text{ AND } x_2 \text{ IS } A_2^N \dots \text{ AND } x_n \text{ IS } A_n^N)$$

$$\text{THEN } y_N = f^{(N)}(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

де $y_N = f^{(N)}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ чітка функція.

Заключенням для кожного продукційного правила в моделі TSK є поліноміальна функція декількох змінних. Класичне подання такої функції, найчастіше використовується на практиці — це поліном першого порядку:

$$y(i) = p_{i0} + \sum_{k=1}^N p_{ik} \cdot x_k, \quad (2.24)$$

де p_{i0}, p_{ik} — вагові коефіцієнти, які підбираються в загальному випадку в процесі навчання системи НЛВ.

Припустимо, на вхід системи НЛВ, яка реалізує алгоритм TSK, надходить вектор стану будь-якого об'єкта. Необхідно отримати вихідне значення y . Алгоритм TSK реалізується в 2 етапи для кожного правила $R^{(i)}$, $k = 2, \dots, N$.

з бази правил. На етапі 1 для правила $R^{(1)}$ розраховується

$$\begin{aligned} &\mu_{A_1^1}(x_1), \mu_{A_2^1}(x_1), \dots, \mu_{A_n^1}(x_n), \\ \omega^1 &= \begin{cases} \min\{\mu_{A_1^1}(x_1), \mu_{A_2^1}(x_1), \dots, \mu_{A_n^1}(x_n)\} \\ \text{або} \\ \mu_{A_1^1}(x_1), \mu_{A_2^1}(x_1), \dots, \mu_{A_n^1}(x_n). \end{cases} \end{aligned} \quad (2.25)$$

На етапі 2 розраховується значення

$$y = f^{(1)}(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Для правила $R^{(N)}$ отримуємо

$$\mu_{A_1^N}(x_1), \mu_{A_2^N}(x_1), \dots, \mu_{A_n^N}(x_n),$$

$$\omega^N = \begin{cases} \min\{\mu_{A_1^N}(x_1), \mu_{A_2^N}(x_1), \dots, \mu_{A_n^N}(x_n)\} \\ \text{або} \\ \mu_{A_1^N}(x_1), \mu_{A_2^N}(x_1), \dots, \mu_{A_n^N}(x_n), \end{cases}$$

(2.26)

$$y_N = f^{(N)}(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Вихідними значеннями алгоритму ТСК є зважена сума окремих значень $y_1, y_2, \dots, y_N$, тобто:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N \omega^i \cdot y_i}{\sum_{j=1}^N \omega^j}. \quad (2.27)$$

Необхідно відзначити, що у відношенні (2.20) вагові коефіцієнти ω^i повинні відповідати умові нормалізації:

$$\sum_{i=1}^N \frac{w_i}{\sum_{j=1}^N w_j} = 1.$$

Коли для кожного i -го продукційного правила $R^{(i)}$ (де $i = 1, 2, \dots, N$) реалізується функція ТСК першого порядку:

$$y_i = p_{i0} + \sum_{k=1}^M p_{ik} \cdot x_k,$$

Тоді можна в лінійному випадку базу правил записати у вигляді:

$$\begin{aligned} R^{(i)}: & IF (x_1 IS A_1^k \text{ AND } x_2 IS A_2^k \dots \text{ AND } x_n IS A_n^k) \\ \text{THEN } & y_i = \sum_{i=1}^N \frac{w_i}{\sum_{j=1}^N w_j} (p_{i0} + \sum_{k=1}^M p_{ik} \cdot x_k) \end{aligned} \quad (2.28)$$

для $k = 1, \dots, M, i = 1, \dots, N$.

Вагові коефіцієнти w_i , присутні в вираженні 5.10, є нелінійними параметрами функції y_i . Коефіцієнти w_i , визначають рівень активації кожного продукційного правила. Визначення рівня активації — це результат агрегування продукційних правил, які відповідають конкретним значенням вектора $X = (x_1, \dots, x_k, \dots, x_m)$, агрегування продукцій виконується з використанням логічного або алгебраїчного множення, тобто з використанням т-норми або s-норм.

На рис.5.3 наведено схему отримання вихідного значення y для двох вхідних змінних x_1, x_2 для двох правил $R^{(1)}$ и $R^{(2)}$.

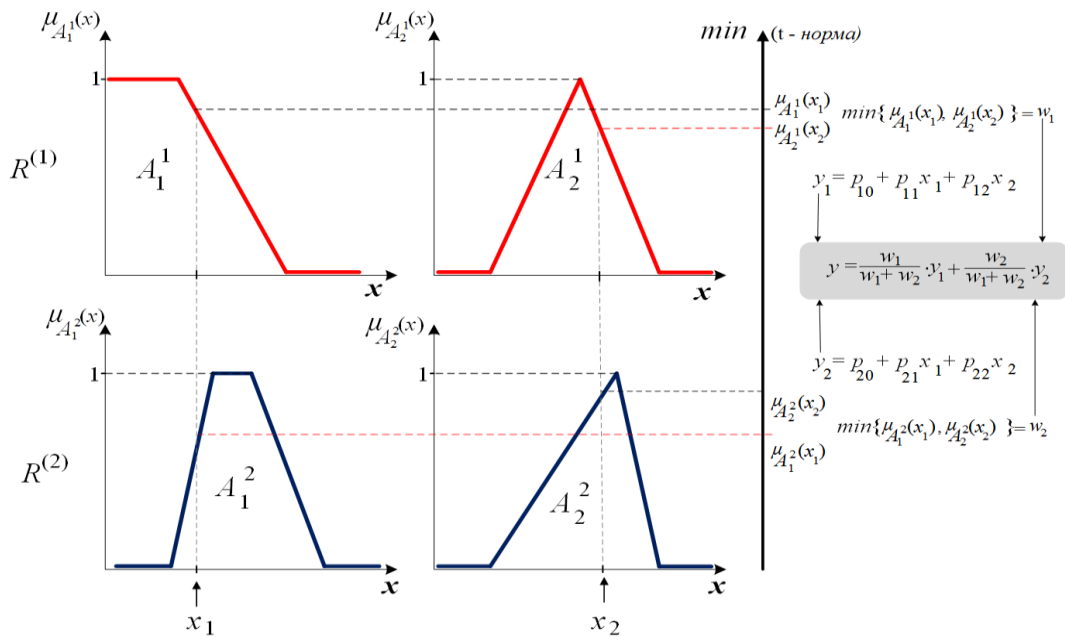


Рис. 2.7. Схема моделі нечіткого логічного виведення за алгоритмом

ТСК для двох правил з двома вхідними змінними x_1 та x_2 .

Ліва частина схеми (рис. 2.6.) відноситься до підумов продукційних правил $R^{(1)}$ та $R^{(2)}$. Рівень активації правил $R^{(1)}$, $R^{(2)}$ — $\mu_A(x)$ визначається як логічне множення (мінімум) від $\{\mu_{A_1^1}(x_1), \mu_{A_2^1}(x_2)\}$. Вагові коефіцієнти w_1 та w_2 , які враховуються при агрегуванні обох правил в моделі НЛВ TSK, відповідно дорівнюють: $w_1 = \mu_{A_2^1}(x_2)$, $w_2 = \mu_{A_1^2}(x_1)$. В правій частині схеми подано відповідні форми лінійної функціональної залежності TSK, які описують заключення для обох продукційних правил. Таким чином, остаточний (агрегований) результат висновку за моделлю TSK може бути подано у вигляді:

$$y = \frac{w_1 \cdot y_1 + w_2 \cdot y_2}{w_1 + w_2} = \frac{w_1}{w_1 + w_2} \cdot y_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2} \cdot y_2,$$

$$\text{де } y_1 = p_{10} + p_{11}x_1 + p_{12}x_2, \quad y_2 = p_{20} + p_{21}x_1 + p_{22}x_2.$$

Результатом НЛВ за алгоритмом ТСК, є чітке значення y , відповідно, відсутня необхідність в етапі дефазифікації, що суттєво зменшує трудомісткість проведення розрахунків. Переваги алгоритму полягають

також в здатності моделювати дуже складні системи, адекватний опис яких за допомогою інших алгоритмів практично неможливо через велику кількість виникаючих взаємозв'язків між нечіткими параметрами. До слабких сторін алгоритму ТСК можна віднести те, що він не дозволяє представляти вихідні змінні в лінгвістичної формі, а настройка параметрів функцій належності є складним завданням нелінійного програмування, для вирішення якого існують спеціальні методи які спираються на математичний апарат штучних нейронних мереж.

2.4 Математична модель оцінювання ефективності метаболізму міського середовища на основі підходу ТСК

Основні заходи щодо побудови математичної моделі оцінювання ефективності ММС на основі підходу ТСК можна поділити на три етапи:

- 1 етап — визначення вхідних і вихідних параметрів нечіткої моделі.
- 2 етап — побудова нечіткої бази знань.
- 3 етап — вибір та обґрунтування алгоритму системи НЛВ.

Перші два етапи були детально розглянути в розділі 4, далі буде більш детально розглянуто математична модель реалізації алгоритму ТСК для обчислення ефективності ММС.

Розглянемо завдання оцінити виміряні величини $x_1, \dots, x_k, \dots, x_n$ (листя деревовидної структури, яку наведено в рис. 2.3) для кожної з яких можна поставити у відповідність три функції приналежності μ_k^1 , μ_k^2 , μ_k^3 . Кожне з виміряних величин может належати до одного з трьох термів [12]:

- виміряна величина x_k може належати до терму "мала кількість" з функцією належності μ_k^1 ;
- виміряна величина x_k може належати до терму "середня кількість" з функцією належності μ_k^2 ;
- виміряна величина x_k може належати до терму "велика кількість" з функцією належності μ_k^3 .

Кожна терм-множина A_k^j має відповідну функцію приналежності μ_k^j де $j \in \{1, 2, 3\}$, яка характеризує ступінь приналежності значення x_k до термів "мала кількість", "середня кількість", "велика кількість".

Всього можна побудувати $m = 3^n$ антецедентів продукційних правил ТСК у вигляді:

$R^{(1)}$ IF x_1 IS A_1^1 AND x_2 IS A_2^1 AND...AND x_n IS A_n^1

THEN $y_1 = f(x_1, \dots, x_n)$,

... ..

$R^{(m)}$ IF x_1 IS A_n^1 AND x_2 IS A_n^2 AND...AND x_n IS A_n^n

THEN $y_m = f(x_1, \dots, x_n)$.

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

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

На цьому етапі виконується фазифікація вхідних первинних показників які характеризують потік вільної енергії, спожитої на забезпечення життєдіяльності міста $P(t)$, потік енергетичних втрат міського середовища $L(t)$ та повний потік речовинно-енергетичних та інформаційних ресурсів, спожитих міським середовищем протягом року $N(t)$.

На практиці зручно використовувати такі функції належності, які допускають аналітичне подання у вигляді деякої простої математичної функції. Це спрощує не тільки відповідні обчислення, але й скорочує обчислювальні ресурси, необхідні для зберігання окремих значень цих функцій приналежності.

На етапі фазифікації первинних показників використовуються кусочно-лінійні функції приналежності, які, як випливає з їх назви, складаються з відрізків прямих ліній, що утворюють безперервну або кусково-безперервну функцію. Найбільш характерним прикладом таких кусково-безперервних функцій є "трикутна" та "трапецієвидна" функції

належності. Характеристики функцій належності заданих в параметричній формі наведено в таблиці 5.1.

На рис.2.3 подано приклад фазифікації обсягів емісії CO_2 , вироблених приватним автотранспортом (див. таблиця 1 додатку А, змінна b_{29}) з застосуванням відповідних терм-множин $A_{b_{29}}^1$ — "мала кількість", $A_{b_{29}}^2$ — "середня кількість", $A_{b_{29}}^3$ — "велика кількість".

Таблиця 2.3 Функції належності, які задано в параметричній формі

Найменування функцій належності	Аналітичний вираз	Параметри функції належності
а трикутн	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}$	$a \leq b \leq c$; (a, c) носій нечіткої множини; b — вершина трикутника; $(a, c)/\{b\}$ межі трикутника; $\{b\}$ — ядро трикутника; b — мода трикутника.
б трапеціє видна	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases}$	$a \leq b \leq c \leq d$; (a, d) — носій нечіткої множини; b, c — вершина трапеції; $(a, b) \cup (c, d)$ — межі трапеції; $\{b, c\}$ — ядро трапеції.

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

$$\mu_{b_{29}}^1 = \begin{cases} 1, & 0 \leq b_{29} \leq 1 \\ \frac{1,5-b_{29}}{0,5}, & 1 \leq b_{29} \leq 1,5 \\ 0, & 1,5 \leq b_{29} \end{cases} ;$$

$$\mu_{b_{29}}^2 = \begin{cases} 0, & b_{29} \leq 1 \\ \frac{b_{29}-1}{0,5}, & 1 \leq b_{29} \leq 1,5 \\ \frac{2-b_{29}}{0,5}, & 1,5 \leq b_{29} \\ 0, & 2 \leq b_{29} \end{cases} ;$$

$$\mu_{b_{29}}^3 = \begin{cases} 0, & b_{29} \leq 1,5 \\ \frac{b_{29}-1,5}{0,5}, & 1,5 \leq b_{29} \leq 2 \\ 1, & 2 \leq b_{29} \end{cases} .$$

Кожна функція належності $\mu_{b_{29}}^1, \mu_{b_{29}}^2, \mu_{b_{29}}^3$ породжує нормально випуклі унімодальні нечіткі множини $A_{b_{29}}^1, A_{b_{29}}^2, A_{b_{29}}^3$ з відповідними ядрами для кожної нечіткої множини $w_{b_{29}} = \text{core}(A_{b_{29}}^1) = 1, m_{b_{29}} = \text{core}(A_{b_{29}}^2) = 1,5$ та $b_{b_{29}} = \text{core}(A_{b_{29}}^3) = 2$, де $w_{b_{29}}, m_{b_{29}}, b_{b_{29}}$ — чіткі значення для визначення відповідно оцінок "мала кількість", "середня кількість", "велика кількість" для змінної b_{29} .

Чіткі значення w_k, m_k, b_k для кожного первинного показника x_k залежать від сукупності різноманітних факторів: нормативів якості навколишнього середовища, програм соціального та економічного розвитку міст України, нормативно-технічної документації та правових норм щодо розвитку інженерно-транспортної інфраструктури міст, нормативно-правової бази житлово-комунального господарства та надання житлово-комунальних послуг населенню. В залежності від значення первинного показника x_k можуть мати місце відношення $w_k < m_k < b_k$ або $b_k < m_k < w_k$.

Відповідно до первинного показнику b_{29} маємо виконання наступних умов:

$$\mu_{b_{29}}^1(b_{29})=1 \text{ при умові } b_{29} \leq w_{b_{29}};$$

$$\mu_{b_{29}}^2(b_{29}) = m_{b_{29}}=1 ;$$

$$\mu_{b_{29}}^3(b_{29})=1 \text{ при умові } b_{29} \geq b_{b_{29}}.$$

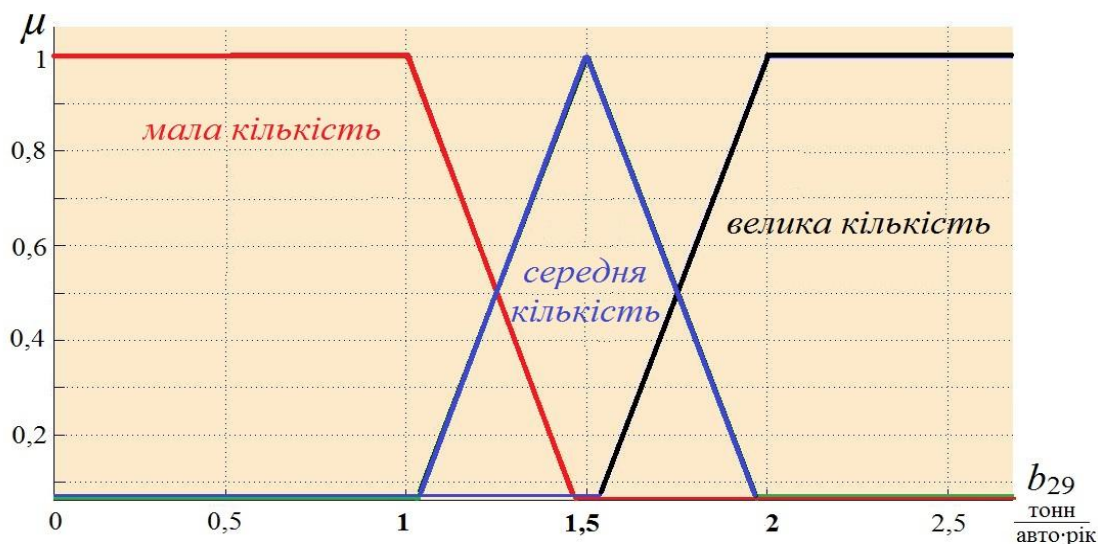


Рис. 2.8 Приклад фазифікації обсягів емісії CO₂, які вироблено приватним автотранспортом (первинний показник b_{29})

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

Для оцінки індикатора ефективності ММС використовується п'ять $p_k = 1, 2, 3, 4, 5$ пріоритетів для вхідних первинних показників x_k .

Що стосується деяких вхідних змінних x_k , кінцевий показник повинен бути неубутних (це випадок змінних, які вимірюють корисну роботу на рис.1), а для деяких змінних кінцевий показник не повинен збільшуватися (це випадок змінних, які вимірюють входи та виходи на рис. 1).

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

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

Функції f_k^j вибираються узгоджено по відношенню до функцій належності μ_k^j , наприклад, функції f_k^j повинні задовольняти таким загальним обмеженням як:

$$f_k^1(x_k) = 0, \quad \forall x_k \leq w_k \text{ або } \forall x_k \leq b_k \quad (2.27)$$

$$f_k^2(x_k) = 50, \quad \forall x_k \leq m_k \wedge \forall x_k \leq b_k \text{ або } \forall x_k \leq m_k \wedge \forall x_k \leq w_k \quad (2.28)$$

$$f_k^3(x_k) = 100, \quad \forall x_k \geq b_k \text{ або } \forall x_k \geq w_k \quad (2.29)$$

Функція f_k^j неубутна, та відповідає обмеженням:

$$0 \leq f_k^j(x_k) \leq 100 \quad (2.30)$$

(вимога до інтервалу значень індикатора оцінювання ефективності ММС між 0 та 100).

Для приклада наведеного на рис.2.5. відповідно до обмежень (2.25) – (2.26) визначена кусково-лінійна функція f_k^j , яка узгоджена з функціями належності μ_k^j , та показана на рис. 2.5.

На рис.2.6 подано кусково-лінійні функції $f_{b_{29}}^1, f_{b_{29}}^2, f_{b_{29}}^3$ які задовольняють обмеженням (2.21) – (2.22) та погоджені з відповідними функціями належності $\mu_{b_{29}}^1, \mu_{b_{29}}^2, \mu_{b_{29}}^3$. Червона лінія графіку відповідає функції $f_{b_{29}}^1$, синя — $f_{b_{29}}^2$ та чорна лінія відповідає функції $f_{b_{29}}^3$, тобто найбільший влад в інтегральну оцінку вносе змінна b_{29} коли умова IF b_{29} IS $A_{b_{29}}^1$ приймає значення "істина".

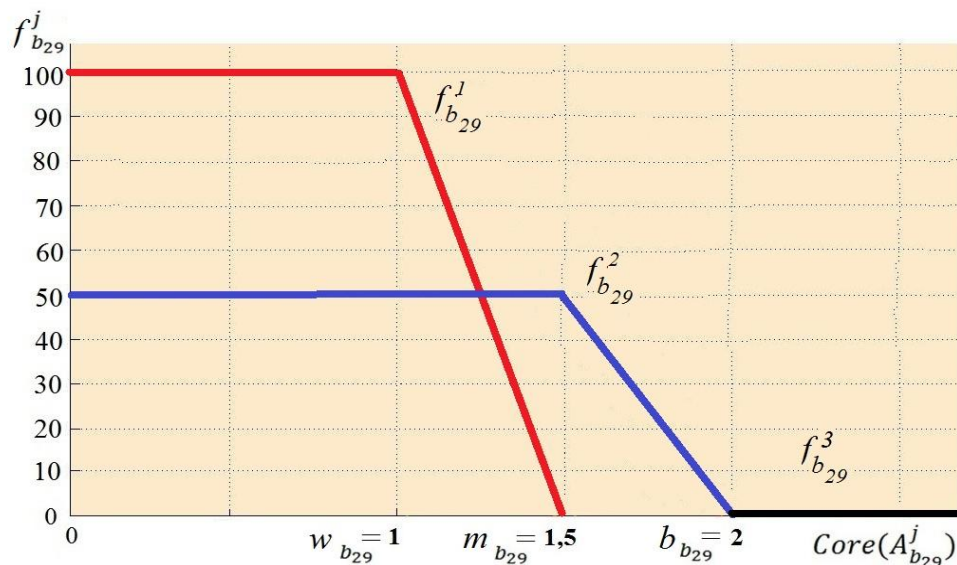


Рис.2.9 Приклад функції $f_{b_{29}}^j$, яка узгоджена з функціями належності показаними на рис.2.5, та відповідає обмеженням (2.21) – (2.22).

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

$$R^{(i)}: \text{IF } \bigwedge_{k=1}^n (x_k \text{ IS } A_k^j) \text{ THEN } y_i = \sum_{k=1}^n \frac{p_k}{p} f_k^j(x_k), \quad (2.31)$$

де i — кількість *TSK*-правил (продукційних правил) ($i = \overline{1, M}$);

n — кількість підумов продукції;

k — порядковий номер вхідної змінної;

x_k — вхідна змінна ($k = \overline{1, n}$);

A_k^j — нечітка множина, з відповідною функцією належності μ_k^j ($j \in \{1, 2, 3\}$);

p_k — коефіцієнт важливості вхідної змінної x_k ;

$$P = \sum_{k=1}^n p_k$$

Відповідно до умови (2.31) треба забезпечити виконання нерівності:

$$0 \leq y_i \leq 100.$$

Нечітке логічне заключення для M кількості TSK -правил подано у вигляді [xx]:

$$y_\alpha = \frac{\sum_{i=1}^M w_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^M w_i} = \frac{\sum_{i=1}^M w_i \cdot \sum_{k=1}^n \frac{p_k}{P} f_k^j(x_k)}{\sum_{i=1}^M w_i}, \quad (2.32)$$

де

α — проміжний рівень обчислювань загальної ієрархічної структури індикатора ефективності ММС після отриманих вхідних даних;

w_i — ваговий коефіцієнт i -го правила, який характеризує рівень активації TSK -правила, якщо рівень активації правила визначається t -нормою від $\mu_{A_1^j}(x_1), \mu_{A_2^j}(x_2), \dots, \mu_{A_n^j}(x_n)$:

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

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

Розглянемо приклад використання кусково-лінійних функцій $f_{b_{29}}^1, f_{b_{29}}^2, f_{b_{29}}^3$ (рис.2.3.) для отримання заключення на проміжному α рівні обчислювань загальної ієрархічної структури індикатора ефективності ММС. Припустимо, у найпростішому випадку якщо значення первинного показника:

- $x_k \leq w_k$, $\mu_{A_k^2}(w_k) = 0$, $\mu_{A_k^3}(w_k) = 0$, $\forall_k = \overline{1, n}$ тоді $y_i = y_\alpha = 0$, відповідно до умови $f_k^1(x_k) = 0$ (2.33);

- $m_k \leq x_k \leq b_k$, $\mu_{A_k^1}(m_k) = 0$, $\mu_{A_k^3}(b_k) = 0$, $\forall_k = \overline{1, n}$ тоді $y_i = y_\alpha = 50$ відповідно до умови $f_k^2(x_k) = 50$ (2.34);

- $x_k \geq b_k$, $\mu_{A_k^1}(b_k) = 0$, $\mu_{A_k^2}(b_k) = 0$, $\forall_k = \overline{1, n}$ тоді $y_i = y_\alpha = 100$, відповідно до умови $f_k^3(x_k) = 100$ (2.35).

В загальному випадку НЛВ на проміжному α рівні обчислювань ефективності ММС буде залежить від рівня активації w_i кожного TSK-правила який визначається t -нормою.

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

На рівні ієрархії $\alpha + 1$ обчислюється середнє арифметичне зважене для отриманого набору дійсних чисел $(y_1, \dots, y_l)^{\alpha+1}$ з позитивними дійсними ваговими коефіцієнтами для кожної з досліджуваних підсистем міського середовища $(v_1, \dots, v_l)^{\alpha+1}$:

$$\bar{y}^{\beta > \alpha+1} = \left(\frac{\sum_{l=1}^v v_l y_l}{\sum_{l=1}^v v_l} \right)^{\alpha+1}, \quad (2.36)$$

де v — кількість виходів рівня ієрархії $\alpha+1$;

v_l — позитивні дійсні вагові коефіцієнти для кожної з підсистем міського середовища;

$\bar{y}_l$ — обчислені проміжні значення індикатора ефективності ММС, які характеризують кількість різного виду енергії, речовини, інформації — N , негативної продукції — L та P — кількість продукції, яка використовується для забезпечення життєдіяльності. Розраховуються для кожної досліджуваної підсистеми міського середовища.

На останньому рівні ієрархії за умови рівності вагових коефіцієнтів вираз для підсумкової оцінки ефективності ММС має вигляд:

$$E_{\Sigma} = \sum_{i=1}^R v_l \bar{y}_l \quad (2.37)$$

де R – кількість досліджуваних підсистем, які впливають на підсумкову оцінку ефективності міського середовища.

РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ВПЛИВУ МІСЬКОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА

3.1. Лінгвістичні змінні які характеризують повну, корисну та втрачену потужність транспортної підсистеми міського середовища

Повна потужність транспортної підсистеми. Повна потужність транспортної підсистеми в метаболічній моделі яку подано на рис. 3.1 характеризується чотирма вхідними лінгвістичними змінними: *DenNet*, *NumberOfVeh*, *EnTransPriv*, *EnTransPub*.

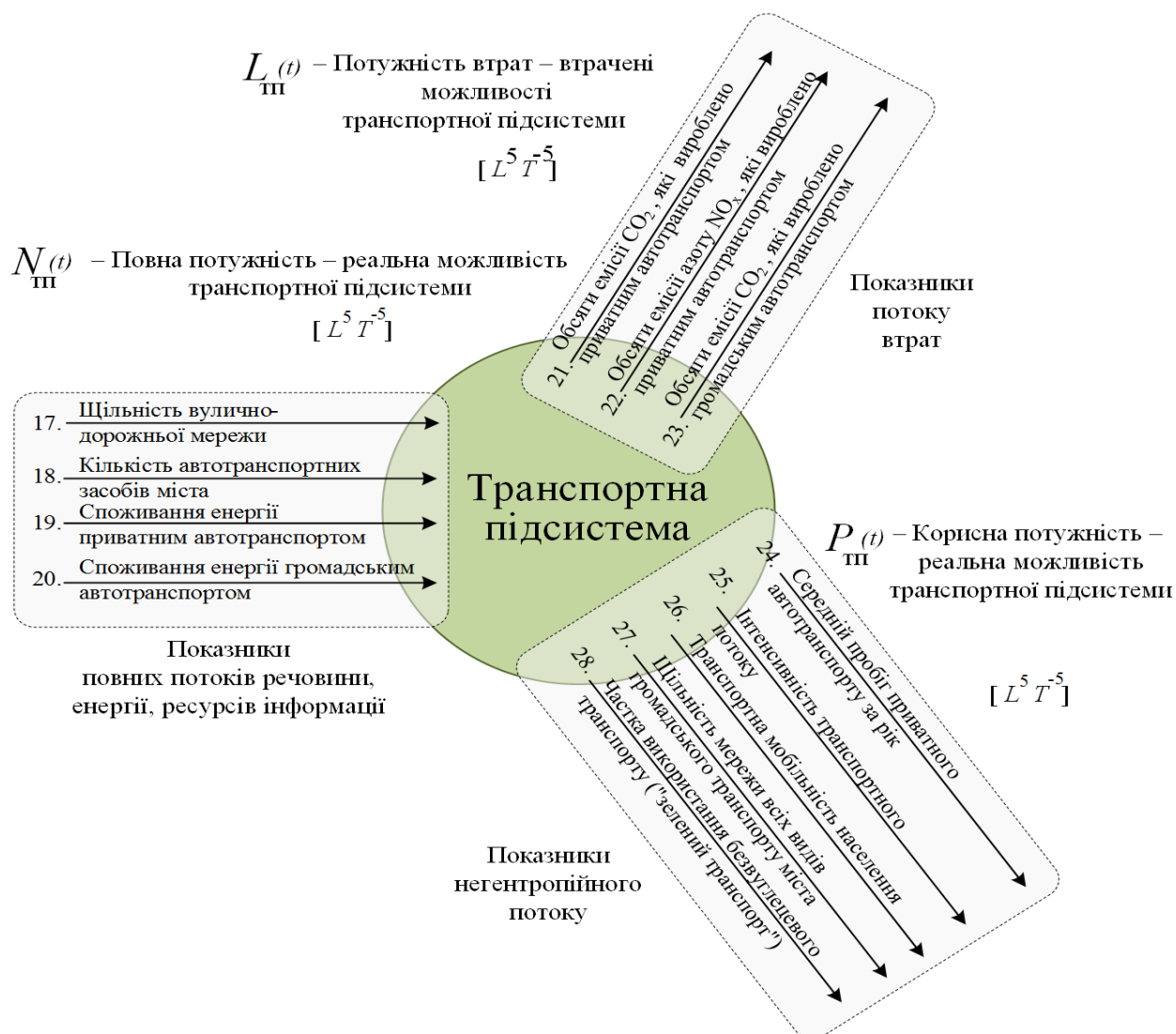


Рис.3.1 Підсистема міське господарство міського середовища
як нерівноважна відкрита система — метаболічне подання

DenNet — характеризує щільність вулично-дорожньої мережі міста.

Щільність вулично-дорожньої мережі міста визначається, як відношення довжини транспортної мережі до площі території міста [xx]:

$$\xi = \frac{\sum L_{\text{ВДМ}}}{S_{\text{міста}}},$$

де $L_{\text{ВДМ}}$ — довжина транспортної мережі, км; $S_{\text{міста}}$ — площа міста, км².

Погана оцінка відповідає — $0,7 \frac{\text{км}}{\text{км}^2}$ та менше. Середня оцінка дорівнює $2,4 \frac{\text{км}}{\text{км}^2}$. Краща оцінка складає $4 \frac{\text{км}}{\text{км}^2}$ або більше.

NumberOfVeh — показує кількість автотранспортних засобів міста. Кількість автотранспортних засобів визначає

EnTransPub — відображає обсяги споживання енергії громадським транспортом. Виконати оцінювання споживання енергії громадським транспортом та, відповідно, визначити обсяги емісії CO₂, виробленої внаслідок цього прямими методами складно. В роботах [xx, xx] запропоновано підхід який дозволяє порівняти витрати енергії на переміщення одного пасажирів громадського транспорту з витратами енергії на один приватний автотransпорт. Автори [xx, xx] припускають, що громадський транспорт можна вважати енергоефективним, якщо він використовує менше 75% енергії від кількості енергії, яка відповідає найкращій оцінці спожитої енергії приватним транспортом. Зручність і пріоритетність громадського транспорту над індивідуальним транспортом може бути виражено шляхом підвищення відсотків. Аналогічний підхід використовується для оцінки обсягів емісії CO₂, які вироблені громадським транспортом. Таким чином, найкраща оцінка споживання енергії громадським транспортом відповідає $1,97 \frac{\text{МВт} \cdot \text{ч}}{\text{рік} \cdot \text{авт}} \cdot 75\% = 48 \frac{\text{МВт} \cdot \text{ч}}{\text{рік} \cdot \text{авт}}$ або менше. Середня оцінка споживання енергії громадським транспортом відповідає $3,94 \frac{\text{МВт} \cdot \text{ч}}{\text{рік} \cdot \text{авт}} \cdot 75\% = 2,96$

$\frac{\text{МВт}\cdot\text{ч}}{\text{рік}\cdot\text{авт}}$. Погана оцінка споживання енергії громадським транспортом

відповідає $7,98 \frac{\text{МВт}\cdot\text{ч}}{\text{рік}\cdot\text{авт}} \cdot 75\% = 5,99 \frac{\text{МВт}\cdot\text{ч}}{\text{рік}\cdot\text{авт}}$ або більше.

EnTransPriv — характеризує обсяги споживання енергії приватним транспортом. Для спрощення оцінювання спожитої енергії приватним транспортом всі оцінки відносяться тільки до легкових автомобілей. Відповідно до роботи [xx] найкраща оцінка споживання енергії приватним транспортом (з урахуванням міського циклу $2200 \frac{\text{км}}{\text{рік}\cdot\text{авт}}$) середнє споживання складає $0,897 \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{км}} = (0,0767 \frac{1}{\text{км}} 11,7 \frac{\text{кВт}\cdot\text{год}}{1})$, тобто $1,97 \frac{\text{МВт}\cdot\text{год}}{\text{рік}\cdot\text{авт}}$ або менш. Середня оцінка відповідно для пробігу приватним транспортом за рік в міському циклі $4400 \frac{\text{км}}{\text{рік}\cdot\text{авт}}$ складає — $3,94 \frac{\text{МВт}\cdot\text{год}}{\text{рік}\cdot\text{авт}}$. Погана оцінка для пробігу приватним транспортом за рік в міському циклі $8900 \frac{\text{км}}{\text{рік}\cdot\text{авт}}$ складає — $7,98 \frac{\text{МВт}\cdot\text{ч}}{\text{рік}\cdot\text{авт}}$ або більше.

Корисна потужність транспортної підсистеми. Корисна потужність транспортної підсистеми в метаболічній моделі характеризується п'ятьма вхідними лінгвістичними змінними: *MobilOfPop*, *KmTrans*, *IntensTrans*, *DenNetPub*, *GreenTrans*.

MobilOfPop — змінна, яка характеризує транспортну мобільність населення. Транспортна мобільність населення визначає кількість поїздок, що припадають на одного мешканця міста за рік [xx]:

$$b = \frac{Q}{N},$$

де Q — обсяг перевезення пасажирів за рік, пас;

N — кількість населення міста, мешканців.

Краща оцінка — $100 \frac{1}{\text{рік}}$ і менше. Середня оцінка дорівнює $300 \frac{1}{\text{рік}}$.

Погана оцінка — $950 \frac{1}{\text{рік}}$ і більше.

$KmTrans$ — змінна, яка показує середній пробіг приватного автотранспорту за рік. Визначення кількості спожитої енергії приватним автотранспортом (легкові автомобілі, фургони, вантажні автомобілі), обсяги емісії CO_2 та оксидів азоту NO_x (NO та NO_2) ґрунтуються на показниках кількості кілометрів пробігу автотранспортом за рік в міському циклі. Визначення кращих, середніх та поганих оцінок загальної протяжності пробігу в міському циклі пересування за рік (місто з приміською територією) згідно з виконаними дослідженнями [xx, xx] складають: краща оцінка — $6000 \frac{\text{км}}{\text{рік}}$, середня оцінка — $12000 \frac{\text{км}}{\text{рік}}$, погана оцінка — $24000 \frac{\text{км}}{\text{рік}}$.

Спираючись на стандарт *New European Driving Cycle (NEDC)* [xx] — новий європейський цикл пересування, який розроблено для оцінювання рівня викидів забруднюючих речовин автомобільними двигунами і економії палива легковими автомобілями (виключаючи комерційні транспортні засоби) передбачає типове використання автомобілів в Європі — для міського циклу *NEDC* складає 63% від загально пробігу автомобіля за рік.

Виходячи з цього, середній пробіг приватного автотранспорту за рік в міському циклі складає: краща оцінка — $6000 \cdot 37\% = 2200 \frac{\text{км}}{\text{рік} \cdot \text{авт}}$, середня оцінка — $12000 \cdot 37\% = 4400 \frac{\text{км}}{\text{рік} \cdot \text{авт}}$, погана оцінка — $24000 \cdot 37\% = 8900 \frac{\text{км}}{\text{рік} \cdot \text{авт}}$.

$IntensTrans$ — змінна, яка показує інтенсивність транспортного руху. Інтенсивність транспортного руху на окремій ділянці дороги визначається як відношення між виміряною кількістю транспортних засобів в даний час та максимальною пропускною спроможністю дороги [xx]:

$$I_r(t) = \frac{q_r(t)}{q_{max}},$$

де r — окрема ділянка дороги;

$q_r(t)$ — виміряна кількість транспортних засобів в даний час на окремій ділянці дороги;

q_{max} — максимальна пропускна спроможність дороги.

Для отримання нечіткої оцінки інтенсивності транспортного руху використовується методика викладена в роботі [xx]. Краща оцінка відповідає 10% або менше. Середня оцінка дорівнює 30%. Погана оцінка — 50% і більше.

DenNetPub — показник щільності мережи всіх видів громадського транспорту міста [xx]. Щільність мережи всіх видів громадського транспорту міста (δ) характеризує насиченість території міста маршрутами громадського транспорту:

$$\delta = \frac{\sum L_M}{S_{\text{міста}}},$$

де L_M — загальна протяжність всіх маршрутів громадського транспорту міста (км);

$S_{\text{міста}}$ — площа міста (км²).

Погана оцінка — $1,5 \frac{\text{км}}{\text{км}^2}$ і менше. Середня оцінка дорівнює $3,5 \frac{\text{км}}{\text{км}^2}$.

Краща оцінка відповідає $5 \frac{\text{км}}{\text{км}^2}$ або більше.

GreenTrans — показник частки використання безвуглецевого транспорту ("зелений транспорт"). Частка використання безвуглецевого транспорту — це середній відсоток громадян, що використовують велосипедний або інший електротранспорт, а також пішохідне пересування, по відношенню до всіх людей, які прямують в місті (наприклад, з використанням приватного транспорту). Найкраща оцінка відповідає 50% або менше. Оцінка середня 40% та найгірша складає 30% або більше.

Потужність втрат транспортної підсистеми. Потужність втрат транспортної підсистеми в метаболічній моделі характеризується трьома вхідними лінгвістичними змінними: *CO2TransPriv*, *NOxTransPub*, *CO2TransPub*.

Обсяги емісії CO₂, які вироблено приватним автотранспортом — *CO2TransPriv*. Краща оцінка при середньому пробігу $2200 \frac{\text{км}}{\text{рік} \cdot \text{авт}}$ та середньому обсягу емісії CO₂ — $190 \frac{\text{гр}}{\text{км}}$ складає $2200 \frac{\text{км}}{\text{рік} \cdot \text{авт}} \cdot 190 \frac{\text{гр}}{\text{км}} = 0,42$

$\frac{\text{т}}{\text{рік} \cdot \text{авт}}$ або менше. Середня оцінка відповідає середньому пробігу $4400 \frac{\text{км}}{\text{рік} \cdot \text{авт}}$ та середньому обсягу емісії CO_2 — $190 \frac{\text{гр}}{\text{км}}$ та складає $4400 \frac{\text{км}}{\text{рік} \cdot \text{авт}} \cdot 190 \frac{\text{гр}}{\text{км}} = 0,84 \frac{\text{т}}{\text{рік} \cdot \text{авт}}$.

Погана оцінка при середньому пробігу $8900 \frac{\text{км}}{\text{рік} \cdot \text{авт}}$ та середньому обсязі емісії CO_2 — $190 \frac{\text{гр}}{\text{км}}$ складає $2200 \frac{\text{км}}{\text{рік} \cdot \text{авт}} \cdot 190 \frac{\text{гр}}{\text{км}} = 1,69 \frac{\text{т}}{\text{рік} \cdot \text{авт}}$ або більше.

Обсяги емісії діоксиду азоту NO_x , які вироблені приватним автотранспортом — $\text{NO}_x\text{TransPub}$. Для оцінювання обсягів емісії діоксиду азоту NO_x було застосовано Європейські норми викидів для легкових автомобілів з бензином [xx]. Краща оцінка при середньому пробігу $2200 \frac{\text{км}}{\text{рік} \cdot \text{авт}}$ складає $0,12 \frac{\text{кг}}{\text{рік} \cdot \text{авт}}$ або менше. Середня оцінка відповідає середньому пробігу $4400 \frac{\text{км}}{\text{рік} \cdot \text{авт}}$ відповідно дорівнює $0,76 \frac{\text{кг}}{\text{рік} \cdot \text{авт}}$. Погана оцінка при середньому пробігу $8900 \frac{\text{км}}{\text{рік} \cdot \text{авт}}$ — $1,33 \frac{\text{т}}{\text{рік} \cdot \text{авт}}$ або більше.

Обсяги емісії CO_2 , які вироблені громадським автотранспортом — $\text{CO}_2\text{TransPub}$. Краща оцінка складає $0,42 \cdot 75\% = 0,32 \frac{\text{т}}{\text{рік} \cdot \text{пас}}$ або менше. Середня оцінка відповідає дорівнює $0,84 \cdot 75\% = 0,63 \frac{\text{т}}{\text{рік} \cdot \text{пас}}$. Погана оцінка — $1,69 \cdot 75\% = 1,27 \frac{\text{т}}{\text{рік} \cdot \text{пас}}$ або більше.

3.2 Оцінка впливу викидів NO_x від опалення та приватного транспорту на ефективність міського середовища

Ефективність міського середовища є важливим індикатором сталого розвитку міста, оскільки вона поєднує соціальні, економічні та екологічні чинники у цілісну оцінку стану міської системи. Одним із ключових факторів, що впливають на ефективність, є рівень забруднення повітря, зокрема викиди оксидів азоту (NO_x), що утворюються під час опалення будівель та роботи приватного транспорту.

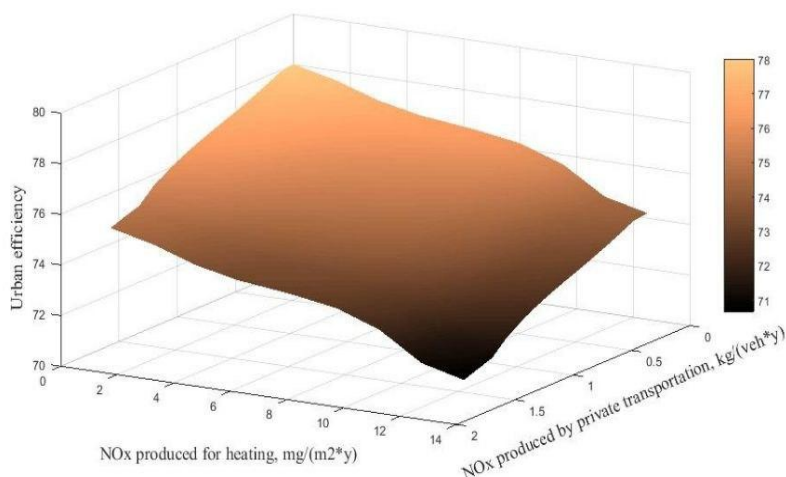


Рис. 3.2 Залежність ефективності міського середовища від обсягів викидів NO_x .

На рисунку 3.2 представлено залежність ефективності міського середовища від обсягів викидів NO_x , що продукуються для опалення (у $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{рік})$) та від приватного транспорту (у $\text{kg}/(\text{транспортний засіб} \cdot \text{рік})$). Висота поверхні відображає значення ефективності міського середовища, яке знижується із зростанням обсягів шкідливих викидів.

Аналіз результатів:

Вплив опалення на ефективність міста:

Збільшення обсягів викидів NO_x , спричинених опаленням будівель, має прямий негативний вплив на ефективність міського середовища. При підвищенні концентрації викидів від 2 до 14 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{рік})$ ефективність системи помітно знижується. Це свідчить про те, що традиційні системи опалення, які використовують викопні енергоносії, значно погіршують екологічний стан міста.

Роль приватного транспорту:

Викиди NO_x від приватного транспорту мають менш виражений, але також негативний вплив на міську ефективність. Це пояснюється тим, що приватний автотранспорт у великих містах є основним джерелом локального забруднення повітря, особливо у центральних районах. При

зростанні викидів від 0 до 2 кг/(транспортний засіб·рік) відзначається тенденція до зниження показників міської ефективності.

Взаємодія двох факторів:

Поєднання високих показників викидів NO_x від опалення та приватного транспорту призводить до найбільшого зниження ефективності міського середовища. Таким чином, ефект синергії цих двох джерел забруднення посилює негативний вплив на якість повітря, що, у свою чергу, погіршує соціально-економічні умови життя міського населення.

Висновки:

Викиди оксидів азоту від опалення будівель та приватного транспорту є критичними факторами, що впливають на ефективність міського середовища.

Зменшення залежності від традиційних систем опалення на вичопному паливі та впровадження екологічно чистого громадського транспорту сприятиме зниженню рівнів забруднення повітря.

Комплексний підхід до управління викидами NO_x дозволить підвищити ефективність міського середовища, що є ключовим етапом досягнення сталого розвитку міст.

3.3 Аналіз впливу викидів CO₂ від приватного та громадського транспорту на ефективність міського середовища

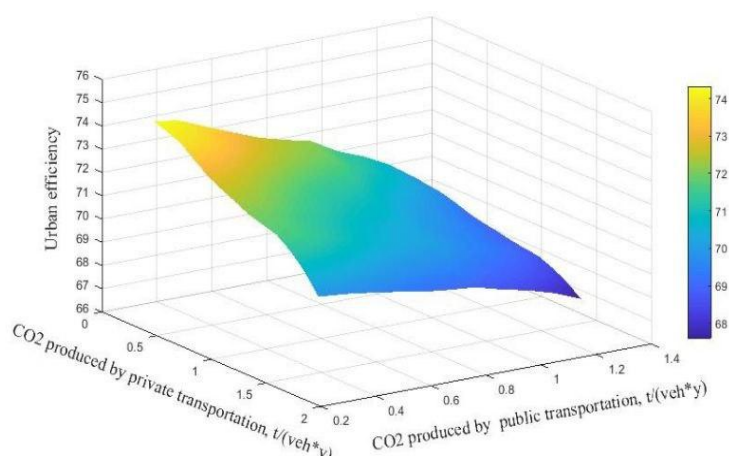


Рис. 3.3 Залежність ефективності міського середовища від обсягів викидів CO₂ приватного транспорту

Забруднення повітря, спричинене викидами вуглекислого газу (CO_2), є одним із найвагоміших чинників, що впливають на ефективність міського середовища. Викиди CO_2 формуються в результаті діяльності транспортної системи міста, зокрема приватного та громадського транспорту. На рисунку 3.3 представлено тривимірну залежність ефективності міського середовища від обсягів викидів CO_2 приватного транспорту (y т/(транспортний засіб·рік)) та громадського транспорту (y т/(транспортний засіб·рік)).

Аналіз результатів:

Вплив приватного транспорту:

Спостерігається чітка негативна тенденція зниження ефективності міського середовища зі збільшенням викидів CO_2 від приватного транспорту. При збільшенні викидів від 0 до 1,5 т/(транспортний засіб·рік) показники міської ефективності поступово знижуються. Це пов'язано з високою частотою використання приватних автомобілів, що є основним джерелом CO_2 у міських районах.

Роль громадського транспорту:

Громадський транспорт, хоча і генерує певний обсяг викидів CO_2 , має значно нижчий негативний вплив на ефективність міського середовища у порівнянні з приватним транспортом. Це пояснюється тим, що громадський транспорт перевозить більшу кількість пасажирів на одиницю енергії, що робить його більш ефективним з точки зору енерговитрат та викидів на душу населення.

Синергічний ефект викидів:

При одночасному зростанні викидів CO_2 від приватного та громадського транспорту спостерігається різке зниження ефективності міського середовища. Це демонструє необхідність оптимізації транспортної політики міста, зокрема перерозподілу пріоритетів на користь громадського транспорту та зменшення залежності від приватних автомобілів.

Висновки:

Приватний транспорт є основним джерелом викидів CO_2 , що негативно впливає на ефективність міського середовища, особливо в умовах інтенсивного автомобільного руху.

Громадський транспорт, завдяки своїй більшій енергоефективності, є ключовим елементом для зменшення викидів CO_2 та підвищення екологічної стійкості міських територій.

Перехід на низьковуглецеві види громадського транспорту (електробуси, трамваї, тролейбуси) та розвиток інфраструктури для мікромобільності (велосипеди, електроскутери) дозволить мінімізувати викиди CO_2 у містах.

Оптимізація транспортного балансу між приватним та громадським транспортом є важливим кроком для підвищення ефективності міського середовища та досягнення цілей сталого розвитку.

3.4 Вплив частки відновлюваної енергії та загального енергоспоживання на ефективність міського середовища

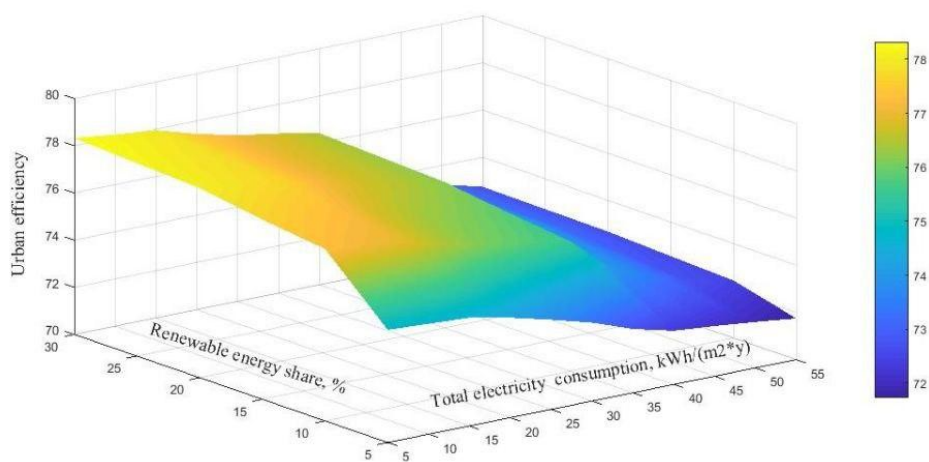


Рис. 3.4

Енергетичне споживання є ключовим чинником у функціонуванні міських систем, особливо у контексті сталого розвитку. Перехід до відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та ефективне управління загальним енергоспоживанням дозволяють мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище та підвищити загальну ефективність міського середовища. На рисунку 3.4 представлено залежність

ефективності міського середовища від частки відновлюваної енергії (у %) та загального споживання електроенергії (у кВт·год/(м²·рік)).

Аналіз результатів:

Частка відновлюваної енергії:

Збільшення частки відновлюваної енергії у загальному енергетичному балансі позитивно впливає на ефективність міського середовища. При значенні частки ВДЕ, що перевищує 20-25%, показники ефективності міста стабілізуються на високому рівні. Це підкреслює важливість впровадження альтернативних джерел енергії, таких як сонячна, вітрова та гідроенергія.

Загальне енергоспоживання:

Зі збільшенням загального споживання електроенергії ефективність міського середовища поступово знижується. В умовах високого споживання, що перевищує 40-50 кВт·год/(м²·рік), спостерігається помітне падіння ефективності. Це пояснюється нераціональним використанням енергетичних ресурсів та залежністю від викопних джерел енергії, які є основним джерелом шкідливих викидів.

Поєднання впливу ВДЕ та споживання енергії:

Графік демонструє, що навіть при високому рівні загального енергоспоживання, підвищення частки відновлюваної енергії здатне компенсувати негативний вплив. Водночас, низька частка ВДЕ у поєднанні з високим енергоспоживанням призводить до різкого зниження ефективності міського середовища.

Висновки до підпункту:

Збільшення частки відновлюваних джерел енергії позитивно корелює з підвищенням ефективності міського середовища, що свідчить про необхідність активного розвитку екологічно чистої енергетики.

Нераціональне зростання загального енергоспоживання знижує ефективність міста, що вимагає впровадження заходів енергоефективності та модернізації міської інфраструктури.

Впровадження комплексного підходу, що поєднує підвищення частки ВДЕ та оптимізацію споживання енергії, є ключовим кроком для досягнення сталого розвитку міст.

Стратегічна політика міст повинна спрямовуватись на стимулювання використання альтернативних джерел енергії, зниження енергетичних витрат та впровадження новітніх технологій енергоефективності.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження показало, що ефективність міського середовища значно залежить від рівнів забруднення повітря, загального енергоспоживання та частки відновлюваних джерел енергії в енергетичному балансі міста. Аналіз впливу трьох ключових факторів дозволив виділити основні проблеми та шляхи їх вирішення.

Аналіз викидів оксидів азоту (NO_x) від опалення та приватного транспорту показав, що ці джерела забруднення є критичними для зниження ефективності міського середовища. Найбільший негативний вплив спостерігається при поєднанні високих обсягів викидів від обох джерел, коли ефективність міста знижується до мінімальних значень. Опалення на основі викопних джерел енергії та інтенсивне використання приватного транспорту створюють значне навантаження на міську екосистему, що вимагає термінового переходу до альтернативних енергоносіїв та розвитку громадського транспорту.

Дослідження впливу викидів CO₂ від приватного та громадського транспорту показало, що основним джерелом викидів є приватні автомобілі. Збільшення обсягів CO₂ призводить до поступового зниження ефективності міського середовища, що особливо помітно в містах із високою інтенсивністю руху. Громадський транспорт демонструє менший негативний вплив завдяки своїй енергоефективності. Найменший негативний ефект спостерігається у випадках оптимального використання електрифікованих систем громадського транспорту та мікромобільності.

Аналіз впливу частки відновлюваної енергії та загального енергоспоживання продемонстрував, що збільшення частки відновлюваних джерел енергії позитивно впливає на ефективність міського середовища. У випадку, коли частка ВДЕ перевищує 20-25%, спостерігається стабільно високий рівень міської ефективності. Водночас зростання загального енергоспоживання без заходів енергоефективності призводить до різкого

погіршення показників ефективності. Найкращі результати досягаються у випадку поєднання раціонального енергоспоживання з розвитком альтернативних джерел енергії.

Таким чином, дослідження показало, що міські системи потребують комплексного підходу для підвищення їх ефективності. Зокрема, основними заходами мають стати: зменшення забруднення повітря шляхом переходу на екологічно чисті види опалення та транспорту, оптимізація транспортної системи із розвитком громадського транспорту та мікромобільності, а також збільшення частки відновлюваної енергії у міському енергетичному балансі.

Робота довела, що традиційні джерела енергії та транспорту є основними причинами погіршення ефективності міських середовищ, а стратегія переходу на альтернативні енергоносії та інноваційні транспортні рішення є ключем до сталого розвитку міст. Кожному місту слід звертати увагу на реальний екологічний та енергетичний стан систем, щоб приймати обґрунтовані рішення для покращення якості життя мешканців.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Mikhno O., Patrakeiev I. QUALITY EVALUATION METHOD OF THE CITY ENVIRONMENT. Visnyk Taras Shevchenko National University of Kyiv. Military-Special Sciences. 2018. № 2 (39). С. 29–39. URL: <https://doi.org/10.17721/1728-2217.2018.39.29-39> (дата звернення: 14.12.2024).
2. Нешева А. Д., Павленко О. О., Касьяненко В. О. Модель екологізації транспортної складової інфраструктури міста. Вісник СумДУ, 2018.
3. Кара І. А. Визначення пасажиропотоків на міських маршрутах з використанням нечіткої логіки та трансакцій абонентів стільникового зв'язку. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, Національний університет «Львівська політехніка», 2017.
4. Чернишов О. Вплив транспорту на екологію міста. Аналіз та стратегії для України. ГО «Міські реформи», 2016.
5. Чередніченко К. В. Моделювання оптимізації міської транспортної мережі в інтегрованих транспортних системах. Збірник наукових праць «Дороги і мости», 2022.
6. Громадська організація «Міські реформи» Вплив транспорту на екологію міста. Аналіз та стратегії для України. Харків, 2016.
7. Патракеєв І. М. Нечітка модель індикатора ефективності метаболізму міського середовища. Технологія управління розвитком складних систем, 2019.
8. Чернишов О. Вплив транспорту на екологію міста. Аналіз та стратегії для України. ГО «Міські реформи», 2016.
9. Сирик З. О., Сирик О. О. Управління транспортною логістикою підприємств: сучасні виклики та перспективи. Регіональна економіка та бізнес, 2022.
10. Бауман О. В. Транспортна система міста Вінниця: основні проблеми та перспективи розвитку. Вісник Вінницького національного технічного університету, 2020.

11. Мироненко В. К. Моделювання транзитних транспортних потоків. Автошляховик України, 2012.
12. Горбачов В. М. Основи теорії транспортних процесів та систем. Конспект лекцій, Український державний університет залізничного транспорту, 2019.
13. Ковальчук С. І. Можливі шляхи вирішення екологічних проблем міського транспорту. Екологічна безпека та природокористування, 2015.
14. Громадська організація «Міські реформи» Вплив транспорту на екологію міста. Аналіз та стратегії для України. Харків, 2016.
15. Фоменко Г. Р. Транспортні потоки та їхній вплив на рівень забруднення міських магістралей. Таврійський науковий вісник, 2020.
16. Лямзін А. О. Оцінка екологічної безпеки транспортних потоків у містах. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, Національний транспортний університет, 2019.
17. Парфенюк Ю. Л. Моделі та методи управління багатоступеневою транспортною логістичною системою в умовах невизначеності. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, 2018.
18. Куклін В. М. Нечітка логіка. Навчальний посібник, що детально описує математичні основи та застосування нечіткої логіки.
19. Семенов С. В. Характеристика екологічних небезпек міських транспортних систем. Науковий вісник будівництва, 2019.
20. Громадська організація «Міські реформи» Вплив транспорту на екологію міста. Аналіз та стратегії для України. Харків, 2016.
21. Ковальчук О. М. Підходи до оптимізації функціонування транспортних систем міст за екологічними критеріями. Технічні науки, 2020.
22. Кириленко Н., Костюченко В., Кравчук Ю., Кубанов Р. Підходи та методи містобудівної оцінки території. Збірник наукових праць. Київ: КНУБА, 2023. С. 35–37.

23. Павліха Н. В., Войчук М. В. Концептуальні засади управління сталим розвитком міста в умовах європейської інтеграції та реалізації реформи децентралізації. *Регіональна економіка*. 2018. №3(89). С. 29–35.
24. Хохуляк О. Функціонально-організаційна модель управління сталим розвитком територіальної громади. *Проблеми і перспективи економіки та управління*. 2022. №4(32). С. 233–244.
25. Азарова І. Б. Управління якістю міського середовища в проектах розвитку міських територій. *Управління розвитком складних систем*. 2017. Вип. 47. С. 224–230.
26. Кириленко Н., Костюченко В., Кравчук Ю., Кубанов Р. Підходи та методи містобудівної оцінки території. *Збірник наукових праць*. Київ: КНУБА, 2023. С. 35–37.
27. Корченкова О. Новітні підходи у сфері управління сталим розвитком великих міст. *Державне управління: удосконалення та розвиток*. 2021. №7.
28. Нестеренко О.О. "Індикатори оцінки рівня сталого розвитку та їх вплив на показники інтегрованої звітності". *Науковий вісник Ужгородського національного університету*, вип. 15, ч. 2, 2017, с. 44–50.
29. Скок С.В., Стратічук Н.В. "Науково-методичні аспекти оцінки сталого розвитку міських екосистем". *Екологічні науки*, вип. 1 (28), 2020, с. 367–372.
30. Граф М.С., Свінцицька О.М., Артамонов Є.Б. "Нечітке моделювання для аналізу та прогнозування в складних інформаційних системах". *Технічна інженерія*, №1 (93), 2024, с. 139–146.
31. Лисенко В.П., Штепа В.М. "Інтелектуальні системи. Нечітка логіка (лекційний матеріал)". *Навчальний посібник*, Національний університет біоресурсів і природокористування України, 2017.
32. Скок С.В. "Система індикаторів сталого розвитку як інструмент ефективного управління урбанізованими територіями". *Таврійський науковий вісник*. Серія: Публічне управління та адміністрування, №1, 2021, с. 46–54.

33. Кондратенко Ю. П. "Нечіткі множини та нечітка логіка". Методичні рекомендації та вказівки для виконання лабораторних робіт студентами спеціальності 122 «Комп'ютерні науки», вип. 267, Миколаїв, 2019.
34. Бех В. П., Бех Ю. В., Туленков М. В. та ін. "Управління сталим розвитком". Підручник для магістрів з управління та адміністрування, Київ: НПУ імені М. П. Драгоманова, 2016.
35. Norbert, Oppenheim Urban Travel Demand Modeling [Text] / Oppenheim Norbert.— John Wiley and Sons, 1995. – 480 p.
36. Public Transport Assignment [Text]. - Department for Transport, Transport Analysis Guidance. – London, 2013. – 23 p
37. Брайловский Н. О. Моделирование транспортных систем / Н. О. Брайловский, Б. И. Грановский. - М.: Транспорт, 1978. - 124 с.
38. Sheffy, Y. Urban Transportation Networks. Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods [Text] / Y. Sheffy. – Engelwood Cliffs: Prentice-Hall, 1995. – 400 p
39. Кондратенко В. Ю. Об'єктно-орієнтовані моделі для синтезу інтелектуальних систем з нечіткою логікою / В. Ю. Кондратенко, В. С. Яценко // Праці Одеського національного політехнічного університету. – 2006. – С. 54–60.
40. Кондратенко Ю. Синтез нечітких систем підтримки прийняття рішень для задач транспортної логістики / Ю. Кондратенко, С. Енчева, Є. Сіденко // Технічні вісті. – 2010. – 1(31). – С. 61–66.
41. Кондратенко Ю. П. Методи обробки нечіткої лінгвістичної інформації в задачах багатокритерійного прийняття рішень / Ю. П. Кондратенко, Є. В. Сіденко // Матер. 6-ї Міжн. наук.-практ. конф. Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT2014. – Херсон, Травень 2014. – С. 161–163.
42. Куссуль Н. М. Інтелектуальні обчислення. Навчальний посібник (навчальний посібник з грифом МОН України) / Н. М. Куссуль, А. Ю. Шелестов, А. М. Лавренюк. – К. : «Наукова думка», 2006. – 186 с.

43. Ямпольський Л. С. Системи штучного інтелекту в плануванні, моделюванні та управлінні / Л. С. Ямпольський, Б. П. Ткач, О. І. Лісовиченко. – Київ : ДП «Видавничий дім «Персонал», 2011. – 544 с.
44. Kaufmann, A., Gupta, M. : Introduction to Fuzzy Arithmetic: Theory and Applications. Van Nostrand Reinhold Company, New York (1985).
45. Kondratenko, G., Kondratenko, Y., Sidenko, I.: Fuzzy Decision Making System for Model-Oriented Academia/Industry Cooperation: University Preferences. In : C. Berger-Vachon (ed.), Complex Systems: Solutions and Challenges in Economics, Management and Engineering 125, pp. 109–124. Springer, Cham (2018) DOI: 10.1007/978-3-319-69989-9_7.
46. Kondratenko, Y., Kondratenko, V. : Soft Computing Algorithm for Arithmetic Multiplication of Fuzzy Sets Based on Universal Analytic Models. In book: V. Ermolayev et al. (eds.), Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Application. Communications in Computer and Information Science 469, ICTERI'2014, pp. 49–77. Springer International Publishing, Switzerland (2014) DOI: 10.1007/978-3-319-13206-8_3.
47. Kondratenko, Y., Kondratenko, N. : Real-Time Fuzzy Data Processing Based on a Computational Library of Analytic Models. DATA 3(4), 1–9 (2018).
48. Kondratenko, Y., Kondratenko, N. : Universal Direct Analytic Models for the Minimum of Triangular Fuzzy Numbers. In : V. Ermolaev et al. (eds.), ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer. Proceedings of the 14th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer. CEUR Workshop Proceedings. Volume II: Workshops, pp. 100–115. Kyiv, Ukraine (2018) CEUR-WS.org/Vol-2104/paper_208.pdf.
49. Kondratenko, Y. P., Kondratenko, N. Y. : Reduced Library of the Soft Computing Analytic Models for Arithmetic Operations with Asymmetrical Fuzzy Numbers. Int. J. of Computer Research 23(4), 349–370 (2016).

50. Kondratenko, Y. P., Kondratenko, N. Y. : Soft Computing Analytic Models for Increasing Efficiency of Fuzzy Information Processing in Decision Support Systems. Chapter in book: R. Hudson (ed.), Decision Making: Processes, Behavioral Influences and Role in Business Management, pp. 41–78. Nova Science Publishers, New York (2015).

51. Lorkowski, J., Kreinovich, V. : Decision Making Under Uncertainty and Restrictions on Computation Resources: From Heuristic to Optimal Techniques. In: Bounded Rationality in Decision Making Under Uncertainty: Towards Optimal Granularity. Studies in Systems, Decision and Control 99. Springer, Cham (2018).

52. Solesvik, M., Kondratenko, Y., Kondratenko, G., Sidenko, I., Kharchenko, V., Boyarchuk, A. : Fuzzy Decision Support Systems in Marine Practice. In : IEEE Intern. Conf. on Fuzzy Systems, Naples, Italy (2017) DOI : 10.1109/FUZZ-IEEE.2017.8015471.

53. Zadeh, L. : Fuzzy sets. Information and Control 8(3), 338–353 (1965).

54. Кучерявий В.П. Екологія - Львів: Світ, 2001 - 500 с: іл. Бібліогр.: с. 480

55. Сухарев С.М., Чундак С.Ю., Сухарева О.Ю. Техноекологія та охорона навколишнього середовища. Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. 2-ге видання, стереотипне. - Львів. "Новий Світ-2000", 2005. -256с.

56. Первинні і вторинні якості // Філософський енциклопедичний словник / В. І. Шинкарук (гол. редкол.) та ін. — Київ : Інститут філософії імені Григорія Сковороди НАН України : Абрис, 2002. — С. 474. — 742 с. — 1000 екз. — ББК 87я2. — ISBN 966-531-128-X.

57. Yuehui Chen, Lizhi Peng. Programing Hierarchical TS Fuzzy Systems - www.ujn.edu.cn

58. Warren B. Powell. Approximate Dynamic Programming: Solving the Curses of Dimensionality. Wiley-Interscience; 1 edition 2007, 488 p

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО -КОМУНІКАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ КАФЕДРА
ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

Кваліфікаційна Робота на тему: «Система прийняття рішень для управління міським транспортом»

Студент: Довгаленко О. К.
Група: САДМ-61
Керівник: Сватко В. В.

1

Актуальність теми

Міста стикаються з серйозними проблемами через інтенсивну урбанізацію, яка створює навантаження на транспортну інфраструктуру, призводить до заторів, збільшення витрат енергії та погіршення якості повітря.

Транспортна система є одним із найбільших джерел викидів CO₂ і забруднюючих речовин.

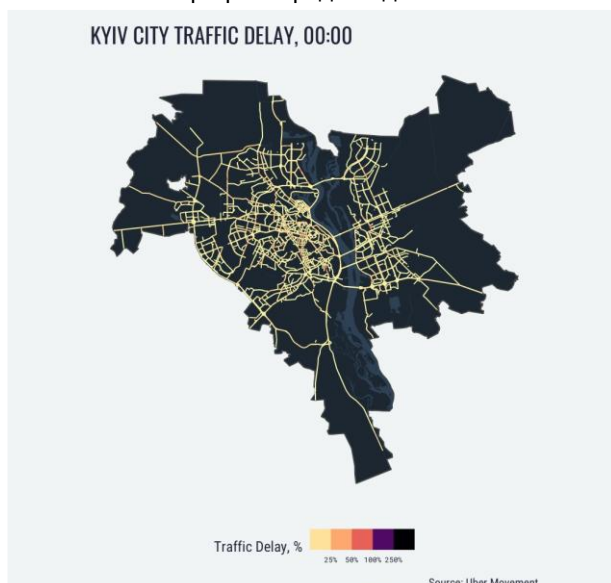
Це створює серйозні екологічні виклики, особливо в густонаселених міських районах.

З іншого боку, транспорт відіграє ключову роль у забезпеченні мобільності населення, що безпосередньо впливає на економічну ефективність і якість життя. Наукова та практична проблема: міста потребують сучасних рішень для управління транспортними потоками, які враховують енергетичні, екологічні та соціальні аспекти сталого розвитку.

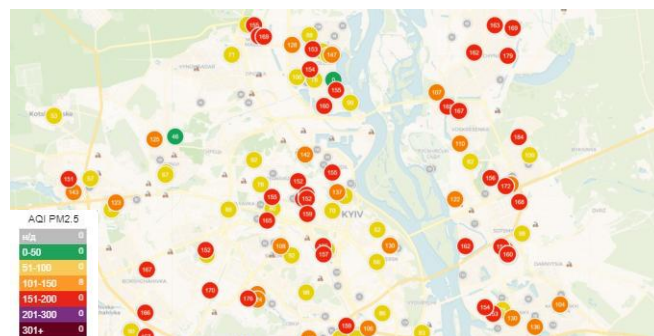
2

Трафік та викиди в місті Київ

Трафік в продовж дня



Карта викидів



3

Мета роботи

Мета дослідження:

- Створення комплексних підходів для оцінювання енергетично -речовинних потоків в транспортній підсистемі міста з метою забезпечення низьковуглецевого розвитку ТП МС
 - Розробка інформаційної технології оцінювання та вибору сценаріїв розвитку та оптимізації енергетично-речовинних потоків транспортної підсистеми міського середовища.
 - Підтримка сталого розвитку міста шляхом оптимізації використання ресурсів і впровадження екологічно чистих видів транспорту.

Об'єкт дослідження:

- Міська транспортна підсистема (на прикладі міста Києва)

Предмет дослідження

- Методи та моделі оцінювання енергетично -речовинних потоків транспортної підсистеми міського середовища.

4

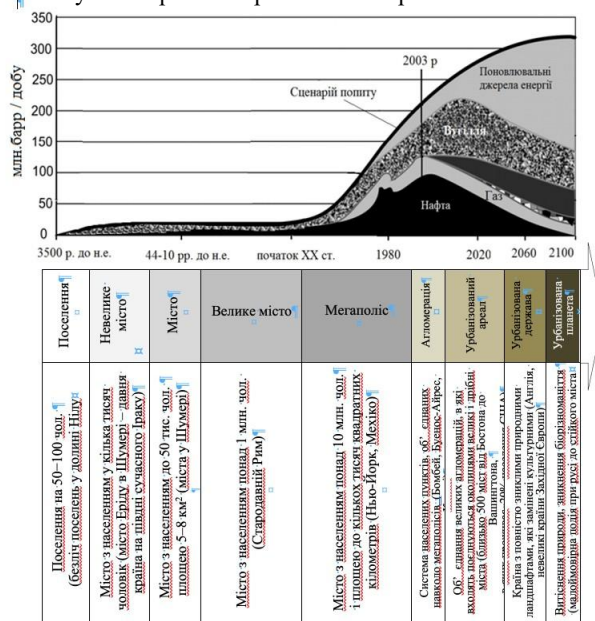
Задачі які виконані для досягнення поставленої мети

В роботі застосовано багаторівневий підхід до оцінки ефективності транспортної системи Він базувався на трьох основних етапах:

1. **Визначення ключових індикаторів ефективності.** Вони включають показники екологічного, енергетичного та соціального впливу. Наприклад, обсяги викидів CO₂, витрати енергії, час затримок у трафіку центральних вулиць міста.
2. **Розробка моделей на основі нечіткої логіки.** Цей підхід дозволяє працювати з неповною або неточною інформацією, що є типовим для міських умов. Використання лінгвістичних змінних, таких як "низький", "середній" і "високий", дозволило оцінити ефективність різних транспортних рішень.
3. **Застосування СППР.** Застосовано метод аналізу ієрархій для упорядкування альтернатив розвитку транспортної підсистеми міського середовища на основі аналізу енергетично-речовинних потоків та визначено оптимальну альтернативу.

5

Сучасні проблеми речовино-енергетичного споживання природних ресурсів транспортної підсистеми МС



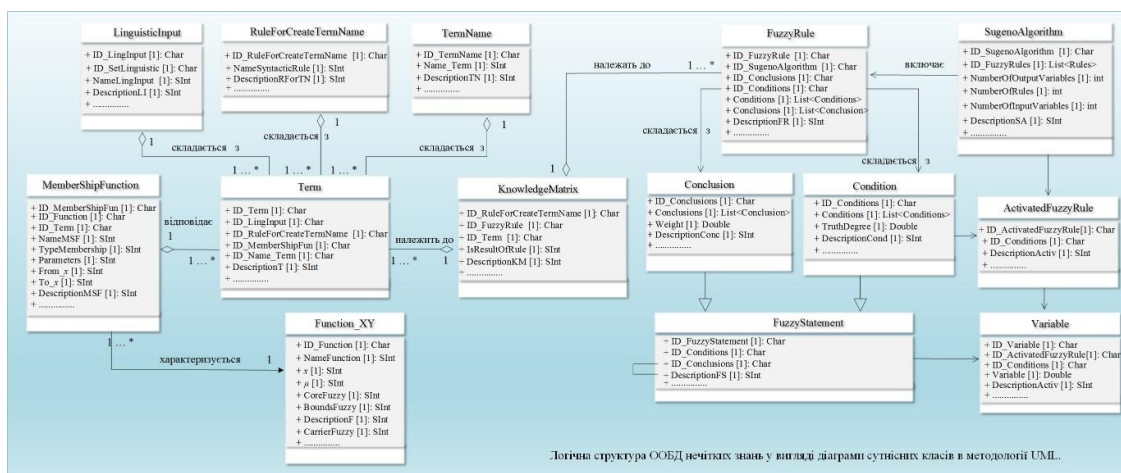
Прогноз споживання речовино-енергетичних потоків в світі



Реальна та ідеальна моделі речовино-енергетичного споживання ресурсів транспортною підсистемою МС

6

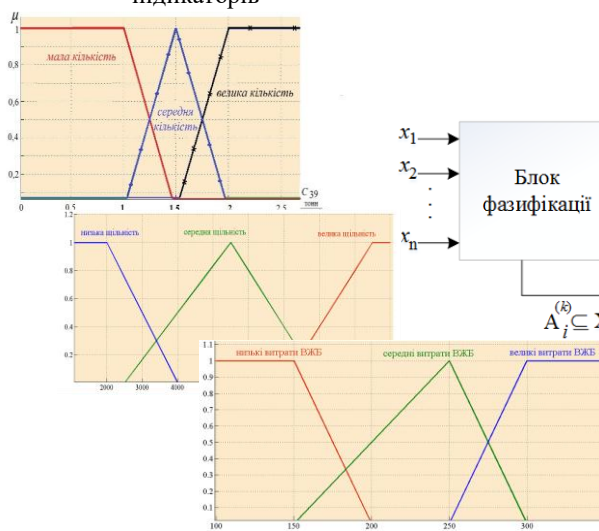
Логічна структура нечіткої бази знань у вигляді діаграми класів об'єктів



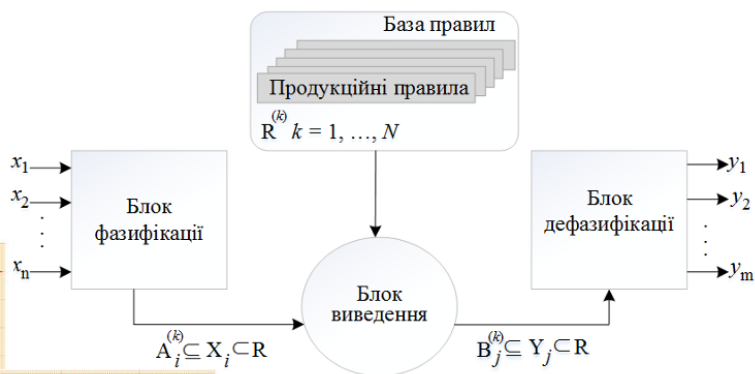
9

Фазифікація вхідних індикаторів, які характеризують енергетично-речовинні потоки транспортної підсистеми МС

Приклад фазифікації вхідних індикаторів

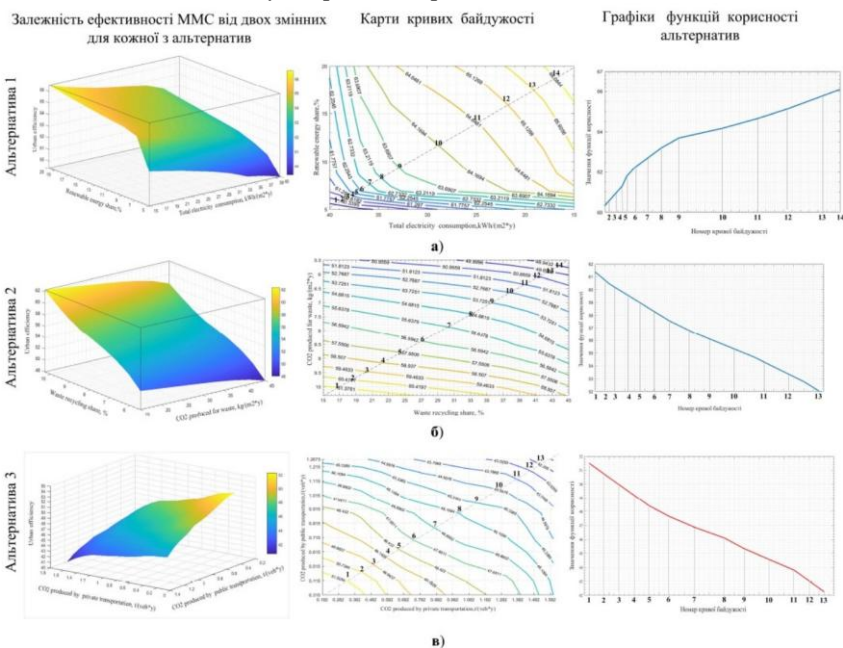


Класична структура моделі нечіткого логічного виведення



10

Результати моделювання в *MathLab* альтернатив розвитку ТП на основі аналізу енергетично-речовинних потоків



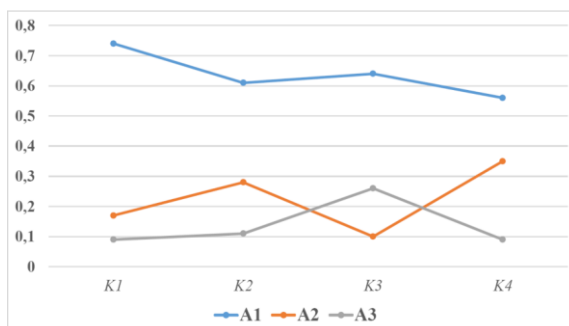
11

Застосування методу аналізу ієрархій для вибору краще альтернативи розвитку ТП МС

Структурна схема ієрархії щодо оцінювання вибору альтернатив



Графік пріоритетності альтернатив



12

Висновки

Проведена робота підтвердило, що ефективність міського середовища значно залежить від рівнів забруднення повітря, загального енергоспоживання та частки відновлюваних джерел енергії. Викиди NO_x від опалення та приватного транспорту є критичними факторами, що знижують міську ефективність. Аналіз показав, що приватний транспорт є основним джерелом CO₂, а громадський транспорт, особливо електрифікований, має менший вплив. Збільшення частки відновлюваних джерел енергії понад 20% стабільно підвищує ефективність системи. Основними рекомендаціями є перехід на екологічно чисті види опалення, розвиток громадського транспорту та мікромобільності, а також оптимізація енергоспоживання.