

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: Генеративний штучний інтелект для цифрових двійників розумних міст

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

(підпис)

Кривецький А.Д.
(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Матійчук Л.П.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Дуда О.М.
(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Боднарчук І.О.
(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Загородна Н.В.
(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 Кривецькому Андрію Дмитровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Генеративний штучний інтелект для цифрових двійників розумних міст

Керівник роботи Матійчук Любомир Павлович, д.е.н., професор 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 27 травня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Наукові публікації про розумні міста, генеративний штучний інтелект та цифрові двійники

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

Вступ. 1 Теоретико-методологічні основи генеративного штучного інтелекту та цифрових двійників «розумних міст». 2 Концептуальне проектування «розумного міста». 3.

Прототипування інноваційного LFM як частини проєкту «Розумне місто». 4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки. Додатки.

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Сенчишин В.С., доцент каф. МТ		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Теслюк В.М., проректор адміністративно-господарської роботи та будівництва	з	

7. Дата видачі завдання 13 квітня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Ознайомлення з завданням до кваліфікаційної роботи	13.04.2026	
2.	Підбір та опрацювання наукових публікацій, збір даних по темі роботи	13.04.2026-20.04.2026	
3.	Виконання дослідження згідно теми кваліфікаційної роботи	21.04.2026-03.05.2026	
4.	Оформлення розділу «Теоретико-методологічні основи генеративного штучного інтелекту та цифрових двійників «розумних міст»»	04.05.2026-10.05.2026	
5.	Оформлення розділу «Концептуальне проектування «розумного міста»	04.05.2026-10.05.2026	
6.	Оформлення розділу «Прототипування інноваційного LFM як частини проекту «Розумне місто»	04.05.2026-10.05.2026	
7.	Виконання завдання до підрозділу «Охорона праці»	27.04.2026-10.05.2026	
8.	Виконання завдання до підрозділу «Безпека в надзвичайних ситуаціях»	27.04.2026-10.05.2026	
9.	Оформлення кваліфікаційної роботи	11.05.2026-13.05.2026	
10.	Нормоконтроль	14.05.2026	
11.	Перевірка на плагіат	15.05.2026	
12.	Попередній захист кваліфікаційної роботи	18.05.2026	
13.	Захист кваліфікаційної роботи	27.05.2026	

Студент

_____ (підпис)

Кривецький А.Д.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Матійчук Л.П.

_____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Генеративний штучний інтелект для цифрових двійників розумних міст // Кваліфікаційна робота освітнього ступеня «Магістр» // Кривецький Андрій Дмитрович // 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. 74, рис. – 15, табл. – 2, кресл. – , додат. – 1, бібліогр. – 57.

Ключові слова: автоенкодер, базові моделі, великі дані, генеративний штучний інтелект, міське планування, моделювання міських систем, розумне місто, сталий розвиток, цифровий двійник.

Кваліфікаційна робота присв'ячена дослідженню генеративний штучний інтелект для цифрових двійників розумних міст. В першому розділі кваліфікаційної роботи розглянуто генеративний ШІ як основу прогнозування та сталого проектування «розумних міст» і цифрових двійників. Описано концептуальні засади базових моделей та аналітичний огляд наукової літератури у цій галузі. Подано базову структуру великої моделі потоків (LFM), адаптовану для міського цифрового двійника (UDT). В другому розділі кваліфікаційної роботи подано огляд концептуального проекту «розумного міста» та його окремих підпроектів. Висвітлено трансформацію платформи відкритих даних у комплексну міську систему. Здійснено обґрунтування умов вибірки, описано процес проектування концепту та виконано розробку моделі великого потоку «розумного міста». В третьому розділі кваліфікаційної роботи здійснено прототипування моделі великого потоку «розумного» міста. Описано основні елементи моделі великого потоку «розумного міста». Розглянуто автоенкодер «розумного міста». Описано перспективи розвитку та потенціал концептуального проекту «розумне місто». Подано аналіз результатів прототипування проекту «розумне місто» в концептуальну модель.

ANNOTATION

Generative Artificial Intelligence for Digital Twins of Smart Cities // The educational level "Master" qualification work // Andrii Kryvetskyi // Ternopil Ivan Pulyuy National Technical University, Faculty of Computer Information Systems and Software Engineering, Department of Computer Science, SNnm-61 group // Ternopil, 2026 // P. 74, fig. – 15, tables – 2, posters – , annexes – 1, ref. – 57.

Key words: autoencoders, basic models, big data, generative artificial intelligence, urban planning, urban systems modeling, smart city, sustainable development, digital twin.

The qualification thesis is devoted to the study of generative artificial intelligence for digital twins of smart cities. In the first chapter of the qualification thesis, generative AI is considered as a basis for forecasting and sustainable design of “smart cities” and digital twins. The conceptual foundations of foundation models and an analytical review of scientific literature in this field are presented. The basic structure of a Large Flow Model (LFM), adapted for an Urban Digital Twin (UDT), is introduced. In the second chapter of the qualification thesis, an overview of the conceptual “smart city” project and its individual subprojects is provided. The transformation of an open data platform into a comprehensive urban system is highlighted. The justification of sampling conditions is carried out, the process of conceptual design is described, and the development of a Large Flow Model of the “smart city” is performed. In the third chapter of the qualification thesis, prototyping of the Large Flow Model of the “smart city” is carried out. The main elements of the Large Flow Model of the “smart city” are described. The “smart city” autoencoder is discussed. The prospects for development and the potential of the conceptual “smart city” project are outlined. An analysis of the prototyping results of the “smart city” project into a conceptual model is presented.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ШІ – штучний інтелект.

AIoT (англ. Artificial Intelligence of Things) – штучний інтелект речей.

CV (англ. Computer Vision) – комп'ютерний зір.

DL (англ. Deep Learning) – глибоке навчання.

Foundation Models (FMs) – базові (фундаментальні) моделі – це великі універсальні моделі штучного інтелекту, які навчаються на масштабних і різномірних наборах даних та здатні виконувати широкий спектр завдань без потреби у спеціалізованому навчанні для кожного окремого випадку.

GAN (англ. Generative Adversarial Network) – генеративно-змагальна мережа.

Large Flow Model (LFM) – велика модель потоків – це концептуальна та практична архітектура для моделювання міських потоків у складних і динамічних середовищах.

LLMs (англ. Large Language Models) – великі мовні моделі.

ML (англ. Machine Learning) – машинне навчання.

NLP (англ. Natural Language Processing) – обробка природної мови.

OSRM (англ. Open Source Routing Machine) – відкрита машина маршрутизації.

PCA-AE (англ. Principal Component Analysis - Autoencoder) – автоенкодер на основі аналізу головних компонент.

UDT (англ. Urban Digital Twin) – міський цифровий двійник.

VAE (англ. Variational Autoencoder) – варіаційний автоенкодер.

VRP (англ. Vehicle Routing Problem) – задача маршрутизації транспортних засобів.

ЗМІСТ

ВСТУП		8
1	ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ГЕНЕРАТИВНОГО ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ «РОЗУМНИХ МІСТ»	11
1.1	Генеративний ШІ – основа прогнозування та оптимізації міських систем.....	11
1.2	Концептуальні та практичні основи генеративного ШІ.....	12
1.3	Аналітичний огляд наукової літератури щодо генеративного ШІ в «розумних містах»	13
1.4	Штучний інтелект для сталого планування та проектування «розумних міст».....	14
1.5	Генеративні моделі штучного інтелекту.....	15
1.6	Базові моделі та їх попередньо навчена підмножина	16
1.7	Штучний інтелект для сталого планування, проектування та цифрового двійника «розумного міста».....	20
1.8	Генеративний ШІ та попередньо навчені базові моделі для сталого планування та проектування «розумного міста» та цифрових двійників	21
1.9	Базова структура для LFM, адаптована для UDT в рамках GSAI: біфокусний підхід	22
1.10	Висновок до першого розділу	24
2	КОНЦЕПТУАЛЬНЕ ПРОЄКТУВАННЯ «РОЗУМНОГО МІСТА»	25
2.1	Огляд концептуального проєкту «розумного міста».....	25
2.2	Підпроєкти концепту «розумного міста»	26
2.3	Трансформація платформи відкритих даних на комплексну систему «розумного міста».....	29
2.4	Обґрунтування умов та вибірки концепту «розумного міста».....	30
2.5	Проектування концепту «розумного міста»	31
2.6	Проектування моделі великого потоку «розумного міста»	32

2.6.1 Концептуалізація та планування моделі великого потоку «розумного міста».....	32
2.6.2 Формування моделі великого потоку «розумного міста»	35
2.7 Висновок до другого розділу	38
3 ПРОТОТИПУВАННЯ ІННОВАЦІЙНОГО LFM ЯК ЧАСТИНИ ПРОЄКТУ «РОЗУМНЕ МІСТО».....	39
3.1 Прототипування моделі великого потоку «розумного» міста.....	41
3.2 Основні елементи моделі великого потоку «розумного міста»	44
3.3 Автоенкодер «розумного міста».....	51
3.4 Перспективи розвитку та потенціал концептуального проєкту «розумне місто»	57
3.5 Аналіз результатів прототипування проєкту «розумне місто» в концептуальну модель.....	59
3.6 Висновок до третього розділу	60
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	61
4.1 Контроль за станом охорони праці.....	61
4.2 Забезпечення безпеки життєдіяльності при роботі з ПК	63
4.3 Висновок до четвертого розділу	65
ВИСНОВКИ.....	66
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ.....	68
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Актуальність теми зумовлена стрімким розвитком технологій штучного інтелекту та цифрової трансформації міського середовища. Сучасні міста стикаються з численними викликами, серед яких зростання населення, перевантаження транспортної інфраструктури, виснаження ресурсів, екологічні проблеми та необхідність підвищення якості життя населення. У зв'язку з цим особливого значення набуває концепція «розумного міста», що базується на використанні цифрових технологій, великих даних та інтелектуальних систем управління.

Одним із найбільш перспективних напрямів розвитку «розумних міст» є застосування цифрових двійників (Urban Digital Twin), які дають змогу створювати віртуальні моделі міських систем для аналізу, прогнозування та оптимізації процесів у реальному часі. Водночас генеративний штучний інтелект відкриває нові можливості для моделювання міських потоків, створення альтернативних сценаріїв розвитку, прогнозовної аналітики та автоматизованого прийняття рішень. Поєднання цифрових двійників із генеративним ШІ дозволяє значно підвищити ефективність міського планування, управління ресурсами та забезпечення сталого розвитку міського середовища.

Попри значний прогрес у сфері штучного інтелекту та цифрових технологій, питання інтеграції генеративного ШІ у цифрові двійники «розумних міст» залишаються недостатньо дослідженими. Існує потреба у вдосконаленні методів моделювання складних міських систем, обробки великих обсягів даних, прогнозування просторової динаміки та підтримки управлінських рішень. Саме тому дослідження генеративного штучного інтелекту для цифрових двійників «розумних міст» є актуальним і має важливе теоретичне та практичне значення для розвитку сучасних інтелектуальних урбаністичних систем.

Мета і задачі дослідження. Метою даної кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Магістр» дослідження теоретико-методологічних засад генеративного штучного інтелекту та цифрових двійників «розумних міст», а також розробка й прототипування моделі великого потоку (LFM) для

підвищення ефективності сталого планування, прогнозування та управління міськими системами. Для досягнення поставленої мети потрібно виконати ряд завдань, зокрема:

- Дослідити теоретичні та концептуальні засади генеративного штучного інтелекту й цифрових двійників «розумних міст».
- Проаналізувати сучасні генеративні моделі, базові моделі та їх застосування для прогнозування й оптимізації міських систем.
- Виконати аналітичний огляд наукових підходів до використання генеративного ШІ у сталому плануванні та проектуванні «розумних міст».
- Спроектувати концептуальну модель великого потоку (LFM), адаптовану для цифрового двійника «розумного міста».
- Здійснити прототипування запропонованої моделі для підтримки управління й прогнозування міських процесів.

Об’єкт дослідження: процеси та технології створення і функціонування цифрових двійників «розумних міст» на основі генеративного штучного інтелекту.

Предмет дослідження: методи, моделі та алгоритми генеративного штучного інтелекту для проектування, моделювання та оптимізації цифрових двійників «розумних міст».

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розвитку концептуальних та методологічних засад застосування генеративного штучного інтелекту для створення цифрових двійників «розумних міст», зокрема у запропонованні підходів до інтеграції базових моделей та моделей великих потоків даних у єдину архітектуру міського цифрового двійника, що забезпечує підвищення точності моделювання, адаптивності та ефективності процесів сталого міського планування.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості застосування розроблених підходів, моделей і методів генеративного штучного інтелекту для створення та вдосконалення цифрових двійників «розумних міст», що дозволяє підвищити ефективність управління міською інфраструктурою, оптимізувати процеси міського планування, покращити прогнозування міських

потоків і сприяти прийняттю більш обґрунтованих управлінських рішень у сфері сталого розвитку міст.

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 57 найменувань та одного додатка. Загальний обсяг кваліфікаційної роботи складає 74 сторінки, з них 50 сторінки основного тексту, який містить 15 рисунків та 2 таблиці.

1 ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ГЕНЕРАТИВНОГО ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ «РОЗУМНИХ МІСТ»

1.1 Генеративний ШІ – основа прогнозування та оптимізації міських систем

Сталий міський розвиток спрямований на подолання викликів урбанізації, виснаження ресурсів та екологічної деградації. Для цього створюються «розумні міста» [3], що використовують ШІ та цифрові двійники. UDT – це цифрова модель міських систем, яка інтегрує дані для аналізу, прогнозування та оптимізації. ШІ підсилює її можливості, забезпечуючи моделювання складних потоків та формування рішень для екологічного планування [4].

ШІ застосовується для створення динамічних моделей, прогнозу аналітики та тестування сценаріїв [5]. Це допомагає адаптувати міста до викликів, підвищувати ефективність і стійкість [6]. Підгалузі – ML, DL, CV, NLP – дають можливість працювати з великими даними та формувати інсайти [7].

Новим напрямом є Generative ШІ, що створює контент і генерує сценарії міських потоків, 3D-моделі та альтернативи дизайну [8]. Використовуються GAN, VAE, Transformers та Diffusion Models. Паралельно розвиваються FMs, універсальні нейромережі, які після попереднього навчання можуть бути адаптовані до різних завдань [9]. Їх інтеграція з генеративним ШІ та UDT відкриває нові можливості для аналізу даних, моделювання та прийняття рішень [10].

Попри прогрес, існують проблеми: обмеженість сценаріїв, складність інтеграції даних, нестача методологій [11]. Для їх вирішення запропоновано LFM – концептуальну модель з можливостями генеративного ШІ, інтегровану в UDT. Вона покликана покращити прогнозу аналітику, адаптивне навчання та управління міськими потоками. Як приклад розглянуто концептуальний проєкт «розумного міста» [2], де LFM застосовується для моделювання просторової динаміки [12].

Таким чином, поєднання UDT, ШІ, генеративного ШІ та FMs формує нову основу для сталого міського розвитку, забезпечуючи ефективне планування, інноваційний дизайн та підвищення стійкості міст [13].

1.2 Концептуальні та практичні основи генеративного ШІ

У цьому параграфі закладається теоретичне та практичне підґрунтя дослідження, спрямованого на інтеграцію генеративного ШІ та FMs у цифрові двійники «розумних міст». Розглядається перетин ключових підгалузей ШІ – ML, DL, CV та NLP – із сучасними практиками міського планування та дизайну. В [14] акцент зроблено на трансформаційній ролі генеративного ШІ та FMs у створенні адаптивних, стійких і екологічно збалансованих «розумних міст».

Огляд демонструє, що інтеграція генеративного ШІ та FMs у UDT-фреймворки відкриває нові можливості для аналізу складних міських потоків, моделювання сценаріїв та підтримки прийняття рішень на основі даних. Водночас виявлено ключові прогалини: недостатня теоретична база, обмежене практичне застосування та відсутність структурованих методологій для моделювання багатомодальних міських динамік. Це створює потребу у розробці нових концептуальних моделей, здатних забезпечити комплексне управління даними та прогнозу аналітику.

Таким чином, параграф формує основу для створення LFM – інноваційної моделі, що поєднує можливості генеративного ШІ та FMs у межах UDT. Її мета – подолати існуючі обмеження, забезпечити точніше моделювання міських потоків та сприяти розвитку сталих стратегій міського планування. Це закладає фундамент для подальших досліджень, спрямованих на практичну реалізацію концепції «генеративний штучний інтелект для цифрових двійників розумних міст».

1.3 Аналітичний огляд наукової літератури щодо генеративного ШІ в «розумних містах»

Тематичний огляд літератури є структурованим методом аналізу досліджень, що дає змогу виявити повторювані теми, узагальнити результати та визначити прогалини у знаннях [4]. Він формує основу для концептуальних моделей, зокрема LFM, яка інтегрує генеративний ШІ, FMs та цифрові двійники «розумних міст». Огляд забезпечує зв'язок між теоретичними положеннями та практичним застосуванням, визначаючи архітектуру й функціональність LFM [5].

Основна увага приділяється синтезу сучасних досліджень у сферах ШІ, генеративного ШІ, FMs та UDT у контексті сталого міського планування. Це дає можливість окреслити ключові виклики: недостатня теоретична база, обмежене практичне застосування та проблеми інтеграції мультимодальних даних [10]. Водночас огляд підкреслює потенціал генеративного ШІ та FMs у моделюванні складних міських потоків і підтримці прийняття рішень [8].

Огляд [2] здійснювався за структурованим процесом (див. рисунок 1.1), що використовував пошук у Scopus, Web of Science, ScienceDirect та Springer Link. Використовувалися ключові комбінації: “Urban Digital Twin” AND “Generative Artificial Intelligence”; “Foundation Models” AND “Digital Twin”; “Smart Cities” AND “AI”; “Urban Planning” AND “GenAI”; “AI” AND “Urban Sustainability” [11].

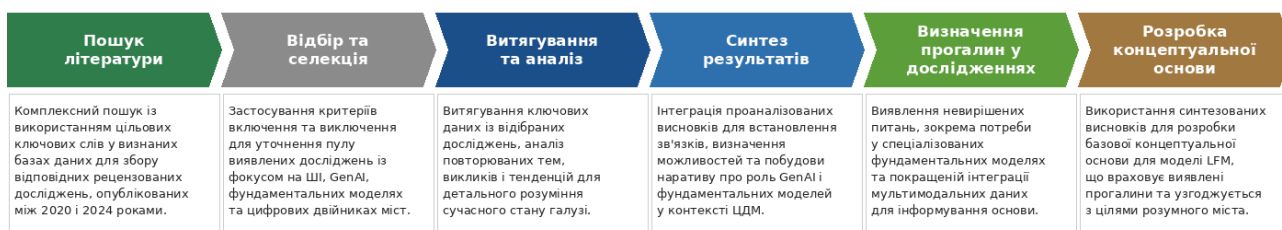


Рисунок 1.1 – Структурна схема процесу наукометричного пошуку [2]

До аналізу використовувалися рецензовані статті, що висвітлюють інтеграцію ШІ, генеративного ШІ та UDT у планування сталих міст, а також

застосування FMs у різних доменах. Виключалися нерелевантні, дубльовані та застарілі роботи.

Ідентифіковано понад триста статей, після відбору залишено понад сто двадцять для аналізу. Виявлено повторювані теми та виклики, окреслено нові тенденції у технологічній інтеграції та методологічних інноваціях [12]. Синтез результатів забезпечив узгоджений наратив, що поєднує теоретичні основи з практичними застосуваннями, створюючи міцну базу для концептуальної рамки LFM [12].

1.4 Штучний інтелект для сталого планування та проєктування «розумних міст»

Штучний інтелект (ШІ) – це галузь комп’ютерних наук, що створює алгоритми для виконання завдань, які потребують людського інтелекту: навчання, логічного висновку, оптимізації, сприйняття та роботи з природною мовою. У міському плануванні це означає аналіз даних, прогнозування транспортних потоків, оптимізацію енергетичних систем та врахування громадських настроїв [7]. Основні підгалузі – ML, DL, CV, NLP та генеративний ШІ – забезпечують спеціалізовані моделі для планування та дизайну міст [15]. Вони сприяють інноваціям і підвищують ефективність у сферах екологічної стійкості [4].

ML формує основу для навчання, DL витягує складні ознаки з даних, CV інтерпретує візуальну інформацію, NLP забезпечує роботу з мовою, а генеративний ШІ створює новий контент і сценарії для адаптації міст до викликів [15]. Сучасні архітектури DL – GAN, CNN, RNN, LSTM, Transformers – застосовуються для текстових, мовних та візуальних завдань [16]. Їх синергія надає можливість вирішувати складні проблеми міського планування, що підтверджено у Vibri [4]. Водночас існує прогалина у дослідженнях щодо комплексного застосування ML, DL, CV, NLP та генеративного ШІ.

Сталі «розумні міста» поєднують екологічні практики, економічний розвиток та соціальну рівність, використовуючи цифрові технології для підвищення якості життя [17]. Основні напрями:

- екологічна стійкість – відновлювані джерела енергії, декарбонізація транспорту, захист біорізноманіття [18];
- економічна стійкість – створення «зелених» робочих місць, підтримка інновацій;
- соціальна стійкість – доступне житло, охорона здоров'я, інклюзивність.

Зростаючі виклики клімату та виснаження ресурсів зміщують акцент саме на екологічну складову [19].

ШІ-моделі дають змогу аналізувати великі масиви даних, отримувати інсайти та підтримувати прийняття рішень. Найпоширенішим інструментом залишаються ML-моделі [19], тоді як DL, CV, NLP та генеративного ШІ поступово розширюють застосування [20]. Завдяки здатності до ітеративного навчання ШІ відображає логіку міського планування: збір даних, аналіз та створення рішень для екологічних викликів. Це робить ШІ ключовим рушієм інновацій у розвитку сталих «розумних міст».

Таким чином, інтеграція ML, DL, CV, NLP та генеративного ШІ у UDT створює основу для генеративного ШІ для цифрових двійників «розумних міст».

1.5 Генеративні моделі штучного інтелекту

Генеративний ШІ – це клас моделей глибинного навчання, здатних створювати нові дані чи контент, що відтворює характеристики вихідних наборів, навчаючись на прихованих закономірностях. Використовуючи архітектури GAN, VAE, Diffusion Models та Transformers, генеративний ШІ продукує текст, зображення, аудіо, код і відео [21]. GANи дають можливість створювати реалістичні зразки з латентного простору, забезпечуючи високу якість зображень [22], тоді як великі моделі на кшталт BigGAN генерують різноманітні високоякісні зображення [23]. Transformers завдяки механізму self-

attention ефективні для роботи з послідовними даними, а flow-моделі забезпечують точне моделювання розподілу даних [21].

Особливе значення для моделювання міських потоків мають варіаційні автоенкодери (VAE), які ефективно кодують і генерують багатовимірні дані у структурованому латентному просторі [24]. Вони надають можливість прогнозувати та симулювати просторово-часові шаблони навіть у неповних наборах даних. Дослідження [25] заклало основу для масштабованого стохастичного варіаційного навчання, а подальші роботи [24] вдосконалили структуру латентного простору та підвищили стійкість до атак.

Автоенкодери (AE) з детермінованою архітектурою також важливі для моделювання складних урбаністичних даних. Автоенкодер «розумного міста» здатний обробляти різні типи міських даних – транспортні потоки, супутникові знімки, просторові карти – у межах UDT. AE застосовуються для видобування ознак, зменшення розмірності та реконструкції даних [26]. Нові підходи, як PCA-AE [27], покращують організацію латентного простору, а дослідження [28] показують переваги PCA над автоенкодерами у швидкості при високій розмірності. Інші роботи [15]) демонструють еволюцію AE та їхню роль у сучасних генеративних мережах, зокрема як альтернативу VAE.

Таким чином, розвиток GAN, VAE, AE та їхніх модифікацій формує потужний інструментарій для моделювання складних міських потоків у цифрових двійниках. Вони забезпечують генерацію даних, реконструкцію та прогнозування, що є критично важливим для створення стійких і адаптивних «розумних міст» [24].

1.6 Базові моделі та їх попередньо навчена підмножина

Генеративний ШІ та FMs є взаємодоповнюючими технологіями, що поєднуються для створення складних систем, здатних генерувати нові дані, аналізувати наявні та виконувати різноманітні завдання. FMs – це базові архітектури, які можна адаптувати до різних доменів шляхом додаткового навчання чи тонкого налаштування. Їхня спеціалізована форма – PFMs – вже

пройшла попереднє навчання на великих і різноманітних наборах даних, що дає змогу ефективно застосовувати їх у конкретних завданнях без потреби у значних обчислювальних ресурсах [9].

Прикладами PFMс є великі мовні моделі (LLMs), як от GPT-3 [29], BERT [30], T5 [31], а також CLIP [32], Geo-FMs [33] та інші моделі для геопросторових даних [34]. LLMс навчаються за допомогою самонавчання на масштабних корпусах і далі налаштовуються для спеціалізованих завдань. Geo-FMs та спільні моделі орієнтовані на географічні дані й можуть працювати як FMs або PFMс залежно від контексту застосування [35].

Порівняльні характеристики генеративних моделей та автоенкодерів для цифрових двійників «розумних міст» подані в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Генеративні моделі та автоенкодери для цифрових двійників «розумних міст» [2]

Модель	Ключові особливості	Приклади застосування у цифрових двійниках міст
GAN	Генерація реалістичних даних із латентного простору; висока якість зображень	Синтез міських карт, адаптація між доменами, наприклад супутникові → вуличні зображення
VAE	Ймовірнісне моделювання; латентний простір для багатовимірних даних	Прогнозування транспортних потоків, симуляція енергетичних та екологічних систем
Трансформери	Self-attention; робота з послідовними даними	Генерація текстових описів міських сценаріїв, аналіз громадських відгуків
Flow-моделі	Пряме моделювання розподілу даних; висока точність	Високоякісна генерація зображень для міських симуляцій
Автоенкодери	Детерміноване кодування та реконструкція даних	Автоенкодер «розумного міста»: аналіз транспортних, супутникових та просторових даних
PCA-AE	Організація латентного простору за важливістю ознак	Оптимізація даних для міських класифікаційних завдань

FMs – це великі нейронні мережі, що навчаються на масивних даних у режимі *unsupervised* чи *self-supervised* [13]. Вони здатні адаптуватися до широкого спектра завдань через *fine-tuning*, *few-shot* чи *zero-shot transfer*, забезпечуючи застосування у тексті, зображеннях та геопросторових об'єктах [13]. Їхня перевага полягає у забезпеченні ефективної ініціалізації параметрів для подальших завдань, включно з семантичною сегментацією, генерацією контенту

та пошуком інформації [36]. Особливо перспективними є мультимодальні GeoAI-моделі, що демонструють високу продуктивність у міській географії та дистанційному зондуванні [13]. На рисунку 1.2 подана схема взаємозв'язків моделей GAN, VAE та AE для цифрових двійників міст.



Рисунок 1.2 – Схема взаємозв'язків моделей GAN, VAE та AE для цифрових двійників міст [2]

Таким чином, FMs і PFMс виступають потужними інструментами для розвитку ШІ-рішень у різних доменах, включно з цифровими двійниками міст. Їхня здатність поєднувати попереднє навчання з адаптацією до спеціалізованих завдань визначає ключову роль у просуванні інновацій у сфері сталого міського розвитку [13]. В таблиці 1.2 подано порівняння характеристик базових моделей (FMs) та попередньо натренованих базових моделей PFMс.

Таблиця 1.2 – Порівняння характеристик базових моделей FMs та попередньо натренованих базових моделей PFMс [2]

Атрибут	Базові моделі FMs	Попередньо натреновані базові моделі PFMс
Трансферне навчання	Властиве архітектурі FMs, що забезпечує адаптацію до подальших завдань після достатнього навчання або тонкого налаштування.	Є прикладом трансферного навчання, оскільки PFMс вже пройшли попереднє навчання і можуть переносити знання на нові завдання з мінімальним додатковим навчанням.
Ефективність використання ресурсів	Застосовується опосередковано: FMs потребують значних ресурсів для попереднього навчання, але зменшують їхню потребу під час адаптації.	Застосовується безпосередньо: PFMс знижують обчислювальні та дані вимоги для подальших завдань, використовуючи вже набуті знання.
Узагальнення	Основна мета FMs – охопити широкі закономірності та знання з різноманітних наборів даних під час навчання.	Явно демонструється PFMс, які використовують попередньо набуті знання для ефективної роботи з різними завданнями, включно з новими або невідомими доменами.
Універсальність	Розроблені як універсальні моделі, що слугують базою для багатьох прикладних завдань.	Практична універсальність проявляється у PFMс, які швидко адаптуються та налаштовуються для конкретних випадків у різних сферах.

Це порівняння підкреслює теоретичні переваги FMs та практичні сильні сторони PFMс, демонструючи їхню взаємодоповнюваність у створенні масштабованих, універсальних і ефективних ШІ-рішень для різних сфер, зокрема міського планування та дизайну.

Отримані висновки щодо відмінностей і можливостей FMs та PFMс формують концептуальну основу для розробки LFM. Використовуючи узагальнення, масштабованість і гнучкість цих моделей, LFM спрямований на вирішення складних завдань моделювання міських потоків і вдосконалення процесів прийняття рішень для потреб цифрових двійників «розумних міст». Такий підхід узгоджується з екологічними цілями сталого розвитку «розумних міст», забезпечуючи ефективне управління ресурсами та підтримку екологічно збалансованого міського середовища [13].

1.7 Штучний інтелект для сталого планування, проєктування та цифрового двійника «розумного міста»

Цифрові двійники «розумних міст» – це складна обчислювальна модель, що інтегрує дані з сенсорів, IoT-пристроїв [37], супутникових знімків та муніципальних баз. Вона створює динамічне відображення міського середовища, включно з інфраструктурою, ресурсами та соціальними процесами, даючи можливість аналізувати й оптимізувати системи та тестувати сценарії сталого розвитку [5].

Останні роки відзначаються активним застосуванням ШІ у UDT для підтримки екологічних цілей. Автори [38] підкреслюють трансформаційну роль ШІ та AIoT у створенні стійких міст, з акцентом на мобільність, енергоефективність, управління відходами та біорізноманіття. Дослідники [39] запропонували метод Deep Reinforcement Learning для адаптивного керування світлофорами, що зменшує затримки та підвищує ефективність руху. Автори [40] класифікували застосування ШІ та DT у транспортній інфраструктурі, акцентуючи на прогностному обслуговуванні та оптимізації потоків. Інші автори [41] показали потенціал поєднання алгоритмів підкріплювального навчання з цифровими двійниками для покращення мобільності.

З технічного боку, дослідники [42] запропонували алгоритми UDT з ML та DL для точних симуляцій, автори [43] продемонстрували інтеграцію семантичних моделей знань, а інші [44] – застосування 3D-моделювання у міському дизайні. Автори [5] зазначають, що більшість робіт зосереджені на інтеграції ШІ-компонентів, але бракує складних моделей самого DT та використання реальних даних для створення міцного зв'язку «фізичне-віртуальне».

Таким чином, синергія ШІ та UDT відкриває нові можливості для сталого міського розвитку, забезпечуючи адаптивність, точність та екологічну орієнтацію цифрових двійників міст [41].

1.8 Генеративний ШІ та попередньо навчені базові моделі для сталого планування та проєктування «розумного міста» та цифрових двійників

Генеративний ШІ та FMs трансформують міське планування й дизайн, забезпечуючи аналіз великих за обсягом наборів та колекцій даних, моделювання складних систем, симуляцію сценаріїв та оптимізацію просторових рішень. Це дає змогу створювати стійкі, ефективні та екологічно орієнтовані міські середовища [45].

Автори [4] підкреслюють ключову роль генеративного ШІ у розвитку цифрових двійників «розумних міст», особливо у сферах енергетики, мобільності та управління інфраструктурою. Дослідники [45] показують, що інтелектуальні UDT інтегрують аналітичне опрацювання та візуалізацію, але стикаються з проблемами багатовимірних даних. Генеративний ШІ вирішує ці обмеження, продукуючи синтетичні дані. Інші автори [46] акцентують на застосуванні GAN, VAE, трансформерів та дифузійних моделей для задач транспортної оптимізації, енергетики, управління водними ресурсами та 3D-моделювання міст.

Генеративний ШІ забезпечує створення синтетичних даних для тестування сценаріїв, адаптивних планів та прогнозних моделей, що підвищує точність і стійкість міських систем [8]. Автори [39] демонструють використання DRL та цифрових двійників для адаптивного керування світлофорами й прогнозного обслуговування інфраструктури, тоді як інші [41] підкреслюють потенціал підкріплювального навчання для оптимізації мобільності.

Важливу роль відіграють PFMс, зокрема LLMс (GPT-4, BERT, T5, CLIP), які застосовуються у партисипативному плануванні, транспортному менеджменті та аналізі складних документів [47]. Вони дають можливість моделювати взаємодію мешканців, генерувати плани мобільності та оптимізувати інфраструктуру, хоча залишаються виклики – довіра до моделей, розуміння спеціалізованої термінології та обчислювальна ефективність [48].

Дослідники [49] наголошують, що інтеграція FMs у цифрові двійники підвищує точність прогнозів, адаптивність та керування складними даними, хоча

потребує вирішення питань ресурсомісткості та прозорості. Використання edge-обчислень [35] надає можливість оптимізувати роботу FMs у режимі реального часу.

Таким чином, поєднання генеративного ШІ та FMs з UDT створює взаємодоповнюючу систему: генеративний ШІ забезпечує генеративні можливості та моделювання міських потоків, а FMs – масштабованість і узагальнення. Це сприяє формуванню адаптивних, екологічно збалансованих стратегій для сталого розвитку «розумних міст» [4].

1.9 Базова структура для LFM, адаптована для UDT в рамках GSAI: біфокусний підхід

Базова структура (див. рисунок 1.3), розглянута в цьому параграфі, розроблена на основі висновків, що зроблені на основі, розглянутих у попередньому параграфі.

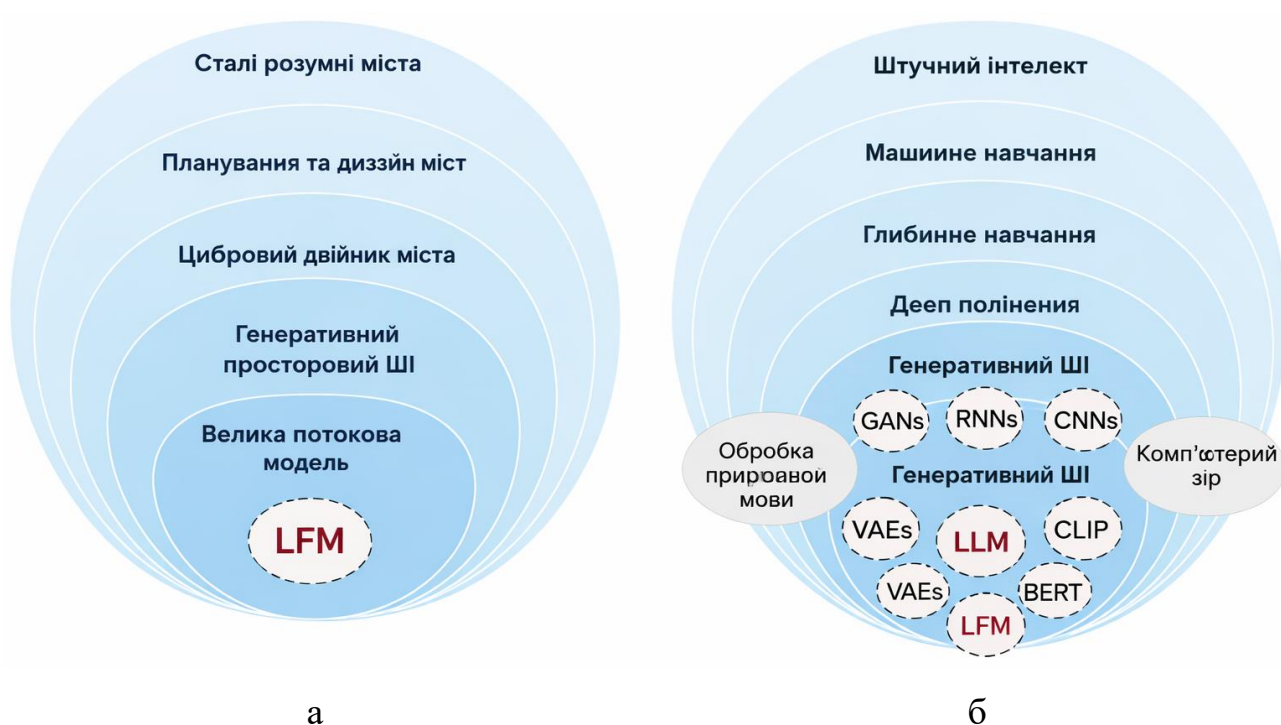


Рисунок 1.3 – Базова структура моделі великих потоків у сталому «розумному» міському розвитку і (а) штучному інтелекті та (б) його підгалузях [2]

Ця концепція забезпечує цілісне розуміння ІІІ та його підгалузей, підкреслюючи їхню значущість для цифрових двійників «розумних міст» як системи планування й дизайну, орієнтованої на сталий розвиток міст. Запропонована структура пояснює взаємозв'язки між компонентами ІІІ та їхній потенціал у вдосконаленні міського моделювання через генеративний ІІІ і FMs. Вона поєднує теоретичні засади, практичні підходи та емпіричні дані, забезпечуючи системний спосіб вирішення просторових викликів і підвищення ефективності прийняття рішень у сталому міському середовищі [45].

LFM є практичним втіленням синергії генеративного ІІІ та FMs, спрямованим на моделювання міських потоків. Як показано на рисунку 1.3, LFM поєднує цифрові двійники, міське планування та дизайн із підсистемами ІІІ, демонструючи їхню взаємодію в контексті розвитку «розумних міст». LFM виступає спеціалізованим підтипом FMs у межах Generative Spatial ІІІ (GSAI), створеним для моделювання просторово-часових динамік міських потоків – мобільності, енергії, матеріалів, відходів та біорізноманіття [4].

На відміну від універсальних генеративних моделей, як от GANs чи VAEs, LFM зосереджується на прогнозуванні та генерації послідовностей потоків у міському середовищі, враховуючи багатомодальні та часові залежності. GSAI, своєю чергою, охоплює ширший спектр моделей для аналізу просторових закономірностей, оптимізації міських просторів і генерації конфігурацій [46].

З теоретичної точки зору, LFM поєднує генеративну, адаптивну та прогнозу аналітику для моделювання міських потоків у межах UDT. Використовуючи можливості FMs і генеративного ІІІ, він формує нову парадигму аналізу взаємозв'язків між просторовими структурами, потоками та цілями сталого розвитку. Його здатність доповнювати неповні міські дані та прогнозувати динаміку потоків розширює традиційні моделі планування, створюючи основу для розвитку GSAI як концепції сталого міського управління [35].

1.10 Висновок до першого розділу

В першому розділі кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Магістр» розглянуто генеративний ШІ – основа прогнозування та оптимізації міських систем. Подано концептуальні та практичні основи генеративного ШІ. Описано аналітичний огляд наукової літератури щодо генеративного ШІ в «розумних містах». Розглянуто штучний інтелект для сталого планування та проєктування «розумних міст». Висвітлено генеративні моделі штучного інтелекту. Проаналізовано базові моделі та їх попередньо навчена підмножина. Досліджено штучний інтелект для сталого планування, проєктування та цифрового двійника «розумного міста». Описано генеративний ШІ та попередньо навчені базові моделі для сталого планування та проєктування «розумного міста» та цифрових двійників. Сформована базова структура для LFM, адаптована для UDT в рамках GSAI: біфокусний підхід.

2 КОНЦЕПТУАЛЬНЕ ПРОЄКТУВАННЯ «РОЗУМНОГО МІСТА»

Цей розділ описує концептуальний проєкт «розумного міста» [2], який виступає узагальненим прикладом для дослідження. Автори [50] визначають комплексний аналіз систем, подій чи проєктів, що досліджуються цілісно за допомогою різних методів. У цьому контексті розглядається концептуальний проєкт «розумного міста» [2], що тісно пов'язаний із підпроєктами, які охоплюють ключові міські домени – мобільність, товари, енергію, матеріали, відходи та біорізноманіття. Така інтеграція забезпечує цілісне відображення міських процесів і підтримує розробку LFM для цифрових двійників «розумних міст», спрямованого на сталий розвиток міста [51]. Це демонструє практичне впровадження LFM у структуру UDT, охоплюючи етапи проєктування та розвитку моделі. Це дає змогу оцінити її значення для сталого міського планування, визначити основні характеристики, цілі, функції та очікувані результати. LFM інтегрує дані з різних міських підсистем, забезпечуючи моделювання потоків енергії, ресурсів і мобільності, що сприяє формуванню екологічно збалансованих рішень у межах концептуального проєкту «розумного міста» [2].

Завдяки описовим даним, візуальним матеріалам і прикладам, дослідження розкриває роль LFM як ключового елемента генеративного III у створенні цифрових двійників міст, демонструючи його потенціал для підвищення ефективності планування та дизайну сталих «розумних» міських систем [52].

2.1 Огляд концептуального проєкту «розумного міста»

Концептуальний проєкт «розумного міста» [2] – це інноваційна ініціатива, спрямована на трансформацію міського планування та управління через створення розширеної структури цифрових двійників «розумних міст». Центром проєкту є «розумне місто», де інтегруються різні міські дані для підвищення інтероперабельності, оптимізації потоків інформації та підтримки сталого розвитку. Основні завдання – оптимізація транспортних мереж, підвищення

енергоефективності, зменшення втрат ресурсів, удосконалення логістики та збереження екологічної рівноваги [51].

Від старту у 2022 році проєкт досягнув значних результатів: створено відкриту та безпечну платформу даних, розроблено рішення для оптимізації мобільності, логістики та управління відходами, а також нові стратегії енергоменеджменту. Крім того, здійснено картографування матеріальних потоків для кращого розуміння ресурсної динаміки міста. Ці досягнення стали можливими завдяки співпраці міської влади, промислових партнерів та академічних інституцій.

Подальший розвиток концептуального проєкту «розумного міста» [2] потребує вдосконалення інструментів і методологій, інтеграцію різноманітних наборів даних, вирішення нових міських викликів та мінімізацію ризиків, що сприятиме сталому розвитку «розумних» міст.

Таким чином, концептуальний проєкт «розумного міста» [2] є практичним прикладом інтеграції генеративного ШІ та FMs у цифрові двійники міст, демонструючи їхній потенціал у створенні адаптивного, стійкого та екологічно збалансованого міського середовища.

2.2 Підпроєкти концепту «розумного міста»

Проєкт «розумне місто» [2] інтегрує декілька взаємопов'язаних підпроєктів, кожен з яких зосереджений на певному аспекті міського життя. Ці підпроєкти розроблені для спільної роботи, використання синергії та динаміки співпраці для вирішення низки міських проблем (див. рисунок 2.1).

Аналіз взаємозв'язків між підпроєктами «розумного міста» показує, як інтегрований підхід підвищує ефективність і практичну цінність проєкту, сприяючи створенню сталого міського середовища.

Підпроєкт 1 – «розумна» платформа міських даних, забезпечує сумісність і безпечний обмін даними через систему Data Mesh на базі Kafka.

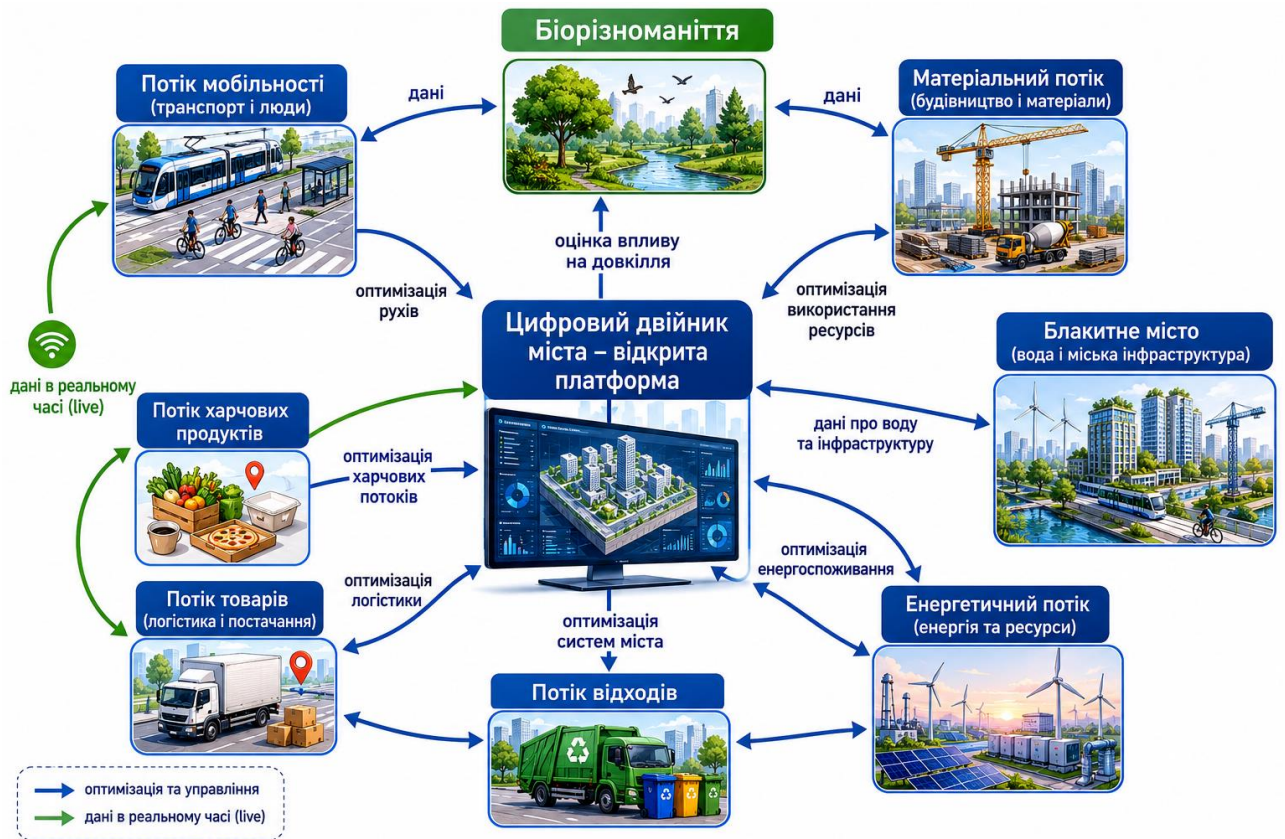


Рисунок 2.1 – Структура концептуального проекту «розумне місто»

Вона підтримує потокову передачу даних у режимі реального часу, інтеграцію та захист приватності. Центральне сховище даних містить ключові набори даних «розумного міста», доступні для аналізу в інших підпроектах.

Підпроект 2 – «розумна» міська мобільність [2] розробляє високоточні алгоритми розрахунку часу поїздок та доступності, вдосконалюючи Open Source Routing Machine (OSRM). Це дає можливість оцінювати інфраструктурні зміни та планувати транспортні системи.

Підпроект 3 – «розумне» біорізноманіття [2] створює інтерактивну карту екологічних мереж міста, інтегруючи геопросторові дані для оцінки впливу урбанізації на дикі види.

Підпроект 4 – «розумне» управління відходами [2] застосовує GIS-платформу для візуалізації потоків відходів і прогнозування їхнього обсягу, що сприяє оптимізації збору та переробки.

Підпроект 5 – «розумне» енергетичне управління формує цифрову модель енергосистеми, поєднуючи локальні та національні рівні для аналізу споживання й розподілу енергії [2].

Підпроєкт 6 [2] – «розумні» матеріальні потоки картографує використання будівельних матеріалів і пропонує GIS-інструменти для впровадження принципів циркулярної економіки.

Підпроєкт 7 – «розумна» оптимізація логістики створює алгоритм Vehicle Routing Problem (VRP) для «SwissPost», що визначає оптимальні маршрути та склад автопарку, знижуючи витрати й покращуючи якість доставки [2].

Підпроєкт 8 – «розумна» багатовимірна ШІ-платформа для проактивного планування об'єднує результати попередніх підпроєктів у відкриту систему моделювання міських процесів. Вона використовує генеративний ШІ та DL для створення колективного інтелекту людини й машини, що підтримує прийняття рішень у міському управлінні.

У межах цього підпроєкту розроблено LFM з генеративними можливостями, який моделює та прогнозує міські потоки, інтегруючи дані з усіх підпроєктів. LFM стає ключовим інструментом для аналізу складної міської динаміки та формування стратегій сталого розвитку.

Кожен підпроєкт концептуального проєкту «розумного міста» [2] взаємопов'язаний із загальною структурою цифрових двійників «розумних міст», забезпечуючи інтеграцію даних і спільний розвиток системи. Підпроєкт 1 створює базову інфраструктуру для обміну даними, що підтримує роботу всіх інших напрямів.

Підпроєкти 2–7 [2] функціонують як спеціалізовані цифрові двійники, орієнтовані на окремі міські потоки. Їхня взаємодія формує цілісний підхід до управління містом. Наприклад, підпроєкти «розумні» відходи та «розумні матеріальні потоки» доповнюють один одного: аналіз життєвого циклу матеріалів допомагає оптимізувати переробку та зменшення відходів. Підпроєкти 2 – «розумна» Мобільність і 5 – «розумна» енергетика досліджують взаємозв'язок між транспортом і споживанням енергії, сприяючи створенню ефективних рішень для сталого транспорту.

Підпроєкт 3 – «розумне» біорізноманіття інтегрує дані мобільності та будівництва для оцінки впливу урбанізації на екологічні мережі, підтримуючи природоорієнтоване планування [2]. Підпроєкт 7 – «розумна» оптимізація

логістики використовує результати мобільності та матеріальних потоків для підвищення ефективності доставки й зменшення екологічного навантаження.

У сукупності ці підпроекти створюють взаємопов'язану систему, де кожен компонент підсилює інший, формуючи основу для інтегрованого управління міськими процесами в межах UDT.

Підпроекти концептуального проекту «розумного міста» [2] розглядаються як окремі платформи цифрових двійників «розумних міст», кожна з яких моделює конкретні міські потоки. Вони створюють цифрові моделі мобільності, енергетики, матеріалів, відходів та біорізноманіття, використовуючи базову інфраструктуру даних для аналізу й оптимізації. Їхня мета – забезпечити практичні інсайти для проактивного планування та прийняття рішень.

Підпроект 1 [2] відповідає за інтеграцію даних і взаємодію між усіма платформами, формуючи єдине цифрове середовище міста. Це створює основу для комплексного аналізу та управління міськими процесами.

Підпроект 8 [2] синтезує результати інших напрямів, розробляючи багатовимірний інструмент на базі генеративного ШІ та DL. Він забезпечує відкриту платформу для проактивного планування, поєднуючи дані й знання з усіх підпроектів. Це надає можливість створювати інноваційні та стійкі рішення, формуючи адаптивне й ефективне міське середовище майбутнього.

Таким чином, концептуальний проект «розумного міста» [2] демонструє, як інтеграція окремих UDT у єдину систему та використання LFM з генеративними можливостями сприяють розвитку стійких «розумних міст».

2.3 Трансформація платформи відкритих даних на комплексну систему «розумного міста»

Інтеграція «Data Mesh Platform», системи безпеки та сховища даних створює основу для цифрових двійників «розумних міст», поєднуючи динамічні й статичні потоки [2]. Це забезпечує точні симуляції, аналітику, співпрацю між

учасниками та захист даних. Така інфраструктура дає UDT змогу відображати складність міського середовища, зберігаючи цілісність і безпеку інформації.

У межах Підпроєкту 8 платформа UDT повинна підтримувати моделювання в режимі реального часу, прогнозу аналітику та інтерактивну візуалізацію. Для цього додаються ключові компоненти:

- інтеграція даних у режимі реального часу;
- динамічне моделювання та симуляції;
- застосування ШІ і розширеного аналітичного опрацювання;
- 3D-візуалізація для користувачів;
- API-з'єднання для інтеперабельності;
- зворотний зв'язок для вдосконалення рішень;
- тестування сценаріїв та оптимізація ресурсів.

Ці елементи перетворюють відкриту платформу даних на інтерактивний UDT, здатний підтримувати проактивне управління містом. Водночас Підпроєкт 8 виходить [2] за межі створення платформи, інтегруючи LFM з генеративними можливостями. Це сприяє формуванню колективного інтелекту «людина-машина» для інноваційного та сталого міського планування.

Таким чином, удосконалена платформа UDT у поєднанні з LFM та генеративного ШІ стає ключовим інструментом для моделювання міських потоків, прогнозування змін і розробки адаптивних стратегій розвитку «розумних міст».

2.4 Обґрунтування умов та вибірки концепту «розумного міста»

Концептуальний проєкт «розумного міста» [2] є оптимальним середовищем для дослідження завдяки багатовимірному міському контексту, інтеграції різних потоків та доступу до якісних даних. Ініціатива охоплює ключові міські домени – мобільність, енергію, матеріали, відходи та біорізноманіття – і виступає стратегічним тестовим майданчиком для LFM. Вона поєднує генеративний ШІ, FMs та цифрові двійники «розумних міст»,

забезпечуючи інтеграцію даних і співпрацю між міськими планувальниками, інженерами, науковцями та політиками.

Дані для розробки LFM походять із підпроектів 2–7, що охоплюють мобільність, транспорт товарів, енергоспоживання, управління відходами, біорізноманіття та використання матеріалів. Використання мультимодальних наборів даних дає змогу моделювати складні взаємозв'язки міських потоків, забезпечуючи масштабованість та адаптивність моделі.

«Розумне місто», завдяки активним програмам сталого розвитку та впровадженню технологій у міське планування, є прикладом для перевірки здатності LFM вирішувати просторові виклики та генерувати практичні інсайти. Інтегровані підпроекти створюють реальне середовище для тестування, що підтверджує потенціал LFM у підвищенні міської стійкості та сталості, поєднуючи теоретичні здобутки з практичними рішеннями.

Таким чином, концептуальний проєкт «розумного міста» [2] демонструє, як використання LFM у поєднанні з генеративним ШІ та UDT може стати ключовим інструментом для прогнозування міських процесів і формування адаптивних стратегій розвитку «розумних міст».

2.5 Проєктування концептуа «розумного міста»

У дослідженні розглянуто нову FMs для міських потоків, розроблену з використанням генеративного ШІ та інтегровану у цифрові двійники «розумних міст». Концептуальний проєкт «розумного міста» [2] виступає стратегічним середовищем для тестування моделі, її проєктування, розробки та перевірки здатності вирішувати просторові виклики й формувати практичні інсайти для міського планування.

Методологія має дві фази:

– Фаза проєктування – створення концептуальної моделі LFM, узгодженої з вимогами моделювання міських потоків у складних середовищах.

– Фаза розробки – триває з ключовими етапами, запланованими на 2025 рік. Вона потребує прототипування, інтеграцію даних та вдосконалення алгоритмів.

У поєднанні ці етапи забезпечують еволюцію LFM у масштабоване рішення для моделювання мультимодальних міських систем, що підвищує адаптивність та ефективність управління «розумними містами».

Таким чином, LFM стає інноваційним інструментом, який поєднує генеративні можливості ШІ з цифровими двійниками, створюючи основу для прогнозування та оптимізації міських процесів.

2.6 Проєктування моделі великого потоку «розумного міста»

2.6.1 Концептуалізація та планування моделі великого потоку «розумного міста»

Фаза проєктування закладає основу для LFM, зосереджуючись на концептуалізації архітектури, стратегіях обробки даних та симуляційних можливостях. Її мета – узгодити модель із потребами моделювання міських потоків у складних і динамічних середовищах.

Цей етап має структуровану послідовність (див. рисунок 2.2), яка поєднує ключові компоненти:

- планування архітектури LFM;
- визначення методів інтеграції та обробки даних;
- розробку симуляційних механізмів для відтворення міських процесів;
- узгодження моделі з вимогами цифрових двійників «розумних міст».

Таким чином, фаза проєктування виступає критично важливим етапом у створенні LFM, який поєднує генеративний ШІ та цифрові двійники «розумних міст», формуючи основу для подальшого розвитку інструментів прогнозування, аналізу та управління міськими системами у контексті сталого розвитку «розумних міст».



Рисунок 2.2 – Покроковий процес концептуального проектування моделі великого потоку [2]

Фаза проектування розпочинається з визначення чітких цілей та вимог, що формують основу для розвитку LFM. Це застосовує точне окреслення міських потоків, які необхідно моделювати, та ідентифікацію конкретних викликів, що потребують вирішення. Активна співпраця зі стейкхолдерами гарантує, що дизайн LFM відображає реальні потреби та пріоритети. Спільне визначення функціональних і технічних вимог забезпечує узгодженість моделі з практичними завданнями міського планування та дизайну в межах концептуального проєкту «розумного міста» [2].

Після визначення цілей формується архітектурний дизайн, який окреслює структурну основу моделі. Це потребує розробку потоків даних, рішень для їхнього зберігання та обробки, а також вибір відповідних алгоритмів – моделей машинного та глибинного навчання, статистичних методів і технік оптимізації. Важливим компонентом стала концептуалізація спеціалізованої архітектури автоенкодера «розумного міста» з енкодером та декодером, адаптованими для роботи з високовимірними просторово-часовими даними.

На наступному етапі здійснюється прототипування та початкова розробка, що дає можливість перевірити концептуальний дизайн LFM. Створюються попередні моделі та діаграми для візуалізації структури та симуляції роботи у контрольованих сценаріях. Такі прототипи виступають тестом на здійсненність, надаючи критичні інсайти щодо потенційних викликів і можливостей. Наприклад, вони оцінюють здатність моделі працювати з мультимодальними наборами даних та її початкову ефективність у відтворенні міських потоків. Ітераційні коригування забезпечують формування надійної та адаптивної основи для подальшої розробки.

Абстракція та стандартизація даних є важливими для безперешкодної інтеграції різнорідних наборів у LFM. Рівні абстракції створюються для гармонізації вхідних та вихідних даних, формуючи єдину структуру, що охоплює різні типи міських потоків. Додатково розробляються протоколи та стандарти, які забезпечують сумісність між гетерогенними наборами даних, сприяючи інтероперабельності та узгодженості. Це критично важливо для підтримання стабільності та надійності аналітичних процесів LFM, надаючи моделі можливість ефективно обробляти складні міські дані та підвищувати її прогностичні можливості.

Завершальним етапом проектування є розробка інструментів моделювання та візуалізації, які забезпечують перетворення аналітичних результатів LFM у практичні інсайти. Визначаються їхні функції, призначення та роль у системі. Симуляційні модулі концептуально створюються для тестування сценаріїв, надаючи можливість досліджувати потенційну міську динаміку, наприклад, варіації мобільності чи коливання енергоспоживання. Візуалізаційні інструменти плануються як інтуїтивні та зручні інтерфейси, що надають стейкхолдерам можливість ефективно взаємодіяти з результатами моделі. Вони забезпечують зрозумілість та підтримують процес прийняття рішень завдяки легкій інтерпретації аналітичних даних.

Фаза проектування завершилася створенням комплексного плану для LFM, який узгоджує технічні інновації з цілями концептуального проекту «розумного міста» [2]. Такий структурований підхід формує основу для поточної фази розробки, що розвиває результати проектування та реалізує модель. Враховуючи динамічний характер міських середовищ, проектування було орієнтоване на масштабованість і адаптивність, що дає LFM змогу інтегрувати нові типи даних та розширювати застосування у різних міських контекстах. Ця гнучкість гарантує, що модель залишатиметься актуальною та стійкою у міру еволюції міських викликів і джерел даних.

2.6.2 Формування моделі великого потоку «розумного міста»

Поточна фаза розробки зосереджується на трансформації концептуального дизайну LFM у функціональну та операційну модель. Цей етап забезпечує еволюцію LFM у надійний інструмент для моделювання та аналізу міських потоків шляхом інтеграції результатів фази проєктування з реальними даними та інсайтами, отриманими у межах концептуального проєкту «розумного міста» [2].

Процес реалізується як структурована послідовність (див. рисунок 2.3), що потребує розробки архітектури, інтеграції різнорідних джерел даних, стандартизації форматів, створення модулів симуляції та інструментів візуалізації.



Рисунок 2.3 – Покроковий процес поточної розробки моделі великого потоку [2]

У цій фазі модель поступово набуває здатності працювати з мультимодальними наборами даних, відтворювати просторово-часові залежності та формувати прогностичні інсайти, які є критично важливими для міського планування та прийняття рішень.

Розробка застосовує ітераційне вдосконалення архітектури автоенкодера «розумного міста», що застосовує оптимізацію енкодер-декодерної структури для роботи з високовимірними даними, розширення латентного простору та впровадження спеціалізованих функцій втрат для точнішого моделювання міських процесів. Паралельно розвиваються модулі симуляції, які дають можливість моделювати складні сценарії, наприклад, стратегії зменшення заторів, оптимізацію енергоспоживання чи заходи зі збереження біорізноманіття.

Особлива увага приділяється створенню інтерактивних інструментів візуалізації, що перетворюють результати аналізу та прогнозів LFM у зрозумілі та практично застосовні формати. Це забезпечує можливість для стейкхолдерів інтуїтивно взаємодіяти з результатами моделі, досліджувати сценарії міських потоків та приймати обґрунтовані рішення.

Фаза розробки також орієнтована на масштабованість, що дає змогу інтегрувати дані з інших міст Швейцарії та за її межами, забезпечуючи адаптивність моделі до різних міських контекстів і викликів. Такий підхід гарантує, що LFM залишатиметься актуальною та стійкою у міру еволюції міських середовищ і джерел даних.

Таким чином, поточна фаза розробки є ключовим етапом у перетворенні LFM на комплексний інструмент, який поєднує генеративний ШІ та цифрові двійники, створюючи основу для сталого розвитку «розумних міст» та формування нових підходів до їхнього планування й управління.

Цей етап здійснює побудову та вдосконалення початкових прототипів LFM, керуючись детальним планом, розробленим у фазі проектування. Розробники перевіряють здійсненність та функціональність попередніх версій моделі, поступово вдосконалюючи їх на основі результатів продуктивності та відгуків стейкхолдерів. Основна увага приділяється плануванню масштабованості та гнучкості, що забезпечує модульну архітектуру, оптимізовану роботу з даними та здатність моделі узагальнювати результати для різних міських контекстів. Такі зусилля спрямовані на адаптивність і надійність, що дає LFM можливість ефективно реагувати на нові виклики як у локальних, так і в ширших міських сценаріях.

Важливим аспектом фази розробки є збір та інтеграція різноманітних наборів даних із підпроектів концептуального проекту «розумного міста» [2]. До них належать дані про мобільність, транспорт товарів, енергоспоживання, управління відходами, показники біорізноманіття та використання матеріалів. Ці дані гармонізуються через процеси абстракції та стандартизації, що забезпечує їхню сумісність та узгодженість між форматами, часовими інтервалами та просторовими масштабами. Така інтегрована структура надає LFM можливість

ефективно обробляти та аналізувати мультимодальні міські потоки, формуючи основу для його прогностичних та аналітичних можливостей.

Центральним елементом є реалізація алгоритмів, визначених у фазі проєктування. Розробники забезпечують безперервну взаємодію між алгоритмами та наборами даних, проводять ретельне тестування для перевірки точності, надійності та масштабованості. Алгоритми налаштовуються для оптимізації здатності LFM моделювати та прогнозувати міські потоки за різних умов, забезпечуючи стабільну роботу у динамічних міських сценаріях.

Фаза розробки також охоплює практичну реалізацію та вдосконалення модулів симуляції та інструментів візуалізації. Симуляційні модулі створюються для моделювання складних міських сценаріїв, як от оптимізація транспортних потоків, планування енергорозподілу чи стратегії управління відходами. Вони програмуються та ітераційно вдосконалюються для надання практичних інсайтів, заснованих на реальних даних. Паралельно розробляються інструменти візуалізації, які перетворюють результати LFM у інтерактивні та зрозумілі формати. Це дає стейкхолдерам змогу краще інтерпретувати складну аналітику та приймати рішення на основі доказів. Якщо у фазі проєктування було визначено функціональність та призначення цих інструментів, то у фазі розробки акцент робиться на їхній практичній зручності та відповідності потребам користувачів.

Валідація та верифікація гарантують надійність і точність LFM шляхом тестування його результатів на основі реальних даних концептуального проєкту «розумного міста» [2]. Початкова валідація оцінює здатність моделі формувати реалістичні та практично застосовні інсайти, тоді як верифікація підтверджує узгодженість роботи всіх компонентів. Відгуки стейкхолдерів та результати тестування спрямовують ітераційні вдосконалення, забезпечуючи адаптивність LFM до різних міських контекстів.

Комплексна документація підтримує операційну реалізацію LFM, описуючи процес розробки, алгоритми, методи інтеграції даних та результати валідації. Додатково готуються навчальні матеріали для ознайомлення стейкхолдерів із функціональністю та застосуванням моделі [2]. Це дає

користувачам можливість ефективно використовувати LFM, сприяючи його впровадженню у практику міського планування та дизайну.

Таким чином, поточна фаза розробки розвиває результати фази проєктування, забезпечуючи еволюцію LFM у надійну та масштабовану модель для аналізу міських потоків. Інтеграція різнорідних даних, розробка алгоритмів, створення симуляційних та візуалізаційних інструментів сприяють досягненню цілей концептуального проєкту «розумного міста» [2], спрямованих на формування сталих рішень у міському плануванні та управлінні.

2.7 Висновок до другого розділу

В другому розділі кваліфікаційної роботи подано огляд концептуального проєкту «розумного міста». Описано підпроєкти концепту «розумного міста». Висвітлена трансформація платформи відкритих даних на комплексну систему «розумного міста». Здійснено обґрунтування умов та вибірки концепту «розумного міста». Подано опис процесу проєктування концепту «розумного міста». Виконано проєктування моделі великого потоку «розумного міста».

3 ПРОТОТИПУВАННЯ ІННОВАЦІЙНОГО LFM ЯК ЧАСТИНИ ПРОЄКТУ «РОЗУМНЕ МІСТО»

У цьому розділі описано процес прототипування LFM у межах концептуального проєкту «розумного міста» [2]. Основна увага приділяється проєктуванню, поточній розробці та практичному застосуванню моделі для моделювання й оптимізації міських потоків з метою вирішення критичних викликів урбанізації. Описується завершення фази проєктування, що забезпечило міцну концептуальну основу, а також окреслюються поточні зусилля у фазі розробки.

LFM формується як комплексна структура, що інтегрує дані про міські потоки, фізичні структури та сучасні технології. Ці зусилля спрямовані на створення функціонального та масштабованого інструменту для моделювання міських потоків, перший прототип якого заплановано до випуску у 2026 році. Окремо підкреслюється, що модель тестується та вдосконалюється на основі реальних даних із підпроектів «розумного міста», демонструючи свій потенціал у підвищенні ефективності сталого міського планування та прийняття рішень, що ґрунтуються на доказах.

LFM перебуває на передовій інновацій у сфері міського планування та дизайну, використовуючи потужність FMs та генеративного ШІ для трансформації підходів до концептуалізації та управління міськими середовищами. Модель поєднує методи генеративного ШІ та FM із просторовими даними для формування нових інсайтів і прогнозів щодо фізичних просторів та структурних потоків [2]. Її мета полягає у навчанні значущих репрезентацій існуючих даних про міські потоки з різних локацій для генерації нових даних потоків для конкретних територій (див. рисунок 3.1).

Таким чином, LFM виступає ключовим інструментом для створення цифрових двійників «розумних міст», який здатний інтегрувати різноманітні дані, моделювати складні сценарії та забезпечувати аналітичне опрацювання для сталого розвитку «розумних міст».

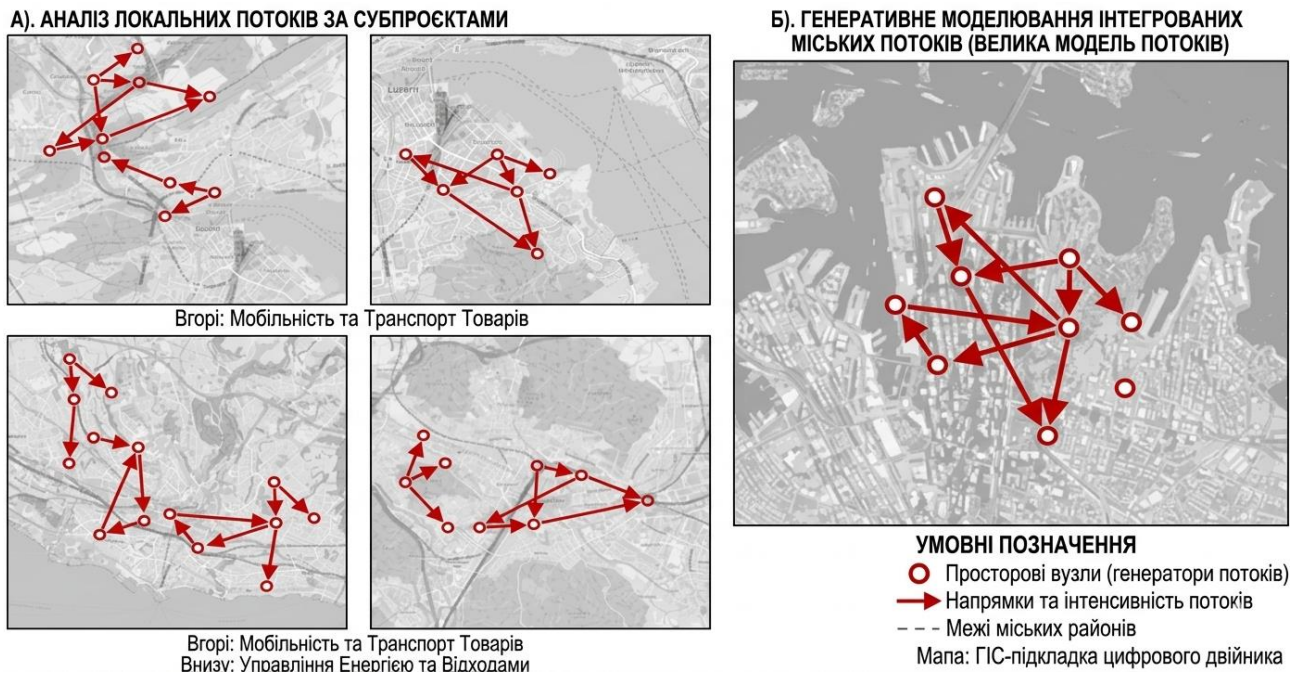


Рисунок 3.1 – Метамоделі великого потоку [2]

У межах загальної мети LFM переслідує декілька конкретних завдань. По-перше, він спрямований на доповнення неповних та упереджених міських даних. Проблема фрагментарності та упередженості інформації про міста є постійною, і LFM може допомогти заповнити ці прогалини, забезпечуючи комплексні та неупереджені дані про міські системи.

По-друге, модель орієнтована на оцінку даних потоків для нових локацій [2]. Розуміння та прогнозування переміщення людей, транспортних засобів і ресурсів є критично важливим для міського планування, логістики та управління надзвичайними ситуаціями. LFM здатна формувати точніші оцінки потоків навіть у тих місцях, де відсутні історичні дані.

По-третє, модель має потенціал прогнозувати еволюцію даних потоків у часі. Оскільки міста та простори постійно змінюються, динаміка потоків також трансформується. LFM може передбачати, як ці потоки розвиватимуться, підтримуючи прийняття рішень та проактивне планування.

По-четверте, модель забезпечує цілісне розуміння міських процесів. Традиційні методи аналізу міських даних часто зосереджуються на окремих аспектах міського життя, що призводить до фрагментарного бачення динаміки міста та взаємодії його компонентів. LFM поєднує різномірні набори даних та

аналітичні методи, формуючи комплексне уявлення про міську динаміку та її взаємозв'язки [2]. Це дає змогу планувальникам враховувати ширший контекст та наслідки своїх рішень (див. рисунок 3.2).

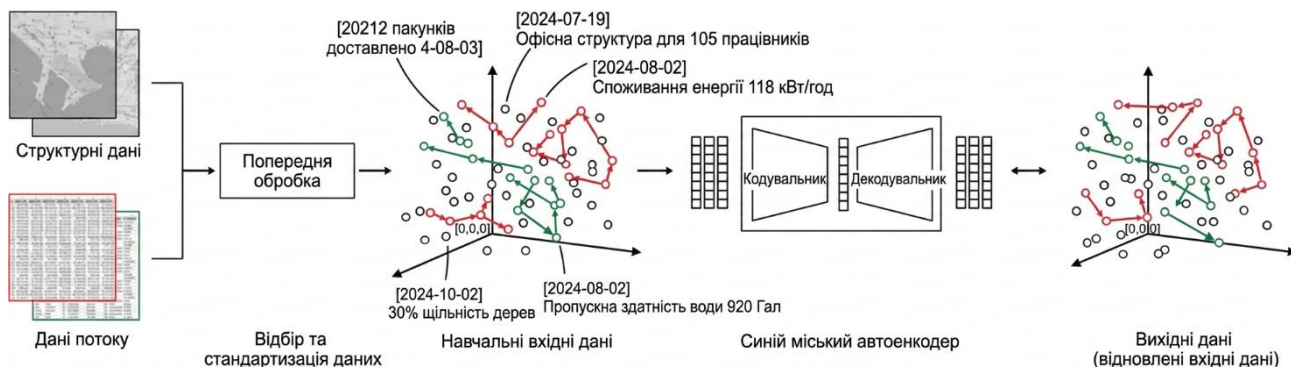


Рисунок 3.2 – Попереднє навчання моделі великого потоку [2]

Таким чином, завдяки інтеграції генеративного ШІ та цифрових двійників «розумних міст», LFM стає інструментом, здатним не лише моделювати поточні міські процеси, але й прогнозувати їхню трансформацію, забезпечуючи основу для сталого розвитку «розумних міст».

3.1 Прототипування моделі великого потоку «розумного» міста

Побудова LFM у межах концептуального проекту «розумного міста» [2] використовує декілька етапів. Спершу здійснюється збір структурних і динамічних даних міських потоків, їх відбір та стандартизація. Підготовлені дані доповнюються вхідними ембедингами та позиційним кодуванням, після чого використовуються для попереднього навчання базової моделі, здатної розпізнавати складні просторово-часові закономірності за допомогою автоенкодера «розумного міста».

Далі LFM проходить точне налаштування із застосуванням методів контрольованого та самоконтрольованого навчання. Це дає можливість оптимізувати модель для конкретних прикладних завдань, забезпечуючи її адаптивність і високу точність у прогнозуванні та моделюванні міських потоків.

Таким чином, процес навчання LFM (див. рисунок 3.3) поєднує попереднє моделювання та подальшу оптимізацію, створюючи основу для інтеграції генеративного ШІ у цифрові двійники та формування інноваційних рішень для «розумних міст».

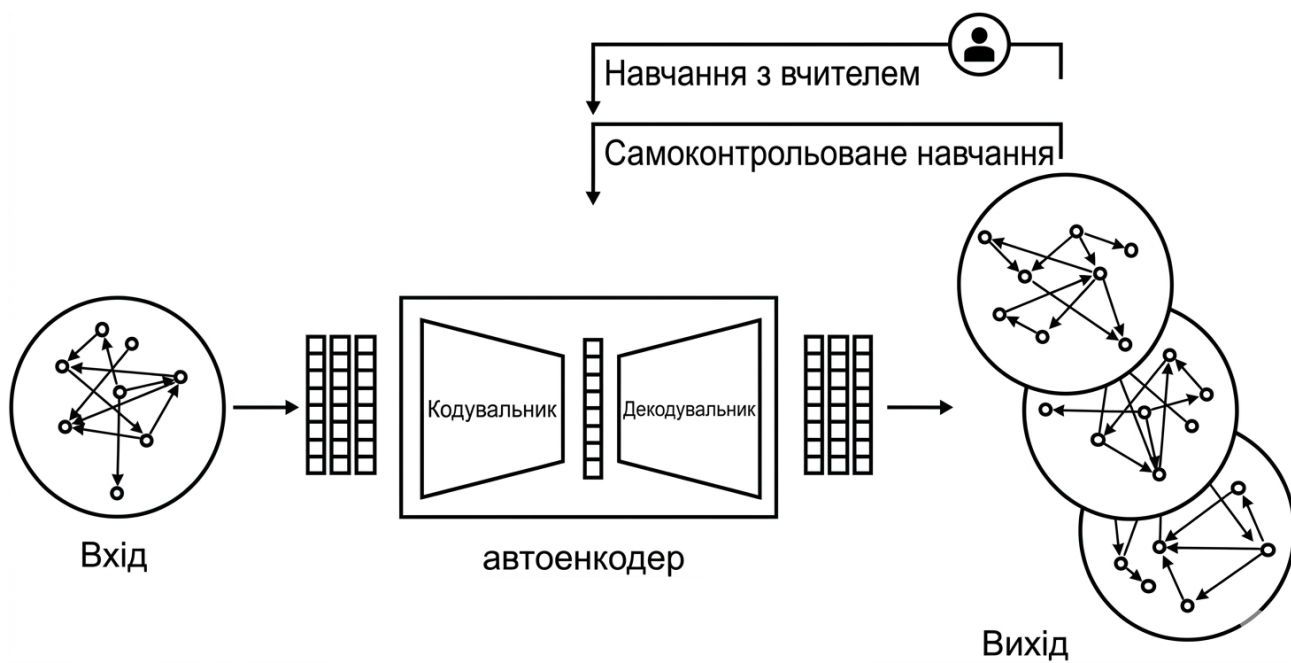


Рисунок 3.3 – Точне налаштування моделі великого потоку [2]

Навчання з учителем застосовує процес тренування моделі на позначених даних, де вона навчається зіставляти вхідні ознаки з цільовими виходами, що надає можливість здійснювати прогнозування на основі нових вхідних даних. Компонент навчання з учителем у LFM отримує додаткову користь від участі експертів «розумного міста», які спеціалізуються на різних міських потоках. Ці фахівці забезпечують супервізію шляхом валідації та анотування наборів даних, що гарантує узгодженість моделі з реальними шаблонами та викликами [2].

З іншого боку, навчання без учителя використовує непозначені дані для створення допоміжних завдань, що дає моделі можливість вивчати корисні репрезентації та закономірності без необхідності у масштабній ручній анотації. Такий підхід застосовує попередні завдання для формування псевдо-міток із даних, що дає змогу моделі навчатися базовим структурам і залежностям. Наприклад, LFM може прогнозувати відсутні сегменти у часових рядах транспортних даних або реконструювати розподіл енергетичних потоків із

неповних записів, використовуючи контрастивне навчання чи масковані автоенкодері. Навчання без учителя підсилює здатність моделі узагальнювати результати на різних наборах даних і в різних міських контекстах, зосереджуючись на завданнях прогнозування у часі чи просторової інтерполяції.

Загалом подвійний підхід забезпечує адаптивність та еволюцію LFM відповідно до унікальних вимог різних завдань міського планування та дизайну, гарантуючи її універсальність та ефективність у різних сферах застосування.

LFM застосовує техніку тонкого налаштування для генерації результатів на основі конкретних вхідних даних («стимулів») (див. рисунок 3.4). Модель використовує набуті знання та шаблони, отримані під час етапу тонкого налаштування, щоб відповідати новим і унікальним результатом, формуючи контент, який враховує специфіку міських потоків та їхню динаміку [2].

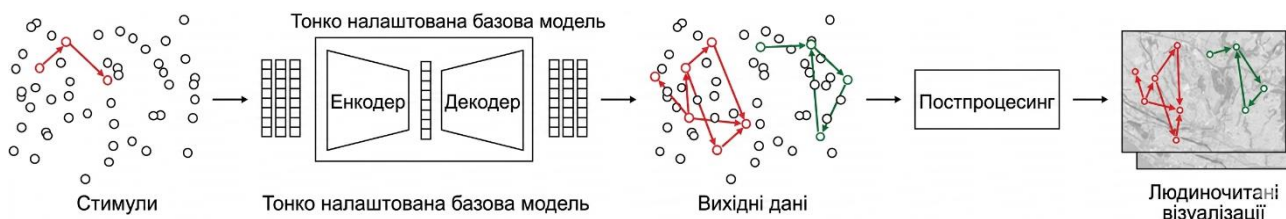


Рисунок 3.4 – Нижній рівень застосування, ініційований стимулами [2]

Таким чином, поєднання генеративного ШІ та цифрових двійників у межах LFM створює інноваційний інструмент, здатний інтегрувати різномірні дані, навчатися як на позначених, так і на непозначених наборах, та формувати прогностичні інсайти для сталого розвитку «розумних міст».

За допомогою методів постобробки та візуалізації результати роботи моделі перетворюються у зрозумілий для людини формат. Запровадження FMs для міських потоків у контексті генеративного ШІ означає суттєвий зсув у підходах до міського моделювання. Завдяки здатності формувати точніше, комплексне та своєчасне уявлення про міську динаміку, LFM забезпечує цілісне бачення міських екосистем, перевершуючи можливості традиційних методів збору даних [2]. Це дає стейкхолдерам можливість створювати повну та багатовимірну картину міського середовища, охоплюючи аспекти, які раніше залишалися непоміченими або недоступними. Такий підхід враховує взаємодію

між різними міськими потоками та їхній сукупний вплив, формуючи цілісне розуміння функціонування міст.

LFM тісно узгоджується з цілями ініціатив цифрових двійників «розумних міст», які надають міським планувальникам та дизайнерам нові інсайти щодо впливу різних інтервенцій та стратегій. Інтеграція LFM у структури UDT може посилити прийняття рішень на основі даних, сприяючи формуванню стійкіших та ефективніших шляхів розвитку міських середовищ. LFM має значний потенціал для планування інфраструктури, реалізації політик та врахування соціальних тенденцій, оскільки забезпечує детальні інсайти про закономірності міських потоків та їхню просторово-часову динаміку [2]. У процесі розвитку сталих «розумних міст» інтеграція LFM у UDT здатна трансформувати підходи до планування, розвитку та управління міськими системами майбутнього.

Останнім часом дослідження почали активно вивчати інтеграцію FM у застосування UDT, підкреслюючи їхній потенціал у посиленні прогнозної аналітики, адаптивного навчання та управління складними наборами даних. Така інтеграція демонструє здатність підвищувати точність і надійність прийняття рішень у системах UDT завдяки використанню сучасних можливостей навчання. У межах цього практичного підходу дослідження показує переваги інтеграції, зокрема можливість приймати обґрунтованіші та своєчасніші рішення завдяки комплексній мультимодальній аналітиці та прогнозним інсайтам. Це позиціонує конвергенцію FM та UDT як трансформаційний крок у застосуванні ШІ для міського планування та дизайну, відкриваючи нові горизонти для розвитку стійких і збалансованих міських середовищ.

3.2 Основні елементи моделі великого потоку «розумного міста»

У цьому параграфі розглянуто базові компоненти LFM, які визначають його здатність обробляти різноманітні міські набори даних та інтегрувати сучасні методи моделювання. Концептуальний дизайн моделі ґрунтується на ключових поняттях – структурах, потоках та залежностях, що формують основу її роботи.

LFM поєднує ці елементи у єдину систему, здатну відтворювати складну динаміку міських процесів. Це забезпечує інтеграцію даних із різних джерел та створює платформу для прогнозування й оптимізації міських потоків у межах цифрових двійників «розумних міст».

Таким чином, модель формує концептуальну основу для використання генеративного ШІ у створенні цифрових двійників «розумних міст», забезпечуючи цілісне розуміння міських екосистем та їхніх взаємозв'язків (див. рисунок 3.5) [2].

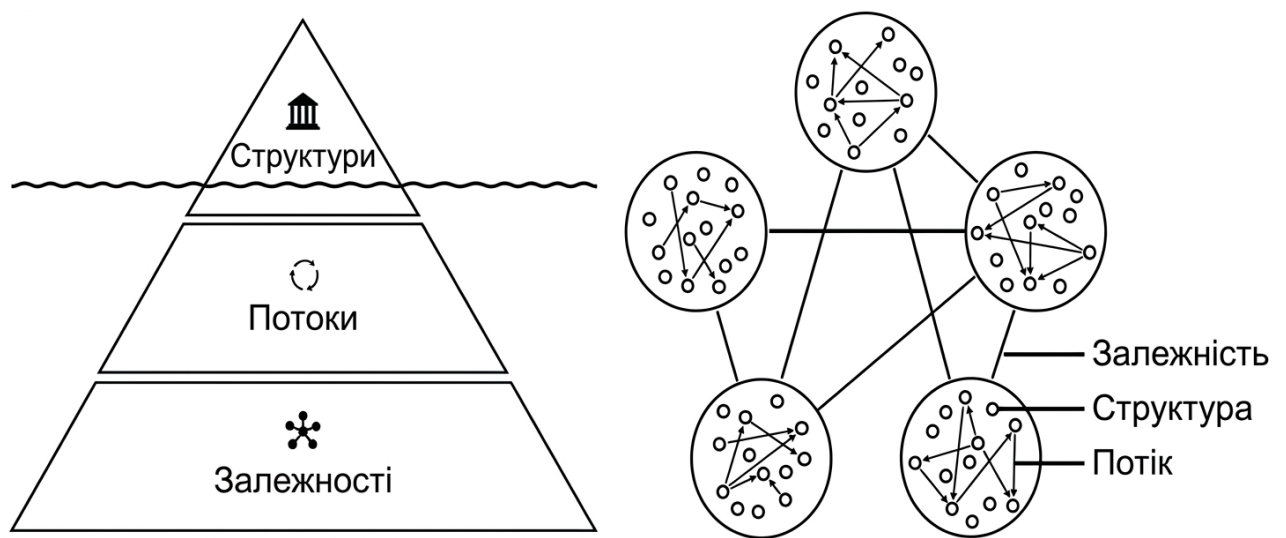


Рисунок 3.5 – Структури, потоки та залежності як основна термінологія [2]

Структури відображають фізичні та видимі об'єкти міського середовища. Потоки описують рух людей, товарів, енергії, відходів, матеріалів та інформації між цими структурами, відображаючи динамічний характер міських систем. Залежності підкреслюють взаємодії та впливи між структурами й потоками, демонструючи каскадні ефекти, які вони можуть спричиняти один для одного. Така термінологія лежить в основі здатності LFM ефективно моделювати складні міські системи та прогнозувати взаємопов'язані міські динаміки [2].

LFM побудована на основі збору та агрегації даних, їхньої абстракції та стандартизації, а також використання архітектури автоенкодера «розумного міста» для навчання моделей глибокого навчання.

Першим кроком у процесі LFM є збір та агрегація різноманітних типів даних, що відображають різні аспекти міського життя. Ці дані формують основу

для подальшого аналізу та моделювання. У проєкті використовуються різні джерела даних для інформування та тренування LFM. Прикладами є дані про потоки відходів від муніципальних служб управління відходами, дані про енергетичні потоки від регіональних енергопостачальників, транспортні дані від національних дорожніх служб та відкритих картографічних платформ, а також дані про матеріальні потоки з баз даних будівництва та переробки, які адмініструють міські планувальні органи. Ці джерела забезпечують контекстно-специфічні дані для моделювання міської динаміки. Набори даних, зібрані з підпроєктів «розумного міста», слугують фундаментом для поточних зусиль із розробки. Вони класифікуються на три основні типи: дані потоків, структурні дані та дескриптори потоків, які інтегруються та обробляються для перевірки здатності LFM моделювати складні міські процеси, забезпечуючи реальний зворотний зв'язок для ітераційного вдосконалення.

Дані потоків є життєво важливими компонентами міського життя та ключовими для розуміння динамічних аспектів міського середовища. У концептуальному проєкті «розумного міста» [2] ці дані збираються за допомогою сучасних інструментів і систем у співпраці з промисловими партнерами. Це інтегрує:

- потоки людей, які відстежуються через IoT-пристрої [53], сигнали мобільних телефонів, системи громадського транспорту та лічильники пішоходів, що допомагає зрозуміти мобільність, щільність населення та динаміку переміщень;

- потоки транспортних засобів, які фіксуються камерами, дорожніми сенсорами та GPS-даними, що дає можливість аналізувати затори та транспортні мережі;

- потоки товарів, які відстежуються через GPS-системи вантажного транспорту та логістичні платформи, забезпечуючи інсайти щодо маршрутів доставки та мереж постачання;

- потоки енергії, які збираються зі «смарт»-лічильників та систем моніторингу комунальних послуг, що є ключовими для управління енергетичною інфраструктурою;

– потоки відходів, які відстежуються через системи управління відходами та сенсори на транспортних засобах, що забезпечує ефективність збору та переробки;

– потоки біорізноманіття та природи, які використовують дані про присутність і рух дикої природи, а також розподіл зелених зон, що допомагає зрозуміти взаємодію між урбанізацією та екосистемами;

– потоки матеріалів, які охоплюють рух будівельних матеріалів та потенціал міського «видобутку» для циркулярних практик у будівництві, сприяючи повторному використанню та переробці.

Структурні дані стосуються фізичної інфраструктури міста та забезпечують статичну основу, на якій взаємодіють динамічні потоки. Вони застосовують детальну інформацію про дорожні мережі, будівлі та землекористування, громадські простори, інфраструктуру комунальних послуг та топографічні особливості [2]. Такі дані отримуються з картографічних сервісів, супутникових знімків, міських департаментів планування та геоінформаційних систем.

Дескриптори потоків є метаданими, що збагачують дані потоків та структурні дані, забезпечуючи додатковий контекст і допомагаючи класифікувати та інтерпретувати різні типи потоків. Вони інтегрують:

– часову інформацію – мітки часу для визначення шаблонів;

– просторові дескриптори – географічні координати та опис територій;

– категоріальні теги – наприклад, розмежування між житловим і комерційним транспортом чи між відновлюваними та невідновлюваними джерелами енергії;

– якісні дескриптори – наприклад, рівень заторів чи дружність міського дизайну до пішоходів.

Після збору та агрегації різноманітних даних наступним кроком є їхня підготовка для попереднього навчання LFM. Цей етап використовує процеси абстракції та стандартизації, які забезпечують сумісність даних з аналітичними інструментами та створюють умови для ефективного аналізу.

Таким чином, інтеграція потокових, структурних даних та дескрипторів у межах LFM формує основу для створення цифрових двійників «розумних міст», що поєднує генеративний ШІ із комплексним аналізом міських систем, забезпечуючи точність прогнозів та підтримку прийняття рішень у сталому розвитку «розумних міст» (див. рисунок 3.6) [2].



Рисунок 3.6 – Вибір даних, абстракція та стандартизація [2]

Процеси абстракції та стандартизації даних ґрунтуються на етапах інтеграції, де різноманітні набори даних із підпроектів «розумного міста» гармонізуються у єдиний формат. Ці постійні зусилля дають LFM змогу працювати з мультимодальними даними та формувати значущі прогнози.

Абстракція даних потребує перетворення складних і гетерогенних даних у уніфікований формат, придатний для аналізу. З огляду на різноманітність джерел міських даних, цей крок є критично важливим для гармонізації різних типів інформації у цілісний набір [2]. Форматна гармонізація потребує перетворення текстових, числових та часових даних у стандартизовану форму, що забезпечує їхню сумісність для комплексного аналізу. Інтеграція даних з різних систем створює єдиний набір, який можна використовувати для моделювання. Агрегація та дезагрегація дають можливість узагальнювати дані на вищому рівні або

деталізувати їх до локальних показників, наприклад, агрегувати транспортні дані у годинні тренди чи деталізувати регіональні дані до рівня окремих районів. Важливим є також виявлення та обробка аномалій і викидів, які можуть спотворювати результати аналізу. Для цього застосовуються методи фільтрації або статистичні корекції.

Стандартизація даних готує їх до ефективного навчання LFM. Одним із перших кроків є нормалізація та масштабування значень, щоб уникнути домінування ознак із більшими діапазонами. Використовуються методи *min-max scaling* або *z-score normalization*. Вирішення проблеми пропусків у даних є ще одним критичним аспектом: застосовується імпутація, індикатори пропусків або видобування неповних записів [2]. Категоріальні змінні, як от назви міст чи типи доріг, кодуються числовими методами – «one-hot encoding» або «label encoding». Інженерія ознак надає можливість створювати нові характеристики чи модифікувати існуючі для кращого виявлення закономірностей, наприклад, комбінування ознак, створення співвідношень чи статистичних узагальнень. Завдяки трансформації та стандартизації дані міського середовища перетворюються у машинно-оброблюваний, узгоджений та аналітично цінний набір.

Конвеєр попередньої обробки даних у LFM [2] розроблений для роботи з різноманітними та складними характеристиками міських потоків, забезпечуючи їхню сумісність для навчання та інтеграції у архітектуру автоенкодера «розумного міста». Він використовує послідовність структурованих кроків, які перетворюють сирі дані у стандартизовані формати, забезпечуючи безперервну інтеграцію та аналіз у межах моделі.

Різнорідні набори даних, включно з транспортними показниками, енергоспоживанням та утворенням відходів, проходять системні трансформації, як от нормалізація числових потоків, наприклад, *min-max scaling*, та кодування категоріальних змінних – типи відходів, категорії транспортних засобів. Ці кроки зменшують варіативність даних, забезпечуючи ефективність процесів навчання моделі. У поєднанні з методами просторово-часового узгодження вони дають

можливість інтегрувати дані з різних підпроектів у LFM, підтримуючи точний аналіз та прогнози.

Для просторово-часової стандартизації часові дані узгоджуються у послідовності з фіксованими погодинними чи денними інтервалами, тоді як просторові дані відображаються на єдину сітку за допомогою GIS-інструментів. Наприклад, транспортні дані з сенсорів агрегуються у годинні показники та відображаються на просторову сітку «100x100», тоді як дані про відходи кодуються як обсяги на зону, узгоджені з тією ж структурою сітки [2].

Стандартизовані формати даних у LFM містять подання транспортних потоків («timestamp», «grid_id», «vehicle_count»), даних про енергоспоживання («timestamp», «grid_id», «energy_consumed_kWh») та даних про утворення відходів («timestamp», «zone_id», «waste_volume_m3», «waste_type») [2]. Такі формати узгоджуються з вимогами позиційного та часово-просторового кодування LFM, забезпечуючи точний аналіз і прогнозування.

Попередня обробка є невід'ємним компонентом архітектури LFM, що реалізується як модульний конвеєр, який гармонізує сирі дані з різних джерел. Дослідники, що працюють із LFM, можуть використовувати API-ендпоїнти або скрипти, які визначають вимоги до вхідних даних – формат, роздільність, кодування, та конфігурації попередньої обробки. Наприклад, транспортні дані можуть бути подані як «timestamp», «grid_id», «vehicle_count» та попередньо оброблені для прямого завантаження у LFM. Такий структурований конвеєр забезпечує сумісність і узгодженість даних, підвищує їхню аналітичну цінність та формує основу для надійного моделювання міських потоків.

Таким чином, завдяки процесам абстракції, стандартизації та попередньої обробки даних LFM інтегрує різноманітні джерела інформації у єдину систему, що поєднує генеративний ШІ та цифрові двійники, створюючи потужний інструмент для аналізу, прогнозування та управління міськими системами у контексті сталого розвитку «розумних міст».

3.3 Автоенкодер «розумного міста»

Навчання LFM потребує використання спеціалізованого автоенкодера «розумного міста», архітектури глибинного навчання, розробленої для моделювання міських потоків. Як модель генеративного ШІ, автоенкодер «розумного міста» застосовує генеративні техніки для вивчення складних шаблонів міських потоків, створення значущих репрезентацій та симуляції нових сценаріїв [2]. Це дає LFM можливість прогнозувати та аналізувати міську динаміку, роблячи автоенкодер «розумного міста» критично важливим компонентом загальної архітектури. Поточна структура автоенкодера «розумного міста» відображає ітераційний процес прототипування, де попередні проєкти тестуються та вдосконалюються для ефективної роботи зі структурованими та неструктурованими даними міських потоків. Зворотний зв'язок із цих тестів спрямовує подальші вдосконалення енкодер-декодерної архітектури.

Автоенкодер «розумного міста» [2] адаптовано для навчання на двох форматах даних, подібно до автоенкодерів, що застосовуються у NLP та розпізнаванні зображень. Проте вона спеціально налаштована для просторових особливостей, складності та нюансів міських потоків. Архітектура складається з двох основних компонентів: енкодера та декодера. Енкодер стискає вхідні дані у низьковимірну репрезентацію, зберігаючи ключові ознаки та шаблони. Декодер реконструює дані з цієї репрезентації, даючи моделі змогу навчатися стійким та значущим відображенням міських даних.

Енкодер планується як комбінація багатосарової CNN для структурованих даних, наприклад, дорожні мережі чи інфраструктурні дані з «OpenStreetMap», та двонаправленого трансформера для неструктурованих даних, наприклад, часові чи семантичні потоки енергії, відходів, людей, транспортних засобів [2]. У дизайн інтегрується позиційне кодування для збереження просторового контексту, що є критично важливим для виявлення просторових шаблонів та часових залежностей.

Декодер віддзеркалює енкодер, використовуючи механізм уваги для пріоритизації значущих ознак, отриманих під час кодування [2]. Наприклад, часовий пік транспортного потоку на ключовому перехресті може бути ознакою заторів, що є важливим для прогнозування майбутніх транспортних сценаріїв або оцінки ефективності інтервенцій, як от альтернативні маршрути чи запровадження зон із низьким трафіком. Декодер ітеративно відтворює просторово-часові репрезентації, забезпечуючи точність відносно вхідних даних та адаптивність для екстрапольованих сценаріїв.

Архітектура потребує використання спеціальних «embedding»-шарів для інтеграції метаданих, як от географічні координати та часові мітки. Це підсилює здатність моделі узагальнювати результати у різних міських контекстах. Наприклад, сегмент потоку може містити широту й довготу транспортного сенсора, що надає можливість моделі просторово контекстуалізувати дані. Часові мітки дають змогу враховувати добові чи сезонні шаблони, як-от підвищене енергоспоживання взимку.

Планується маркування даних потоків категоріями, наприклад, «тип відходів: пластик» чи «тип транспортного засобу: автобус», що дасть моделі можливість розрізняти різні типи потоків та пріоритизувати релевантні ознаки [2]. Латентний простір моделі буде налаштований для високовимірних просторових і часових характеристик, із можливим використанням спеціалізованих функцій втрат для узгодження з наборами даних міських потоків.

Наприклад, для даних транспортних потоків може застосовуватися зважена функція втрат, яка мінімізує помилки у високонавантажених зонах – перехрестя, магістралі, допускаючи більшу похибку у малонавантажених районах. Для потоків біорізноманіття може використовуватися функція втрат просторової безперервності, щоб реконструйовані дані зберігали екологічну зв'язаність зелених коридорів.

Ця концептуальна архітектура відображає прагнення LFM ефективно працювати з різними типами даних та прогнозувати міську динаміку. Водночас конкретні конфігурації мережі та параметри будуть ітеративно

вдосконалюватися у процесі впровадження та експериментів із різними типами міських даних і сценаріїв. Такий підхід забезпечує оптимальну адаптацію архітектури до вимог і викликів моделювання міських потоків.

Подібно до того, як ChatGPT прогнозує або генерує нові послідовності слів на основі запитів, автоенкодер «розумного міста» навчається на абстрагованих міських даних так само, як автоенкодери працюють із текстовими документами чи зображеннями. Архітектура автоенкодера «розумного міста» застосовує специфічне «embedding»-кодування та позиційне кодування для міських потоків (див. рисунок 3.7), що забезпечує точне відображення просторово-часових залежностей та підвищує здатність моделі до генеративного прогнозування у контексті цифрових двійників «розумних міст» [2].

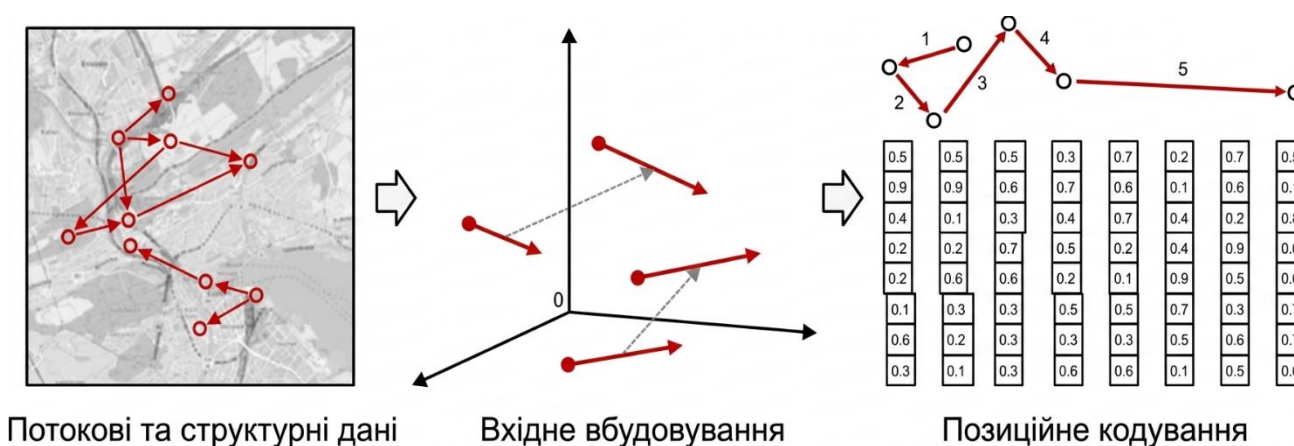


Рисунок 3.7 – Деталі процесу кодування [2]

Вбудовування вхідних даних та позиційне кодування дають LFM можливість екстраполювати відомі дані та враховувати просторові й часові виміри, що є критично важливими для точних прогнозів. Наприклад, тренування на типовому транспортному потоці у години пік чи на розподілі руху пішоходів у вихідні дає змогу LFM передбачати зміни цих шаблонів у відповідь на нові інфраструктурні проєкти, впровадження політик чи соціальні тенденції.

Вбудовування вхідних даних трансформує інформацію про міські потоки у формат, який моделі глибокого навчання можуть ефективно обробляти та аналізувати [2]. Перетворення кожного елемента міських потоків – фрагмента потоку у числові репрезентації, відомі як векторні «embeddings», дає архітектурі

автоенкодера «розумного міста» змогу працювати зі складними міськими явищами у структурованій та придатній для аналізу формі. Наприклад, відстань певного фрагмента потоку до умовного центру міста може бути закодована як частина його векторного «embedding». У поєднанні з іншими характеристиками, зокрема, структурними даними чи даними потоків, ця просторова інформація створює багатовимірне подання міських процесів. Такі «embeddings» дають LFM можливість виявляти значущість просторових взаємозв'язків та залежностей між потоками [2].

Позиційне кодування здійснює інтеграцію просторової та часової інформації у дані, що дає змогу LFM розуміти послідовність і контекст міських потоків. Завдяки цьому архітектура автоенкодера «розумного міста» може точно відтворювати унікальні позиційні характеристики конкретних міських процесів, як от рух людей, транспортних засобів чи товарів у різних локаціях. Такі контекстуалізовані дані надають моделі можливість розпізнавати шаблони та залежності у вже існуючих послідовностях потоків. Використовуючи це комплексне розуміння, LFM здатна прогнозувати майбутні послідовності міських потоків із дедалі більшою точністю.

У процесі навчання основним завданням автоенкодера «розумного міста» є видобування значущих ознак, залежностей та шаблонів із даних міських потоків [2]. Цей процес є ключовим для ефективного подання та розуміння складних взаємодій і динаміки міських систем. Архітектура навчається розпізнавати повторювані шаблони та взаємозв'язки, наприклад, тенденції транспортних заторів, закономірності руху пішоходів чи цикли енергоспоживання. Вона також здатна виявляти аномалії та нетипові події, що є важливим для вчасного виявлення проблем чи можливостей для втручання у міське управління.

Зменшення розмірності даних до найбільш інформативних ознак полегшує ефективний та точний аналіз, що є ключовим для роботи з великими наборами міських даних. Крім того, архітектура розвиває здатність узагальнювати вивчені шаблони на нові, ще невідомі дані. Така здатність до узагальнення є критичною

для прогнозування майбутньої міської динаміки на основі минулих і поточних даних.

Узагальнення означає здатність LFM ефективно працювати з новими, невідомими даними, які не входили до навчального набору, але відображають нові контексти чи стимули [2]. Це забезпечує універсальність моделі та її здатність адаптуватися до змінних умов міського середовища, що є фундаментом для створення цифрових двійників у поєднанні з генеративним ШІ, здатного підтримувати сталий розвиток «розумних міст» (див. рисунок 3.8).

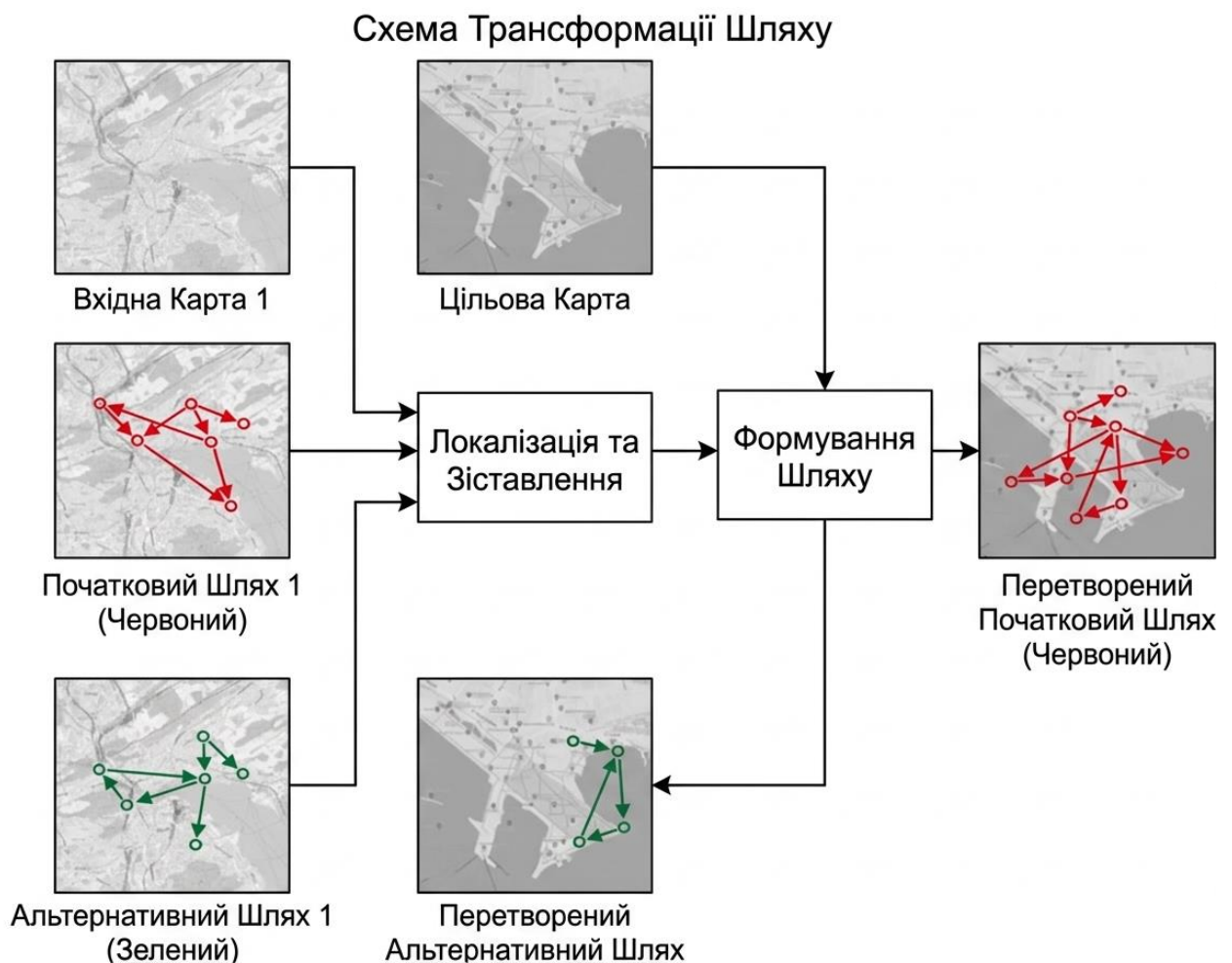


Рисунок 3.8 – Узагальнюючі ознаки моделі великого потоку [2]

Ця здатність є фундаментальною для точності та надійності прогнозів LFM, особливо коли йдеться про передбачення майбутньої міської динаміки на основі минулих і поточних даних. У контексті генеративного ШІ значення здатності LFM до узагальнення є особливо важливим через динамічний і постійно мінливий характер міських середовищ. Міста є складними системами,

де умови можуть швидко змінюватися під впливом економічних зрушень, політичних рішень, розвитку інфраструктури чи соціальних тенденцій.

Здатність LFM до узагальнення гарантує її адаптацію до нових сценаріїв і змін у місті, які не були явно відображені у навчальних даних. Наприклад, модель може прогнозувати транспортні шаблони у відповідь на нову транспортну політику або оцінювати вплив комерційного розвитку на рух пішоходів. Узагальнення також дає LFM можливість формувати прогностичні інсайти щодо майбутньої міської динаміки [2]. Модель здатна передбачати, як ці процеси можуть еволюціонувати під впливом різних стимулів чи змін, розуміючи фундаментальні закономірності та взаємозв'язки, що визначають міські потоки.

Міські дані характеризуються високою варіативністю та складністю. Здатність LFM до узагальнення дає їй можливість ефективно працювати з цією варіативністю, забезпечуючи актуальність і стійкість прогнозів навіть за умов значних коливань у даних.

Розвиток і підтримка сильної здатності до узагальнення в LFM застосовує декілька ключових аспектів. По-перше, навчальний набір даних має бути максимально різноманітним і репрезентативним, охоплюючи різні міські умови, сценарії та типи даних. Така різноманітність допомагає моделі вивчати універсальні шаблони, що застосовуються у різних ситуаціях. По-друге, впровадження регуляризаційних технік під час навчання запобігає перенавчанню моделі на тренувальних даних. Використання методів на кшталт варіаційного «dropout», «weight decay» чи «early stopping», забезпечує засвоєння загальних закономірностей, а не запам'ятовування окремих точок даних [2]. По-третє, застосування методів крос-валідації під час навчання та оцінки моделі допомагає визначити її здатність до узагальнення. Тренування та тестування на різних підмножинах даних дає змогу оцінити ефективність роботи моделі з новими даними. Нарешті, безперервне навчання та оновлення є необхідними для адаптації до динамічного характеру міських середовищ. Регулярне оновлення моделі новими даними та повторне навчання допомагає підтримувати й удосконалювати її здатність до узагальнення з часом.

У підсумку, LFM використовує можливості генеративного ШІ та сучасні архітектури глибинного навчання для створення просторово точних репрезентацій міського середовища, що планувальникам і політикам можливість моделювати та аналізувати різні сценарії розвитку сталих «розумних міст» [2]. Завдяки адаптивному навчанню, прогностичним можливостям та аналітичному опрацюванню на основі даних LFM має значний потенціал для підтримки прийняття рішень на основі доказів і формування міст майбутнього.

3.4 Перспективи розвитку та потенціал концептуального проєкту «розумне місто»

Фаза розробки LFM, яка триває зараз, ґрунтується на завершеній фазі проєктування та зосереджується на побудові й вдосконаленні моделі. Основні досягнення застосовують початкову інтеграцію та стандартизацію різномірних наборів даних із підпроєктів концептуального проєкту «розумного міста» [2], а також ітераційне прототипування архітектури автоенкодера «розумного міста». Ці кроки спрямовані на створення надійної та масштабованої моделі, здатної точно відтворювати й прогнозувати міські потоки, враховуючи складність мультимодальних даних.

Набори даних, що використовуються на цьому етапі, охоплюють широкий спектр міських потоків. Їхня інтеграція та гармонізація тривають, забезпечуючи узгодженість між різними форматами, часовими інтервалами та просторовими контекстами. Це дає LFM можливість формувати значущі репрезентації міських систем, відображаючи просторово-часові залежності, які є критично важливими для планування та прийняття рішень. Подальша робота [2] буде спрямована на вдосконалення моделі, зокрема, удосконалення архітектури автоенкодера «розумного міста» для ефективнішої роботи з високовимірними даними, потребуючи використання спеціалізованих функцій втрат та розширення латентного простору для точнішого відображення міської динаміки;

– розвиток модулів симуляції для моделювання складних міських сценаріїв, як от стратегії зменшення заторів, оптимізація енергоспоживання чи

заходи зі збереження біорізноманіття, що забезпечить практичні інсайти для управлінців;

- створення інтерактивних інструментів візуалізації, які перетворюватимуть прогнози та симуляції моделі у зрозумілі формати, даючи стейкхолдерам можливість інтуїтивно досліджувати сценарії міських потоків;

- підвищення масштабованості LFM для інтеграції даних з інших міст Швейцарії та за її межами, що забезпечить ширшу застосовність і адаптивність до різних міських контекстів та викликів.

LFM, розглянута у дослідженні [2], створена як базова архітектура для моделювання міських потоків, навчена та протестована на різноманітних наборах даних концептуального проєкту «розумного міста». Хоча нинішній обсяг моделі локалізований, її орієнтація на масштабованість відкриває потенціал для застосування в інших містах Швейцарії, Європи та Азії. Ітеративний характер розробки та модульна архітектура позиціонують LFM як основу для еволюції у комплексну FMs. Ця трансформація буде досягнута завдяки подальшому навчанню на різноманітних наборах даних, інтеграції нових джерел, як от IoT-сенсори [54], екологічні та соціально-економічні дані, та впровадженню методів безперервного навчання, що підтримуватимуть адаптивність і актуальність моделі.

Зрештою, ці характеристики підкреслюють потенціал LFM у вирішенні критичних міських викликів у масштабі. Модель надаватиме планувальникам, управлінцям та дослідникам інструменти для високоточного аналізу проблем швидкої урбанізації, кліматичної стійкості та оптимізації ресурсів. Завдяки аналітичному опрацюванню на основі даних та прогнозним можливостям LFM сприятиме прийняттю рішень, що ґрунтуються на доказах. У міру просування фази розробки до випуску першого прототипу у 2026 році LFM продовжує формувати шлях до сталіших, ефективніших та стійкіших міських середовищ у відповідності до загальної мети концептуального проєкту «розумного міста» [2].

3.5 Аналіз результатів прототипування проєкту «розумне місто» в концептуальну модель

Результати фрпсуївання концептуального проєкту «розумного міста» [2] були узагальнені у концептуальну модель, яка відображає ключові компоненти моделювання та симуляції міських потоків у межах LFM (див. рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 – Концептуальна модель процесу дослідження проєкту «розумного міста» [2]

Модель побудована навколо п'яти взаємопов'язаних рівнів, кожен з яких представляє критично важливі процеси та функціональні можливості, що лежать в основі роботи LFM.

Ця структура сформована на основі завершеної фази проєктування та поточної фази розробки LFM, демонструючи його потенціал у вирішенні просторових викликів та сприянні екологічній стійкості. Узагальнення результатів підкреслює значущість і практичну застосовність LFM для сталого міського планування та дизайну.

Таким чином, концептуальна модель виступає завершальним етапом дослідження, показуючи, як інтеграція генеративного ШІ та цифрових двійників «розумних міст» у рамках LFM може забезпечити нові підходи до аналізу міських систем, підвищити точність прогнозів та створити інструменти для прийняття рішень, що ґрунтуються на даних [2]. Це відкриває шлях до формування стійкіших, ефективніших і збалансованих міських середовищ майбутнього.

Концептуальна модель проєкту «розумного міста» [2], демонструє інноваційний потенціал LFM, організуючи результати дослідження у цілісну п'ятирівневу структуру. Вона підкреслює важливість інтеграції різномірних міських наборів даних, застосування сучасних методів моделювання та симуляції, а також формування прогностичної аналітики для подолання складності міських систем.

Гармонізація та стандартизація даних у поєднанні з орієнтацією на практичні інсайти створюють масштабовану й адаптивну основу для ширшого застосування у сфері сталого міського розвитку. Це узагальнення підкреслює практичну значущість LFM у межах концептуального проєкту «розумного міста» [2] та закладає фундамент для майбутніх досліджень і вдосконалень.

Концептуальна модель є важливим кроком уперед у розвитку інструментів цифрових двійників «розумних міст», підтримуючи міста у досягненні стійкості та екологічної збалансованості. Вона демонструє, як інтеграція генеративного ШІ у цифрові двійники може забезпечити нові можливості для аналізу, прогнозування та управління міськими процесами, формуючи основу для створення ефективніших і стійкіших «розумних міст» майбутнього.

3.6 Висновок до третього розділу

В третьому розділі кваліфікаційної роботи здійснено прототипування моделі великого потоку «розумного» міста. Описано основні елементи моделі великого потоку «розумного міста». Розглянуто автоенкодер «розумного міста». Описано перспективи розвитку та потенціал концептуального проєкту «розумне місто». Подано аналіз результатів прототипування проєкту «розумне місто» в концептуальну модель.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Контроль за станом охорони праці

Тема кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Магістр» присвячена дослідженню генеративного штучного інтелекту для цифрових двійників «розумних міст». Тому доцільно розглянути питання контролю за станом охорони праці. Великі інформаційно-технологічні проєкти, що інтегрують ІТ-системи та комунікаційні технології у складну міську інфраструктуру, потребують особливої уваги до питань безпеки та охорони праці. Контроль у цій сфері є ключовим інструментом для гарантування надійних умов роботи та запобігання інцидентам. Його сутність полягає у систематичному моніторингу та перевірці дотримання встановлених вимог, виконання обов'язків і функцій відповідальними суб'єктами. Попри превентивні заходи, рівень виробничого травматизму та кількість смертельних випадків залишаються високими, що свідчить про недостатню ефективність існуючих механізмів нагляду.

Контроль здійснюється як роботодавцями, які відповідають за внутрішній моніторинг і підтримку безпечних умов, так і державними органами, що реалізують зовнішній нагляд на загальнонаціональному рівні. Його мета полягає не лише у виявленні та усуненні порушень, а й у їх попередженні через превентивні заходи та формування культури безпеки.

Для досягнення результативності контроль має бути комплексним: удосконалення законодавчої бази, створення дієвого державного механізму нагляду, підвищення рівня поінформованості та відповідальності роботодавців і працівників. Формування стійкої культури безпеки є необхідною умовою для зменшення виробничих ризиків.

На підприємствах застосовуються різні форми контролю, серед яких триступеневий контроль, закріплений у нормативних документах, а також оперативний контроль, що здійснюється керівниками робіт та службами охорони

праці. Вищі організації проводять перевірки на більш високих рівнях, а місцеві органи влади та самоврядування також беруть участь у нагляді.

Внутрішньовідомчий контроль, що здійснюється роботодавцем, є важливим елементом системи безпеки. Згідно із Законом України про охорону праці, роботодавець зобов'язаний створити умови відповідно до нормативних вимог та гарантувати дотримання прав працівників. Це включає впровадження системи управління охороною праці, проведення інструктажів та регулярні перевірки [55]. Відомчий контроль дозволяє виявляти та усувати порушення, а також сприяє формуванню культури безпеки серед працівників. Важливу роль відіграє громадський контроль та державний нагляд, що реалізуються через перевірки та контрольні заходи. На рівні підприємства адміністративний контроль здійснюється керівником, головними спеціалістами та іншими уповноваженими особами [56]. Внутрішній контроль реалізується керівними структурами підприємств і організацій для забезпечення безпечних умов праці. Він передбачає планові перевірки, складання актів про виявлені порушення та визначення заходів для їх усунення. Мета – гарантувати дотримання законодавства, виправляти недоліки та підвищувати рівень культури безпеки.

Оперативний контроль має ключове значення для своєчасного виявлення порушень і недоліків, що можуть спричинити аварії чи нещасні випадки. Він забезпечує моніторинг дотримання норм та стандартів, а також дозволяє швидко реагувати на зміни у виробничих умовах. Перший рівень контролю здійснюється безпосередньо на робочих місцях, другий – на рівні керівників підрозділів, третій – на рівні вищого управління підприємства, а четвертий – у стратегічному контексті, де ухвалюються рішення щодо вдосконалення системи охорони праці.

Підвищення ефективності контролю тісно пов'язане з інтеграцією сучасних технологій, таких як Інтернет речей (IoT) та штучний інтелект. IoT дозволяє встановлювати сенсори для постійного моніторингу стану обладнання та виявлення аварійних ситуацій, а штучний інтелект допомагає аналізувати великі обсяги даних, виявляти ризики та формувати прогностичні моделі безпеки.

Таким чином, оперативний контроль є не лише необхідним елементом для забезпечення безпеки виробничих процесів, а й важливим інструментом для підтримки високого рівня організації та готовності до запобігання аваріям. Інтеграція сучасних технологій робить цей процес більш ефективним і своєчасним, знижуючи ймовірність виникнення небезпечних ситуацій та забезпечуючи безпечніші умови праці для всіх учасників виробничого середовища [56].

4.2 Забезпечення безпеки життєдіяльності при роботі з ПК

Розробка, впровадження та підтримка сучасних інформаційно-технологічних систем, зокрема «розумних» систем, передбачає тривалу роботу за комп'ютером. Інженери, програмісти, оператори та адміністратори щодня взаємодіють із цифровими платформами, створюючи архітектуру систем, програмуючи мікроконтролери, аналізуючи дані з сенсорів, керуючи хмарними сервісами та здійснюючи моніторинг усієї інфраструктури. Така діяльність є невід'ємною частиною життєвого циклу складних міських рішень, що інтегрують цифрові двійники «розумного міста» та генеративний штучний інтелект.

Недотримання правил безпечної роботи з комп'ютером може спричинити серйозні проблеми зі здоров'ям, серед яких синдром комп'ютерного зору, болі у спині та синдром зап'ястного каналу. Це безпосередньо впливає на продуктивність і якість роботи персоналу, а отже — на ефективність функціонування цифрових двійників міських інфраструктур. Саме тому створення комфортних і безпечних умов праці є критично важливим для успішної реалізації таких систем.

Ефективність «розумних» систем залежить не лише від технологічних компонентів, але й від людського фактора. Хоча дослідження зосереджене на інформаційних технологіях, воно опосередковано охоплює і тих, хто створює та експлуатує ці технології. Тому питання безпеки життєдіяльності при роботі з

комп'ютером є важливою складовою комплексного підходу до розвитку міських цифрових двійників.

Комп'ютери стали універсальним інструментом у професійній діяльності, освіті, комунікації та дозвіллі. Проте їх використання потребує дотримання правил безпеки. Ігнорування таких правил може призвести до фізичних ушкоджень. Неправильна організація робочого місця, наприклад невідповідний стіл чи крісло, часто спричиняє біль у спині та шиї, а тривала робота за монітором викликає перенапруження очей і погіршення зору [57].

Не менш важливим є захист даних. Викрадення або втрата інформації може мати серйозні наслідки для бізнесу чи особистого життя користувача. Використання надійних паролів, багатофакторної автентифікації та шифрування даних допомагає запобігти таким ризикам.

Для безпечної роботи за комп'ютером необхідно враховувати тривалість сеансів, ергономіку, параметри відображення та умови у приміщенні. Робоче місце має бути чистим і добре провітрюваним, а перерви слід робити регулярно, щоб уникати перевтоми. Монітор повинен бути розташований на відстані не менше 55–60 см від очей, а його центр — на рівні очей або трохи нижче. Важливо стежити за поставою: ноги мають стояти на підлозі, стегна і гомілки утворювати прямі кути, плечі залишатися розслабленими. Для збереження здоров'я очей рекомендується виконувати гімнастику, регулярно переводити погляд на віддалені предмети, моргати кожні кілька секунд, а також використовувати спеціальні окуляри чи очні гелі.

Додатково слід звертати увагу на освітлення робочого місця, яке має бути достатнім, щоб уникати перенапруження очей. Яскравість і контрастність екрана потрібно регулювати так, щоб світло не було надмірним. Важливо також змінювати вид діяльності протягом дня, робити перерви з руховою активністю та уникати використання телевізора як монітора, адже його випромінювання значно перевищує допустимі норми.

Таким чином, безпечна робота за комп'ютером є не лише питанням охорони здоров'я працівників, але й важливим чинником стабільності функціонування цифрових двійників «розумних міст». Вона забезпечує стійкість

процесів, підвищує якість аналітики та прогнозування, а також сприяє ефективному використанню генеративного штучного інтелекту у контексті розвитку «розумних» міст [57].

4.3 Висновок до четвертого розділу

В третьому розділі кваліфікаційної роботи описано контроль за станом охорони праці. Розглянуто особливості забезпечення безпеки життєдіяльності при роботі з ПК.

ВИСНОВКИ

Проведене в кваліфікаційній роботі освітнього рівня «Магістр» дослідження показало, що генеративний штучний інтелект у поєднанні з концепцією цифрового двійника міста формує потужний інструмент для прогнозування, моделювання та оптимізації міських процесів, забезпечуючи сталий розвиток і підвищення ефективності «розумних» міст.

В першому розділі кваліфікаційної роботи:

- Розглянуто генеративний ШІ – основа прогнозування та оптимізації міських систем.

- Подано концептуальні та практичні основи генеративного ШІ.

- Описано аналітичний огляд наукової літератури щодо генеративного ШІ в «розумних містах».

- Розглянуто штучний інтелект для сталого планування та проектування «розумних міст».

- Висвітлено генеративні моделі штучного інтелекту.

- Проаналізовано базові моделі та їх попередньо навчена підмножина.

- Досліджено штучний інтелект для сталого планування, проектування та цифрового двійника «розумного міста».

- Описано генеративний ШІ та попередньо навчені базові моделі для сталого планування та проектування «розумного міста» та цифрових двійників.

- Сформована базова структура для LFM, адаптована для UDT в рамках GSAI: біфокусний підхід.

В другому розділі кваліфікаційної роботи:

- Подано огляд концептуального проєкту «розумного міста».

- Описано підпроекти концепту «розумного міста».

- Висвітлена трансформація платформи відкритих даних на комплексну систему «розумного міста».

- Здійснено обґрунтування умов та вибірки концепту «розумного міста».

- Подано опис процесу проектування концепту «розумного міста».

- Виконано проектування моделі великого потоку «розумного міста».

В третьому розділі кваліфікаційної роботи:

- Здійснено прототипування моделі великого потоку «розумного» міста.
- Описано основні елементи моделі великого потоку «розумного міста».
- Розглянуто автоенкодер «розумного міста».
- Описано перспективи розвитку та потенціал концептуального проєкту «розумне місто».
- Подано аналіз результатів прототипування проєкту «розумне місто» в концептуальну модель.

У розділі «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях» описано контроль за станом охорони праці. Розглянуто особливості забезпечення безпеки життєдіяльності при роботі з ПК.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

- 1 Fedonuyk A., Yunchyk V., Mukutuyk I., Duda O., Yatsyuk S. Application of the hierarchy analysis method // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1840(1). DOI: 10.1088/1742-6596/1840/1/012065.
- 2 Huang, Jeffrey, Simon Elias Bibri, and Paul Keel. "Generative spatial artificial intelligence for sustainable smart cities: A pioneering large flow model for urban digital twin." *Environmental Science and Ecotechnology* 24 (2025): 100526.
- 3 Duda O., Stanko A. Architecture of monitoring platform in smart cities // *Вісник ХНУ*. 2023. No. 4. P. 10–19. DOI: 10.31891/2307-5732.
- 4 S.E. Bibri, *Artificial intelligence and its generative power for advancing the sustainable smart city digital twin: a novel framework for data-driven environmental planning and design*, *Artif. Intellig. Things Smart. Eco-Cities: Pioneer. Environ. Synerg. Urban Brain, Digit. Twin, Metabol. Circular Platform*, CRC/Taylor Francis Group (2025), <https://doi.org/10.1201/9781003536420>.
- 5 T. Kreuzer, P. Papapetrou, J. Zdravkovic, *Artificial intelligence in digital twins: a systematic literature review*, *Data Knowl. Eng.* 151 (2024) 102304, <https://doi.org/10.1016/j.datak.2024.102304>.
- 6 A.F. Gkontzis, S. Kotsiantis, G. Feretzakis, V.S. Verykios, *Enhancing urban resilience: smart city data analyses, forecasts, and digital twin techniques at the neighborhood level*, *Future Internet* 16 (2) (2024) 47, <https://doi.org/10.3390/fi16020047>.
- 7 J. Adinkrah, F. Kemausuor, E.T. Tchao, H. Nunoo-Mensah, A.S. Agbemenu, A. Adu-Poku, J.J. Kponyo, *Artificial intelligence-based strategies for sustainable energy planning and electricity demand estimation: a systematic review*, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 210 (2025) 115161. ISSN 1364-0321.
- 8 D. Ciri c, *New generative and AI design methods for transportation systems and urban mobility design, planning, operation, and analysis: contribution to urban computing theory and methodology*, in: *Keeping up with Technologies to Imagine and Build Together Sustainable, Inclusive, and Beautiful Cities*, International Academic

Conference on Places and Technologies, 2024, pp. 490e503, https://doi.org/10.18485/arh_pt.2024.8.ch59.

9 X. Liu, L. He, Y. Zhang, Measuring geographic diversity of foundation models with a natural languagebased geo-guessing experiment on GPT-4, arXiv (2024). <https://arxiv.org/abs/2404.07612>.

10 B. Lei, P. Janssen, J. Stoter, F. Biljecki, Challenges of urban digital twins: a systematic review and a Delphi expert survey, *Autom. ConStruct.* 147 (2023) 104716, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104716>.

11 B. Wang, Q. Wang, J.C.P. Cheng, C. Yin, Object verification based on deep learning point feature comparison for scan-to-BIM, *Autom. ConStruct.* 142 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104515>. Article 104515.

12 Y. Sun, T. Dogan, Generative methods for Urban design and rapid solution space exploration, *Environ. Plan. B Urban Anal. City Sci.* 50 (6) (2023) 1577e1590, <https://doi.org/10.1177/23998083221142191>.

13 G. Mai, W. Huang, J. Sun, S. Song, D. Mishra, N. Liu, S. Gao, T. Liu, G. Cong, Y. Hu, C. Cundy, Z. Li, R. Zhu, N. Lao, On the opportunities and challenges of foundation models for geospatial artificial intelligence, arXiv:2304.06798v1 [cs.AI] (2024), <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.06798>.

14 Duda O., Kunanets N., Martsenko S., Nykytyuk V., Pasichnyk V. COVID-19 data collections and processing // *IEEE CSIT 2021*. P. 252–257. DOI: 10.1109/CSIT52700.2021.9648658.

15 B. Lin, W. Jabi, P. Corcoran, S. Lannon, The application of deep generative models in urban form generation based on topology: a review, *Architect. Sci. Rev.* 67 (3) (2024) 189e204, <https://doi.org/10.1080/00038628.2023.2209550>.

16 Y. Cao, S. Li, Y. Liu, Z. Yan, Y. Dai, P.S. Yu, L. Sun, A comprehensive survey of AI-generated content (AIGC): a history of generative AI from GAN to ChatGPT, arXiv preprint arXiv:2303.04226 [cs.AI]. Retrieved from, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.04226>, 2023.

17 Vaskiv R. I., Hrybovskyi O. M., Kunanets N. E., Duda O. M. Information system of street lighting control in smart city // *Radio Electronics, Computer Science, Control.* 2024. No. 3(70). P. 212–223. DOI: 10.15588/1607-3274-2024-3-18.

18 A. Abu-Rayash, I. Dincer, Development of an integrated model for environmentally and economically sustainable and smart cities, *Sustain. Energy Technol. Assess.*, 73 (2025) 104096, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104096>.

19 S.E. Bibri, A. Alexandre, A. Sharifi, J. Krogstie, Environmentally sustainable smart cities and their converging AI, IoT, and big data technologies and solutions: an integrated approach to an extensive literature review, *Energy Inform.* 6 (2023) 9.

20 S. Bibri, J. Krogstie, A. Kaboli, A. Alahi, Smarter eco-cities and their leadingedge artificial intelligence of things solutions for environmental sustainability: a comprehensive systemic review, *Environ. Sci. Ecotechnol.* 19 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.ese.2023.100330>.

21 D.P. Kingma, P. Dhariwal, Glow: generative flow with invertible 1x1 convolutions, *arXiv preprint arXiv:1807.03039* (2018), <https://doi.org/10.48550/arXiv.1807.03039>.

22 Y. Hong, U. Hwang, J. Yoo, S. Yoon, How generative adversarial networks and their variants work, *ACM Comput. Surv.* 52 (1) (2019) 1e43, <https://doi.org/10.1145/3301282>.

23 A. Brock, J. Donahue, K. Simonyan, Large scale GAN training for high fidelity natural image synthesis. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*, 2018, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1809.11096>.

24 M.C. Connor, G.H. Canal, C.J. Rozell, Variational autoencoder with learned latent structure. Paper Presented at the 24th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS 2021), 2021, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.10597> arXiv:2006.10597.

25 D.P. Kingma, M. Welling, Auto-encoding variational bayes, *arXiv preprint arXiv:1312.6114* (2013), <https://doi.org/10.48550/arXiv.1312.6114>.

26 P. Li, Y. Pei, J. Li, A comprehensive survey on design and application of autoencoder in deep learning, *Appl. Soft Comput.* 138 (2023) 110176, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110176>.

27 C.H. Pham, S. Ladjal, A. Newson, PCA-AE: Principal component analysis autoencoder for organising the latent space of generative networks, *J. Math. Imag. Vis.* 64 (4) (2022) 569e585, <https://doi.org/10.1007/s10851-02201077-z>.

28 Q. Fournier, D. Aloise, Empirical comparison between autoencoders and traditional dimensionality reduction methods, *Proceed. IEEE Second Int. Conf. Artif. Intellig. Knowled. Eng.* (2021) 211e214, <https://doi.org/10.1109/AIKE.2019.00044>.arXiv:2103.04874. IEEE.

29 T. Brown, B. Mann, N. Ryder, M. Subbiah, J.D. Kaplan, P. Dhariwal, A. Neelakantan, P. Shyam, G. Sastry, A. Askell, S. Agarwal, A. Herbert-Voss, G. Krueger, T. Henighan, R. Child, A. Ramesh, D. Ziegler, J. Wu, C. Winter, C. Hesse, M. Chen, E. Sigler, M. Litwin, S. Gray, B. Chess, J. Clark, C. Berner, S. McCandlish, A. Radford, I. Sutskever, D. Amodei, Language models are fewshot learners, *Proceed. Conf. Neural Inform. Process. Syst. (NeurIPS)* 33 (2020) 1877e1901. Retrieved from, <https://proceedings.neurips.cc/paper/2020/file/1457c0d6bfcb4967418bfb8ac142f64aPaper.pdf>.

30 J. Devlin, M.W. Chang, K. Lee, K. Toutanova, BERT: pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding, *arXiv preprint arXiv:1810.04805* (2018), <https://doi.org/10.48550/arXiv.1810.04805>.

31 C. Raffel, N. Shazeer, A. Roberts, K. Lee, S. Narang, M. Matena, P.J. Liu, Exploring the limits of transfer learning with a unified text-to-text transformer, *arXiv preprint arXiv:1910.10683* (2020), <https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.10683>.

32 A. Radford, J.W. Kim, C. Hallacy, A. Ramesh, G. Goh, S. Agarwal, I. Sutskever, Learning transferable visual models from natural language supervision, *arXiv preprint arXiv:2103.00020* (2021), <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.00020>.

33 K. Janowicz, Philosophical foundations of GeoAI: exploring sustainability, diversity, and bias in GeoAI and spatial data science, in: *Handbook of Geospatial Artificial Intelligence*, CRC Press, 2023, pp. 26e42, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.06508>.

34 J. Jakubik, S. Roy, C.E. Phillips, P. Fraccaro, D. Godwin, B. Zadrozny, D. Szwarcman, C. Gomes, G. Nyirjesy, B. Edwards, D. Kimura, N. Simumba, L. Chu, S.K. Mukkavilli, D. Lambhate, K. Das, R. Bangalore, D. Oliveira, M. Muszynski, K.

Ankur, M. Ramasubramanian, I. Gurung, S. Khallaghi, H. Li, Steve, M. Cecil, M. Ahmadi, F. Kordi, H. Alemohammad, M. Maskey, R. Ganti, K. Weldemariam, R. Ramachandran, Foundation models for generalist geospatial artificial intelligence, arXiv:2310.18660 [cs.CV], <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.18660>, 2023.

35 M. Xu, D. Niyato, H. Zhang, J. Kang, Z. Xiong, S. Mao, Z. Han, Joint foundation model caching and inference of generative AI services for edge intelligence, arXiv:2305.12130 [cs.NI] (2023), <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.12130>.

36 C. Zhou, Q. Li, C. Li, J. Yu, Y. Liu, G. Wang, K. Zhang, C. Ji, Q. Yan, L. He, A comprehensive survey on pretrained foundation models: a history from BERT to ChatGPT, arXiv preprint arXiv:2302.09419 (2023), <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.09419>.

37 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.

38 S.E. Bibri, J. Huang, S.K. Jagatheesaperumal, J. Krogstie, The synergistic interplay of artificial intelligence and digital twin in environmentally planning sustainable smart cities: a comprehensive systematic review, Environ. Sci. Ecotechnol. 20 (2024) 100433, <https://doi.org/10.1016/j.ese.2024.100433>.

39 H. Kamal, W. Yanez, S. Hassan, D. Sobhy, Digital-twin-based deep reinforcement learning approach for adaptive traffic signal control, IEEE Internet Things J. (99) (2024, January) 1, <https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3377600>,1.

40 J. Wu, X. Wang, Y. Dang, Z. Lv, Digital twins and artificial intelligence in transportation infrastructure: classification, application, and future research directions, Comput. Electr. Eng. 101 (September 2021) (2022) 107983, <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.107983>.

41 A.A. Salunke, Reinforcement learning empowered digital twins: pioneering smart cities towards optimal urban dynamics, EPRA Int. J. Res. Develop. (IJRD) (2023), <https://doi.org/10.36713/epra13959>.

42 K. Zvarikova, J. Horak, S. Downs, Digital twin algorithms, smart city technologies, and 3D spatio-temporal simulations in virtual urban environments,

Geopolit. Hist. Int. Relat. 14 (1) (2022) 139e154, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.09419>.

43 M. Austin, P. Delgoshaei, M. Coelho, M. Heidarinejad, Architecting smart city digital twins: combined semantic model and machine learning approach, *J. Manag. Eng.* 36 (4) (2020) 04020026, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000825](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000825).

44 S. Beckett, Smart city digital twins, 3D modeling and visualization tools, and spatial cognition algorithms in artificial intelligence-based urban design and planning, *Geopolit. Hist. Int. Relat.* 14 (1) (2022) 123e138. <https://www.jstor.org/stable/48679657>.

45 C. Saranya, K. Haripriya, S. Bhargava, C.M. Tejashree, J.T. Thomas, Urban “digital twins” for smart cities and citizens. Paper presented at the international conference on recent trends in computing & communication technologies (ICRCCT’2K24). <https://doi.org/10.59544/QXKH3144/ICRCCT24P17>, 2024, November.

46 H. Xu, F. Omitaomu, S. Sabri, S. Zlatanova, X. Li, Y. Song, Leveraging generative AI for urban digital twins: a scoping review on the autonomous generation of urban data, scenarios, designs, and 3D city models for smart city advancement, *Urban Inform.* 3 (1) (2024), <https://doi.org/10.1007/s44212024-00060-w>. Article 29.

47 Z. Zhou, Y. Lin, Y. Li, Large language model empowered participatory urban planning, *arXiv:2402.01698 [cs.CL]*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.01698>, 2024.

48 X. Fu, C. Li, W. Zhai, Using natural language processing to read plans: a study of 78 resilience plans from the 100 resilient cities network, *J. Am. Plann. Assoc.* 89 (1) (2023) 107e119, <https://doi.org/10.1080/01944363.2022.2038659>.

49 A. Trantas, P. Pileggi, Digital twin and foundation models: a new frontier. In proceedings of the 16th international conference on agents and artificial intelligence 3, ICAART, Rome, Italy, 2024, pp. 988e994.

50 G. Thomas, A typology for the case study in social science following a review of definition, discourse, and structure, *Qual. Inq.* 17 (6) (2011) 511e521, <https://doi.org/10.1177/1077800411409884>.

- 51 R.K. Yin, *Case Study Research: Design and Methods*, Sage, Los Angeles, 2014.
- 52 R.K. Yin, *Case Study Research and Applications: Design and Methods*, sixth ed., SAGE Publications, Inc, 2017.
- 53 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.
- 54 Orlov M. V., Duda O. M., Zhovnir Y. I., Hrybovskyi O. M. *DevOps tools in IoT systems // Комп'ютерно-інтегровані технології*. 2024. Vol. 57. P. 128–138. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2024-57-15.
- 55 Стручок В.С. *Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека»*. Навчальний посібник. 2022.
- 56 Левченко, О. Г. (2024). *Охорона праці та цивільний захист*.
- 57 *Безпека життєдіяльності при роботі з комп'ютером*. <https://ua5.org/svit/2394-bezpeka-zhyttyediyalnosti-pry-roboti-z-kompyuterom.html>.

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. Вігів, 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. Вігів, 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

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 багатовимірний 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.

Багатовимірний 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.

УДК 004.03

Г. Вовнянка; Д. Ониськів; А. Кривецький

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

ПЕРСПЕКТИВИ АНАЛІТИЧНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ДАНИХ РОЗУМНИХ МІСТ

UDC 004.03

H. Vovnianka; D. Onyskiv; A. Kryvetskyi

PROSPECTS OF ANALYTICAL PROCESSING OF SMART CITIES DATA

Поява «розумних міст» призвела до утворення надлишку даних із різних міських джерел, що вимагає надійних методів для ефективної обробки цієї інформації. Розпізнавання іменованих інформаційних сутностей є критично важливим для вилучення значущої аналітичної інформації із цих потоків даних. Взаємодія з користувачами відіграє критично важливу роль у процесах дослідження даних, особливо в контекстах «розумних міст», де необхідно враховувати різноманітні потреби та наміри користувачів.

Останні досягнення в галузі мовних моделей діють змогу моделям швидко адаптуватися до запитів користувачів без великих наборів даних для конкретних завдань [1]. Однак, саме лише збільшення розміру моделі не гарантує точної інтерпретації запитів користувачів. Узгодження моделей з людськими запитами шляхом тонкого налаштування із використанням зворотного зв'язку від користувачів може значно підвищити задоволеність запитів та якість результатів. Проте, у контексті аналітики міського середовища існують значні виклики щодо приватності та інтеграції даних. Застосування для аналітичного опрацювання даних у режимі реального часу повинні вирішувати проблеми конфіденційності, при цьому ефективно використовуючи цінні дані для вдосконалення застосувань великих даних орієнтованим на запити способом [2]. Безпека та конфіденційність у контекстно-залежних системах охорони здоров'я є невід'ємною частиною створення надійних та ефективних рішень у межах «розумних міст». Тому для вирішення цих взаємопов'язаних завдань необхідні програмно-алгоритмічні рішення, які надають пріоритет орієнтованим на користувача перспективам та ефективно інтегрують різноманітні системи.

Взаємопов'язані системи у міському середовищі мають на меті покращити управління через систематичне використання даних «розумних міст» [2]. Вирішення проблем масштабованості та доступності даних у межах цифрових двійників «розумних міст» може бути досягнуто за допомогою підходів із використанням синтетичних даних. Методи прогнозного моделювання, як от нейронні мережі, слугують вирішальними інструментами для прогнозування споживання електроенергії містом, інформуючи електроенергетичну промисловість про ключові тенденції споживання [3]. Крім того, системи реального часу дають змогу безпечно та ефективно управляти біометричними даними, підвищуючи можливості розподілених мереж.

Література

1. Naveed, Humza, et al. "A comprehensive overview of large language models." *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology* 16.5 (2025): 1-72.
2. Dahmane, Walid Miloud, Samir Ouchani, and Hafida Bouarfa. "Smart cities services and solutions: A systematic review." *Data and Information Management* 9.2 (2025): 100087.
3. Alhasnawi, Bilal Naji, et al. "The rising, applications, challenges, and future prospects of energy in smart grids and smart cities systems." *Energy Conversion and Management: X* (2025): 101162.