

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних наук
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Стан та перспективи розвитку розумних міст на основі штучного інтелекту

Виконав: студент VI курсу, групи СНнм-61
спеціальності 122 Комп'ютерні науки
(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Боднар М.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Марценко С.В.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Дуда О.М.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Боднарчук І.О.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2026

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних наук
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Боднарчук І.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

« 13 » квітня 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки
(шифр і назва спеціальності)

Студенту Боднару Миколі Орестовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Стан та перспективи розвитку розумних міст на основі штучного інтелекту

Керівник роботи Марценко Сергій Володимирович, к.т.н., доцент кафедри КН
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 10 » березня 2026 року № 4/9-150

2. Термін подання студентом завершеної роботи 26 травня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Наукові публікації про розумні міста та штучний інтелект

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1 Теоретичні основи розвитку «розумних міст» на основі штучного інтелекту. 2 Аналіз технологій прогнозування та оптимізації у «розумних містах». 3 Перспективи та виклики розвитку «розумних міст». 4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки. Додатки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1 Титульна сторінка. 2 Тема, Мета, Об'єкт, Предмет дослідження. 3 Завдання дослідження.

4 Актуальність дослідження. 5 Компоненти «розумного міста». 6 Платформа аналітичного опрацювання даних «розумного міста». 7 Інтелектуальні інформаційні технології для обробки міських даних у «розумних містах». 8 Роль штучного інтелекту та хмарних обчислень у перетворенні міських даних. 9 Концептуальна схема оптимізації на базі ШІ для потреб «розумного міста». 10 Прогнозні моделі в плануванні «розумного міста» та методи оптимізації та їх застосування в «розумних містах». 11 Інтелектуальні застосування для розподілу ресурсів у «розумних містах». 12 Висновки. 13 Завершальний слайд.

АНОТАЦІЯ

Стан та перспективи розвитку розумних міст на основі штучного інтелекту // Кваліфікаційна робота освітнього ступеня «Магістр» // Боднар Микола Орестович // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії, кафедра комп'ютерних наук, група СНм-61 // Тернопіль, 2026 // С. 72, рис. – 6, табл. – 8, кресл. – 13, додат. – 1, бібліогр. – 54.

Ключові слова: розумне місто, штучний інтелект, прогнозна аналітика, методи оптимізації, хмарні обчислення, інтернет речей, PESTEL-аналіз.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню стану та перспектив розвитку розумних міст на основі штучного інтелекту. В першому розділі подано сутність концепції «Розумне місто». Висвітлено роль Big Data та штучного інтелекту у розвитку «розумних міст». Описано інтелектуальні системи прийняття рішень у «розумних містах». Проаналізовано роль штучного інтелекту в міському розвитку. Досліджено інтелектуальні платформи та методи обробки даних «розумних міст». Обґрунтовано концептуальні основи інтеграції штучного інтелекту та хмарних обчислень в інфраструктуру «розумних міст». Сформовано теоретико-методологічні засади трансформації урбаністичних даних за допомогою технологій штучного інтелекту.

В другому розділі кваліфікаційної роботи описано прогнозу аналітику в міському плануванні. Подано прогнозування перспектив зростання «розумних міст». Досліджено моделі прогнозування транспортних потоків. Висвітлено прогнози впливу на навколишнє середовище. Досліджено інтелектуальні методи оптимізації систем «розумних міст». Розглянуто роль ШІ-керованих хмарних рішень у процесах прийняття управлінських рішень та прогностичного аналізу міського середовища.

В третьому розділі кваліфікаційної роботи подано аналіз викликів і перспектив розвитку інтелектуальних міських систем. Проаналізовано обмеження розвитку «розумних міст» з використанням ШІ.

ANNOTATION

Current State and Development Prospects of AI-Based Smart Cities // The educational level "Master" qualification work // Mykola Bodnar // Ternopil Ivan Pulyuy National Technical University, Faculty of Computer Information Systems and Software Engineering, Department of Computer Science, SNnm-61 group // Ternopil, 2026 // P. 72, fig. – 6, tables – 8, posters – 13, annexes – 1, ref. – 54.

Key words: smart city, artificial intelligence, predictive analytics, optimization methods, cloud computing, Internet of Things, PESTEL analysis.

The qualification thesis is devoted to the study of the current state and prospects for the development of smart cities based on artificial intelligence. The first chapter presents the essence of the “Smart City” concept. The role of Big Data and artificial intelligence in the development of smart cities is highlighted. Intelligent decision-making systems in smart cities are described. The role of artificial intelligence in urban development is analyzed. Intelligent platforms and methods for processing smart city data are investigated. The conceptual foundations for integrating artificial intelligence and cloud computing into smart city infrastructure are substantiated. The theoretical and methodological principles of transforming urban data using artificial intelligence technologies are formulated.

The second chapter of the qualification thesis describes predictive analytics in urban planning. Forecasting the growth prospects of smart cities is presented. Models for predicting traffic flows are investigated. Forecasts of environmental impact are highlighted. Intelligent optimization methods for smart city systems are studied. The role of AI-driven cloud solutions in managerial decision-making processes and predictive analysis of the urban environment is considered.

The third chapter of the qualification thesis presents an analysis of the challenges and prospects for the development of intelligent urban systems. The limitations of smart city development using artificial intelligence are analyzed.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

БПЛА – безпілотні літальні апарати.

ІКТ – інформаційні та комунікаційні технології

ШІ – штучний інтелект.

ІоТ (англ. Internet of Things) – Інтернет речей.

GNN (англ. Graph Neural Networks) – графова нейронна мережа.

LSTM (англ. Long Short-Term Memory) – тривалої короткострокової пам'яті.

ML (англ. Machine Learning) – машинне навчання.

SVM (англ. Support Vector Machines) – метод опорних векторів.

RFID (англ. Radio frequency identification) – радіочастотна ідентифікація.

QoL (англ. Quality of Life) – якість життя.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗВИТКУ «РОЗУМНИХ МІСТ» НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ	11
1.1 Сутність концепції «Розумне місто»	11
1.2 Big Data та штучний інтелект у розвитку «розумних міст»	14
1.3 Інтелектуальні системи прийняття рішень у «розумних містах»	15
1.4 Роль штучного інтелекту в міському розвитку	17
1.5 Інтелектуальні платформи та методи обробки даних «розумних міст»	18
1.6 Концептуальні основи інтеграції штучного інтелекту та хмарних обчислень в інфраструктуру «розумних міст»	21
1.7 Теоретико-методологічні засади трансформації урбаністичних даних за допомогою технологій штучного інтелекту	23
1.8 Висновок до першого розділу	24
2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ У «РОЗУМНИХ МІСТАХ»	25
2.1 Прогнозна аналітика в міському плануванні	25
2.2 Прогнозування перспектив зростання «розумних міст»	28
2.3 Моделі прогнозування транспортних потоків	29
2.4 Прогнози впливу на навколишнє середовище	31
2.5 Інтелектуальні методи оптимізації систем «розумних міст»	33
2.5.1 Моделі розподілу ресурсів «розумних міст»	35
2.5.2 Системи «розумного» енергоменеджменту	37
2.5.3 Оптимізація «розумного» транспортування	39
2.6 Роль ІІІ-керованих хмарних рішень у процесах прийняття управлінських рішень та прогностичного аналізу міського середовища	40
2.7 Висновок до другого розділу	45
3 ПЕРСПЕКТИВИ ТА ВИКЛИКИ РОЗВИТКУ «РОЗУМНИХ МІСТ»	46

3.1 Аналіз викликів і перспектив розвитку інтелектуальних міських систем.....	46
3.2 Аналіз обмежень розвитку «розумних міст» з використанням ШІ ...	49
3.3 Макросередовищні фактори розвитку «розумних міст»: можливості, ризики та футурологічні тенденції	50
3.4 Майбутні тенденції застосування штучного інтелекту для «розумних міст».....	57
3.5 Умови сталого розвитку «розумних міст» на основі штучного інтелекту	58
3.6 Висновок до третього розділу	60
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	61
4.1 Психологічні чинники небезпеки	61
4.2 Домедична допомога при ураженні електричним струмом персоналу інтелектуальних міських систем	63
4.3 Висновок до четвертого розділу	64
ВИСНОВКИ.....	65
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ	67
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Актуальність теми. Стрімка урбанізація сучасного світу вимагає кардинального переосмислення підходів до управління міським середовищем, що зумовлює трансформацію традиційних мегаполісів у «розумні міста». Фундаментом цієї еволюції стає інтеграція технологій штучного інтелекту (ШІ), Big Data та хмарних обчислень в єдину інфраструктуру. Теоретико-методологічна сутність концепції полягає у створенні інтелектуальних платформ та систем прийняття рішень, здатних ефективно обробляти колосальні масиви урбаністичних даних. Тому дослідження теоретичних засад взаємодії ШІ та хмарної інфраструктури є важливим для формування гнучких, адаптивних моделей міського розвитку, які спроможні відповідати на динамічні запити сучасного суспільства.

Практичний складник функціонування «розумних міст» безпосередньо пов'язаний із впровадженням методів прогнозної аналітики та інтелектуальної оптимізації. Застосування ШІ-керованих хмарних рішень дає можливість не лише здійснювати стратегічне міське планування, а й розв'язувати прикладні завдання в режимі реального часу: прогнозувати транспортні потоки, мінімізувати шкідливий вплив на навколишнє середовище та оптимізувати розподіл критично важливих ресурсів. Моделі «розумного» енергоменеджменту та інтелектуальної логістики дають змогу свою спроможність максимізувати економічну ефективність міського господарства, що робить глибокий аналіз інструментів оптимізації та прогнозування нагальною потребою для сучасної муніципальної практики.

Поряд із очевидними перевагами, системне розгортання інтелектуальних міських систем стикається із низкою суттєвих обмежень, макросередовищних ризиків та технологічних викликів. Оцінка перспектив розвитку штучного інтелекту в урбаністиці вимагає комплексного врахування як футурологічних тенденцій, так і жорстких умов забезпечення сталого розвитку. Збалансоване дослідження поточного стану технологій, наявних бар'єрів та майбутніх векторів трансформації «розумних міст» дасть змогу сформулювати ефективні стратегії

мінімізації ризиків та визначити оптимальні шляхи розбудови безпечного, екологічного та комфортного міського простору майбутнього. Тому стан та перспективи розвитку розумних міст на основі штучного інтелекту є актуальним напрямком сучасних наукових досліджень.

Мета і задачі дослідження. Метою даної кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Магістр» є комплексне теоретичне обґрунтування та практичний аналіз стану, викликів і перспектив розвитку «розумних міст» на основі інтеграції технологій штучного інтелекту, хмарних обчислень та прогнозової аналітики для оптимізації управління міською інфраструктурою та забезпечення її сталого розвитку. Для досягнення поставленої мети потрібно виконати ряд завдань, зокрема:

– Дослідити теоретичні засади концепції «розумного міста» та роль технологій штучного інтелекту, Big Data й хмарних обчислень у трансформації урбаністичних даних.

– Проаналізувати методи прогнозової аналітики в міському плануванні, зокрема моделі прогнозування транспортних потоків та екологічного впливу.

– Оцінити інструменти інтелектуальної оптимізації управлінських процесів, систем розподілу ресурсів, «розумного» енергоменеджменту та транспортування.

– Визначити ключові виклики, обмеження та перспективи розвитку інтелектуальних міських систем у контексті забезпечення їхнього сталого розвитку.

Об'єкт дослідження процес функціонування та розвитку інфраструктури «розумних міст» в умовах цифровізації та інтеграції сучасних інтелектуальних інформаційних технологій.

Предмет дослідження: теоретико-методологічні засади, технологічні інструменти, моделі прогнозової аналітики та оптимізації на основі штучного інтелекту, що забезпечують трансформацію та сталий розвиток систем управління «розумними містами».

Наукова новизна одержаних результатів кваліфікаційної роботи полягає у комплексному теоретичному узагальненні наукового завдання щодо оцінки

стану, оптимізації та визначення перспектив розвитку інтелектуальних систем управління «розумними містами» на основі технологій штучного інтелекту.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що сформульовані в роботі висновки, моделі та рекомендації можуть бути безпосередньо використані для цифровізації та підвищення ефективності міського управління.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні результати проведених досліджень обговорювались на XIII науково-технічній конференції «Інформаційні моделі, системи та технології» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, 2025 р.).

Публікації. Основні результати кваліфікаційної роботи опубліковано у двох працях конференції (Див. додатки А).

Структура й обсяг кваліфікаційної роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури з 54 найменувань та одного додатка. Загальний обсяг кваліфікаційної роботи складає 72 сторінки, з них 50 сторінки основного тексту, який містить 6 рисунків та 8 таблиць.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗВИТКУ «РОЗУМНИХ МІСТ» НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

1.1 Сутність концепції «Розумне місто»

Швидкий прогрес в індустрії ІКТ останнім часом забезпечив нові методи обробки та аналізу поточних джерел даних у «розумних містах». Різноманітні технології впроваджуються у містах, щоб зробити їх придатнішими для життя, ефективнішими, інтелектуальнішими, стійкішими та життєздатнішими. Інтелектуальні та ефективні моделі обробки даних для застосунків машинного зору в «розумних містах» – це інтелектуальні системи виявлення для моніторингу швидкості й потоку транспортних засобів, а також руху пішоходів на дорогах і тротуарах [1]. Також це «розумні» й високоефективні моделі зберігання, пошуку та обробки масивних відеоданих у хмарах для моніторингу дотримання правил дорожнього руху в смарт системах відеоспостереження та транспорту. У «розумних містах» застосовуються моделі на основі обробки зображень та розпізнавання для аналізу актуальних на сьогодні даних зображень, в тому числі системи розпізнавання пожеж на основі глибокого навчання для «розумної» пожежної безпеки, а також системи виявлення люків під час моніторингу доріг і вулиць. Також застосовуються моделі прогнозування даних щодо транспортних потоків у «розумних містах» для передбачення заторів на дорогах та тенденцій руху пішоходів, моделі щодо прогнозування поширення захворювань [2]. Крім того, у «розумних містах» застосовуються моделі оптимізації, зокрема моделі інтелектуальної маршрутизації та планування шляху для навігації транспортних засобів у системах логістики, дистрибуції та доставки [3].

Описане вище сімейство моделей в основному пристосоване до сфер «розумної» мобільності та пішохідного руху. Проте багато дослідників також працюють над моделями обробки даних в інших міських сферах – як незалежно, так і в інтеграції з «розумним» транспортом. Це дає змогу подати відносно обширний огляд моделей обробки міських даних із використанням різних

методів для різних сфер застосування. «Розумні міста» демонструють стрімке зростання і тому стали головним трендом у розвитку смарт-середовищ [1]. «Розумні міста» спрямовані на покращення якості життя в міських поселеннях, підвищення екологічної стійкості та зниження операційних витрат. Очікується, що концепція «розумного міста» принесе величезну користь, і її вже перейняли великі міста по всьому світу. Проте цінність бачення «розумних міст» може бути повністю реалізована лише через успішну інтеграцію передових технологій та перспективних моделей управління містом.

Впровадження хмарних рішень на базі ШІ в контур аналітичного опрацювання міських даних є революційним підходом до управління та стратегічного розвитку сучасного урбанізованого середовища. Оскільки мегаполіси по всьому світу стикаються з проблемою стрімкого зростання населення, обмеженістю ресурсів та нагальною потребою в забезпеченні екологічної сталості, інтеграція передових технологій стає безальтернативною умовою їхнього виживання. У кваліфікаційній роботі досліджується синергетичний ефект від спільного використання хмарних обчислень та ШІ з метою розширення архітектурних можливостей обробки, зберігання та інтелектуального аналізу великих за обсягом наборів та колекцій даних в «розумних містах».

Хмарні ШІ-платформи забезпечують високошвидкісний збір гетерогенних даних у режимі реального часу з диверсифікованих джерел, зокрема IoT-пристроїв, розподілених сенсорних мереж та платформ соціальних медіа. Зазначені рішення дають можливість автоматизувати та оптимізувати процеси акумуляції й препроцесингу колосальних обсягів інформації, що дає змогу міським архітекторам та муніципальним органам влади формувати практично орієнтовані аналітичні висновки. Завдяки залученню методів ML стає можливим:

- точне прогнозування тенденцій розвитку транспортних потоків;
- оптимізація алгоритмів енергоспоживання;
- підвищення рівня громадської безпеки.

Що в сукупності суттєво покращує якість міського життя.

Крім того, хмарні архітектури гарантують необхідний рівень масштабованості та гнучкості для ефективного управління високодинамічними потоками міських даних. Вони виступають основою для розгортання колабораційних платформ, які стимулюють залучення стейкхолдерів та розвиток інновацій через ініціативи відкритих даних та інструменти партисипативного (громадянського) проєктування. Доступність хмарних сервісів також забезпечує інклюзивність цифрової трансформації, оскільки надає невеликим муніципалітетам доступ до передових аналітичних інструментів, які раніше були прерогативою виключно великих мегаполісів.

Стрімка еволюція ІІІ-технологій відкрила нові перспективи для розбудови «розумних міст», пропонуючи інноваційні рішення урбаністичних проблем та визначаючи чіткі вектори їхнього сталого розвитку. Попри те, що технології ІІІ надають можливість суттєво підвищити операційну ефективність, знизити інфраструктурні витрати та покращити загальну якість міського життя, їхнє практичне розгортання пов'язане з комплексом серйозних викликів. До них належать загрози конфіденційності персональних даних, етичні дилеми алгоритмізації, висока вартість первинного впровадження, а також нагальна потреба у формуванні всеосяжної нормативно-правової бази.

Крім того, інтеграція інструментів ІІІ в уже існуючі урбаністичні системи вимагає вирішення технологічних завдань, пов'язаних із крос-платформною сумісністю й інтероперабельністю даних, актуалізацією кіберзагроз та ризиками поглиблення цифрового розриву між різними верствами населення.

З іншого боку, існує спектр вагомих переваг, що надають можливість прийняття управлінських рішень у режимі реального часу, розгортання прогностичної аналітики, а також проєктування більш інклюзивних та стійких до криз міських просторів.

У [1] підкреслено нівелюючу роль державно-приватного партнерства, активної взаємодії з громадою та етичного управління процесами цифровізації для подолання зазначених бар'єрів та максимізації корисного ефекту від впровадження ІІІ.

1.2 Big Data та штучний інтелект у розвитку «розумних міст»

Поява великої кількості сенсорних пристроїв разом із прогресом у сфері бездротових технологій та дешевих датчиків уможливили розвиток проєктів класу «Розумне місто» по всьому світу [4]. «Розумні міста» – це сукупність технологій та інструментів обробки міських даних, які перетворюють інноваційні дані від вбудованих датчиків, громадян та IoT пристроїв на інструменти для видобування знань про місто, моніторингу та підтримки сталого розвитку [5]. Спостерігається значний прогрес у типах та обсягах даних, що збираються в містах, що створює потребу у видобуванні інформації з цих масивів даних, прогнозуванні майбутніх умов, а також в оптимізації або управлінні містами на основі цієї інформації та прогнозів [6]. Однак у «Розумних містах» деякі зібрані на даний момент часу дані можуть мати велику цінність для майбутнього, а деякі інструменти прогнозування можуть потребувати врахування величезної кількості історичних даних для побудови точних моделей, що породжує виклики, характерні для ранньої епохи великих за обсягом наборів та колекцій даних, як от мінливість («Volatility») та висока розмірність («High-dimensionality»).

«Розумні міста» також генерують багато високовимірних фотоподібних зображень та відео, знятих із високою частотою кадрів з обширної множини різнотипових камер, що створює величезні та різноманітні дані, які, окрім свого великого обсягу, відрізняються інтервалами та чіткістю. Тому моделювання, прогнозування та управління «Розумними містами» створює більші труднощі, ніж у випадку з традиційними містами. Процеси прогнозування та оптимізації в «Розумних містах» розглядаються на основі характеристик, складнощів у сфері досліджень та розробок («R&D»), а також необхідних обчислювальних інструментів для обробки міських даних [7]. Обробка даних, як перший крок у вирішенні проблем «Розумних міст», розглядається через детальне вивчення її «вузьких місць» у сферах керованості й масштабованості, а також методів попередньої обробки, необхідних для аналізу міських даних, та контрольованих факторів прогнозованості. Дані, що моделюються, та результати моделювання разом формують типи знань, отриманих із «Розумного міста» [8].

Прогнозування – це процеси оцінювання значень змінної достовірності у прогнозованому часі. Змінна достовірності прогнозування попиту – це рівень попиту в до-сталий період. Невизначеність та шуми, що створюються вимірвальними приладами й обмежують керованість баз даних, сформованих на основі серій вимірювань у «Розумних містах» [9].

1.3 Інтелектуальні системи прийняття рішень у «розумних містах»

У зв'язку зі стрімкою урбанізацією та зростанням кількості населення міста дедалі частіше стикаються з викликами, пов'язаними з інфраструктурою, заторами на дорогах, економічною ефективністю та доступом до медичних послуг. На додачу до цих суттєвих проблем великі міста потерпають від змін клімату та забруднення довкілля. Новітні досягнення у сферах ШІ, «розумних» давачів та технологій бездротового зв'язку дали змогу розгорнути повсюдні сенсорні та обчислювальні рівні для підвищення технічних та управлінських навичок. «Розумні» системи міст взаємодіють і з'єднуються між собою у вигляді мереж для формування інтегрованого міста. «Розумні міста» зі складними мережами повітряного та водного транспорту, мобільності, енергетики, охорони здоров'я, сталого розвитку, даних значною мірою покладаються на аналітичне опрацювання даних для прийняття «розумних» рішень [10]. Ця революційна технологія призводить до величезних викликів у сферах збору даних, прогнозування та оптимізації, через що завдання інтелектуального прийняття рішень у «розумних містах» не можуть бути вирішені безпосередньо за допомогою наявних методів ML та дослідження операцій. Покращення мобільності й сталого розвитку, забезпечення ефективної доставки, комфортного проживання та своєчасності надання послуг завжди були актуальними питаннями для міських адміністраторів. З іншого боку, трильйони давачів, користувачькі та соціальні дані, що генеруються в місті щодня, відкривають нові можливості та простір для спільної роботи дослідників над створенням інноваційних технологій прийняття рішень. За останні декілька років, разом із драматичним зростанням пропускної здатності зв'язку, обчислювальної

потужності та швидкості обробки даних, цей напрям досліджень продемонстрував переконливі успіхи, представивши моделі руху, класифікатори, моделі прогнозування мобільності, оптимізаційні рішення в режимі реального часу та програмно-алгоритмічні комплекси для прийняття рішень. Компоненти «розумного міста» подані на рисунку 1.1.

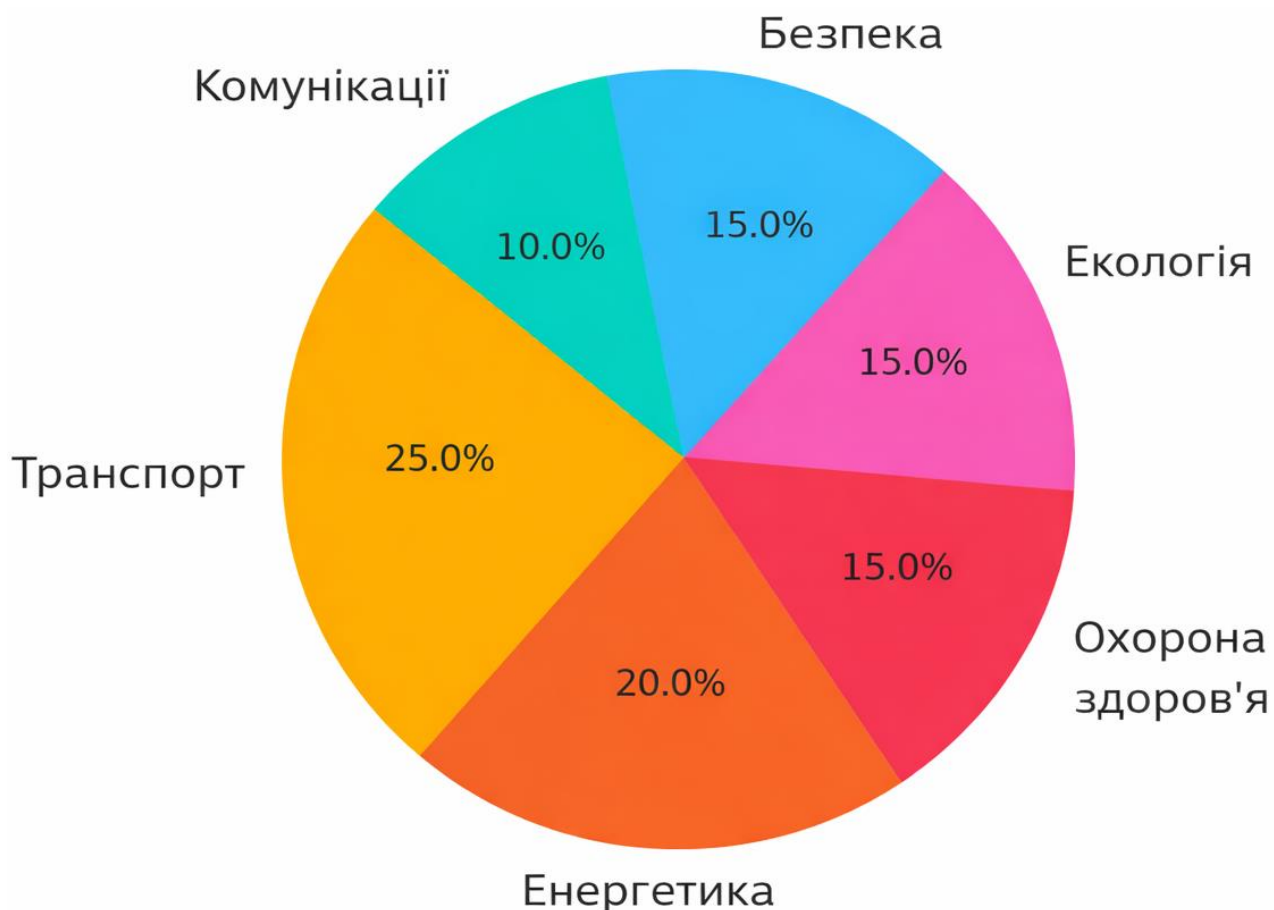


Рисунок 1.1 – Компоненти «розумного міста»

Створення «розумних» послуг мобільності залишається одним із найбільших викликів через ширші екологічні, транспортні та поведінкові аспекти, а також через наявність багатьох точок зору, множинності факторів та складних невизначеностей, що впливають на рішення [11]. Тому зосередимось на масштабних досягненнях у технологіях і методологіях, пов'язаних із великими за обсягом наборами та колекціями даних, ML та дослідженням операцій, а також на їхньому застосуванні у сфері прийняття рішень для «розумної» мобільності. Прийняття рішень у «розумних містах» часто передбачає одночасне дослідження різноманітних аспектів. Ці аспекти – це різні

форми міських даних – як от види транспорту, зображення, навколишні шуми, геолокація, супутникові та аерофотознімки тощо – які збираються за допомогою мобільного зв'язку, сенсорних та супутникових технологій і містять різноманітні характеристики, як-от кількість, масштаб, якість та форми подання. Сюди належать простори прогнозування, часові вікна та рівень шуму для користувачької міської інформації. Це також застосовує різні форми оцінювання даних із урахуванням різноманітності та неповноти прогнозованих результатів. Водночас прийняття рішень охоплює зв'язки між різними аспектами, які можуть бути динамічними для різних міст чи регіонів, періодів часу та джерел даних [12].

1.4 Роль штучного інтелекту в міському розвитку

Штучний інтелект (ШІ) відіграє критично важливу роль у міському розвитку «розумних міст», де системи ШІ використовуються для підтримки прийняття рішень у процесах проектування та планування з метою вирішення складних взаємопов'язаних викликів – це називають взаємозв'язком ШІ та урбанізму. ШІ може суттєво розширити можливості обробки даних, прогнозування та оптимізації в «розумних містах», забезпечуючи чітке розуміння складності, динаміки та тенденцій у міському середовищі. В [13] розглядаються інсайти на основі ШІ, пов'язані з міським моделюванням на основі даних, прогнозуванням, рекомендацією протоколів, виявленням знань та оптимізацією сенсорних мереж. Висвітлено деякі критичні виклики та напрями майбутніх досліджень у сфері розробки систем обробки даних, прогнозування та оптимізації міського середовища на основі ШІ в контексті «розумних міст» [14].

Зростаючий рівень складності сучасного міського середовища посилив значущість використання підходів на основі даних у міському моделюванні, що допомагає регуляторам та особам, які приймають рішення, краще зрозуміти просторово-фізичні, соціальні та екологічні складнощі й динаміку. Інтеграція передових обчислювальних методів із великими та гетерогенними масивами

даних відкрила нові шляхи для дослідження міського середовища, а також взаємодії та впливу в системі «людина-довкілля». Очікується, що завдяки поєднанню переваг ШІ та IoT [1], концепція «штучного інтелекту речей» (AIoT) змінить міське середовище та уможливить проєктування і надання більш стійких та інклюзивно інтелектуальних послуг «розумного міста», адаптованих до індивідуальних потреб, поведінки та характеристик [15].

Використання ШІ дає можливість користувачам, які не є експертами, брати активну участь у процесах функціонування послуг на базі ШІ та взаємодіяти з системами ШІ, знаннями та процесами, що використовуються в конкретному контексті. Це може прискорити розуміння людиною складності викликів, які потребують рішень за допомогою ШІ, інтерпретацію інсайтів та результатів, згенерованих системами ШІ, а також аналіз взаємодії людини та ШІ під час процесу та результату надання послуг для вдосконалення моделей. Проєкт людиноцентричних технологій ШІ для підтримки прийняття міських рішень повинен враховувати механізми мислення та міркування вищого порядку, що виходять за межі суто когнітивного підходу, а також брати до уваги як потенційні можливості, так і ризики [16].

1.5 Інтелектуальні платформи та методи обробки даних «розумних міст»

Платформа аналітичного опрацювання даних «розумного міста» – це інтелектуальне хмарне рішення, яке забезпечує універсальну структуру аналізу міських даних (див. рисунок 1.2). Ця структура складається з трьох основних рівнів [1]:

1. Збір даних, який спрямований на збір інформації з різноманітного обладнання для фіксації даних, розміщеного по всьому місту на периферії.

2. Аналіз даних, у якому виявляються помилки, екстремальні значення, нормальні та аномальні дані, а описова статистика кожного аналітичного методу збирається та трансформується у заздалегідь визначений стандартний формат для подальшої обробки.

3. Прийняття рішень, яке використовує результати аналізу для оцінювання стану міської атмосфери, пропонування рішень та довгострокових перспектив для керівників міст [3].



Рисунок 1.2 – Платформа аналітичного опрацювання даних «розумного міста»

«Розумні міста» потерпають від надмірної кількості даних через наявність різноманітного смарт-обладнання. Цей надлишок даних є проблемою для міських управлінців та систем «розумних міст», що вимагає попереднього менеджменту для забезпечення ефективності даних та отримання високих результатів від аналізу великих за обсягом наборів та колекцій даних. Що стосується ефективності, дані автоматично групуються за сімома сферами діяльності й закріплюються за кожним конкретним слотом аналізу великих за обсягом наборів та колекцій даних. Процес збору даних ускладнюється безпосередньою наявністю обладнання для їх фіксації. Типи даних варіюються від відео до рядків або часових міток і мають фіксуватися IoT пристроями [17]. Інформаційні технології для обробки міських даних у «розумних містах» описано в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Інформаційні технології для обробки міських даних у «розумних містах»

Технологія	Опис	Застосування
Розпізнавання зображень	Виявляє об'єкти, візерунки або події з візуальних даних	Виявлення пішоходів, відстеження транспортних засобів, розпізнавання пожежі
Відеоаналітика	Обробляє відеопотоки з високою частотою кадрів	Моніторинг дорожнього руху, правоохоронні органи
Хмарне сховище та пошук даних	Зберігає та керує великими обсягами міських даних	Системи відеоспостереження, управління дорожнім рухом у режимі реального часу
Інструменти попередньої обробки даних	Обробляє відсутні значення, шум та перетворення форматів	Підготовка вхідних даних ML

Дані необхідно конвертувати в числові одиниці виміру у визначеному форматі для сумісності з алгоритмами ML, тоді як відео також потребує спеціальних процедур для перетворення формату пікселів у форму рядків або векторів. Попередня обробка зібраних даних є критично важливою для роботи з широким спектром відсутньої інформації та пропущених значень у наборах даних. Вхідні дані адмініструються засобами інженерії даних. Вхідні дані маркуються за датасетом, а немарковані дані зберігаються для подальшого використання в моделях ML з учителем або напівкерованого навчання. Інженерія даних вимагає експертних знань профільних фахівців і є тривалим процесом для тих, хто займається попередньою обробкою [18].

1.6 Концептуальні основи інтеграції штучного інтелекту та хмарних обчислень в інфраструктуру «розумних міст»

На тлі безперервного зростання міського населення сучасні мегаполіси постають перед безпрецедентними викликами у сфері розбудови інфраструктури, раціонального управління ресурсами та забезпечення екологічної сталості. Відповіддю на ці системні проблеми стало виникнення концепції «розумних міст», яка спрямована на залучення передових технологій та аналітичного опрацювання великих за обсягом наборів та колекцій даних для підвищення загального рівня якості міського життя [19]. Центральне місце в цій еволюції посідає інтеграція ШІ та хмарних обчислень, які в синергії формують потужну основу для комплексного аналізу колосальних масивів урбаністичних даних [20].

Сучасні «розумні міста» генерують надвеликі обсяги інформації з диверсифікованих джерел, зокрема з IoT-пристроїв, розподілених сенсорних мереж та контенту, що створюється безпосередньо жителями – партисипативні дані. Традиційні методи обробки даних виявляються неефективними в умовах такого інтенсивного інформаційного напливу, що призводить до втрати можливостей для прийняття обґрунтованих управлінських рішень [21]. У свою чергу, хмарні рішення на базі ШІ забезпечують масштабований та високоефективний інструментарій для агрегації, препроцесингу та інтелектуального аналізу цих даних у режимі реального часу, надаючи муніципальним адміністраціям можливість оперативно й гнучко реагувати на нові виклики та загрози [22].

На рисунку 1.3 подано роль штучного інтелекту та хмарних обчислень у перетворенні міських даних.

Зазначені технології створюють підґрунтя для впровадження прогностичної аналітики, що надає можливість муніципальним системам завчасно моделювати та ефективно нівелювати такі проблеми, як перевантаження транспортних мереж, перевитрата енергоресурсів та загрози у сфері громадської безпеки [23].

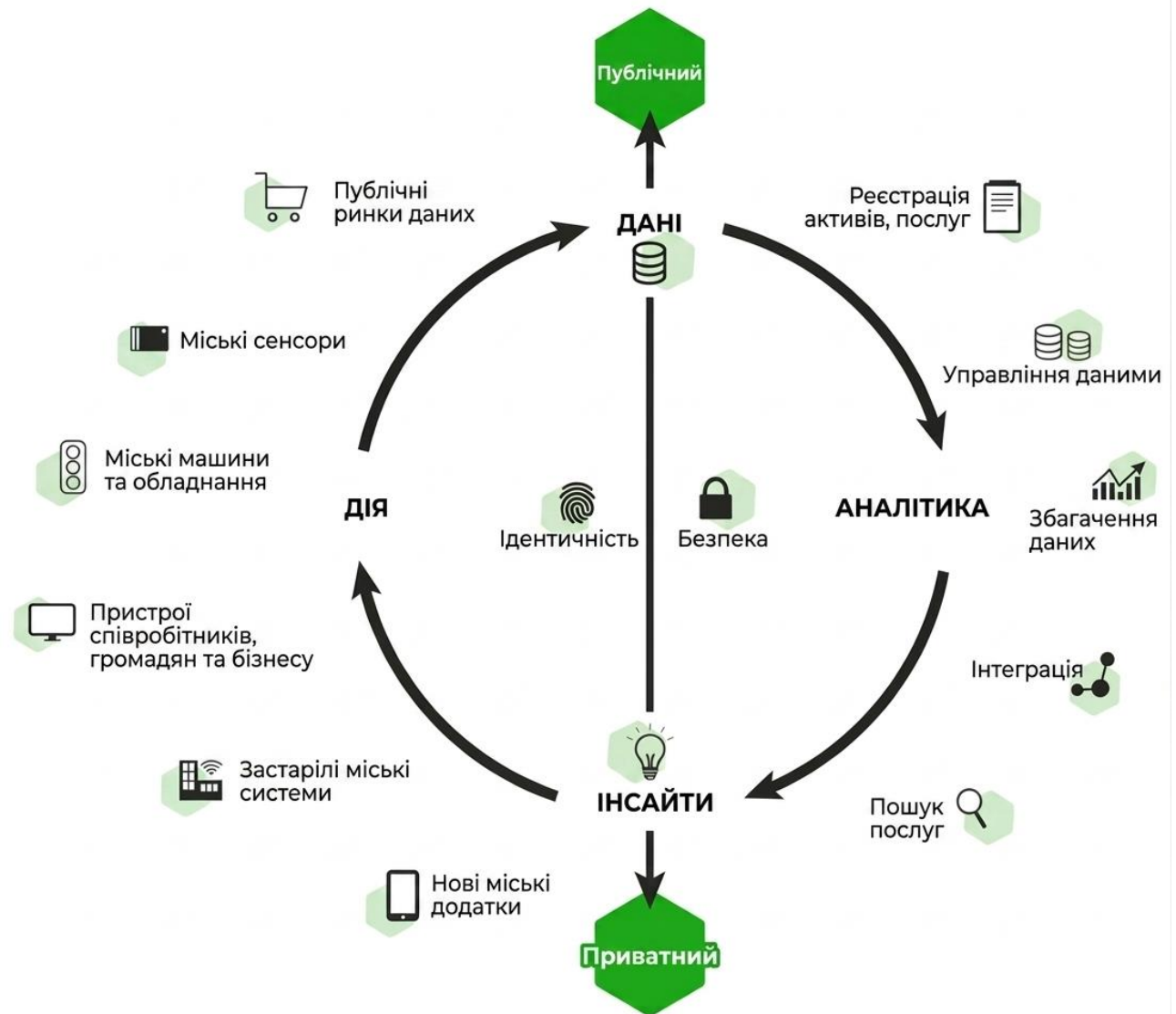


Рисунок 1.3 – Роль штучного інтелекту та хмарних обчислень у перетворенні міських даних

Завдяки трансформації первинних масивів даних («raw data») в інтерпретовані й практично орієнтовані аналітичні висновки, рішення на основі ШІ суттєво підвищують якість довгострокового міського планування та раціонального розподілу наявних ресурсів, що в кінцевому підсумку веде до зростання рівня якості життя населення (QoL). Крім того, хмарні платформи виступають каталізатором міжвідомчої та міжсекторальної взаємодії стейкхолдерів, стимулюючи диверсифікацію інновацій та залученість громадян через спільні ініціативи у сфері використання відкритих даних [24].

1.7 Теоретико-методологічні засади трансформації урбаністичних даних за допомогою технологій штучного інтелекту

Сучасні «розумні міста» залучають передові технології, зокрема ШІ та IoT, з метою підвищення рівня автоматизації муніципальних сервісів та покращення якості життя населення. Завдяки обробці масштабних масивів даних, що надходять із диверсифікованих джерел – розподілених сенсорів, камер відеоспостереження та інтелектуальних лічильників. ШІ дає змогу оптимізувати функціональні можливості міста, знизити операційні витрати, вдосконалити розподіл ресурсів та стимулювати залученість громадян. Така тотальна датафіксація процесів забезпечує вищу якість прийняття управлінських рішень та загальну ефективність міського менеджменту. Водночас інтеграція ШІ актуалізує низку суттєвих викликів, серед яких особливе місце посідають проблеми конфіденційності персональних даних, етичні аспекти застосування алгоритмів, а також ризики поглиблення соціальної нерівності – цифрового розриву [25]. Своєчасне вирішення цих проблем є критично важливою умовою для того, щоб інноваційні міські проєкти реалізовувалися на засадах інклюзивності та приносили реальну користь усім членам суспільства.

Під «розумним містом» розуміють урбанізоване середовище, яке інтегрує цифрові технології у свої внутрішні системи, сервіси та інфраструктуру для підвищення операційної ефективності, оптимізації каналів інформування громадськості та покращення стандартів життя резидентів. У таких міських зонах активно застосовуються ІКТ та IoT, що дає можливість модернізувати міські операції, стимулювати економічний розвиток та підвищувати рівень добробуту як окремих громадян, так і суб'єктів підприємницької діяльності [25]. Першочерговою метою «розумних міст» є підвищення ефективності традиційних мереж і служб за допомогою впровадження цифрових інновацій.

До визначальних характеристик «розумного міста» належать:

- високотехнологічна інфраструктура;
- ініціативи у сфері екологічної сталості;
- ефективна мережа громадського транспорту;

- стратегічне просторове планування;
- активне залучення жителів і представників бізнесу до управління міським середовищем.

Крім того, у таких містах пріоритетна увага приділяється модернізації різноманітних комунальних об'єктів [25], зокрема:

- транспортні системи;
- водопостачання;
- управління відходами;
- інфраструктура освітлення;
- інфраструктура теплопостачання.

Крім того, інноваційні трансформації спрямовані на створення інтерактивніших та гнучкіших муніципальних адміністрацій за одночасного забезпечення високого рівня безпеки у громадських просторах.

Слід зазначити, що в сучасній науковій дискусії концепція «розумного міста» не має єдиного універсального визначення [25]. Існує обширна множина інтерпретацій, де одні підходи акцентують увагу виключно на технологічних аспектах, тоді як інші – висвітлюють першочергову роль людського та інституційного факторів. «Розумне місто» визначається не просто кількістю інтегрованих у нього технологічних рішень, а насамперед стратегічною доцільністю та ефективністю їхнього практичного застосування.

1.8 Висновок до першого розділу

В першому розділі кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Магістр» описано інтелектуальні системи прийняття рішень у «розумних містах». Проаналізовано роль штучного інтелекту в міському розвитку. Досліджено інтелектуальні платформи та методи обробки даних «розумних міст». Обґрунтовано концептуальні основи інтеграції штучного інтелекту та хмарних обчислень в інфраструктуру «розумних міст». Сформовано теоретико-методологічні засади трансформації урбаністичних даних за допомогою технологій штучного інтелекту.

2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ У «РОЗУМНИХ МІСТАХ»

2.1 Прогнозна аналітика в міському плануванні

Прогностична аналітика надає можливість ефективно використовувати історичні дані для формування інтерпретованих та практично орієнтованих прогнозів щодо потенційних майбутніх подій у міському середовищі. У контексті функціонування сучасних мегаполісів аналіз ретроспективної інформації є ключовим інструментом для прогнозування та раціонального розподілу наявних ресурсів з метою задоволення потреб жителів [1]. Завдяки залученню даних із фізичного світу, моделі ML здатні здійснювати точне прогнозування соціальної та інфраструктурної динаміки, що дає змогу муніципальним органам влади та суб'єктам господарювання своєчасно реагувати на виклики відповідно до розрахованих сценаріїв майбутнього. Пріоритезація та структурування міських даних забезпечує доступ до вищого рівня деталізації інформації: від короткострокового прогнозування попиту на послуги таксі до оцінювання щільності пасажиропотоку на станціях метрополітену в конкретні проміжки часу. Масштаб впровадження та потенційні переваги цих методів визначають їх як інтелектуальні послуги «розумного міста», спрямовані на підвищення рівня організації, ефективності та безперебійності функціонування міських сервісів. Для розширення можливостей обробки міських даних у рамках прогностичної аналітики виокремлюють два взаємопов'язані субнапрями: прогностичне моделювання та прогностична оптимізація [26].

Базуючись на аналізі ретроспективних даних, прогностичне моделювання трансформує параметри моделей ML в алгоритми, які кодують закономірності конкретного досліджуваного процесу, забезпечуючи підґрунтя для прийняття рішень або подальшого системного аналізу. Цей підхід дає можливість апроксимувати складні процеси, що потребують тривалого оцінювання, у компактні й швидкодійні обчислювальні моделі [1]. На практиці таке

моделювання застосовується для вдосконалення диспетчеризації та реагування в транспортних системах, зокрема для оптимізації розподілу замовлень у таксі, забезпечення пунктуальності швидкісного автобусного транспорту та управління пасажиропотоками в метрополітені.

Схеми оптимізації на базі ШІ (див. рисунок 2.1) дають змогу генерувати плани та стратегії шляхом моделювання простору сценаріїв «подія–дія» для досягнення поставленої мети [1].



Рисунок 2.1 – Концептуальна схема оптимізації на базі ШІ для потреб «розумного міста»

Окрім цього, прогностичне моделювання надає можливість формалізувати фізичні процеси, що визначають загальну динаміку міста. Глибоке розуміння структури міських даних та внутрішніх процесів за допомогою прогностичного моделювання закладає основу для розбудови ефективнішого міського простору, оскільки будь-яка комплексна муніципальна система функціонує швидше та гнучкіше за умови чіткого математичного опису її динамічних характеристик [27]. В таблиці 2.1 подано прогностичні моделі в плануванні «розумного міста».

Таблиця 2.1 – Прогностичні моделі в плануванні «розумного міста»

Тип моделі	Опис	Варіанти використання
Прогнозування часових рядів	Використовує історичні дані для прогнозування майбутніх тенденцій	Прогнозування попиту на таксі, пасажиропотік у метро
Моделі глибокого навчання	Вивчає складні закономірності з великих наборів даних	Моделювання зростання міст, прогнозування впливу на навколишнє середовище
Регресійні моделі	Оцінює зв'язки між змінними	Прогнозування споживання енергії, оцінка заторів
Гібридні моделі ШІ	Поєднує ШІ з методами оптимізації	Ефективна диспетчеризація, планування маршрутів

У сфері спеціалізованої оптимізації на основі ШІ стає можливим синтез стратегічних рішень, які забезпечують досягнення найкращих показників планування та управління у заданий проміжок часу з урахуванням встановлених цільових та часових обмежень. Вибір оптимальних керуючих впливів залежить від двох основних джерел інформації: прогнозованої поведінки жителів –

людського фактора та географічних і фізичних параметрів середовища, у якому відбуваються досліджувані процеси.

Сучасні схеми інтелектуальної оптимізації інтегруються з прогностичними моделями, що забезпечує глибший аналіз предметної області, скорочення часу обчислень та підвищення якості стратегічного планування. У межах такої гібридизації прогностичне моделювання звужує стохастичний простір пошуку рішень, обмежуючи перелік факторів міського середовища, які суттєво впливають на якість планування, тоді як алгоритми оптимізації ШІ здійснюють спрямований перебір варіантів у цьому звуженому просторі, знаходячи релевантні оптимальні стратегії [28].

2.2 Прогнозування перспектив зростання «розумних міст»

У сучасному світі урбанізовані регіони є головними центрами економічного зростання. Вони є динамічними структурами, які забезпечують функціонування складних соціально-економічних мереж. Водночас, як свідчить низка досліджень, неконтрольоване розростання міських територій призводить до негативних наслідків, зокрема до скорочення біорізноманіття, руйнування природних ареалів та фрагментації ландшафту [1]. Територіальне розширення міст стимулює будівництво та модернізацію інфраструктури, що часто створює загрозу для екологічної сталості середовища. Через це моніторинг і контроль процесів урбанізації стали пріоритетними завданнями для державних органів та екологічних організацій з метою пошуку оптимального балансу між збереженням довкілля та просторовим міським плануванням.

У зв'язку зі стрімким розширенням міст критично важливого значення набуває моніторинг та регулювання змін у структурі землекористування. Основна складність аудиту міських територій полягає в їхній величезній площі, що робить ручне відстеження неефективним у геопросторовому та часовому масштабах. Сучасні супутники дистанційного зондування Землі здійснюють регулярне та періодичне фільмування земної поверхні в глобальному масштабі.

Пасивні сенсори космічного базування постачають знімки великих ділянок планети, які охоплюють різні класи землекористування [29].

Супутникові знімки є ефективним інструментом для моніторингу урбанізаційних процесів у режимі реального часу [1]. Використання інформаційних продуктів такого класу для контролю міського розвитку раніше досліджувалося багатьма науковцями в контексті створення механізмів раннього попередження та підтримки прийняття рішень у плануванні. Базова ідея полягає в зіставленні векторів змін, згенерованих у часових рядах зображень, шляхом аналізу динаміки переходу земель інших категорій під міську забудову. Для точного та стійкого прогнозування міського розвитку розроблено вдосконалені прогностичні моделі на основі клітинних автоматів, агентних методів, штучних нейронних мереж, логістичної регресії, фракталів та метода опорних векторів (SVM) [30]. Клітинні автомати є однією з найпопулярніших моделей для прогнозування просторового розширення міст завдяки своїй простоті та відносно зрозумілій архітектурі застосування. На основі принципів клітинних автоматів було створено низку моделей та проведено відповідні прикладні дослідження для багатьох найбільших мегаполісів світу з метою виявлення урбаністичних змін. Водночас останніми роками значної популярності набули штучні нейронні мережі, які демонструють високу ефективність під час обробки великих масивів високорозмірних вхідних даних та мають здатність навчатися на основі нелінійних функцій [30].

2.3 Моделі прогнозування транспортних потоків

Прогнозування транспортних потоків відіграє критично важливу роль у зниженні рівня заторів на дорогах, що є гострою глобальною проблемою, яка призводить до таких негативних наслідків, як втрата часу через збільшення тривалості поїздок та перевитрата пального. Інтеграція новітніх технологій у транспортні системи відкриває широкі можливості для істотного підвищення точності прогнозування трафіку [30]. Особливу увагу приділено сучасним досягненням та перспективним напрямкам досліджень у сфері інтелектуальних

методів прогнозування на основі ШІ – з огляду на їхню високу ефективність та потенціал у моделюванні багатовимірних транспортних часових рядів. На першому етапі систематизовано та класифіковано різні типи даних і джерела інформації, що використовуються в профільній науковій літературі. Далі категоризовано базові методи попередньої обробки даних у контексті транспортного планування, після чого узагальнено безпосередньо методи прогнозування та сфери їхнього прикладного застосування. На завершення окреслено ключові виклики у сфері прогнозування трафіку та визначено вектори для подальших наукових досліджень.

Ураховуючи динамічний та стохастичний характер дорожнього руху, прогнозування трафіку є невід’ємним елементом розбудови концепції розумного міста. Останнім часом впровадження інноваційних технологій, зокрема в рамках архітектури «розумних міст», дало можливість значно вдосконалити процеси моделювання транспортних систем [1].

У [1] ідентифіковано, систематизовано та детально описано релевантні типи даних, їхні ресурси й джерела походження, а також базові методи препроцесингу. Сформовано комплексну класифікацію, у межах якої виокремлено три групи застосування кожного методу прогнозування. Порівняння методів прогнозування трафіку наведено на рисунку 2.2.

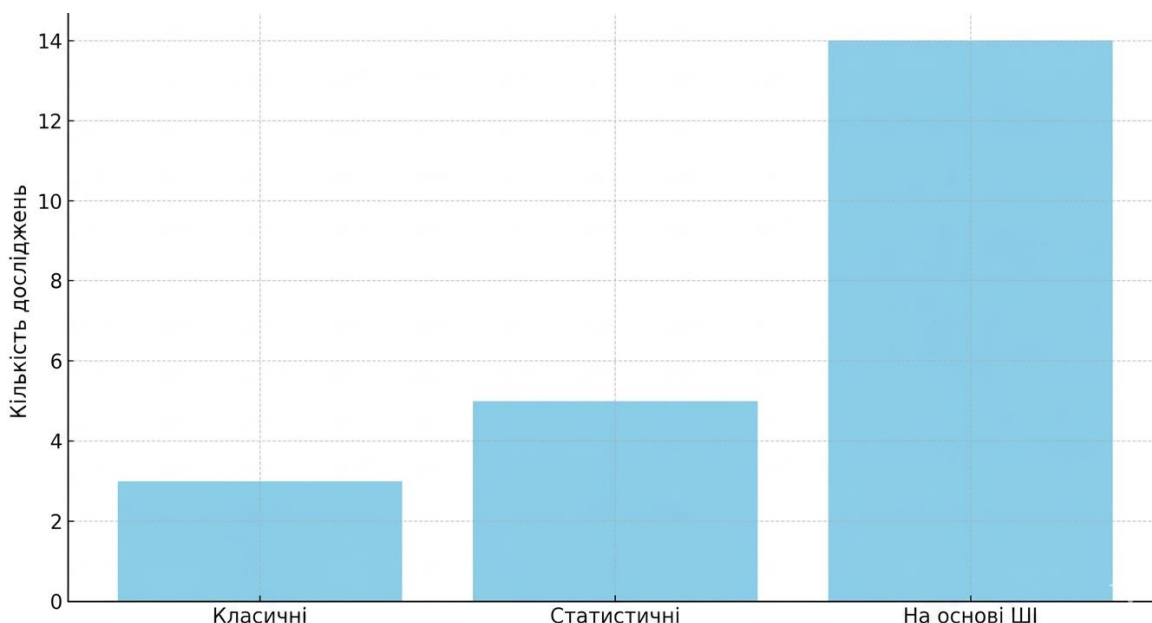


Рисунок 2.2 – Порівняння методів прогнозування трафіку

З метою виявлення існуючих прогалин та потенційних можливостей для подальших наукових розробок у сфері інтелектуального прогнозування на базі ШІ, цей аналіз структуровано за чотирма основними напрямками, зокрема:

- попередня обробка даних;
- методи моделювання;
- сфери їхнього практичного впровадження.

Завдяки точному визначенню інтенсивності транспортних потоків на найближчу перспективу, автоматизовані системи управління дорожнім рухом здатні оптимізувати програми роботи світлофорних об'єктів для мінімізації заторів. При комплексному застосуванні цього підходу на декількох перехрестях прогнозоване транспортне навантаження може бути рівномірно розподілене по суміжних вузлах дорожньої мережі, що надає можливість знизити загальний негативний ефект від утворення заторів [1]. Висока точність прогнозів слугує детермінованим індикатором для оперативної заміни поточного плану регулювання на адекватніший поточній ситуації сценарій. З погляду попередньої обробки даних, найбільш ефективним рішенням є використання простого ковзного середнього без прив'язки до часових міток як вхідного параметра. Це дало інтелектуальній моделі змогу генерувати короткострокові прогнози, спираючись виключно на показники транспортного потоку за останні декілька хвилин, без необхідності врахування часового контексту. Крім того, для підтвердження стійкості та інваріантності запропонованого підходу [31], розроблена архітектура підлягає крос-верифікації на різних наборах вихідних даних.

2.4 Прогнози впливу на навколишнє середовище

Прогнозування екологічних наслідків охоплює оцінювання впливу транспортних мереж та систем управління твердими побутовими відходами на навколишнє середовище. Моделювання таких прогнозів ефективно реалізується за допомогою методів ШІ, зокрема глибокого навчання, ML та навчання з підкріпленням [32]. Технології ШІ застосовуються для моделювання часових

рядів концентрації забруднювачів повітря, які згодом передаються в алгоритм XGBoost для прогнозування навантаження на транспортну систему та оцінювання динаміки забруднення. Моделі архітектури seq2seq на основі глибокого навчання успішно прогнозують часові ряди екологічного впливу систем управління муніципальними відходами. Для оцінювання екологічних наслідків функціонування транспортних систем у масштабах декількох міст одночасно використовуються алгоритми випадкового лісу та регресії опорних векторів. У свою чергу, парадигма навчання з підкріпленням у поєднанні з GNN дає можливість моделювати екологічний вплив у просторово-часовій перспективі. Таким чином, інтеграція ШІ в контур управління «розумних міст» надає можливість вирішувати проблеми міського екологічного моніторингу переважно через призму аналізу часових закономірностей [1].

Під екологічним впливом розуміють сукупність позитивних та негативних наслідків функціонування міських сервісів або технологічних процесів для навколишнього середовища. Позитивний екологічний вплив, що виражається у підвищенні якості екосистем, становить екологічну вигоду. Екологічні аспекти визначаються як специфічні ознаки середовища, що впливають на роботу міських служб, і можуть класифікуватися за типом джерела, регіоном та зоною безпосереднього впливу [1]. Транспортні комплекси та системи є основними сервісами масових транспортних потоків у структурі «розумних міст». Системи на базі ШІ забезпечують багатоаспектний моніторинг міського транспорту та утилізації відходів. Застосування інтелектуальних методів для прогнозування екологічних наслідків зумовлене кількісними та часозалежними характеристиками впливу транспортних систем і систем управління відходами. На даний час моделюванню часових рядів приділяється все більше уваги, а методи ШІ, зокрема, класичне та глибоке навчання, залучаються для аналізу часових рядів забруднювачів атмосфери завдяки їхній високій інтерпретованості та обчислювальній ефективності [13]. Дослідження доводять, що завдання прогнозування часових рядів успішно вирішується за допомогою нейронних мереж LSTM для оцінювання екологічних наслідків роботи транспорту, тоді як прогнози значення концентрації CO, NO₂, O₃, PM₁₀ та PM_{2.5} використовуються

для моделювання зайнятості водіїв таксі, що дає змогу опосередковано оптимізувати пасажиропотік за допомогою навчання з підкріпленням.

У [33] запропоновано підхід до інтелектуального моделювання на основі випадкового лісу та сурогатної регресії опорних векторів для прогнозування екологічного впливу міжміських транспортних систем на показники зайнятості земельних ресурсів, енергоспоживання та викидів CO₂. Навчання з підкріпленням у синергії з графовими нейронними мережами застосовується для моделювання екологічного впливу систем метрополітену в просторово-часовому вимірі на основі топологічної структури транспортних маршрутів та специфіки розподілу міських територій [33]. Детальний аналіз взаємозв'язку між сервісами «розумного міста», типами даних та архітектурами ШІ дає можливість зробити висновок, що на сучасному етапі розвитку ШІ в концепції «Розумне місто» вирішує завдання мінімізації антропогенного навантаження переважно шляхом оптимізації часових параметрів функціонування інфраструктури [34].

2.5 Інтелектуальні методи оптимізації систем «розумних міст»

Оптимізація різноманітних технологічних та логістичних операцій є критично важливою умовою для забезпечення ефективного та сталого функціонування «розумних міст». Величезні масиви інформації, що генеруються розподіленими мережами датчиків та IoT-пристроями по всьому місту, виступають базовим ресурсом для оптимізаційних алгоритмів, спрямованих на підвищення якості життя міського населення [1]. У цьому контексті концепція «розумних міст» підлягає детальному аналізу з погляду теорії оптимізації, з докладним описом релевантних і найбільш поширених алгоритмів та моделей. У [35] подано всеосяжний огляд цієї дисципліни, який відображає поточний стан наукових досліджень, невирішені проблеми, а також низку перспективних напрямів для подальшої науково-практичної діяльності.

У [1] розглянуто прикладні кейси оптимізації в межах інфраструктури «розумних міст». Сфери впровадження в кожному окремому випадку структуровано та категоризовано на основі цільових функцій оптимізаційних

задач та наявних систем обмежень, з акцентом на різні аспекти життєдіяльності міста та його операційних процесів [1]. В [36] подано аналітичний огляд оптимізаційних алгоритмів, що використовуються в даній галузі та детальну характеристику поширених комерційних та відкритих обчислювальних рішень. Окрему увагу приділено результатам діяльності ініціативи «Розумні міста», а також платформ відкритих даних та інформаційним масивам, які вони надають для подальших досліджень демографічних та соціально-економічних показників міського середовища. Загальну систематизацію цих підходів подано в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Методи оптимізації та їх застосування в «розумних містах»

Метод	Опис	Галузь застосування
Генетичний алгоритм	Імітує природний відбір для пошуку оптимальних рішень	Розподіл ресурсів, синхронізація світлофорів
Лінійне програмування	Вирішує задачі оптимізації з лінійними обмеженнями	Розподіл енергії, маршрутизація збору відходів
Навчання з підкріпленням	Навчається методом спроб і помилок	Автономні транспортні засоби, «розумні» мережі
Графові нейронні мережі	Моделює зв'язки між сутностями	Прогнозування просторово-часової мобільності

На основі аналізу сучасної наукової літератури розглянуто підходи до моделювання та пошуку рішень, представлені як в академічних колах, так і в промисловому секторі [1]. Зокрема, висвітлено питання оптимізації маршрутизації міських автобусів, зокрема, застосування робастного та адаптивного алгоритму для багатогоризонтного планування графіків руху транспорту та роботи водіїв. Розглянуто задачу проектування та просторового

розміщення екологічних велосипедних мереж, де детально описано нову модель змішано-цілочисельного квадратичного програмування для оптимізації локацій станцій громадського велопрокату. Проаналізовано методи вивчення та прогнозування мобільності населення, зокрема мультимодальний графовий підхід на основі глибокого навчання для просторово-часового прогнозування міграції жителів на базі гетерогенних джерел даних [1].

2.5.1 Моделі розподілу ресурсів «розумних міст»

Задачі раціонального розподілу ресурсів «розумних міст» виникають у багатьох прикладних сферах, зокрема у:

- громадському транспорті;
- диспетчеризації потужностей;
- енергетичних мережах;
- керуванні БПЛА тощо.

У сучасних реаліях функціонування «розумних міст» скорочення бюджетних асигнувань на тлі стрімкої урбанізації зумовлює необхідність ефективнішого моніторингу та контролю використання наявних муніципальних ресурсів [1]. Головною метою цього параграфу є систематичний огляд оптимізаційних підходів, які застосовуються для розподілу ресурсів у межах концепції розвитку «розумних міст» на базі IoT-технологій.

Аналітичний огляд [1] охоплює специфіку вирішення задач розподілу ресурсів у сферах «розумних міст»:

- «розумна» енергетика;
- інтелектуальне керування дорожнім рухом;
- утилізація та збір побутових відходів;
- функціонування «розумних» сервісів таксі;
- координація логістичних БПЛА;
- розподіл продуктів харчування тощо.

Оскільки ресурсами «розумних міст» можуть виступати як об'єкти фізичної інфраструктури, так і безпосередньо міські сервіси, найбільш

поширеним підходом є оптимізація чисельності парку транспортних/технічних засобів та раціональне закріплення наявних ресурсів за цільовими об'єктами [1]. Математичний інструментарій та алгоритми, що залучаються для розв'язання цих оптимізаційних задач, варіюються від класичних комбінаторних алгоритмів до складних методів, що базуються на імітаційному моделюванні дискретних подій [36]. Загальну структуру аналізованих моделей подано на рисунку 2.3.

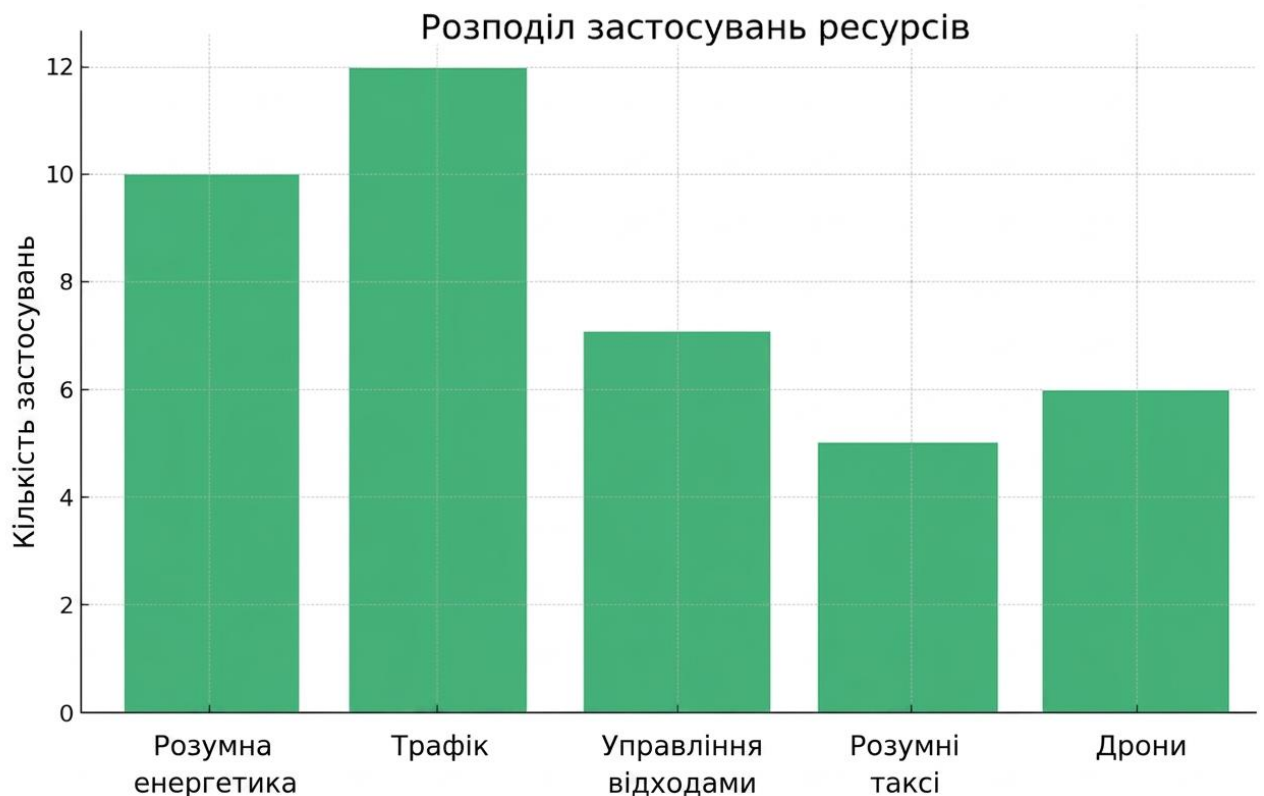


Рисунок 2.3 – Застосування розподілу ресурсів у «розумних містах» [1]

Основні прикладні сфери оптимізації розподілу ресурсів у «розумних містах» на базі IoT-технологій авторами [1] було класифіковано за базовими субкатегоріями:

- «розумна» енергетика;
- транспортні потоки;
- управління відходами;
- «розумне» таксі.

А також комплексне використання БПЛА, що охоплює субкатегорії:

- БПЛА.

- Доставка за допомогою БПЛА.
- Доставка їжі.

З математичного погляду, задачі оптимізації розподілу ресурсів характеризуються високим рівнем різноманітності формальних постановок і є обчислювально складними [1]. Математичний інструментарій, що застосовується для розв'язання таких комбінаторних задач, варіюється від точних методів до наближених алгоритмів. Оскільки в більшості існуючих підходів до розподілу ресурсів використовується «міопічне» припущення – принцип жадібного вибору то ефективнішим є впровадження концепції горизонту планування. Це дає змогу задіяти методи, що є квазіоптимальними для відповідних релаксаційних задач, після попереднього оцінювання фізичних, раціональних або структурно-складнісних обмежень, накладених на попередньо зарезервовані міські ресурси.

2.5.2 Системи «розумного» енергоменеджменту

Сучасні міста споживають понад 70% світової енергії та є джерелом 75% глобальних викидів CO₂. Саме тому з метою зниження витрат на енергоносії, забезпечення екологічної та економічної сталості міського середовища, а також підвищення якості життя громадян, енергетичний менеджмент у мегаполісах набуває статусу критично важливої проблеми [37]. Дане питання потребує комплексного вирішення в контексті управління та оптимізації енергоспоживання в архітектурі «розумного міста». Очікується, що в межах концепції «розумних міст» будуть враховані вимоги щодо конфіденційності даних, а методи ШІ знайдуть безпосереднє застосування в таких процесах, як транзакційне управління енергією, прогностичний аналіз систем, функціонування комплексів раннього попередження для утилізації відходів, прогнозування транспортних потоків, розробка стратегій спільного міського планування, а також створення інтелектуальних інформаційних панелей та смарт-інструментів для туризму [38].

Енергетичний менеджмент та оптимізація в міському просторі базуються на аналізі систем, де енергетичні потоки спрямовуються від оператора системи розподілу до кінцевих споживачів, наприклад, комерційних багатоповерхових будівельних комплексів, університетських кампусів тощо. Зазначені споживачі здійснюють прогнозування, ціноутворення та контроль власного енергоспоживання шляхом моделювання тарифних планів, аналізу графіків навантаження та забезпечення прозорості встановлених лімітів [1]. ШІ відіграє ключову роль у забезпеченні цих інтелектуальних процесів. Зокрема, методи навчання без учителя, як от кластеризація, можуть ефективно застосовуватися для просторового виокремлення суміжних споживачів. Сегменти енергетичного попиту зі схожими профілями навантаження також враховуються під час розробки прогностичних тарифних моделей. У зв'язку з цим виникає необхідність вирішення задач керування акумуляторними батареями та системами зберігання енергії. Просторове розміщення таких пристроїв накопичення є критично важливим і має враховувати низку факторів, що виходять за межі суто економічної доцільності [1]. Наприклад, рентабельність встановлення накопичувачів повинна корелювати з обмеженнями щодо максимальної споживаної потужності в конкретних інфраструктурних вузлах.

Системи енергоменеджменту в житловому секторі за функціональними ознаками поділяють на дві категорії: управління попитом та оптимізація постачання. Управління попитом дає можливість ідентифікувати критичні періоди, впродовж яких енергетичне навантаження є надмірним, та забезпечує перерозподіл основних потужностей на періоди мінімального споживання – згладжування піків навантаження [1]. Традиційні підходи до реалізації цього процесу використовують оптимізаційні методи на основі евристичних алгоритмів або вичерпного перебору, які є обчислювально витратними. Існують також підходи, що спираються на детерміноване моделювання енергетичних мереж та поточного стану постачання. Проте аналіз наукових джерел за останні десять років свідчить про стрімке зростання інтересу до методів, які базуються виключно на технологіях ШІ, для забезпечення функціонування сервісів енергетичного менеджменту в межах інтегрованих трансакційних систем.

2.5.3 Оптимізація «розумного» транспортування

Задачі оптимізації транспортних систем у межах концепції «розумного міста» суттєво варіюються за типами вхідних і вихідних даних, системами обмежень та цільовими функціями. Сучасні інтелектуальні системи керування міським дорожнім рухом застосовуються для оцінювання транспортних потоків на різних перехрестях та відповідного коригування сигналів регулювання з метою оптимізації часу поїздки у масштабах усього міста. Зазначені системи можуть функціонувати як у розімкненому, так і в замкненому контурі управління. Системи із замкненим контуром адаптують часові фази світлофорних об'єктів на перехрестях у режимі реального часу, спираючись на поточні оцінки тривалості поїздки та безперервні потоки вхідних даних [36]. У свою чергу, системи з розімкненим контуром оптимізують модель транспортного потоку з нульовими початковими умовами, яка верифікується на основі статичних наборів даних.

Оптимізація керування в замкненому контурі належить до класу NP-важких задач, проте наближене рішення може бути знайдене за допомогою біоінспірованої евристики, відомої як реактивний острівний алгоритм, для різних топологій мережі разом з реалістичними планами міст. Оцінювання впливу будь-якого транспортного втручання або реконфігурації мережі на загальний трафік до моменту практичної реалізації за своєю суттю є оптимізаційною задачею і може бути формалізоване як Марківський процес прийняття рішень на основі імітаційного моделювання [1]. Цей процес передбачає дискретизацію типів можливих сценаріїв втручання, що є обчислювально витратним завданням. Для моделювання та балансування інтенсивності впроваджуваних заходів та їхнього безпосереднього впливу на агентів – учасників руху застосовується інкрементний підхід, вільний від нерухомих точок.

Іншою специфічною задачею транспортної оптимізації є впровадження систем тарифікації заторів у межах висотних архітектурних комплексів ділових кварталів, де агентами виступають користувачі ІТ-систем у хмарочосах. Учасники таких систем мають вибір: здійснювати переміщення за допомогою

сервісних ліфтів, що надаються власниками будівель, або використовувати власний персональний транспорт, рух якого залежить від завантаженості наземних вулиць. Для стимулювання користувачів обирати внутрішні логістичні сервіси будівлі застосовується інструмент динамічного ціноутворення [1]. Власники комплексів впроваджують нелінійні та несепарабельні споживчі стратегії тарифікації для мотивації зміни поведінки агентів. При цьому враховуються такі чинники, як рівень задоволеності як самих агентів, так і власників будівель, щільність трафіку, а також пропускна здатність різних ліфтових шахт і прилеглих вулиць. Для пошуку зазначених споживчих стратегій, які апроксимують стан конкурентної рівноваги, застосовується гібридний оптимізаційний алгоритм, що поєднує глобальні пошукові можливості генетичного алгоритму та ефективність локального покращення рішень методом імітації відпалу.

2.6 Роль ІІІ-керованих хмарних рішень у процесах прийняття управлінських рішень та прогностичного аналізу міського середовища

Таблиця аналізу наукових джерел є фундаментальним інструментом дослідника, що забезпечує систематизацію та структурування відібраних для публікації та аналізу матеріалів. Вона дає змогу лаконічно узагальнити зміст різноманітних інформаційних джерел, спрощуючи процес компаративного аналізу різних досліджень та теоретичних моделей у сфері інтелектуального управління містами [25]. Завдяки візуалізації закономірностей, тенденцій та прогалів в існуючих наукових працях, така таблиця стимулює генерацію нових наукових гіпотез та поглиблює розуміння взаємозв'язків між різними підходами до впровадження ІІІ.

Комплексна трансформація сучасного урбанізованого простору в концепції «розумних міст» під впливом ІІІ охоплює низку взаємопов'язаних доменів, кожен з яких характеризується специфічним балансом деструктивних чинників та стратегічних перспектив.

У межах дослідження ШІ в «розумному» управлінні [39] встановлено, що технології ШІ виступають каталізатором інтенсифікації процесів прийняття рішень, підвищення прозорості та залучення громадян до партисипативного менеджменту шляхом автоматизації й інтелектуального аналізу великих за обсягом наборів та колекцій даних. Це створює передумови для суттєвого покращення якості надання муніципальних послуг та розбудови інклюзивних управлінських моделей. Проте системна імплементація цих інновацій натрапляє на серйозні етичні бар'єри, загрози порушення конфіденційності та проблему поглиблення цифрового розриву, що мінімізує ефект справедливості. Ситуація ускладнюється відсутністю уніфікованих нормативно-правових і стандартизованих рамок регулювання ШІ [25]. Для врахування зазначених загроз постає необхідність проектування адаптивних міських систем, заснованих на жорстких етичних принципах та локальних програмах підвищення цифрової грамотності населення.

Аналогічні трансформації простежуються у сфері застосування ШІ в «розумній» мобільності [40], де ШІ забезпечує оптимізацію транспортної інфраструктури через алгоритми інтелектуального регулювання дорожнього руху, координацію автономного транспорту та стимулювання сталих мультимодальних перевезень, зокрема, електромобілі та системи шерингу. Основними деструкторами тут виступають проблеми фізичної та кібербезпеки, низька технологічна сумісність – інтероперабельність гетерогенних платформ і високий рівень капітальних витрат на етапі розгортання. Наявна технологічна фрагментація долається через формування спільних цифрових екосистем та уніфікацію інфраструктурних стандартів, що дає можливість суттєво знизити рівень заторів і мінімізувати антропогенний тиск на екосистему.

У домені ШІ в «розумному» середовищі [41] інтелектуальні системи забезпечують високу точність моніторингу екологічного стану міст за допомогою інноваційних моделей утилізації відходів, контролю якості атмосферного повітря та інтеграції зелених зон. Головними викликами у цьому векторі є складність препроцесингу даних, захист інформації та потреба в розгортанні капіталомістких сенсорних мереж; понад те, висока енергоємність

самих обчислювальних моделей ШІ може суперечити глобальним цілям декарбонізації. Проте використання відновлюваних джерел енергії та інтелектуальна оптимізація ресурсів відкривають можливості для створення екологічно стійких і безпечних для здоров'я умов проживання. Опис технологічно-прикладних доменів «розумного міста» на основі ШІ подано в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Технологічно-прикладні домени «розумного міста» на основі ШІ

Напрямок (Домен)	Ключові результати, що оптимізує ШІ	Системні проблеми та бар'єри	Перспективи та шляхи вирішення
«Розумна» мобільність	Оптимізація трафіку, автономний транспорт, смарт-шеринг.	Ризики кібербезпеки, висока вартість, несумісність платформ.	Зменшення заторів, створення єдиних цифрових екосистем.
«Розумне» середовище	Екомоніторинг, «розумна» утилізація відходів, контроль повітря.	Складність обробки даних, високе енергоспоживання самого ШІ.	Формування сталих умов проживання, інтеграція відновлюваної енергії.
«Розумне» життя	Системи «розумного» дому, IoT-сервіси під потреби жителів.	Загрози конфіденційності, соціокультурний опір автоматизації.	Людино-орієнтований дизайн, підвищення комфорту міського простору.
«Розумна» економіка	Стимулювання цифрового бізнесу, блокчейн-транзакції.	Брак фінансування, правові прогалини, економічна нерівність.	Створення стійких моделей фінансування, рівний доступ до ІТ.

Сфера впровадження ШІ в «розумному» житті [42] безпосередньо впливає на антропоцентричний вимір міста через інтеграцію систем «розумного» дому, IoT-пристроїв та персоналізованих цифрових сервісів, адаптованих під індивідуальні потреби жителів. Основними бар'єрами для дифузії цих інновацій залишаються ризики витоку персональних даних і соціокультурний опір суспільства автоматизації життєдіяльності [25]. Вирішення цих суперечностей лежить у площині просування людино-орієнтованого дизайну та реалізації інклюзивної соціальної політики, що забезпечує формування комфортного й високоінтегрованого міського досвіду.

Розвиток ШІ в «розумній» економіці [43] стимулює макроекономічне зростання через інтенсифікацію цифрового підприємництва, модернізацію інноваційної інфраструктури та впровадження трансакційних моделей на базі технології блокчейн. Динамізація економічних процесів стримується фінансово-правовими перешкодами, зокрема складністю залучення довгострокових інвестицій, регуляторними прогалинами та нерівним доступом до технологій, що посилює соціально-економічну стратифікацію [25]. Подолання цих бар'єрів можливе завдяки розробці альтернативних моделей фінансування та забезпечення рівного доступу суб'єктів ринку до інтелектуальних інструментів, що гарантує стійкість та інклюзивність міських економічних систем.

Важливим вектором виступає інтеграція ШІ в концепцію «розумних» людей [44], де ШІ орієнтований на розширення людського капіталу через цифровізацію освітніх платформ та реалізацію ініціатив із підвищення медіаграмотності. Успішність цього процесу наразі лімітується наявною мовною та алгоритмічною упередженістю систем ШІ, дефіцитом базових цифрових навичок у маргіналізованих груп та загальним нерівним доступом до інструментів цифровізації [25].

Аналіз етичних та соціальних наслідків [45] свідчить, що тотальна цифровізація урбанізму актуалізує загрози поглиблення існуючого дисбалансу влади та ігнорування принципів соціальної справедливості на користь суто технологічного прагматизму. Відсутність чітких деонтологічних рамок знижує рівень суспільної довіри до ШІ-систем. Вирішення цієї кризи вимагає переходу

до регенеративних міських моделей та розвитку міждисциплінарної наукової співпраці, де інклюзивна політика стає базовим критерієм інтеграції технологій. Опис соціо-гуманітарних, управлінських та методологічних аспектів ШІ в «розумних містах» подано в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Соціо-гуманітарні, управлінські та методологічні аспекти ШІ в «розумних містах»

Напрямок (Домен)	Ключові результати (Вплив ШІ на систему)	Системні проблеми та бар'єри	Перспективи та шляхи вирішення
«Розумне» управління	Автоматизація послуг, прозорість рішень, залучення громадян.	Етичні дилеми, цифровий розрив, відсутність правових рамок.	Створення адаптивних систем, підвищення цифрової грамотності.
«Розумні» люди	Онлайн-освіта, цифрова грамотність маргіналізованих груп.	Алгоритмічна упередженість ШІ, брак базових цифрових навичок.	Подолання цифрового розриву через навчання на рівні громад.
Етичні та соціальні наслідки	Виявлення ризиків тотальної цифровізації урбанізму.	Дисбаланс влади, ігнорування принципів соціальної справедливості.	Міждисциплінарна співпраця, перехід до регенеративних міських моделей.
Майбутні дослідження	Прогнозний аналіз, ML, нові IoT-протоколи.	Прогалини в оптимізації БПЛА, брак стандартизованих протоколів даних.	Створення масштабованих ШІ-рішень у чітких етичних межах.

У табл. 2.3 та 2.4 подано комплексний огляд викликів та перспективних можливостей розвитку «розумних міст» на основі ШІ, які систематизовано за ключовими тематичними напрямками. Вона наочно демонструє трансформаційний потенціал ШІ в процесах міського розвитку, одночасно висвітлюючи етичні, соціальні та технологічні бар'єри, що потребують першочергового вирішення [25]. Джерельну базу порівняльного аналізу становлять релевантні результати сучасних наукових пошуків, що гарантує високий рівень обґрунтованості, достовірності та актуальності поданої інформації.

З огляду на це, напрямки майбутніх досліджень [40] мають фокусуватися на еволюції методів прогнозованої аналітики, ML та IoT-платформ. Існуючі наукові прогалини, які формують потребу в удосконаленні моделей навчання на основі великих за обсягом наборів та колекцій даних, оптимізації використання БПЛА та розробці стандартизованих протоколів ШІ, визначають подальшу траєкторію наукових пошуків. Перспективні дослідження мають бути спрямовані на створення масштабованих, обчислювально ефективних рішень, інтегрованих в чіткі етичні рамки та міждисциплінарні підходи до вирішення глобальних урбаністичних проблем.

2.7 Висновок до другого розділу

В другому розділі кваліфікаційної роботи описано прогнозу аналітику в міському плануванні. Подано прогнозування перспектив зростання «розумних міст». Досліджено моделі прогнозування транспортних потоків. Висвітлено прогнози впливу на навколишнє середовище. Досліджено інтелектуальні методи оптимізації систем «розумних міст». Розглянуто роль ШІ-керованих хмарних рішень у процесах прийняття управлінських рішень та прогностичного аналізу міського середовища.

3 ПЕРСПЕКТИВИ ТА ВИКЛИКИ РОЗВИТКУ «РОЗУМНИХ МІСТ»

3.1 Аналіз викликів і перспектив розвитку інтелектуальних міських систем

Структуруючи наявні дані за специфічними категоріями і водночас акцентуючи увагу на потенційних перевагах та бар'єрах, з якими стикаються міські агломерації під час імплементації інноваційних муніципальних ініціатив [25]. Кожен структурний елемент таблиці узагальнює конкретні можливості – підвищення ефективності, покращення якості життя, економічний розвиток, та водночас відображає корелюючі з ними виклики – конфіденційність даних, етичні аспекти, ризики поглиблення соціальної нерівності. Систематизоване подання цих результатів забезпечує швидку навігацію та компаративний аналіз, що дає дослідникам і практикам змогу оперативно оцінити складну динаміку розвитку інтелектуальної міської інфраструктури. Такий синтез не лише сприяє верифікації доміантних тем у науковому дискурсі, а й задає вектори для майбутніх досліджень та розробки нормативно-правових інструментів регулювання.

На основі узагальнення теоретичних джерел було диференційовано ключові можливості та виклики, що визначають сучасний стан розвитку ШІ-керованих «розумних міст» [25].

Перспективні можливості:

– Підвищення операційної ефективності та екологічної сталості – застосування ШІ має високий потенціал для оптимізації міських процесів, зокрема, управління дорожнім рухом, розподіл енергоспоживання та утилізацію побутових відходів. Це забезпечує мінімізацію операційних витрат та зниження техногенного навантаження на довкілля.

– Підвищення якості міського життя – інтелектуальні муніципальні ініціативи дають можливість підвищити рівень безпеки громадського простору, оптимізувати роботу пасажирського транспорту та спростити доступ до базових

послуг. ШІ-рішення забезпечують персоналізацію сервісів та створення адаптивного міського середовища.

– Економічне зростання та стимулювання інновацій – інтеграція ШІ в інфраструктуру «розумних міст» підвищує інвестиційну привабливість міст, стимулює створення нових робочих місць та виступає драйвером інновацій, сприяючи розробці нових продуктів і бізнес-моделей, адаптованих до урбаністичного простору.

– Прийняття рішень на основі аналізу даних – технології ШІ надають можливість аналізувати надвеликі масиви інформації, що надходять від IoT-пристроїв та інших гетерогенних джерел. Це забезпечує точність прогнозування, раціональний розподіл ресурсів та проактивне вирішення інфраструктурних проблем.

Системні виклики:

– Конфіденційність та безпека даних – тотальний збір та обробка інформації в «розумних містах» актуалізують загрози для кібербезпеки. Формування суспільної довіри та відповідальне впровадження ШІ вимагають використання надійних методів шифрування, децентралізації та технологій анонімізації даних.

– Етичні аспекти та алгоритмічна неупередженість – застосування ШІ в міському просторі породжує питання щодо легітимності, справедливості та підзвітності автоматизованих систем. Для розбудови інклюзивного «розумного міста» критично важливо забезпечити прозорість алгоритмів та їхню відповідність етичним нормам.

– Цифровий розрив та соціальна нерівність – існує реальний ризик того, що смарт-ініціативи можуть поглибити існуючу соціальну сегрегацію, створюючи умови, за яких частина населення опиниться відрізаною від технологічних благ. Це вимагає розробки стратегій інклюзивного залучення та підвищення цифрової грамотності громадян.

– Розвиток інфраструктури та забезпечення інтероперабельності – ефективне функціонування ШІ потребує потужної апаратної бази, зокрема, високошвидкісні канали зв'язку, системи зберігання даних та обчислювальні

потужності. Ключовим завданням є забезпечення крос-платформної сумісності – інтероперабельності різних технологічних стеків.

– Методологія впровадження та муніципальне управління – реалізація ШІ-проектів потребує чіткого стратегічного планування та координації. Успішна імплементація можлива лише за умови синергії між органами місцевого самоврядування, приватним сектором та інститутами громадянського суспільства.

Дослідження [1] підтверджує необхідність збалансованого підходу до розбудови «розумних міст», який дає змогу максимізувати корисний ефект від впровадження ШІ за одночасного нівелювання супутніх ризиків [25]. Пріоритетом має стати етичність, безпека даних та інклюзивність стратегій розвитку. Крім того, існує постійна потреба в проведенні фундаментальних та прикладних досліджень для подолання технологічних бар'єрів і забезпечення сталого та справедливого використання ШІ в урбаністичних екосистемах.

У підсумку, отримуючи очевидні переваги у вигляді оптимізації процесів та дата-центричного управління, «розумні міста» водночас стикаються зі складними етичними та безпековими дилемами. Аналогічним чином, дата-центричні ланцюги постачання залучають аналітичне опрацювання в режимі реального часу для підвищення прозорості та ефективності логістики, проте наражаються на опір організаційним змінам та труднощі інтеграції даних [25]. Конвергенція цих доменів, підтримувана синергією ШІ, IoT та блокчейн технологій, відкриває широкі перспективи для:

- оптимізації міської логістики;
- зниження транспортних витрат;
- раціонального природокористування.

Комплексне вирішення питань конфіденційності та кібербезпеки є безальтернативним інструментом для повного розкриття потенціалу цих взаємопов'язаних систем та формування ефективних, стійких і життєздатних міських середовищ майбутнього [46].

3.2 Аналіз обмежень розвитку «розумних міст» з використанням ШІ

Попри високі очікування від розбудови «розумних міст», існує низка бар'єрів, які потребують розв'язання. Як впливає з самої концепції «розумних міст», її функціонування критично залежить від коректності використання інформації, що актуалізує проблему розрізнявальної здатності та якості міських даних [1]. З погляду вхідних параметрів, необхідним є залучення не лише ретроспективної інформації, а й даних у режимі реального часу, зокрема сенсорних даних та сигналів зворотного зв'язку. З погляду вихідних параметрів, обов'язковим є формування прогностичних даних, що дає змогу подолати обмеження традиційних методів аналізу, які не враховують майбутні сценарії розвитку подій.

Крім того, деякі очікування щодо «розумних міст» наразі залишаються лише декларативними намірами або квазізобов'язаннями, які важко реалізувати на практиці. Наприклад, масштаби збору сенсорних даних є лише наслідком кількості мобільних давачів та розпорядників інформації. Відтак, сам по собі обсяг великих даних не гарантує підвищення їхньої якості та інформативності [1]. Аналіз колосальних масивів муніципальних даних є часомістким та ресурсоемним процесом з погляду використання обчислювальної пам'яті. Щонайменше, процес прийняття рішень, який базується на надлишковій кількості сценаріїв, може виявитися неефективним та нераціональним. Продуктивнішим підходом є фокусування на обмеженій кількості цільових завдань, моделей або конкретних регіонів [47].

Соціальна природа міського середовища породжує додаткові труднощі. Впродовж тривалого періоду часу міські дані накопичувалися ізольовано – кожна організація зберігала власні інформаційні масиви в окремих сховищах, керуючи ними за допомогою локальних методів та відповідно до внутрішніх політик конфіденційності. Обмін даними між відомствами обмежений за швидкістю, повнотою, рівнем деталізації, зрозумілістю та зручністю використання. Рівень агрегації даних – добовий, місячний, річний тощо, зібраних однією структурою, часто є непридатним для іншої установи, яка потребує

іншого ступеня дискретизації. Міжорганізаційні бар'єри досі існують, попри чіткий суспільний запит на інформаційну прозорість. Це зумовлює необхідність розробки нормативно-правової бази та регламентів для стимулювання ефективного шерингу даних між цими організаціями. Крім того, з погляду кінцевого користувача, відкритим залишається питання правового регулювання та управління «розумними» житловими комплексами, які фактично є автономними цифровими підсистемами міста [48].

Міські дані в концепції «розумних міст» є гетерогенними та високодинамічними, через що часто виникає проблема деградації їхньої якості – поява аномалій, пропусків або дублікатів. У зв'язку з цим критично важливого значення набувають процеси очищення та попередньої обробки даних. Такі операції є монотонними та трудомісткими, що вимагає їхньої повної або часткової автоматизації на основі інтелектуальних алгоритмів. Серйозні виклики також пов'язані з апаратними та програмними бар'єрами [1]. Попередні спроби впровадження систем моніторингу та диспетчерського управління складними міськими комплексами були фрагментарними й базувалися на ізольованих інструментах, що призвело до низького рівня їхньої технологічної сумісності. Існування таких дискретних систем зумовило проблеми сумісності та взаємодії в масштабах усього міста. Для подолання цього недоліку постає потреба у створенні уніфікованої архітектури програмно-алгоритмічних комплексів, здатних інтегрувати наявні інструменти моніторингу та контролю за допомогою відкритих інтерфейсів прикладного програмування («open APIs»).

3.3 Макросередовищні фактори розвитку «розумних міст»: можливості, ризики та футурологічні тенденції

Сучасні «розумні міста» залучають передові технології, зокрема ШІ та IoT, з метою підвищення рівня автоматизації муніципальних сервісів та покращення якості життя населення. Завдяки обробці масштабних масивів даних, що надходять із диверсифікованих джерел – розподілених сенсорів, камер відеоспостереження та інтелектуальних лічильників, ШІ дає можливість:

- оптимізувати функціональні можливості міст;
- знизити операційні витрати;
- вдосконалити розподіл ресурсів;
- стимулювати залученість громадян.

Така тотальна датафіксація процесів забезпечує вищу якість прийняття управлінських рішень та загальну ефективність міського менеджменту [25].

Водночас інтеграція ІІІ актуалізує низку суттєвих викликів, серед яких особливе місце посідають проблеми конфіденційності персональних даних, етичні аспекти застосування алгоритмів, а також ризики поглиблення соціальної нерівності. Своєчасне вирішення цих проблем є критично важливою умовою для того, щоб інноваційні міські проекти реалізовувалися на засадах інклюзивності та приносили реальну користь усім членам суспільства [25].

Розвиток «розумних міст», що базується на впровадженні ІІІ та інших передових технологій, визначається складним комплексом взаємопов'язаних можливостей та викликів. Для систематизації та дослідження зовнішніх макроекономічних факторів, що впливають на траєкторію реалізації смарт-ініціатив, доцільно застосувати методологічну матрицю PESTEL-аналізу. Цей інструмент надає можливість сформулювати цілісне розуміння умов, у яких відбувається трансформація міського середовища.

Структурні фактори макросередовища «розумних міст» за PESTEL.

Політичні та регуляторні аспекти:

– Перспективи: Державна підтримка та розробка цільових стратегічних програм створюють сприятливе екосистему для розвитку інноваційних міст. Надання субсидій, програм фінансування та прозорих регуляторних інструкцій виступає потужним стимулом для залучення інвестицій та масштабування технологій.

– Деструктивні чинники: Процеси розбудови «розумних міст» можуть гальмуватися через політичну нестабільність, відсутність чіткої довгострокової стратегії розвитку та конфлікт інтересів у вищих ешелонах влади. Бюрократизація та регуляторні бар'єри суттєво уповільнюють темпи імплементації проектів.

Узагальнену матрицю, що поєднує політичні та економічні аспекти PESTEL-аналізу із концепцією «розумних міст» та враховує прогнозні орієнтири футурологічних досліджень, наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Політичні та економічні проблеми та можливості з урахуванням PESTEL-аналізу для «розумних міст» [25]

Фактор PESTEL	Поточні міркування щодо «розумного міста»	Футурологічні висновки
Політичний	Урядова політика, фінансування та нормативні акти, що підтримують «розумну» інфраструктуру, наприклад, 5G, Інтернет	Збільшення глобальної співпраці щодо стандартів «розумних міст»; зростання міст-держав або децентралізованих моделей управління
	Закони про конфіденційність даних та правила кібербезпеки	Управління на основі ШІ та прогнозна політика для вирішення міських проблем
Економічний	Високі початкові інвестиційні витрати на «розумну» інфраструктуру	ерехід до циркулярної економіки; зростання зелених інвестицій та моделей сталого фінансування
	Державно-приватне партнерство для фінансування проектів «розумного міста»	Зростання децентралізованих економік, наприклад, систем на основі блокчейну, та міських послуг, керованих економікою

Економічні драйвери та бар'єри:

– Перспективи: Зростання ефективності інфраструктури та підтримка інновацій підвищують інвестиційну привабливість міст, стимулюють ділову активність та створюють нові робочі місця. Оптимізація управління ресурсами забезпечує пряме зниження операційних витрат і приносить значний фінансовий ефект.

– Деструктивні чинники: Висока вартість первинних капіталовкладень, обмеженість бюджетного фінансування та невизначеність щодо термінів окупності інвестицій є серйозними фінансовими бар'єрами. Крім того,

економічна нерівність обмежує доступ маргіналізованих верств населення до переваг смарт-інфраструктури.

Узагальнену матрицю, що поєднує соціальні та технологічні аспекти PESTEL-аналізу із концепцією «розумних міст» та враховує прогностні орієнтири футурологічних досліджень, наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Соціальні та технологічні проблеми та можливості з урахуванням PESTEL-аналізу для «розумних міст» [25]

Фактор PESTEL	Поточні міркування щодо «розумного міста»	Футурологічні висновки
Соціальний	Урбанізація та зростання населення стимулюють попит на «розумні» рішення	Старіння населення та посилення уваги до інклюзивного дизайну для доступності та рівності
	Залучення громадян та цифрова грамотність для впровадження «розумного міста»	Гіперперсоналізований міський досвід з використанням ШІ та великих за обсягом наборів та колекцій даних; зростання «розумних» спільнот та спільних житлових просторів [49]
Технологічний	Впровадження IoT, ШІ та великих за обсягом наборів та колекцій даних для управління містом, наприклад, дорожній рух, відходи, енергетика	Квантові обчислення та передовий ШІ революціонізують міське планування та прийняття рішень у режимі реального часу
	озвиток мереж 5G/6G та периферійних обчислень для швидшого підключення	Інтеграція доповненої/віртуальної реальності (AR/VR) для міського досвіду; автономні транспортні засоби та дрони, що змінюють транспорт та логістику

Соціальні трансформації:

– Перспективи: Модернізація державних послуг, підвищення рівня безпеки та розширення каналів комунікації покращують якість життя та зміцнюють локальні громади. ШІ-рішення дають можливість адаптувати міські сервіси під специфічні потреби різних демографічних груп.

– Деструктивні чинники: Суспільний опір змінам, занепокоєння щодо конфіденційності особистого життя та етичні дилеми можуть суттєво уповільнити дифузію технологій. Без урахування принципів інклюзивності смарт-ініціативи ризикують поглибити соціальну сегрегацію та цифровий розрив.

Технологічний потенціал:

– Перспективи: Прогрес у сферах ШІ, IoT та аналітичного опрацювання великих за обсягом наборів та колекцій даних надає потужний інструментарій для оптимізації урбаністичних систем та проактивного моделювання кризових ситуацій. Моніторинг у режимі реального часу та автоматизація виводять процеси управління на якісно новий рівень.

– Деструктивні чинники: Висока технологічна складність, проблеми крос-платформної сумісності – інтероперабельності та вразливості перед кіберзагрозами становлять системну небезпеку. Динамічний розвиток технологій вимагає безперервних інвестицій в оновлення знань та модернізацію інфраструктури.

Екологічний вимір та сталість

– Перспективи: Смарт-технології сприяють забезпеченню екологічної сталості через оптимізацію енергоспоживання, інтелектуальне поводження з відходами та зниження вуглецевого сліду. ШІ забезпечує моніторинг стану довкілля та оперативне виявлення джерел забруднення.

– Деструктивні чинники: Стрімке розгортання цифрової інфраструктури призводить до зростання енергоспоживання дата-центрів та збільшення обсягів електронних відходів, що потребує додаткової екологічної оцінки самих алгоритмів ШІ.

Юридичне та правове забезпечення

– Перспективи: Формування чітких законодавчих меж, які регулюють право власності на дані, кібербезпеку та захист інтелектуальної власності, підвищує рівень довіри до екосистеми «розумних міст». Стандартизація нормативної бази спрощує шеринг даних між різними системами.

– Деструктивні чинники: Відсутність адаптованого законодавства щодо верифікації даних, юридичної відповідальності автономних систем та етичного

розгортання ШІ створює правовий вакуум. Конфлікт юрисдикцій суттєво ускладнює реалізацію транскордонних або міжрегіональних смарт-проектів.

Узагальнену матрицю, що поєднує екологічні та правові аспекти PESTEL-аналізу із концепцією «розумних міст» та враховує прогностичні орієнтири футурологічних досліджень, наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Екологічні та правові проблеми та можливості з урахуванням PESTEL-аналізу для «розумних міст» [25]

Фактор PESTEL	Поточні міркування щодо «розумного міста»	Футурологічні висновки
Екологічний	Акцент на відновлюваній енергії та вуглецево-нейтральних містах	Міста, стійкі до клімату, з адаптивною інфраструктурою для боротьби з екстремальними погодними явищами
	«Розумні» системи управління відходами та водозбереження	Біоінженерні матеріали та самовідновлювана інфраструктура для сталого міського розвитку
Правовий	Права інтелектуальної власності на технології «розумного міста»	Розвиток правових рамок для етики ШІ, володіння даними та автономних систем
	Відповідність міжнародним стандартам сумісності «розумного міста»	Глобальна гармонізація законів щодо транскордонних потоків даних та співпраці в рамках «розумних міст»

Табл. 3.1-3.3 надає вичерпне уявлення про те, як поточні та майбутні тенденції формуватимуть еволюцію «розумних міст», забезпечуючи їх сталий розвиток, інклюзивність та технологічну просунутість.

Ефективність застосування даної методології підтверджується міжнародним досвідом. Зокрема, у межах профільного дослідження із застосуванням нейтрософського PESTEL-аналізу [1] було ідентифіковано ряд ключових бар'єрів на шляху розвитку «розумних міст». Згідно з отриманими оцінками, найбільш критичними виявилися соціальні та політичні фактори. Екологічні та юридичні фактори мали найменший питомий вплив у межах аналізованого контексту [25]. Наведені дані чітко вказують на те, що для

успішної імплементації смарт-проєктів у країнах, що розвиваються, першочергову увагу необхідно приділяти саме подоланню соціально-політичних та інституційних викликів.

Проведений PESTEL-аналіз підкреслює важливість комплексного, системного та стратегічного підходу до розбудови «розумних міст». Лінійне врахування політичних, економічних, соціальних, технологічних, екологічних та правових чинників надає можливість муніципалітетам максимізувати позитивний ефект від інтеграції ШІ та мінімізувати супутні ризики. Реалізація цього потенціалу потребує сильного лідерства, консолідації зусиль усіх стейкхолдерів та жорсткого дотримання принципів етичності й сталого розвитку.

Зазначена аналітична модель слугує основою для вивчення макроекологічних чинників, що визначають перспективи та майбутні тренди розвитку «розумних міст», а також наочно демонструє баланс існуючих викликів та можливостей.

Ключові футурологічні висновки щодо «розумних міст»:

- Міські екосистеми на основі ШІ: міста використовуватимуть ШІ для прогнозної аналітики, оптимізації розподілу ресурсів та покращення досвіду громадян.

- Децентралізована інфраструктура: блокчейн та децентралізовані системи забезпечать прозоре та ефективне управління містом.

- Адаптація до клімату: «розумні міста» надаватимуть пріоритет адаптивній інфраструктурі для вирішення проблем зміни клімату.

- Людиноцентричний дизайн: акцент на інклюзивності, доступності та персоналізованому міському досвіді.

- Інтеграція нових технологій: квантові обчислення, доповнена/віртуальна реальність (AR/VR) та передова робототехніка переосмислять міське життя та управління.

3.4 Майбутні тенденції застосування штучного інтелекту для «розумних міст»

На сучасному етапі розвитку міста є ключовими центрами акумуляції колосальних обсягів диверсифікованих даних. Гомогенна та гетерогенна інформація безперервно генерується в процесі повсякденної життєдіяльності міських агломерацій. Основними джерелами цих даних виступають розподілені мережі сенсорів, камери відеоспостереження, реєстратори температури, телеметричні логери комунальних служб, RFID-мітки тощо [1]. Завдяки використанню передових обчислювальних технологій цей масштабний інформаційний масив оперативно обробляється у режимі квазіреального часу як на базі хмарних платформ, так і безпосередньо на периферійних пристроях («edge computing»). Результатом такої обробки є оптимізація базової інфраструктури міст, зокрема транспортних систем та управління дорожнім рухом.

Понад те, наразі активно впроваджуються технології на основі ШІ для інтелектуального аналізу зазначених даних, і потенціал таких рішень лише починає розкриватися. У профільних наукових джерелах [1] досліджено різноманітні типи міських даних, а також технології їхньої обробки та аналізу в синергії з різними методологіями «розумних міст». Специфіка застосування ШІ-технологій у міському середовищі підлягає системній ідентифікації; водночас розширений аналіз дає змогу виокремити характерні шаблони їхнього практичного використання з метою виявлення існуючих наукових прогалин, перспективних напрямів досліджень, комерційного потенціалу, локальних особливостей, характеристик конкретних міст, а також методів забезпечення конфіденційності даних [1]. Кінцевою метою є оцінювання можливості трансферу передових технологій для вирішення повсякденних локальних проблем, які є типовими для більшості сучасних міст.

Комплексне розуміння та успішна інтеграція всіх цих аспектів є обов'язковою умовою для муніципальних органів влади під час практичного впровадження інтелектуальних технологій [1]. Оскільки одночасне врахування

цих чинників може викликати труднощі на етапі експертного оцінювання, то акцент зроблено на розробці ефективного інструментарію для класифікації та фільтрації існуючих моделей.

3.5 Умови сталого розвитку «розумних міст» на основі штучного інтелекту

Становлення «розумних міст» під впливом стрімкого розвитку ШІ створює унікальну конвергенцію можливостей та викликів, здатних фундаментально трансформувати парадигму міського життя. У прагненні досягти вищого рівня операційної ефективності, екологічної сталості та покращення якості життя населення, ШІ позиціонується як революційний інструментарій, спроможний оптимізувати управління ресурсами, вдосконалити державні й муніципальні послуги та стимулювати загальний економічний розвиток [25]. Проте ефективне розгортання рішень на основі ШІ вимагає розробки проактивних стратегій для подолання комплексних проблем, що супроводжують цей технологічний прогрес.

Такі серйозні виклики, як забезпечення конфіденційності та безпеки даних, етичні аспекти алгоритмізації, ризики поглиблення цифрового розриву, проблеми інтероперабельності та екологічної сталості, потребують ретельного вивчення. Їхнє вирішення є обов'язковою умовою для того, щоб інноваційні муніципальні ініціативи залишалися інклюзивними, справедливими та соціально відповідальними. Формування суспільної довіри за допомогою прозорих механізмів управління даними, гарантування неупередженості алгоритмів ШІ та підвищення технологічної доступності для всіх верств населення є критично важливими кроками на шляху до створення середовища, де цифровізація виступає драйвером позитивних трансформацій [25].

Крім того, синергетична взаємодія між державними структурами, представниками приватного сектору та громадськими організаціями є базовим елементом для проектування інтегрованих рішень, що відповідають складним і диверсифікованим потребам міського населення. Фокусуємось на залученні

стейкхолдерів та розвитку інклюзивних моделей управління, міста спроможні сформувати колективне бачення стратегії «розумних міст», яка відображатиме різноманітні перспективи та прагнення їхніх жителів.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що попри значну кількість бар'єрів, транзит до керованих ШІ «розумних міст» відкриває колосальний потенціал для формування більш стійких, ефективних та динамічних урбаністичних систем. Поєднуючи інноваційний розвиток із жорстким дотриманням етичних стандартів та принципів соціальної інклюзії, сучасні міста здатні ефективно використовувати інструменти ШІ для побудови сталого майбутнього. Подальший шлях розвитку вимагає не лише суто технологічного прогресу, а й консolidованого прагнення до розбудови громад, що гармонійно розвиваються в умовах цифрової ери [25].

Розвиток інтелектуальних міст виявляє безліч закономірностей, які концептуально відображають стратегічні принципи, необхідні для оптимізації складних логістичних систем, зокрема, систем контролю запасів та оборонних циклів зворотних потоків товарів. Подібно до того, як в управлінні матеріальними ресурсами необхідне точне балансування між оптимальним розміром замовлення та обсягами рекуперації (відновлення) для мінімізації витрат, проекти «розумних міст» потребують комплексного підходу. Цей підхід має поєднувати максимізацію обчислювального потенціалу ШІ з одночасним врахуванням супутніх інфраструктурних ризиків. Зазначені ризики та загрози кібербезпеці, порушення конфіденційності та цифрову сегрегацію, вимагають створення жорстких структур багаторівневого врядування та реалізації спільних ініціатив усіх зацікавлених сторін. Проведення подібних методологічних паралелей між теорією управління запасами та системним міським плануванням доводить, що гнучкість рішень, стратегічне моделювання та орієнтація на циркулярну економіку є ключовими факторами для повного розкриття потенціалу ШІ-моделей. У кінцевому підсумку це дасть можливість сформувати стійке, високоефективне та справедливе міське середовище для всіх його резидентів [50].

3.6 Висновок до третього розділу

В третьому розділі кваліфікаційної роботи подано аналіз викликів і перспектив розвитку інтелектуальних міських систем. Проаналізовано обмеження розвитку «розумних міст» з використанням ШІ. Досліджено макросередовищні фактори розвитку «розумних міст»: можливості, ризики та футурологічні тенденції. Висвітлено майбутні тенденції застосування штучного інтелекту для «розумних міст». Розглянуто умови сталого розвитку «розумних міст» на основі штучного інтелекту.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Психологічні чинники небезпеки

Тема кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Магістр» присвячена дослідженню стану та перспектив розвитку розумних міст на основі штучного інтелекту. Персонал, який забезпечує функціонування центрів обробки даних (ЦОД) та інтелектуальних платформ керування «розумними містами», постійно перебуває під впливом комплексу стресогенних чинників. Це зумовлює високу актуальність аналізу психологічних аспектів професійних ризиків. За статистичними оцінками експертів із безпеки життєдіяльності, від 60% до 90% інцидентів та травм на виробництві й у побуті стаються через неухважність або недбалість самого персоналу [51]. Ця тенденція актуалізує потребу у формуванні культури безпеки та відповідального ставлення до здоров'я. Основними деструктивними передумовами таких ситуацій є:

- брак належного рівня професійних знань та виховання у сфері культури безпеки;
- низька внутрішня мотивація до суворого дотримання нормативних вимог охорони праці;
- допуск до виконання складних чи високотехнологічних завдань осіб із підвищеною схильністю до травматизму;
- виконання обов'язків у стані хронічної перевтоми чи за інших несприятливих психоемоційних станів.

Індивідуальна вразливість працівника перед техногенними та виробничими небезпеками посилюється як особистісними рисами (особливостями темпераменту, дефектами органів чуття, незадоволеністю роботою), так і специфікою самої діяльності в умовах цифровізації. До специфічних навантажень ІТ-персоналу Smart City належать: значне інтелектуальне напруження, вимушена гіподинамічна робоча поза, високий темп обробки інформації, тривала фіксація уваги на моніторах (перенапруження зорового та слухового аналізаторів), а також ергономічна невідповідність

робочих місць антропометричним параметрам. Синергетичний ефект цих факторів викликає емоційне та фізичне виснаження, що уповільнює реакції, знижує концентрацію, спотворює сприйняття дійсності й, як наслідок, призводить до аварійних ситуацій.

Для розв'язання цих проблем використовують інструментарій психології безпеки — галузі, яка вивчає психічні процеси, властивості та стани людини в умовах трудової діяльності [52]. Психічні процеси традиційно поділяють на три групи:

- Пізнавальні (когнітивні): мислення, пам'ять, увага, сприйняття та уява, які визначають якість накопичення досвіду та прийняття рішень.
- Емоційні: реакції організму на внутрішні й зовнішні подразники та стресори.
- Вольові: механізми свідомого самоконтролю та регулювання поведінки.

Якщо психічні властивості (інтелект, емоційна стабільність, вольові якості) є відносно стійкими характеристиками особистості, то психічні стани є динамічними. Дослідження доводять, що продуктивність праці оператора безпосередньо залежить від рівня психологічного напруження: помірна активація мобілізує ресурси організму, тоді як надмірне навантаження (дистрес) критично знижує працездатність аж до повної дезорганізації дій.

Додатковим деструктивним чинником, що руйнує систему безпеки, є вживання психоактивних речовин. На відміну від легких стимуляторів (кава, чай), які здатні тимчасово нівелювати сонливість, сильніші стимулятори та транквілізатори суттєво уповільнюють реакції, викликають апатію та знижують ментальну активність. Особливо небезпечним є вживання алкоголю, який виступає причиною 40–60% дорожньо-транспортних пригод та до 64% смертельних випадків на виробництві. При цьому стан післяалкогольної астенії (похмільний синдром) є не менш загрозливим, оскільки викликає загальмованість, притуплює відчуття небезпеки й критично знижує надійність людської ланки в управлінні складними системами «розумного міста».

4.2 Домедична допомога при ураженні електричним струмом персоналу інтелектуальних міських систем

Сучасна інфраструктура «розумного міста», попри свою високу цифровізацію, функціонує на базі складної фізичної архітектури. Вона охоплює хмарні сервери, дата-центри великих даних, а також периферійне обладнання інтелектуальних систем (наприклад, водопостачання та енергоменеджменту «розумного міста»), яке містить велику кількість датчиків, мікроконтролерів, мережевих комутаторів та виконавчих механізмів (насоси, сервоприводи). Монтаж, налаштування та технічне обслуговування цих систем неминуче пов'язані з ризиком травматизму через ураження електричним струмом. Оскільки безпека інженерів, техніків та операторів є найвищим пріоритетом, чітке розуміння алгоритму домедичної допомоги є критично важливим аспектом для забезпечення безперебійної та відповідальної експлуатації технологій штучного інтелекту в міському середовищі.

У випадку ураження струмом першочерговим завданням рятувальника є негайне припинення його дії на організм постраждалого. Оскільки під дією напруги виникають судоми м'язів, людина зазвичай не спроможна самотійно розірвати контакт із провідником. Пріоритетним кроком є екстрене знеструмлення відповідної ділянки електрообладнання. Якщо швидко вимкнути живлення неможливо, необхідно відокремити постраждалого від струмопровідних частин в установках з напругою до 1000 В, дотримуючись суворих правил особистої безпеки: використовувати лише сухі ізоляційні предмети (дерев'яні палиці, дошки, гумові килимки, сухий одяг або діелектричні рукавиці) [53]. Відтягувати людину дозволяється виключно за сухий одяг, уникаючи контакту з відкритими ділянками її тіла чи вологим взуттям. За потреби перерізати провідники можна лише інструментом із належно ізольованими ручками. Транспортувати потерпілого на інше місце дозволяється лише за умови, якщо йому або рятувальнику загрожує повторна небезпека.

Після успішного вивільнення особи з-під дії струму необхідно оперативно оцінити її стан. Для цього постраждалого кладуть спиною на тверду поверхню,

перевіряють наявність дихання, пульсу на сонній артерії та стан зіниць, розширення яких свідчить про гостре порушення мозкового кровообігу. Залежно від виявлених ознак, домедична допомога надається за одним із трьох сценаріїв:

– При збереженні свідомості, дихання та пульсу потерпілому забезпечують повний фізичний та емоційний спокій, повністю забороняють будь-які рухи чи продовження роботи та організують безперервний контроль до приїзду лікаря.

– У разі непритомності за умови стабільного серцебиття та дихання людину вкладають горизонтально, розстебають тісний одяг, забезпечують приплив свіжого повітря і повертають до тями за допомогою нашатирного спирту чи окроплення обличчя водою.

– За відсутності дихання або при його судомному характері, а також при зникненні пульсу, негайно розпочинають серцево-легеневу реанімацію, що включає штучне дихання та непрямий масаж серця, які проводять безперервно до відновлення життєвих функцій або прибуття медиків.

Критично важливо: Виклик бригади екстреної медичної допомоги є обов'язковим у будь-якому випадку ураження електричним струмом, незалежно від поточного стану чи суб'єктивного самопочуття постраждалого.

Навіть за відсутності видимих ознак життя не можна вважати померлою, оскільки вона може перебувати в стані клінічної смерті, коли своєчасна допомога є вирішальною [54]. Констатувати летальну ситуацію поза межами медичного закладу дозволено лише за наявності несумісних із життям очевидних ушкоджень (наприклад, значне роздроблення черепа або повне обгорання тіла). В усіх інших випадках боротьба за життя працівника «розумного міста» має тривати безперервно.

4.3 Висновок до четвертого розділу

В третьому розділі кваліфікаційної роботи описано психологічні чинники небезпеки. Розглянута домедична допомога при ураженні електричним струмом персоналу інтелектуальних міських систем.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження обґрунтовано, що успішна розбудова та сталий розвиток «розумного міста» залежать від системної інтеграції штучного інтелекту, великих даних і хмарних обчислень в єдину інфраструктуру, яка через моделі прогнозової аналітики та методи інтелектуальної оптимізації дає змогу мінімізувати екологічні й макросередовищні ризики та критично підвищити ефективність муніципального управління.

В першому розділі кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Магістр»:

- Подано сутність концепції «Розумне місто».
- Висвітлено роль Big Data та штучного інтелекту у розвитку «розумних міст».
- Описано інтелектуальні системи прийняття рішень у «розумних містах».
- Проаналізовано роль штучного інтелекту в міському розвитку.
- Досліджено інтелектуальні платформи та методи обробки даних «розумних міст».
- Обґрунтовано концептуальні основи інтеграції штучного інтелекту та хмарних обчислень в інфраструктуру «розумних міст».
- Сформовано теоретико-методологічні засади трансформації урбаністичних даних за допомогою технологій штучного інтелекту.

В другому розділі кваліфікаційної роботи:

- Описано прогнозу аналітику в міському плануванні.
- Подано прогнозування перспектив зростання «розумних міст».
- Досліджено моделі прогнозування транспортних потоків.
- Висвітлено прогнози впливу на навколишнє середовище.
- Досліджено інтелектуальні методи оптимізації систем «розумних міст».
- Розглянуто роль ШІ-керованих хмарних рішень у процесах прийняття управлінських рішень та прогностичного аналізу міського середовища.

В третьому розділі кваліфікаційної роботи:

- Подано аналіз викликів і перспектив розвитку інтелектуальних міських систем.

- Проаналізовано обмеження розвитку «розумних міст» з використанням ШІ.

- Досліджено макросередовищні фактори розвитку «розумних міст»: можливості, ризики та футурологічні тенденції.

- Висвітлено майбутні тенденції застосування штучного інтелекту для «розумних міст».

- Розглянуто умови сталого розвитку «розумних міст» на основі штучного інтелекту.

У розділі «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях» описано психологічні чинники небезпеки. Розглянута домедична допомога при ураженні електричним струмом персоналу інтелектуальних міських систем.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

- 1 Khaleel Khlewee, Ismael, Kassem Hamze, and Tirus Muya. "AI in smart cities: a review of urban data processing, prediction, and optimization techniques." *Estidamaa 2025* (2025): 29-38.
- 2 Duda O., Kunanets N., Matsiuk O., Pasichnyk V., Rzhеuskyi A. Aggregation, Storing, Multidimensional Representation and Processing of COVID-19 Data // *Advances in Intelligent Systems and Computing V. CSIT 2020*. Springer, Cham, 2021. Vol. 1293. DOI: 10.1007/978-3-030-63270-0_60. ISSN 2194-5357, EISSN 2194-5365.
- 3 F. Ghareh Mohammadi, F. Shenavarmasouleh, M. H. Amini, and H. R. Arabnia, "Data analytics for smart cities: Challenges and promises," 2021.
- 4 Kunanets N., et al. Designing the Repository of Documentary Cultural Heritage // *Advances in Intelligent Systems and Computing V. CSIT 2020*. Springer, Cham, 2021. Vol. 1293. DOI: 10.1007/978-3-030-63270-0_70. ISSN 2194-5357, EISSN 2194-5365.
- 5 P. Bellini, P. Nesi, and G. Pantaleo, "IoT-enabled smart cities: A review of concepts, frameworks and key technologies," *Appl. Sci.*, 2022.
- 6 Duda O., Matsiuk O., Kunanets N., Pasichnyk V., Rzhеuskyi A., Bilak Y. Formation of hypercubes based on data obtained from IoT devices // *International Journal of Sensors, Wireless Communications and Control*. 2021. Vol. 11(5). P. 498–504. DOI: 10.2174/2210327910999201210145151.
- 7 A. Abdallah, S. Anadani, and H. Ismail, "Internet-Based 3D Volumes with Signed Distance Fields: Establishing a WebGL Rendering Infrastructure," in *Proc. Int. Conf.*, 2024.
- 8 J. S. Gracias, G. S. Parnell, E. Specking, and E. A. Pohl, "Smart cities—A structured literature review," *Smart Cities*, 2023.
- 9 S. L. Zubaidi, K. Hashim, S. Ethaib, and N. S. S. Al-Bdairi, "A novel methodology to predict monthly municipal water demand based on weather variables scenario," *J. King Saud Univ.*, vol. 2022, 2022.

10 R. U. Attah, B. M. P. Garba, and I. Gil-Ozoudeh, "Advanced financial modeling and innovative financial products for urban development: Strategies for economic growth," *Int. J. Eng. Res.*, 2024.

11 Y. Himeur, M. Elnour, F. Fadli, N. Meskin, and I. Petri, "AI-big data analytics for building automation and management systems: A survey, actual challenges and future perspectives," *Artif. Intell.*, vol. 2023, 2023.

12 M. A. Fadhel, A. M. Duhaim, A. Saihood, and A. Sewify, "Comprehensive systematic review of information fusion methods in smart cities and urban environments," *Information*, vol. 2024, 2024.

13 S. E. Bibri, J. Huang, S. K. Jagatheesaperumal, and J. Krogstie, "The synergistic interplay of artificial intelligence and digital twin in environmentally planning sustainable smart cities: A comprehensive systematic review," 2024.

14 M. E. E. Alahi, A. Sukkuea, F. W. Tina, and A. Nag, "Integration of IoT-enabled technologies and artificial intelligence (AI) for smart city scenario: Recent advancements and future trends," *Sensors*, 2023.

15 F. Z. Rozony and M. N. A. Aktar, "A systematic review of big data integration challenges and solutions for heterogeneous data sources," *Acad. J.*, 2024.

16 S. Schmager and I. O. Pappas, "Understanding human-centred AI: A review of its defining elements and a research agenda," *Behav. Inf. Technol.*, 2025.

17 Duda O., Stanko A. Architecture of monitoring platform in smart cities // *Вісник ХНУ*. 2023. No. 4. P. 10–19. DOI: 10.31891/2307-5732.

18 R. Sonani and V. Govindarajan, "Cloud integrated governance driven reinforcement framework for ethical and legal compliance in AI based regulatory enforcement," *J. Sel. Top.*, 2025.

19 Rakshit, Ishita. "AI-driven cloud solutions for smart city data analytics." *Systemic analytics* 3.1 (2025): 27-34.

20 Kalusivalingam, A. K., Sharma, A., Patel, N., & Singh, V. (2021). Enhancing smart city development with AI: Leveraging machine learning algorithms and iot-driven data analytics. *International journal of ai and ml*, 2(3), 1-25. <https://cognitivecomputingjournal.com/index.php/IJAIML-V1/article/view/78>

21 Gade, K. R. (2021). Data-driven decision making in a complex world. *Journal of computational innovation*, 1(1), 1-18. <https://researchworkx.com/index.php/jci/article/view/2>

22 Nama, P., Pattanayak, S., & Meka, H. S. (2023). AI-driven innovations in cloud computing: Transforming scalability, resource management, and predictive analytics in distributed systems. *International research journal of modernization in engineering technology and science*, 5(12), 4165. <https://www.doi.org/10.56726/IRJMETS47900>

23 Ang, K. L. M., Seng, J. K. P., Ngharamike, E., & Ijamaru, G. K. (2022). Emerging technologies for smart cities' transportation: Geo-information, data analytics and machine learning approaches. *ISPRS international journal of geo-information*, 11(2), 85. <https://www.mdpi.com/2220-9964/11/2/85>

24 Abbas, M., Akhai, S., Abbas, U., Jafri, R., & Arif, S. M. (2025). Ai-enabled sustainable urban planning and management. In *Real-world applications of ai innovation* (pp. 233–260). IGI Global Scientific Publishing. <https://www.igi-global.com/chapter/ai-enabled-sustainable-urban-planning-and-management/363608>

25 Wang, Sevidon. "Challenges and opportunities for developing a smart city based on artificial intelligence." *Applied Innovations in Industrial Management* 5.1 (2025): 62-69.

26 A. A. Adesina, T. V. Iyelolu, and P. O. Paul, "Leveraging predictive analytics for strategic decision-making: Enhancing business performance through data-driven insights," *World J. Adv. Res.*, 2024.

27 M. Elassy, M. Al-Hattab, M. Takruri, and S. Badawi, "Intelligent transportation systems for sustainable smart cities," *Transp. Eng.*, 2024.

28 H. Hao, Y. Wang, and J. Chen, "Empowering scenario planning with artificial intelligence: A perspective on building smart and resilient cities," *Engineering*, 2024.

29 S. Pal and S. K. Ghosh, "Rule based end-to-end learning framework for urban growth prediction," 2017.

30 T. Orusa, A. Viani, and E. Borgogno-Mondino, “Earth observation data and geospatial deep learning AI to assign contributions to European municipalities Sen4MUN: An empirical application in Aosta Valley,” *Land*, 2024.

31 P. Wu, Z. Zhang, X. Peng, and R. Wang, “Deep learning solutions for smart city challenges in urban development,” *Sci. Rep.*, 2024.

32 Duda O., Shakleina I., Luchkevych M. AI and ML in DevOps efficiency // *Herald of Khmelnytskyi National University*. 2025. Vol. 351(3.1). P. 143–149. DOI: 10.31891/2307-5732-2025-351-17.

33 S. Felici-Castell, J. Segura-Garcia, J. J. Perez-Solano, R. Fayos-Jordan et al., “AI-IoT low-cost pollution-monitoring sensor network to assist citizens with respiratory problems,” 2023.

34 P. Linardatos, V. Papastefanopoulos et al., “CO2 concentration forecasting in smart cities using a hybrid ARIMA– TFT model on multivariate time series IoT data,” *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, 2023.

35 R. Pinki, S. Kumar, S. Vimal, and N. S. Alghamdi, “Artificial intelligence-enabled smart city management using multiobjective optimization strategies,” *Expert Syst.*, vol. 2025, 2025.

36 A. Shah Syed, D. Sierra-Sosa, A. Kumar, and A. Elmaghraby, “Making cities smarter–Optimization problems for the IoT enabled smart city development: A mapping of applications, objectives, constraints,” 2022.

37 A. Khatun and S. G. S. Hossain, “Open challenges and issues: Artificial intelligence for transactive management,” 2020.

38 P. Chamoso Santos and F. de la Prieta Pintado, “Smart cities simulation environment for intelligent algorithms evaluation,” 2015.

39 Wolniak, R., & Stecuła, K. (2024). Artificial Intelligence in Smart Cities–Applications, Barriers, and Future Directions: A Review. *Smart Cities*, 7(3), 1346-1389.

40 Szpilko, D., Naharro, F. J., Lăzăroiu, G., Nica, E., & de la Torre Gallegos, A. (2023). Artificial intelligence in the smart city–a literature review. *Engineering Management in Production and Services*, 15(4), 53-75.

41 Haque, A. B., Nur, A., & Chowdhury, R. N. (2023). Artificial Intelligence in Smart City-Systematic Literature Review of Current Knowledge and Future Research Avenues. Enabling Technologies for Effective Planning and Management in Sustainable Smart Cities, 53-77.

42 Chen, M., Jiang, Y., Guizani, N., Zhou, J., Tao, G., Yin, J., & Hwang, K. (2020). Living with I-fabric: Smart living powered by intelligent fabric and deep analytics. *IEEE Network*, 34(5), 156-163.

43 Şerban, A. C., & Lytras, M. D. (2020). Artificial intelligence for innovative renewable energy sector in Europe– smart energy infrastructures for next generation smart cities. *IEEE Access*, 8, 77364-77377.

44 Nasr, M., Islam, M. M., Shehata, S., Karray, F., & Quintana, Y. (2021). Competent healthcare in the age of AI: recent advances, challenges, and prospects. *IEEE Access*, 9, 145248-145270.

45 Angehrn, Z., Sostar, J., Nordon, C., Turner, A., Gove, D., Karcher, H., ... & de Reydet-de Vulpillieres, F. (2020). Ethical and Social implications of using predictive modelling for Alzheimer's disease prevention: a systematic literature review. *Journal of Alzheimer's Disease*, 76(3), 923-940.

46 Nozari, H., Bakhshi-Movahed, A., & Bakhshi-Movahed, A. (2024). Innovative processes in the data-driven supply chain. *International Scientific Hub*, 18-35.

47 C. Lim, K. J. Kim, and P. P. Maglio, "Smart cities with big data: Reference models, challenges, and considerations," 2018.

48 Zhovnr Y. I., Hrybovskyi O. M., Orlov M. V., Duda O. M., Kunanets N. E. IoT information systems methodology // Управління розвитком складних систем. 2024. Vol. 60. P. 56–71. DOI: 10.32347/2412-9933.2024.60.56-70.

49 Pasichnyk S., Maga A., Kunanets N., Lozytskyi O., Petrushyna B., Duda O., Rybak A. Smart household interface design // Вісник НУ «Львівська політехніка». 2024. No. 15. P. 273–289. DOI: 10.23939/sisn2024.15.273.

50 Bakhshi Movahed, A., & Mokhtari, H. (2023). Development of an Inventory Control Model for Reusable Items: Economic Quantities of Order and Recovery. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 15(3), 20-40.

51 Психологія безпеки. URL: https://pidru4niki.com/70727/bzhd/psihologiya_bezpeki.

52 Психологічні чинники небезпеки. URL: <https://subject.com.ua/safety/bezpeka/30.html>.

53 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів : НПАОП 40.1-1.21-98. – Офіц. вид. – Київ : Основа, 2020. – 384 с.

54 Геврик Є. О. Безпека життєдіяльності : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / Є. О. Геврик. – Київ : Ельга, Ніка-Центр, 2022. – 276 с.

ДОДАТКИ

Тези конференцій

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ**

МАТЕРІАЛИ

ХІІ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

**«ІНФОРМАЦІЙНІ МОДЕЛІ,
СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ»**



17-18 грудня 2025 року

**ТЕРНОПІЛЬ
2025**

ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ

Голова: Микола Приймак– професор кафедри комп'ютерних систем та мереж, д.т.н., професор;

Співголови: Павло Марущак– докт. техн. наук, професор, проректор з наукової роботи.
Ігор Баран– канд. техн. наук, доцент, декан факультету ФІС.

Науковий секретар: Галина Семенишин– старший викладач.

Члени: докт. фіз.-мат. наук, професор Василь Кривень; докт. техн. наук, професор Ярослав Литвиненко; докт. техн. наук, професор Микола Карпінський; докт. фіз.-мат. наук, професор Михайло Петрик; канд. техн. наук, доцент Галина Осухівська; канд. пед. наук, доцент Жанна Баб'як; канд. техн. наук, доцент Наталія Загородна.

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ

Голова: Юрій Скоренький– канд. фіз.-мат. наук, доцент, завідувач кафедри фізики

Члени: канд. техн. наук, доцент Вячеслав Никитюк; канд. техн. наук, доцент Дмитро Михалик; канд. техн. наук, доцент Марія Стадник; канд. техн. наук, доцент Євгенія Тиш; ст. викладач Ліліана Джиджора.

Матеріали XIII науково-технічної конференції «Інформаційні моделі, системи та технології» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, (Тернопіль, 17–18 грудня 2025 р.). – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2025. –162 с.

Адреса оргкомітету: ТНТУ ім. І. Пулюя, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, 46001,
тел. (0352) 52-41-33, факс (0352) 254983.

E-mail: conffis2025@gmail.com

Редагування, оформлення та верстка: Галина Семенишин

СЕКЦІЇ КОНФЕРЕНЦІЇ, ЯКІ ПРЕДСТВЛЕНІ В ЗБІРНИКУ

- Математичне моделювання;
- Інформаційні системи та технології;
- Комп'ютерні системи та мережі;
- Програмна інженерія та моделювання складних розподілених систем;
- Новітні фізико-технічні та освітні технології.

В збірнику надруковано тези доповідей XIII науково-технічної конференції «Інформаційні моделі, системи та технології» (Тернопіль, 17–18 грудня 2025 р.) за такими науковими напрямками: математичне моделювання; інформаційні системи та технології; комп'ютерні системи та мережі; програмна інженерія та моделювання складних розподілених систем; новітні фізико-технічні та освітні технології.

Розрахований на науковців, викладачів та студентів вузів.

За зміст тез та дотримання норм академічної доброчесності відповідальність несе автор.

© Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя, 2025]

В. Кокайло АНАЛІЗ МЕТААСАМБЛЕВИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ МЕДИЧНИХ ДІАГНОЗІВ V. Kokailo ANALYSIS OF META-ENSEMBLE ALGORITHMS FOR MEDICAL DIAGNOSIS CLASSIFICATION	202
Е. Приймачук ЦИФРОВІ ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ (SMART GRID) ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ (SCADA, ADMS) E. Pryimachuk DIGITAL ELECTRICITY GRIDS (SMART GRID) AND INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS (SCADA, ADMS)	203
Н. Луцьк, В. Антонюк, А. Паламар СТРУКТУРА ІОТ-СИСТЕМИ ДЛЯ МОНИТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЖИТЛОВИХ ПРИМІЩЕНЬ N. Lutsyk, V. Antoniuk, A. Palamar STRUCTURE OF AN IOT SYSTEM FOR MONITORING THE PARAMETERS OF ELECTRICAL NETWORKS IN RESIDENTIAL PREMISES	204
М. Боднар, Г. Вовнянка, В. Дуда ПЕРЕДОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ДАНИХ У РОЗУМНИХ МІСТАХ M. Bodnar, H. Vovnianka, V. Duda ADVANCED DATA PROCESSING TECHNOLOGIES IN SMART CITIES	205
І. Вітів, А. Кривецький, М. Боднар БАГАТОВИМІРНЕ АНАЛІТИЧНЕ ОПРАЦЮВАННЯ ВЕЛИКИХ ДАНИХ I. Vitiv, A. Kryvetskyi, M. Bodnar BIG DATA MULTIDIMENSIONAL ANALYTICAL PROCESSING	206
Г. Вовнянка, Д. Ониськів, А. Кривецький ПЕРСПЕКТИВИ АНАЛІТИЧНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ДАНИХ РОЗУМНИХ МІСТ H. Vovnianka, D. Onyskiv, A. Kryvetskyi PROSPECTS OF ANALYTICAL PROCESSING OF SMART CITIES DATA	207
О. Котлінський, І. Вітів, С. Довгалюк РОЗУМНІ МІСТА – КОНЦЕПТИ ТА НАПРЯМКИ ДОСЛІДЖЕНЬ O. Kotlinskyi, I. Vitiv, S. Dovhaliuk SMART CITIES – CONCEPTS AND RESEARCH DIRECTIONS	208
В. Лабчук, Р. Захарченко ДЕЗІНФОРМАЦІЯ ВОРОЖИХ СИЛ ЗАСОБАМИ SMALL DATA V. Labchuk, R. Zakharchenko DISINFORMATION OF ENEMY FORCES WITH THE HELP OF SMALL DATA	209
А. Микитишин, С. Гавриць, О. Колеснік РОЗПОДІЛЕНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ДЛЯ ВЕРСТАТІВ З ЧИСЛОВИМ ПРОГРАМНИМ КЕРУВАННЯМ A. Mikitishin, S. Havrys, O. Kolesnik DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM FOR CNC MACHINES	211
Р. Михайлишин, М. Приймак КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА ІОТ-СИСТЕМА КОНТРОЛЮ КІЛЬКОСТІ ЛЮДЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ХМАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ R. Mykhailyshyn, M. Pryimak COMPUTERIZED IOT SYSTEM FOR MONITORING THE NUMBER OF PEOPLE USING CLOUD TECHNOLOGIES	212
Д. Ониськів, С. Довгалюк, О. Котлінський СИСТЕМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ДОВКІЛЛЯ D. Onyskiv, S. Dovhaliuk, O. Kotlinskyi ENVIRONMENTAL INDICATORS MONITORING SYSTEMS	213

УДК 004.03

М. Боднар; Г. Вовнянка; В. Дуда

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

ПЕРЕДОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ДАНИХ У РОЗУМНИХ МІСТАХ

UDC 004.03

M. Bodnar; H. Vovnianka; V. Duda

ADVANCED DATA PROCESSING TECHNOLOGIES IN SMART CITIES

Швидкий прогрес інформаційних та комунікаційних технологій забезпечив нові методи обробки та аналізу джерел даних у «розумних містах». Для цього застосовуються різноманітні технології для дистрибуції міст, щоб зробити їх більш придатними для життя, ефективними, інтелектуальними, сталими та стійкими. Інтелектуальні та ефективні моделі обробки даних для застосунків машинного зору в «розумних містах» впроваджують в інтелектуальні системи виявлення для моніторингу швидкості та потоку транспортних засобів, а також руху пішоходів на дорогах та тротуарах [1]. Застосування моделей машинного навчання в «розумних містах»:

- Моделі зберігання та пошуку для обробки масивних відеоданих у хмарі для моніторингу транспортних засобів та дотримання правил дорожнього руху в системах відоспостереження та транспорту.

- Моделі на основі зображень та розпізнавання для аналізу поширених даних зображень у містах, зокрема системи розпізнавання пожеж на основі глибокого навчання для розумної профілактики пожеж та системи виявлення кришок люків у моніторингу проїжджої частини та вулиць.

- Моделі прогнозування потокових даних у «розумних містах» для завчасного визначення заторів на дорогах та тенденцій руху пішоходів.

- Моделі оптимізації в «розумних містах», зокрема моделі інтелектуальної маршрутизації та планування шляху для навігації транспортних засобів у логістичних, дистрибуційних та постачальних системах [1].

Вищезазначена родина моделей в основному адаптована до сфер застосування «розумної» мобільності та «розумного» пішохідного руху. Однак, також є багато дослідників, які працюють над моделями обробки даних в інших міських доменах, або незалежно, або в інтегрованому режимі з транспортом. В [1] зроблено огляд численних платформ «розумного міста» на ринках для управління даними та інтеграції з різноманітними застосунками. Перспективним є надання відносно комплексного огляду моделей обробки міських даних з різними методами для різних прикладних доменів.

«Розумні міста» зазнали швидкого зростання і тому стали головною тенденцією у розвитку «розумних» середовищ. «Розумні міста» прагнуть покращити придатність міських поселень для життя, підвищити сталість та зменшити експлуатаційні витрати. Очікується, що концепція «розумного міста» принесе значну користь, і вона була прийнята великими містами по всьому світу. Однак цінність бачення «розумних міст» може бути повністю реалізована лише через успішну інтеграцію передових технологій та перспективних моделей міського управління.

Література

1. khaleel Khlewee, Ismael, Kassem Hamze, and Tirus Muya. "AI in smart cities: A review of urban data processing, prediction, and optimization techniques." ESTIDAMAA 2025 (2025): 29-38.

УДК 004.03

I. Вітів; А. Кривецький; М. Боднар

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

БАГАТОВИМІРНЕ АНАЛІТИЧНЕ ОПРАЦЮВАННЯ ВЕЛИКИХ ДАНИХ

UDC 004.03

I. Vitiv; A. Kryvetskyi; M. Bodnar

BIG DATA MULTIDIMENSIONAL ANALYTICAL PROCESSING

Актуальність використання аналітичного опрацювання великих за обсягом наборів та колекцій даних для новітніх фізико-технічних технологій полягає у необхідності швидкої та точної обробки експоненційно зростаючих обсягів даних, що генеруються високочутливими сенсорами, прискорювачами частинок та складними фізичними моделями, для оптимізації процесів та інновацій. Це дає змогу в режимі реального часу виявляти закономірності, прогнозувати поведінку систем, керувати міськими системами тощо. У контексті аналітичного опрацювання великих за обсягом наборів та колекцій даних багатовимірна аналітика великих даних відіграє провідну роль, здебільшого завдяки широкому переліку реальних застосувань, де її можна успішно застосувати. На даний момент часу, дослідники запропонували обширний перелік прикладних застосувань, зокрема [1]:

- великі за обсягом набори та колекції соціальних даних;
- великі за обсягом набори та колекції сенсорних даних;
- великі за обсягом набори та колекції графових даних;
- великі за обсягом набори та колекції енергетичних даних

Внутрішня природа багатовимірних абстракцій надає явну перевагу над класичними, наприклад, SQL-орієнтованими, підходами завдяки використанню розлогого класу аналітичних методологій. В результаті, декілька доменів даних можуть бути легко змодельовані в термінах вимірів, ієрархій, рівнів та мір, і на їхній основі можуть бути побудовані потужні аналітичні інструменти.

Традиційні системи оперативної аналітичної обробки (OLAP) та бізнес-аналітики (BI) помітно розширюють можливості SQL-орієнтованих інструментів аналітичного опрацювання даних. Оскільки добре відомо, що, як правило, набори даних у реальному житті проявляють багатовимірну та багаторівневу природу. Тому багатовимірні аналітичні інструменти більш придатні для видобування корисної інформації з великих за обсягом наборів та колекцій даних, ніж традиційні, безвимірні підходи.

Багатовимірна аналітика великих за обсягом наборів та колекцій даних, що зберігає приватність, є актуальним напрямком досліджень в галузі аналітики великих даних, що зберігає приватність, де фокус зосереджується навколо комбінації методологій багатовимірної аналітики великих даних та парадигм збереження приватності. Цей дослідницький контекст передбачає збереження приватності чутливого діапазону даних при одночасній підтримці завдань багатовимірної аналітики великих за обсягом наборів та колекцій даних. Цей напрямок досліджень активно стимулюється нещодавнім вибуховим розвитком сучасних хмарних інформаційно-технологічних платформ.

Література

1. Ohana, Ruben, et al. "The well: a large-scale collection of diverse physics simulations for machine learning." *Advances in Neural Information Processing Systems* 37 (2024): 44989-45037.