Міністерство освіти й науки України
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “КИЄВО-МОГИЛЯНСЬКА АКАДЕМІЯ”
Факультет Інформатики
Катедра Мультимедійних Систем

Кваліфікаційна робота

освітній ступінь – магістр

на тему: “**АНАЛІЗ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ УКРАЇНИ НА ОСНОВІ ПОКАЗНИКІВ ЕНТРОПІЇ ОРІЄНТАЦІЇ**”

Виконав студент
2-го року навчання
121 “Інженерія програмного забезпечення”
Макарець Андрій Олександрович
Керівник кваліфікаційної роботи
Смиш О.Р, ст.викл., PhD.
Рецензент _____.
Кваліфікаційна робота захищена з оцінкою
Секретар ЕК Мелешко С.А.
(підпис)

Київ 2025

Міністерство освіти й науки України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЄВО-МОГИЛЯНСЬКА АКАДЕМІЯ»

Кафедра інформатики факультету інформатики

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав.катедри мультимедійних систем ,

к.н.доц. Жежерун О.П

(підпис)

„____”_____2025 р.

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу

студенту Макарцю Андрію факультету Інформатики 2 року навчання магістерської програми

ТЕМА «АНАЛІЗ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ УКРАЇНИ НА ОСНОВІ ПОКАЗНИКІВ ЕНТРОПІЇ ОРІЄНТАЦІЇ »

Зміст ТЧ до кваліфікаційної роботи:

Індивідуальне завдання

Зміст

Анотація

1 Вступ

2 Огляд літератури

3 Теоретичні аспекти просторового аналізу

4 Архітектура програмного рішення

5.Інтерпретація та рекомендації

6. Висновки

Список літератури

Дата видачі „___” _____ 2024р. Смиш О.Р. _____

(підпис)

Завдання отримав _____

(підпис)

Графік підготовки кваліфікаційної роботи до захисту

№ п/п	Назва етапу роботи	Термін виконання етапу	Примітка
1.	Отримання завдання на кваліфікаційну роботу	10.2024	
2.	Огляд літератури за темою роботи	02.2025	
3.	Написання вступу	02.2025	
4.	Написання основної текстової частини	03-05.2025	
5.	Написання програмної частини	26.05.2025	
6.	Надання роботи керівнику для перевірки	28.05.2025	
7.	Попередній захист	29.05.2025	
8.	Коригування роботи, перевірка на плагіат	05.06.2025	
9.	Захист кваліфікаційної роботи	10.06.2025	

ЗМІСТ

Вступ.....7
1. Огляд літератури.....9
1.1. Концепції з “Вулиць та патернів” для аналізу впорядкованості мереж..9
1.2 Примарний графовий підхід та центральність вулиць.....9
1.3 Орієнтація вуличної мережі та ентропія конфігурації (Boeing, 2019)....10
1.4 Концепції вуличних шаблонів і структур (Marshall, 2004).....12
1.5 Інтеграція підходів для аналізу вуличних мереж.....13
1.6 Вплив оглянутої літератури на програмну реалізацію.....14
1.7. Висновок.....15
2. Теоретичні аспекти просторового аналізу.....17
2.1. Поняття просторового порядку в містобудуванні.....17
2.2. Теорія ентропії та її застосування в аналізі мереж.....18
2.2.1. Визначення ентропії Шеннона для дискретного розподілу.....19
2.2.2. Адаптація формули до орієнтаційної ентропії вуличної мережі..20
2.2.3. Ентропія, зважена за довжиною сегментів.....21
2.2.4. Нормалізований індекс впорядкованості φ.....22
2.2.5. Інтерпретація індексу φ.....23
2.2.6. Переваги та обмеження ентропійного підходу.....25
2.3. Додаткові мережеві метрики.....25
2.3.1. Середній степінь вузлів.....26
2.3.2. Частка глухих кінців.....26
2.3.3. Частка чотиривузлових перехресть.....27
2.3.4. Середня циркулярність.....27
2.4. Особливості українських вуличних мереж: попередні публікації.....29
2.5. Висновок.....31
3. Архітектура програмного рішення.....33
3.1. Загальна мета та функціональні вимоги.....33
3.1.1. Мета програмного рішення.....33

3.1.2. Нефункціональні вимоги.....33
3.2. Структура та вміст програмного пакету**.....33**
3.2.1. Загальна організація 33
3.2.2. Опис ключових модулів.....34
3.3. Аналіз обласних центрів України 39
3.3.1. Графіки.....39
4**. Інтерпретація та рекомендації.....43**
4.1. Інтерпретація.....43
4.2. Рекомендації.....43
4.3. Напрямки подальших досліджень.....44
Висновки.....46
Джерела.....49

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: Аналіз транспортних мереж України на основі показників ентропії орієнтації.

Студент: Макарець Андрій Олександрович

Рік навчання, спеціальність, факультет: 2-й рік навчання (магістерська програма), інженерія програмного забезпечення, факультет інформатики.

Науковий керівник: Смиш Олег Романович.

Мета роботи - адаптувати та застосувати підходи до аналізу орієнтаційної ентропії вуличних мереж до населених пунктів України

Ключові слова: ентропія, орієнтація, дорога, φ-індекс, нормалізація, граф, вузол, напрям

ВСТУП

У сучасних умовах швидкої урбанізації й розвитку інфраструктури якість вуличної мережі стає одним із ключових чинників, що визначають ефективність транспортного руху, доступність міського простору та комфорт пересування мешканців. Геометрична структура вулиць, їхня орієнтація та зв'язність, формують "просторовий код" міста, який впливає на поведінкові моделі пішоходів і водіїв, розподіл руху й навіть мікрокліматичні умови міського середовища. Тому кількісні методи аналізу вуличних мереж сьогодні є невід'ємною складовою містобудівних досліджень і проєктування.

Принцип орієнтації вулиць — ці направлені переважні кутові значення їхніх сегментів—може бути виміряний за допомогою ентропії Шеннона: чим ближчий розподіл напрямків до однорідного, тим вища ентропія, а отже — нижчий ступінь впорядкованості. У роботі [5] Boeing застосував цю методику до 100 міст світу, увівши нормалізований індекс φ, який відображає ступінь наближення мережі до ідеальної ортогональної ґратки. Попри широку географічну репрезентативність у дослідженні [5], українські міста в ньому практично не представлені, а, отже, відсутня цілісна картина їхньої просторової організації з точки зору ентропійного аналізу.

Мета цієї магістерської роботи — адаптувати та застосувати підхід [5] до аналізу орієнтаційної ентропії вуличних мереж населених пунктів України, приділяючи особливу увагу провідним містам, як-от: Київ, Львів, Харків, Одеса та ін.. Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання:

1. збір і попередня обробка даних OpenStreetMap за межами адміністративних кордонів досліджуваних міст;
2. розрахунок розподілу кутових напрямків вулиць та обчислення ентропії H_0 для кожного міста;

3. введення нормалізованого індексу φ як міри впорядкованості орієнтаційної структури;
4. порівняльний аналіз отриманих значень із результатами інших регіональних досліджень;
5. інтерпретація виявлених закономірностей у контексті історії планування та сучасного розвитку українських міст.

Об’єкт: вуличні мережі українських міст як просторові графи (вузли — перехрестя та глухі кінці; ребра — вуличні сегменти).

Предмет: розподіл орієнтацій вуличних сегментів та кількісні показники їхньої ентропії й впорядкованості (індекс φ), а також взаємозв’язок цих показників із загальними характеристиками мережі (циркулярність, середній степінь вузлів, частка перехресть).

Наукова новизна полягає в першому застосуванні підходу Boeing (2019) до аналізу орієнтаційної ентропії вуличних мереж саме українських міст із врахуванням їхніх історичних і топографічних особливостей.

Практичне значення: результати аналізу можуть стати основою для рекомендацій із підвищення транспортної ефективності, оптимізації громадського транспорту та розвитку пішохідної інфраструктури; окрім того, вони доповнять глобальні бази даних ентропійних показників міст.

Результати дослідження дозволять заповнити існуючу лакуну у знаннях щодо геометричного порядку вуличних мереж України, надати містобудівникам та транспортним аналітикам об’єктивний інструментарій для порівняння рівня впорядкованості міст і обґрунтованого прийняття рішень щодо подальшого розвитку інфраструктури.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Концепції з “Вулиць та патернів” для аналізу впорядкованості мереж.

Міські вуличні мережі можуть бути регулярними або нерегулярними. Регулярні, заплановані схеми, наприклад, ортогональні ґратки, вирізняються повторюваним геометричним порядком, тоді як нерегулярні мережі історичних міст часто утворюють лабіринт із вулиць різних напрямків. Більшість міст поєднують елементи обох типів та проміжні “гібридні” форми [9] Така структура накладається на функціональність: як зазначає Маршалл, традиційні історичні райони та сучасні планові райони демонструють різний рівень доступності та зв’язності вуличної мережі [9] Це означає, що ступінь впорядкованості мережі — чи в мережі домінує чіткий візерунок, чи хаотичне переплетення — безпосередньо впливає на просторову логіку міста та можливості навігації в ньому.

1.2. Примарний графовий підхід та центральність вулиць

Sergio Porta та колеги (2006) запропонували розглядати вуличну мережу як примарний граф: вузли графа відповідають перехрестям, а ребра – вуличним відрізкам між ними [4]. Такий підхід протиставляється дуальному, де вузлами є цілі вулиці або осі, а зв’язки встановлюються між ними при

перетинах. Примарне представлення більш інтуїтивне для міського дизайну, адже прямо моделює фізичні перехрестя і відстані між ними.

Як зазначають автори, їхній підхід:
(1) базується на вузловому графі,
(2) працює з реальними метричними відстанями замість чисто топологічних кроків,
(3) використовує множину показників, а не один показник.

Індекси центральності, розглянуті в статті, включають класичні метрики з соціальних мереж, адаптовані до географічних мереж: степінь вузла - скільки доріг сходиться в перехресті, близькість - зворотна сума відстаней від даного вузла до всіх інших, посередництво - частка найкоротших шляхів, що проходять через вузол, а також специфічні для вуличних мереж показники на зразок “прямолінійності”, що оцінює наскільки маршрути між вузлом та іншими є близькими до прямих ліній [10]. Аналіз 1-мильних фрагментів міст, проведений [4], показав, що поєднання цих метрик дозволяє виокремити структурний скелет міста – ті вулиці, що відіграють найбільшу роль у просторовій організації.

1.3. Орієнтація вуличної мережі та ентропія конфігурації (Boeing, 2019)

Geoff Boeing у [5] зосередив увагу на іншому аспекті міських мереж – орієнтації вулиць та ступені впорядкованості мережі. У своїй роботі він досліджує 100 міст світу, використовуючи дані OpenStreetMap для отримання вуличних графів. Одне з головних нововведень – це запровадження метрики орієнтаційної ентропії: показника, що кількісно відображає, наскільки різноманітні напрямки (азимутальні орієнтації) вулиць у місті. Ідея полягає в тому, що впорядкована, сітчаста мережа, як,

наприклад, в деяких Американських містах, матиме кілька домінуючих напрямків, і відповідно низьку ентропію розподілу орієнтацій. Натомість органічне місто з кривими, довільно спрямованими вулицями матиме майже рівномірний спектр напрямків і високу ентропію. Boeing вимірює розподіл азимутів вуличних сегментів для кожного міста, беручи до уваги напрямок кожного відрізка дороги, незалежно від його довжини і обчислює ентропію Шеннона цього розподілу.

Технічно реалізовано так: всі напрямки відрізків нормалізуються до діапазону 0–180°

$$H = -\sum_{i=1}^{36} p_i \ln p_i \quad .$$

Потім спектр ділиться на, скажімо, 36 бінів по 10° і рахується ентропія Таким чином отримують H_O – ентропію орієнтацій вуличного графа. Також розраховується H_W – ентропія, зважена за довжиною відрізків. Окрім ентропії орієнтацій, у цій роботі вводиться показник “orientation-order” (φ) – нормалізований індекс впорядкованості орієнтації мережі. Він шкалує отримане значення ентропії між 0 - повністю хаотична, ізотропна мережа, де всі напрямки зустрічаються рівномірно та 1 - ідеально впорядкована сітка, де вулиці зорієнтовані лише по двох взаємно перпендикулярних напрямах, як у “ідеальній” ґратці. Цей нормалізований показник φ дозволяє порівнювати міста за ступенем близькості до ідеальної ґратки. Загалом, можна обчислити й інші метрики, що описують конфігурацію мережі . Комплекс цих показників дає повніший портрет вуличної мережі міста.

Основні висновки Boeing (*2019)* продемонстрували, що показники впорядкованості мережі суттєво різняться між містами різних регіонів і історичних типів забудови [3]. Наприклад, міста США та Канади виявились значно більш сітчастими: вони мають нижчу ентропію орієнтацій та меншу звивистість вулиць (circuity) в середньому, що відповідає ортогональним плануванням на кшталт ґратки[5]. Натомість міста Європи, Азії чи Латинської Америки часто демонструють вищу ентропію – їхні вулиці

зорієнтовані менш упорядковано, багато радіальних або криволінійних структур. Ці емпіричні результати підтримують давні гіпотези про “органічні” vs “плановані” міста: мережі, що еволюціонували поступово, мають більше безладдя в орієнтаціях, а мережі, спроектовані за єдиним планом, ближчі до впорядкованих решіток. Важливо, що Boeing продемонстрував скалованість та автоматизацію такого аналізу: використання OpenStreetMap через OSMnx дозволило швидко зібрати дані і порахувати показники одразу для сотні міст [5]. Це підкреслює потенціал створення відтворюваних інструментів для кількісної оцінки просторового ладу міста.

1.4. Концепції вуличних шаблонів і структур (Marshall, 2004)

Stephen Marshall у книзі “Streets and Patterns” (2004) заклав теоретичну основу для розуміння топологій вуличних мереж і їхнього впливу на функціонування міста. Він розглядає, як історично формувалися різні шаблони вуличних мереж – від простих лінійних містечок до розгалужених деревоподібних субурбій, радіально-концентричних схем та регулярних ґраток. Одна з класифікацій, яку наводить Marshall, виділяє чотири основні типи шаблонів: лінійний - один-два основних коридори, часто вздовж річки чи дороги, деревоподібний – мережа типу “ялинка” або система тупиків, що впадають у магістралі, радіальний (радіально-кільцева структура з центром) та ґратка – ортогональна сітка кварталів[3].

Ці морфологічні типи пов’язані з функціональними аспектами: наприклад, деревоподібні мережі асоціюються з автомобілецентричним передмістям, тоді як традиційні ґратки підтримують змішане використання територій і пішохідну доступність [11]. Marshall підкреслює, що якість вуличної мережі визначається не лише геометрією, тобто прямолінійністю чи

кривизною вулиць, а передусім способом з’єднання елементів – тобто конфігурацією маршрутів і перехресть. Іншими словами, важливо як лінії з’єднуються одна з одною, утворюючи цілісну систему, адже від цього залежить і доступність, і взаємодія між частинами міста.

На підтримку своїх аргументів Marshall застосовує графові моделі. Фактично, він також представляє вуличну мережу як набір вузлів і зв’язків між ними для аналізу структури маршрутів. Він вводить поняття “структури маршруту” (route structure) і пропонує методи кількісного оцінювання мережі, зокрема за допомогою трикутних діаграм, що відображають співвідношення між ключовими показниками, скажімо, зв’язністю, перетинністю та ієрархічністю мережі. Marshall фактично закликає переходити від суто ієрархічної класифікації доріг (магістраль → колектор → локальна вулиця) до багатовимірної класифікації, яка враховує форму, використання, взаємне положення і призначення вулиць одночасно. Такий підхід дозволяє оцінити мережу комплексно – наприклад, мережа може бути одночасно високозв’язною, тобто мати багато альтернативних шляхів і дрібномасштабною - короткі блоки, вузли на малій відстані, як у центрах європейських міст, або ж, навпаки, розірваною (мати багато глухих кутів) і крупноблочною, як у приміських районах.

Висновки Marshall підкреслюють, що традиційні, більш зернисті та зв’язні шаблони, як у історичних центрів, є більш стійкими для міської активності, пішохідності тощо, і він виступає за повернення до дрібносітчастих структур замість модерністських розгалужених схем. Його робота інтерпретує кількісні показники, такі як центральність чи ентропія орієнтацій, у контексті якості міського середовища та планувальних рішень.

1.5. Інтеграція підходів для аналізу вуличних мереж

Розглянуті підходи Porta (графовий аналіз центральності) та Boeing (аналіз орієнтацій і ентропії) не є конкуруючими, а навпаки – взаємодоповнювальні. Разом із концепціями Marshall вони дозволяють створити цілісну методику оцінки вуличної мережі. Примарний графовий підхід забезпечує основу для структурного аналізу: ми представляємо місто як граф і розраховуємо метрики, що виявляють ключові вузли та ребра: центральні вулиці, важливі перехрестя. Це відповідає на питання: які місця найважливіші з точки зору мережевої доступності та потоків? В той же час, орієнтаційна ентропія дає морфологічний вимір: вона характеризує загальний патерн планування – наскільки він регулярний чи хаотичний. Це відповідає на питання: **чи має місто чітко виражену сітку вулиць, чи його мережа безладно розкидана в усіх напрямках?** У поєднанні ці аналізи малюють повнішу картину: наприклад, місто може мати високоцентралізовану структуру, з кількома дуже важливими магістралями, і водночас бути орієнтаційно впорядкованим як регулярна сітка, або навпаки – мати розмитий розподіл центральності при хаотичній орієнтації. Концепції Marshall допомагають інтерпретувати ці результати: вони підказують, до якого типу шаблону належить мережа за отриманими метриками. Наприклад, високозв’язна дрібна сітка – традиційний європейський центр; фрагментована деревоподібна мережа з високою орієнтаційною ентропією – передмістя зі звивистими вулицями; регулярна решітка з низькою ентропією – планований колоніальний чи американський містоплан тощо.

1.6. Вплив оглянутої літератури на програмну реалізацію

Вплив роботи Porta (2006) на програмну реалізацію полягає в тому, що система має обчислювати кілька показників центральності для кожного вузла та ребра графа. Це значить, що алгоритмічно передбачено модуль для розрахунку центральностей, використовуючи метричні відстані для, скажімо,

близькості або прямолінійності. Крім того, на основі MCA слід зберігати всі ці показники для подальшого порівняння і виявлення “скелету” мережі.

Вплив роботи Boeing (2019) відображається у модулі аналізу орієнтацій: необхідно автоматично визначати всі напрямки вуличних сегментів міста, побудувати їх гістограму і обчислити показник ентропії за формулою Шеннона[5], а також, за потреби, нормалізований показник φ, що задає ступінь впорядкованості від 0 до 1. До того ж, Boeing показав важливість таких показників, як циркулярність маршрутів, середня довжина сегмента, частка 4-сторонніх перехресть, тож доцільно включити й їх розрахунок у ПЗ – ці метрики легко обчислюються з геометрії графа або стандартних алгоритмів.

Концепції Marshall впливають на структуру інтерфейсу та аналіз: програма може надавати користувачу інтерпретації чи типологічні підказки на основі отриманих чисел. Наприклад, якщо мережа показує низький середній степінь вузла і багато тупиків – це можна віднести до древовидного шаблону; якщо ентропія орієнтацій близька до ідеальної решітки $\varphi \approx 1$, а середня зв’язність висока – шаблон ґратковий. Така інтеграція методів перетворює суто числові результати на змістовні висновки про характер міської мережі.

1.7. Висновок

У результаті аналізу літератури стає очевидним, що різні підходи до вивчення вуличних мереж доповнюють одне одного. Маршалл (2004) класифікує мережі за чотирма базовими морфологічними типами: лінійний, деревоподібний, радіальний, ґратка і наголошує, що справжня “якість” мережі вимірюється не лише формою вулиць, а тим, як вони з’єднуються в єдину систему . Porta (2006) пропонують примарний графовий підхід для

розрахунку метрик, що дозволяє виокремити “скелет” мережі — найважливіші магістралі та вузлові перехрестя з урахуванням метричних відстаней. Boeing (2019), у свою чергу, розвиває морфологічний вимір, вводячи орієнтаційну ентропію (Ho) і нормалізований індекс упорядкованості φ, які кількісно характеризують, наскільки мережа наближена до ідеальної сітки чи до хаотичного, органічного переплетення вулиць.

Поєднання цих підходів дає змогу отримати повніший портрет мережі. На сьогодні в Україні відсутні роботи щодо аналізу мережі вулиць міст на базі відкритих даних – тим більше з використанням настільки сучасних метричних показників, як центральності MCA чи орієнтаційна ентропія. Хоча методи Porta і Boeing були випробувані на закордонних містах, в Україні вони ще не були впроваджені у використання для планування чи академічних досліджень.

2. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ПРОСТОРОВОГО АНАЛІЗУ

2.1. Поняття просторового порядку в містобудуванні

Поняття просторового порядку в містобудуванні охоплює властивості, які визначають організацію, структуру та сприйняття міського простору. З одного боку, це геометрична впорядкованість — регулярність сіток, симетрія планувальних рішень та пропорційність забудови [1]. З іншого — топологічна впорядкованість, що характеризується зв’язністю мережі вулиць, доступністю зон і інтуїтивною чіткістю орієнтування для мешканців і гостей міста [1].

У класичних теоріях планування просторовий порядок ототожнювався з ортогональною структурою вулиць , коли регулярна сітка забезпечувала зручність руху й ясність просторових зв’язків. Наприкінці XX століття в рамках просторового синтаксу було запропоновано нові методики аналізу — через локальні й глобальні топологічні індекси зв’язності мережі [2].

Подальший розвиток кількісного аналізу просторового порядку пов’язаний із такими підходами:

- **Графові моделі**: вуличну мережу представляють як просторовий граф і аналізують властивості вузлів і ребер за допомогою метрик центральності, циркулярності, розподілів степенів [3];
- **Індекси регулярності**: ступінь відхилення реальної мережі від теоретичних шаблонів (ортогональної або радіально-концентричної сітки) вимірюється через порівняння розподілу перехресть і циклів [4];
- **Ентропійні методи**: оцінка неоднорідності розподілу напрямків вуличних сегментів за ентропією Шенона дає змогу порівнювати впорядкованість мереж незалежно від масштабу міста [5].

З точки зору прикладного програмування важливо зазначити, що сучасне дослідження просторового порядку потребує програмних засобів і алгоритмів обробки геоданих. OpenStreetMap у поєднанні з бібліотеками NetworkX, OSMnx (для роботи з графами) та SciPy, NumPy (для чисельних розрахунків) створюють фундаментальний інструментарій кількісного просторового аналізу. Поєднання містобудівної теорії з програмними технологіями забезпечує міждисциплінарний підхід.

Таким чином, просторовий порядок у містобудуванні — це комплексне поняття, що включає класичні планувальні принципи, сучасні топологічні та статистичні методи аналізу, а також інформаційно-технологічний контекст реалізації обчислювальних алгоритмів. Це підкреслює необхідність використання інженерно-програмних рішень для кількісної оцінки впорядкованості вуличних мереж.

2.2. Теорія ентропії та її застосування в аналізі мереж

У загальному розумінні ентропія за Клодом Шенноном є величиною, яка вимірює ступінь хаотичності або невизначеності дискретного розподілу ймовірностей. Якщо розглядати вуличну мережу як граф, де кожне ребро відповідає сегменту дороги з певним азимутом, то ентропія дає можливість кількісно оцінити, наскільки “розпорошені” напрями цих сегментів. У цьому підрозділі подано:

1. коротке нагадування базової формули Шеннона для ентропії дискретного розподілу;
2. алгоритм, як перетворити кути сегментів у частоти бінів та обчислити орієнтаційну ентропію;
3. обґрунтування урахування довжини сегментів через зважену ентропію;
4. введення нормалізованого індексу впорядкованості φ;

5. огляд переваг і обмежень підходу.

2.2.1. Визначення ентропії Шеннона для дискретного розподілу

Нехай $\{p_i\}_{i=1}^{n}$, $\sum_{i=1}^{n} p_i = 1$— це набір ймовірностей, які характеризують дискретний розподіл випадкової величини X, де n — кількість можливих станів, і ентропія H(X) за формулою Шеннона визначається так:

$$H(X) = -\sum_{i=1}^{n} p_i \, , \ln p_i$$

де логаритм ln взято за основою e. У цьому визначенні ентропії одиницею вимірювання є натуральний логаритм, але часто використовують і біти, тоді беруть логаритм за основою 2. Оскільки в нашому аналізі порівнюються відносні величини, різниця між цими шкалами не є критичною, і прийнятно зберігати саме натуральний логаритм.

У контексті вуличної мережі “стани” відповідають певним інтервалам - бінам орієнтацій, а pi — частка (частота) сегментів, які потрапили до i-го біна. Якщо орієнтації вулиць були б абсолютно однорідними, наприклад, усі сегменти спрямовані,точно на північ або на схід, то розподіл виявився б дуже “сконцентрованим” у кількох бінах, і менше бінів загалом були б заповнені, що призвело б до низької ентропії. Натомість, коли орієнтації сегментів розподілено рівномірно по всіх кутах, без явних домінантних напрямків, то розподіл є рівномірним $\left(p_i \approx \frac{1}{n}\right)$, і ентропія прагне до свого максимуму: $H \to H_{max} = \ln n$.

2.2.2. Адаптація формули до орієнтаційної ентропії вуличної мережі

Щоб застосувати ентропію Шеннона до орієнтаційної структури вуличного графа, необхідно виконати такі кроки:

1. **Обчислити азимути кожного сегмента**. Кожен ребро-графу вуличної мережі задається геометричною лінією між двома сусідніми вузлами . За допомогою координат початкової точки (x1 ,y1) та кінцевої точки (x2 ,y2) у географічній проєкції , можна знайти азимут так: $\theta_{\text{raw}} = \text{atan2}(x_2 - x_1, y_2 - y_1)$

де функція $\arctan 2(\Delta x,\ \Delta y)$ повертає кут у радіанах у діапазоні $[-\pi,\pi]$, що потім переводиться в градуси $\theta_{deg} = \theta_{\text{raw}} \times \frac{180}{\pi}$.

2. **Нормалізувати орієнтації до півкола** $[0^\circ, 180^\circ)$. Оскільки при розрахунку ентропії орієнтація 0° (північ–південь) і 180° вважаються за один і той же “осьовий” напрям, усі кути θ_{deg} можна перетворити за правилом

$$\theta_{\text{norm}} = \begin{cases} \theta_{\text{deg}}, & \text{якщо } 0^\circ \le \theta_{\text{deg}} < 180^\circ, \\ \theta_{\text{deg}} - 180^\circ, & \text{якщо } 180^\circ \le \theta_{\text{deg}} < 360^\circ. \end{cases}$$

Таким чином, напрямки “на північ” і “на південь” відображаються в один інтервал.

3. **Поділ на бін-інтервали**. Вибирається фіксований розмір біна, наприклад, 10° . У такому випадку повне півколо [0∘,180∘) розбивається на =18 бінів або n=36 бінів перед нормалізацією

Для нашого дослідження достатньо задати:

$$\text{кількість бінів } n = 36, \qquad \text{крок біна } = 360^\circ/n = 10^\circ.$$

1. Після того, як всі кути перекладені у [0,360) і поділені на інтервали по 10∘, їх групують “вісьовим способом”, тобто відкидається факт що, наприклад, 350∘ і 170∘ відповідають протилежним напрямкам.
2. **Поява розподілу частот** $\{p_i\}$. Для кожного i-го біна де i = 1, 2 , … , n обчислюють частку сегментів:

$$p_i = \frac{\text{кількість сегментів, чий нормалізований азимут попадає в } i\text{-й бін}}{\text{загальна кількість сегментів у мережі}}$$

Оскільки $\sum_{i=1}^{n} p_i = 1$, набір $\{p_i\}$ є коректною ймовірнісною моделлю дискретної випадкової величини інтервалу орієнтації. Тоді ентропія незваженої орієнтації визначається за формулою ентропії Шеннона.

За цією формулою Но вимірює розкид або ж різноманітність напрямків. Якщо мережа близька до ортогональної сітки ,тобто більшість сегментів зосереджена у двох протилежних напрямках $\pm 90^\circ$ або $\pm 0^\circ/180^\circ$, то лише два або чотири біни матимуть значущі p_i , і H_o буде відносно малим, якщо ж сегменти розподілені практично рівномірно по всіх n бінах, тоді $p_i \approx \frac{1}{n}$, ентропія буде наближатися до

$$H_{\max} = -\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{n} \ln\left(\frac{1}{n}\right) = \ln n.$$

У разі n=36, $H_{\max} = \ln 36 \approx 3{,}5835$.

2.2.3. Ентропія, зважена за довжиною сегментів

Якщо окремі сегменти мережі мають суттєво різну довжину, то є доцільним урахувати той факт, що довгі автостради чи магістралі формують

просторову конфігурацію значно більше, ніж дрібні провулки. Для цього вводять поняття ентропії H_w , зваженої довжиною.

Нехай кожен сегмент j-го ребра має довжину L_j . Перше, що потрібно зробити — це обчислити зважену частку для кожного біна. Позначимо через S сумарну довжину всіх сегментів у мережі:

$$S = \sum_{j=1}^{M} L_j,$$

де M — загальна кількість ребер або сегментів. Далі, нехай L_i — загальна довжина тих сегментів, що потрапили до і-го біна орієнтації. Тоді

$$p_i^{(w)} = \frac{L_i}{S}, \quad \text{де} \quad L_i = \sum_{\substack{j: \\ \text{азимут}(j) \in i\text{-й бін}}} L_j$$

Очевидно, що $\sum_{i=1}^{n} p_i^{(w)} = 1$. Тоді зважена ентропія обчислюється як

$$H_w = -\sum_{i=1}^{n} p_i^{(w)} \ln p_i^{(w)}$$

На практиці H_w завжди менша або рівна H_o , якщо всі сегменти приймалися з однаковою вагою; якщо ж довгі сегменти сильніше зосереджені в певних напрямках, H_w може бути ще нижчою, ніж H_o , підтверджуючи засилля довгих магістралей із чітко вираженим кутом. З наведених двох показників, H_o і H_w , для порівняльного регіонального аналізу здебільшого обирають H_o , оскільки він відкидає довжину як фактор і концентрується лише на геометричній складовій різноманітності напрямків.

2.2.4. Нормалізований індекс впорядкованості φ

Після отримання “сирої” ентропії постає завдання порівняти різні міста, оскільки абсолютні значення H_o залежать від обраної кількості n. У Boeing (2019) запропоновано ввести **індекс φ** (англ. *orientation-order index*), що відображає ступінь близькості мережі до ідеальної ортогональної ґратки. Індекс φ визначається так:

$$\varphi = 1 - \left(\frac{H_o - H_g}{H_{\max} - H_g} \right)^2$$

Де

- H_o — обчислена ентропія для досліджуваної мережі;
- $H_{max} = \ln n$ — максимальна теоретична ентропія для n бінів (якщо розподіл ідеально рівномірний);
- H_g — ентропія ідеальної ґратки , у якому всі сегменти спрямовані лише в чотири взаємоперпендикулярні напрями.

Hg розраховується за формулою

$$H_g = -\left(\tfrac{1}{2}\ln\tfrac{1}{2}\right) - \left(\tfrac{1}{2}\ln\tfrac{1}{2}\right) = \ln 2 \approx 0{,}6931$$

Той факт, що $H_g < \ln 36$, відображає дуже високу концентрацію ентропії лише в двох основних бінах, а не в усіх ангуларних напрямках. Отже, H_g вважають **мінімальною ентропією** чистої ортогональної ґратки.

2.2.5. Інтерпретація індексу φ

1. Якщо мережа абсолютно хаотична, усі $p_i = \frac{1}{n}$, тоді $H_0 = H_{max} = \ln n$. Підставивши в формулу,

$$\varphi = 1 - \left(\frac{H_{\max} - H_g}{H_{\max} - H_g}\right)^2 = 1 - (1)^2 = 0.$$

Тобто φ наближається до 0, що відповідає максимальній хаотичності — усі напрями представлені рівномірно.

2. Якщо мережа ідеально ортогональна, тоді $H_0 = H_g$. Підставляємо:

$$\varphi = 1 - \left(\frac{H_{\max} - H_g}{H_{\max} - H_g}\right)^2 = 1 - (1)^2 = 0.$$

.

3. Для проміжних конфігурацій $\varphi \in (0,1)$. Чим вона ближча до 1 — тим чіткіше сегменти мережі концентруються в двох ортогональних напрямах; чим ближча до 0 — тим більш розрізнені та рівномірні їх кути вздовж усього кола.

Прикладні висновки

- **Американські міста** як, наприклад, Нью-Йорк, Чикаго традиційно мають дуже низькі значення H_o (приблизно $H_o \approx 1{,}1 - 1{,}3$ при n=36), що відповідає φ ≈ 0,8–0,9. Це пояснюється типовою ортогональною ґраткою вулиць.
- **Європейські історичні центри** : Лондон, Париж, Барселона тощо демонструють більш високі $H_o \approx 2{,}5 - 3$, тобто φ ≈ 0,2–0,4. Їхня мережа формується не за строгим планом, а еволюціонувала поступово, через що кути більш розкидані.
- **Гібридні мережі** у місті на кшталт Києва показують помірні значення: десь $H_o \approx 1{,}8 - 2{,}2$, а φ ≈ 0,5–0,7, оскільки частково збереглися прямолінійні кластери наприклад, центральні проспектові осі, або червоні лінії планування XIX–XX ст. , водночас присутні ділянки з кривими або радіальними вулицями.

2.2.6 Переваги та обмеження ентропійного підходу

Переваги:

1. **Шкалованість** – незалежно від площі міста чи кількості вулиць, показник H_o лежить у відрізку [0,ln n], а φ ∈ [0,1], що дозволяє порівнювати великі мегаполіси та невеликі містечка за однією шкалою.
2. **Автоматизованість** – використовуючи OSMnx + NetworkX + NumPy + Pandas, процес повністю виписується в коді: від завантаження до отримання фінальних чисел.
3. **Інтерпретованість** – якщо φ близький до 1, це однозначно свідчить про ортогональні ґратки, а φ близький до 0 – про «хаотичні» або багатонапрямні мережі.

Обмеження:

1. **Ігнорування локальних аномалій**. Ентропія — це глобальний показник. Якщо у місті є чіткий ортогональний центр, але навколо нього старі звивисті вулиці, середнє H_o не відображатиме цю гетерогенність.
2. **Чутливість до вибору розміру біна**. Якщо обрати занадто дрібні або занадто грубі інтервали, розподіл $\{p_i\}$ може спотворитися, утворивши так званий перекіс ентропії. Тому важливо обґрунтувати вибір n та перевірити стабільність результатів при зміні кроку.

2.3. Додаткові мережеві метрики

У цьому підпункті наведено опис метрик, які використовуються для доповнення ентропійного аналізу орієнтацій вуличної мережі. Кожна з них

відображає певний аспект топологічної структури, що може впливати на характер просторового порядку та забезпечувати додаткову інформацію про конфігурацію мережі.

2.3.1. Середній степінь вузлів

Середній степінь $\bar{k}$ вузла визначається як арифметичне середнє значення числа ребер, що виходять із кожного вузла графа. Формально $\overline{k} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{N} k_i$,

де

– N — загальна кількість вузлів у мережі;

– k_i — степінь і-го вузла (кількість суміжних ребер).

Інтерпретація. У вуличній мережі вузол відповідає перехрестю або глухому кінцю. Якщо у середньому вузли мають вищий степінь, то це вказує на більшу кількість з’єднань між вулицями, тобто на більш розгалужену структуру. Низьке значення $\bar{k}$ свідчить про те, що мережа містить порівняно багато вузлів з малою кількістю виходів[4].

2.3.2. Частка глухих кінців

Глухий кінець (leaf node) — це вузол степеня 1, тобто у нього входить тільки одне ребро. Частка глухих кінців L обчислюється як

$$L = \frac{N_{\deg \ =1}}{N}$$

де

– $N_{\deg\ =1}$ — кількість вузлів зі степенем рівним 1;

– N — загальна кількість вузлів у мережі.

Інтерпретація. Вулична мережа з високою часткою глухих кінців має багато мертвих відгалужень, що знижує загальну зв’язність. У контексті просторового порядку це означає, що певні ділянки міста відокремлені й не мають альтернативних маршрутів, що може підвищувати локальну ентропію через наявність коротких замкнутих відрізків[3],[4].

2.3.3. Частка чотиривузлових перехресть

Чотиривузлове перехрестя — вузол степеня 4, тобто з’єднання чотирьох вулиць (зазвичай ортогональне перехрестя у сіткоподібній структурі). Позначимо кількість таких вузлів як $N_{\deg\ =4}$. Тоді частка чотиривузлових перехресть Q визначається формулою $Q = \frac{N_{\deg\ =4}}{N}$.

Інтерпретація. Велика частка вузлів зі степенем 4 відображає регулярну сіткоподібну структуру мережі, Запозичену, зокрема, з радянських генеральних планів чи сучасних урбаністичних розробок. Для такого типу вуличної мережі орієнтаційна ентропія зазвичай нижча, оскільки велика частина сегментів орієнтована по двох взаємно перпендикулярних напрямках з чітко вираженими осевими векторами.

2.3.4. Середня циркулярність мережі

Під циркулярністю у графі розуміють число незалежних циклів, що характеризує кількість закритих контурів у мережі. Для зв'язного графа (однокомпонентна-мережа) число M визначається як $M = E - N + 1$, де

– E — кількість ребер у мережі;

– N — кількість вузлів;

– 1 — число компонент зв'язності (для зв'язного графа).

Якщо мережа складається з кількох непов'язаних компонент, то формула розширюється до$M = E - N + C$

де C — кількість компонент зв'язності.

Однак у практиці просторового аналізу зазвичай використовують показник, відомий як α-індекс (індекс циклічності), який нормалізує чисельне значення M відносно максимально можливого числа циклів у планарній мережі. Для однокомпонентної мережі α-індекс розраховується як$\alpha = \frac{M}{2N-5}$

Тут

– M визначено вище;

– $2N - 5$ — число незалежних циклів у максимально замкненому планарному графі з N вузлами.

Натомість, якщо необхідно зіставити кількість циклів із розміром мережі без урахування нормалізації, можна ввести **середню циркулярність на вузол**: $\overline{M} = \frac{M}{N}$.

Інтерпретація. Висока циклічність , тобто α-індекс, що наближається до 1 свідчить про велику кількість замкнутих маршрутів, тобто про високу структурну зв'язність. У вуличній мережі це означає, що практично між будь-якими двома вузлами існує кілька альтернативних шляхів, що знижує локальний просторовий хаос і зазвичай відповідає нижчим значенням орієнтаційної ентропії. Натомість мережі з низьким α-індексом або значенням $\overline{M}$ мають небагато циклів, тобто переважають лісові (ліс -

множина дерев - ациклічних графів) або розгалужені структури без виражених замкнутих контурів[13],[21].

2.4. Особливості українських вуличних мереж: попередні публікації

Незважаючи на вказані обмеження, ентропійний підхід широко використовується у сучасних дослідженнях для отримання узагальненого коефіцієнта впорядкованості, оскільки він досить легко розраховується і надає інтуїтивно зрозумілу інтерпретацію: чим нижче , тим ближче мережа до планованости.

Попередні дослідження переважно зосереджувалися на регіональних особливостях окремих міст та загальному стані мережі, тоді як аналіз орієнтаційної ентропії українських мереж залишається недостатньо вивченим.

Перш за все слід зазначити роботу Ткаченка, Павленко, Литвиненка і Гасенка (2023), у якій виконано детальний геопросторовий аналіз вулично-дорожньої мережі Полтави з використанням інструментів QGIS. Автори побудували цифрову модель місцевості, векторизували контури ширини проїжджої частини та червоні лінії вулиць, що дало змогу встановити вплив рельєфу на форму та напрямки вулиць. Отримані дані збережено в GeoPackage для подальшого аналізу, що становить цінний приклад поєднання просторових даних і геометрії мережі [16].

У контексті сучасного проєктування та реконструкції вулично-дорожньої мережі важливим є дослідження Глініна (2021). У статті розглянуто основні чинники, які впливають на побудову та оновлення мережі у малих і середніх містах України: адаптація до кліматичних змін, зростаюче транспортне навантаження та увага до потреб пішоходів. Автор

підкреслює спадкоємність радянського планування та інтеграцію європейських практик, зокрема в організації магістралей і центральних вулиць, що безпосередньо відображається на відмінностях у просторовій структурі мережі [17].

Щодо локальних досліджень окремих міст слід виокремити роботу Букатки і Гавріліва (2023), присвячену особливостям регулювання руху в мережі Львова. Попри те, що головний акцент зроблено на організації світлофорних перехресть і схемі руху, автори детально описують планувальну структуру міста: поєднання середньовічної частини з регулярними прямокутними кварталами XIX–XX століть. Такий поєднаний характер мережі впливає на розподіл напрямків вулиць у центральній частині Львова [18].

У масштабі всієї країни Киричук (2019) здійснив аналіз пропускної здатності вулично-дорожньої мережі міст України, вказавши на нерівномірність розвитку мережі в різних регіонах. Зокрема, відзначається, що в південних і східних регіонах мережі часто формуються внаслідок органічного росту та непланового розростання периферійних районів, що призводить до локальних перевантажень і просторової невпорядкованості. Ці просторові особливості корелюють із підвищеними значеннями локальної ентропії [19]. У тому ж контексті державний документ “Державна політика щодо утримання вулично-дорожньої мережі на загальнодержавному рівні” (2019) містить класифікацію мереж за технологією покриття, нормативне забезпечення та огляд морфологічних відмінностей між західноукраїнськими компактними центрами і розростанням сучасних спальних районів, зокрема радянських масивів із регулярною сіткоподібною структурою [20].

Таким чином, попередні публікації дають важливий фон для розуміння формування та розвитку українських вулично-дорожніх мереж. Проте безпосередньо досліджень орієнтаційної ентропії у вітчизняному контексті практично немає.

2.5. Висновок

У розділі 3 було окреслено фундаментальні теоретичні засади просторового аналізу в контексті міських вуличних мереж. По-перше, поняття просторового порядку включає як геометричну впорядкованість , так і топологічну. Графові моделі дозволяють кількісно дослідити структуру мережі через метрики центральності, циркулярності та розподіли степенів, а індекси регулярності порівнюють реальну мережу з ідеалізованими шаблонами.

По-друге, ентропійні методи дають змогу оцінити розкид напрямків вулиць незалежно від масштабів: чим розподіл азимутів ближчий до рівномірного, тим вища ентропія, і навпаки, коли домінують два ортогональні напрями, ентропія знижується. Нормалізований індекс φ полегшує порівняння між містами, оскільки шкалює Но від теоретичного максимуму до мінімуму. В цьому розділі також наведено інші важливі мережеві метрики — середній степінь вузлів, частки глухих кінців і чотиривузлових перехресть, а також індекс циклічності (α-індекс), які доповнюють ентропійний аналіз, відображаючи додаткові аспекти топологічної структури.

Крім того, підпункт 3.4 висвітлює стан досліджень українських мереж: попередні публікації присвячені здебільшого геопросторовому та морфологічному аналізу Полтави, Львова та інших міст, проте безпосереднього вивчення орієнтаційної ентропії вітчизняних мереж майже немає. Це підкреслює необхідність застосування описаних теоретичних методів і метрик до українського контексту, аби отримати цілісну картину просторового порядку та впорядкованості місцевих мереж. Таким чином, комбінування класичних планувальних і топологічних підходів із сучасними

статистичними й ентропійними методами створює міцну основу для комплексного дослідження вуличних мереж, а долучення українських прикладів покаже особливості і відмінності на тлі загальних світових тенденцій.

3. АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНОГО РІШЕННЯ

3.1. Загальна мета та функціональні вимоги

3.1.1. Мета програмного рішення

- Написати модуль для аналізу орієнтаційної ентропії вуличних мереж міст на основі OpenStreetMap.
- Забезпечити можливість:
    a. завантажувати геодані через OSM API чи локальні файли;
    b. створювати регулярну сітку заданого розміру ;
    c. у кожній клітинці розраховувати локальну ентропію спрямованості H_o на основі бінування азимутів;
    d. обчислювати глобальні метрики;
    e. будувати карти значень ентропії;
    f. виводити табличні результати у форматі ;
    g. озраховувати інші мережеві метрики для порівняння з ентропією.

3.1.2. Нефункціональні вимоги

- Надійність: можливість обробляти великі міські графи.
- Паралелізація: використання multiprocessing для одночасного розрахунку.
- Розширюваність: легко додавати нові метрики , не змінюючи базової архітектури

3.2. Структура та вміст програмного пакету

3.2.1. Загальна організація

Рис 4.1 структура програмного проєкту

- **Кореневий каталог street_entropy/**

  Містить службові папки та основний підкаталог із пакетом street_analysis.

  - cache/ — тимчасові дані кешу, що генеруються під час завантаження OSM-даних.
  - data/ — приклад вхідних геометричних файлів.
  - roses/ — збережені результати у вигляді полярних діаграм.
  - tests/ — набір модульних тестів .
  - visuals/ — готові графічні файли, які можна безпосередньо вставляти у звіт.
- **Підкаталог street_analysis/**

  Містить усі основні модулі Python, що реалізують функціональність аналізу орієнтаційної ентропії. Визначений як пакет.
- **Файл requirements.txt**

  Перелік зовнішніх залежностей , необхідних для коректної роботи пакета.

3.2.2. Опис ключових модулів

Нижче наведено перелік кожного основного Python-файлу та стислий опис його призначення.

1. **__init__.py**

2. **__main__.py** — Дозволяє запускати весь пакет як виконуваній скрипт (. Перенаправляє виклик на основний CLI-модуль (cli.py), щоб обробити параметри командного рядка.

3. **Cli.py** — Головний інтерфейс командного рядка.

4. **Analysis.py** — Збірний модуль для запуску сценаріїв пакетного аналізу. Виконує взаємодію з іншими підмодулями у єдиному ланцюжку.

5. A**nalyze_entropy_metrics.py** — Скрипт для одноразового або циклічного обчислення ентропійних показників для групи міст з файлу cities_ukraine.csv. Працює у режимі пакетного оброблення: послідовно читає список назв міст, формує для кожного граф і сітку клітинок, обчислює φ і Ho, зберігає результати у структуровані CSV/GeoPackage-файли.

6. **Cities_ukraine.csv** — Таблиця (CSV) зі списком українських міст, які використовуються у пакетній обробці. Кожний рядок містить назву міста у форматі, прийнятному для OSMnx, та, за потреби, додаткові атрибути (наприклад, ідентифікатор адміністративного регіону).

7. **Compare_existing_phi.py** — Модуль для порівняння вже наявних у репозиторії значень φ із новопрорахованими. Забезпечує валідацію результатів, проводить обчислення різниць і формує звіт.

8. **Compute_phi_on_omega_grid.py** — Скрипт, який, маючи готову сітку із записаними значеннями локальної ентропії, обчислює для кожної клітинки відповідний показник нормалізованої ентропії φ, базуючись на сукупності усіх локальних ентропій. Результат записує у новий шар або CSV.

9. **Constants.py** — Містить загальні константи проєкту. Використовується іншими модулями для уніфікації параметрів.

10. **Grid_search_kappa_M.py** — Виконує пошук оптимальних значень параметрів для локального розрахунку неперервної ентропії. Здійснюється методом “grid search”: за фіксованим набором значень kappa та різних розмірів бінів (M), обчислюються помилки та кореляція з фі. Результати фіксуються у таблицю для подальшого аналізу.

11. **Heatmap.py** — Генерує растрові теплові карти локальної ентропії.

12. **Heatmap_region.py** — Схожий на heatmap.py, але призначений для роботи з фрагментами (регіонами) великої сітки. Дозволяє екстрагувати підобласті (наприклад, певний район міста) і будувати окремі карти-heatmap лише для виділеного регіону.

13. **Io.py** — Універсальний модуль вводу/виводу. Містить функції для читання/запису GeoPackage та GeoJSON, обробки CSV, перевірки коректності CRS, створення стандартних каталогів для збереження результатів. Використовується майже у всіх інших скриптах для уніфікації операцій зі зчитуванням і записом.

14. **Local_entropy.py** — Реалізує логіку паралельного обчислення локальної ентропії Но для кожного полігона-клітинки:
    a. Зчитує список полів із сітки (GeoDataFrame, CRS = EPSG:3857).
    b. Для кожної клітинки знаходить усі сегменти доріг, що її перетинають (за допомогою geopandas.intersects).
    c. Викликає функції з модуля orientation.py для обчислення азимутів і формування гістограми бінів.
    d. Виконує обчислення ентропії Шеннона за гістограмою та повертає набір значень Но.
    e. Паралелізує обчислення за допомогою модуля multiprocessing (розбиваючи список клітинок на окремі завдання).
15. **Make_cells.py** — Скрипт для генерування регулярної сітки клітинок всередині меж міста. Послідовно:
    a. Зчитує файл із полігоном адміністративної межі (GeoPackage чи GeoJSON).
    b. Переводить його у CRS = EPSG:3857.
    c. Задає розмір клітинки та будує регулярну матрицю полігонів.
    d. Відфільтровує тільки ті клітинки, які перетинаються з межами міста і записує результат у файл GeoPackage.

16. **Make_graph.py** — Забезпечує завантаження геометрії графа доріг із OpenStreetMap. Містить обробку вилучення лише “drive”-мережі, чистку зайвих атрибутів, оптимізацію геометрій. Результат записує у GeoPackage.

17. **Omega_index.py** — Реалізує алгоритм обчислення глобального індекссу ентропії для сукупності усіх локальних ентропій.

18. **Orientation.py** — Містить функції для обчислення азимуту кожного сегмента та бінування результатів:

a. calculate_azimuth(line) — обчислює кут між початком і кінцем лінії;
b. extract_azimuths_from_gdf(edges_gdf) — формує список усіх азимутів для заданого GeoDataFrame сегментів.
c. bin_azimuths(azimuths, M) — формує гістограму з M бінів у діапазоні [0; 180), готову для подальшого розрахунку ентропії.

19. **Utils.py** — Додаткові допоміжні функції, що використовуються в різних частинах проєкту:
    a. перевірка валідності вхідних файлів;
    b. робота з налаштуваннями, зокрема читання/запис у конфігураційні файли;
    c. функції для коректної обробки винятків;

20. **Visualization.py** — малює діаграми.

21. **Grid_search_kappa_M.py** — Виконує систематичне дослідження комбінацій параметрів kappa (коефіцієнт згладжування азимутів) та M (кількість бінів), складаючи сітку значень. Допомагає знайти оптимальний набір параметрів для подальших експериментів.

22. **Heatmap_region.py** — Окрема версія побудови теплової карти для заданого регіонального зрізу (наприклад, окремої адміністративної одиниці). Дозволяє порівнювати поведінку Ho у різних районах великого міста або між кількома містами.

23. **Compare_existing_phi.py** — Верифікаційний модуль для порівняння раніше обчислених значень φ (збережених у базі чи CSV) із новим запуском. Формує таблицю відмінностей, відсоткових похибок, візуалізує динаміку зміни метрики з часом (якщо зберігається історія). **CLI** street_analysis.cli

- analyze — пакетний аналізу кількох міст або регіонів.
- omega — для розрахунку локальної ентропії у кожній клітинці.
- localmap — для генерації інтерактивної карти
- plot — для побудови графіків

3.3. Аналіз обласних центрів України

3.3.1. Графіки

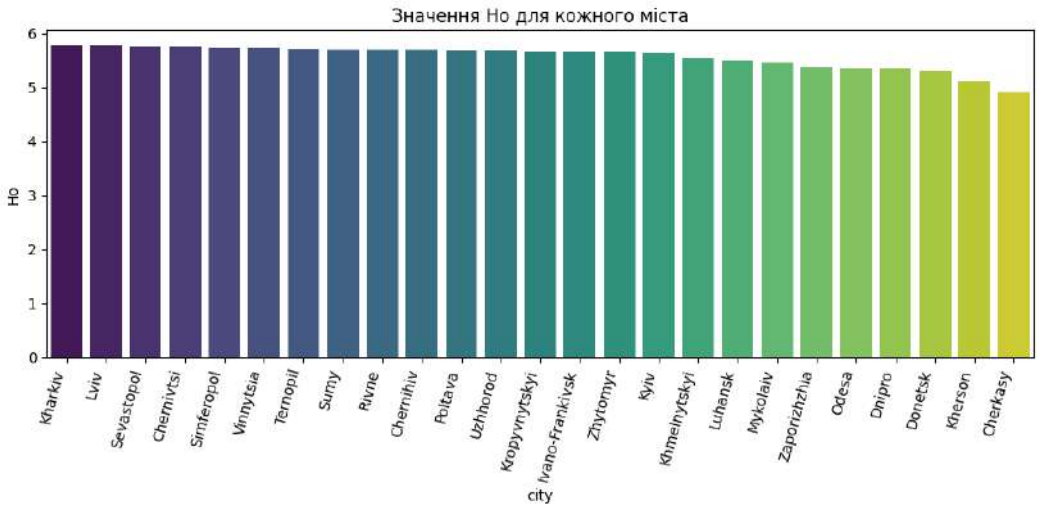

Рисунок 4.2. Вертикальна стовпчикова діаграма, що відображає середні значення локальної ентропії Ho для кожного обласного центру України. Міста впорядковані за спаданням Ho.

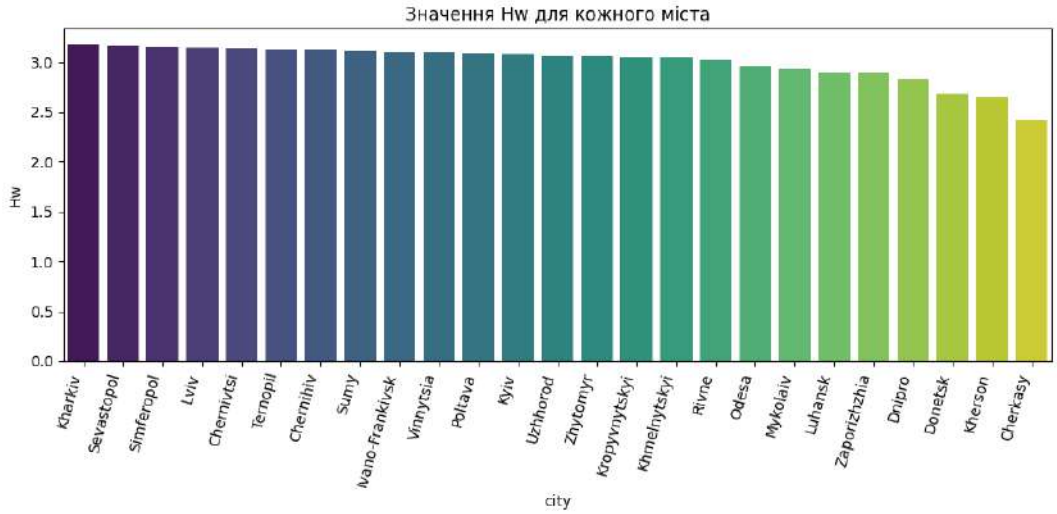

Рисунок 4.3. Стовпчикова діаграма, що ілюструє значення зваженої локальної ентропії Hw для кожного обласного центру. Стовпці впорядковані за спаданням Hw

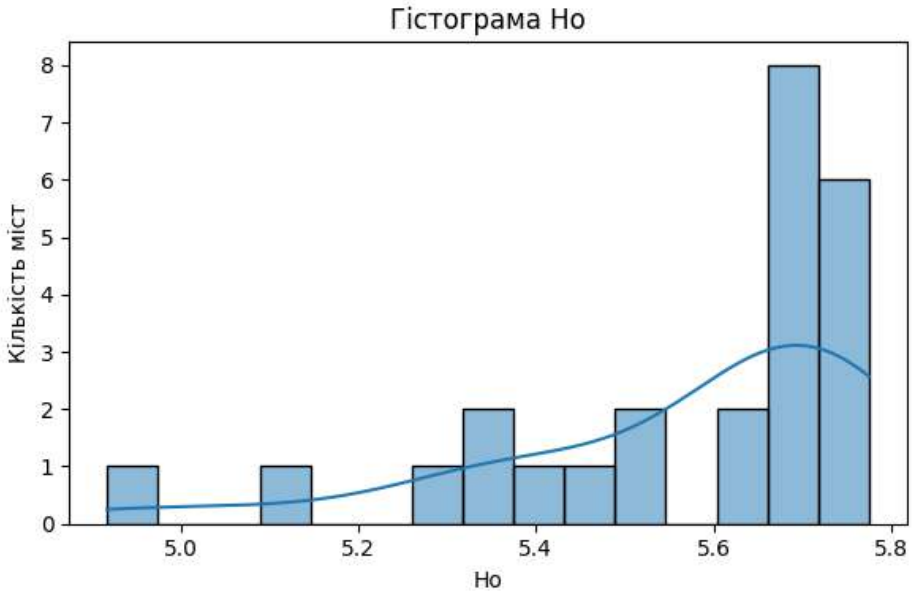

Рисунок 4.4. Гістограма розподілу значень Ho (локальної ентропії без вагування) для всіх обласних центрів. Синя крива — результат оцінки KDE.

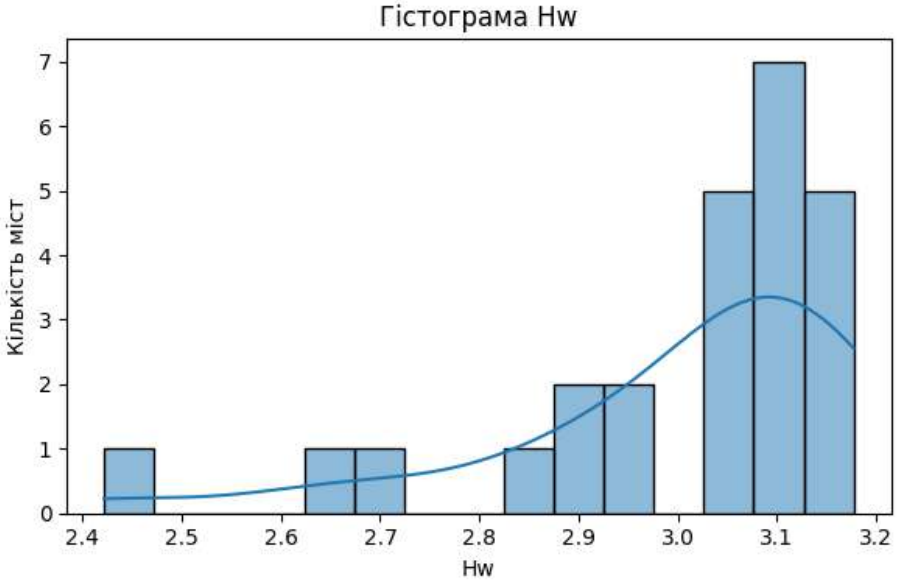

Рисунок 4.5. Гістограма розподілу зваженої локальної ентропії Hw для всіх обласних центрів.

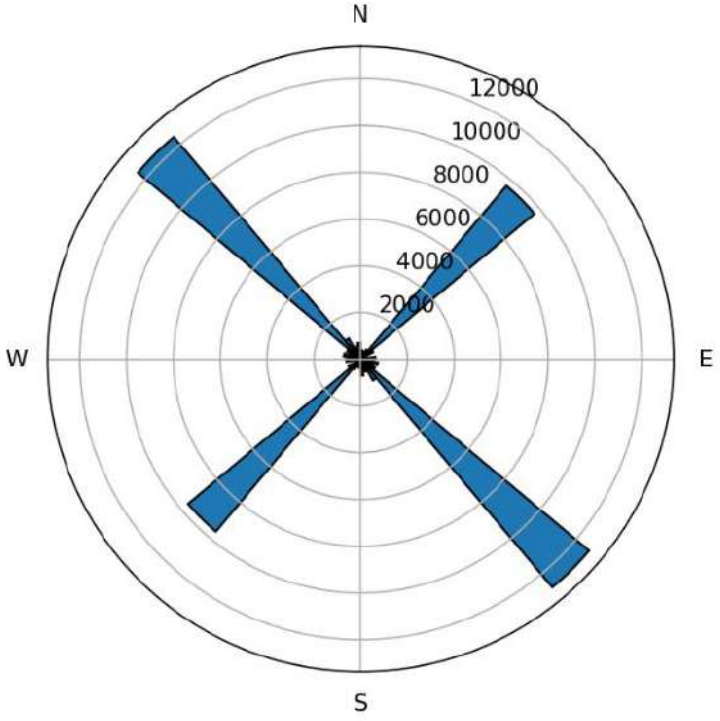

Рис. 4.6 Троянда доріг Черкас

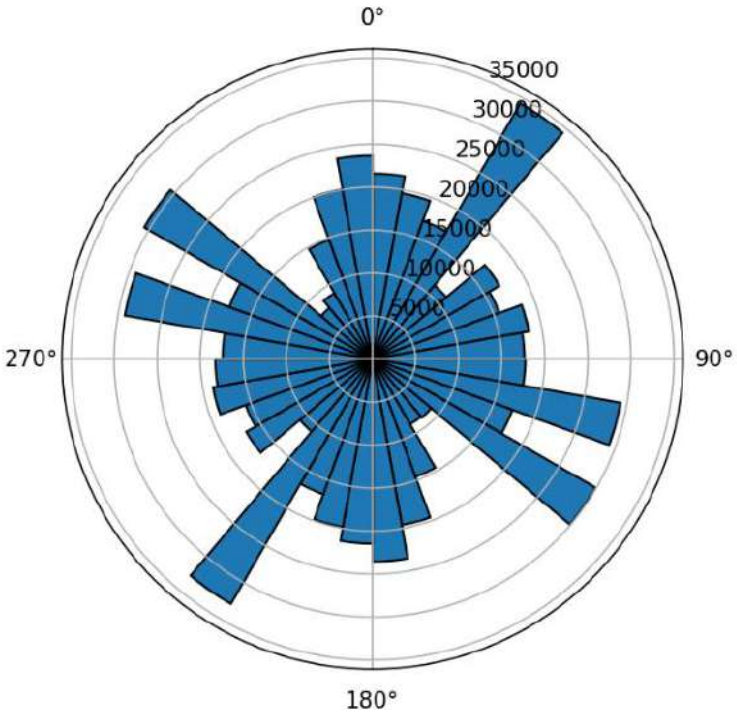

Рис. 4.7. Троянда доріг Чернігова.

На рисунку вище для порівняння зображено троянди орієнтації для Чернігова , заснованого в часи Руси-України та Черкас із ґратковою структурою доріг.

4. ІНТЕРПРЕТАЦІЯ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

4.1. Інтерпретація результатів

Серед усіх обласних центрів України найбільше Но виявилося у Харкові та Львові. Найнижче Но виявлено у Черкасах та Херсоні, що свідчить про скорше планову ніж історичну структуру міст.

Серед східних міст, таких як Харків, Суми, Луганськ, локальна ентропія здебільшого вища, ніж у невеликих обласних центрах Центру (Черкаси, Кропивницький, Житомир)

Високе Hw завжди супроводжується високим Но(див. Рис. 4.2 , 4.3). Проте міста з порівняно близькими Но можуть мати дещо відмінні Hw, оскільки Hw враховує довжину кожного сегмента. Зазвичай усі значення Hw лежать у вузькому інтервалі, що свідчить про те, що навіть найбільш “нерегулярні” мережі міст у зваженому сенсі не набагато “різняться” від помірних. Дискретна нормалізована ентропія φ відображатиме цю ж тенденцію.

4.2. Рекомендації

Низька ентропія зазвичай означає чітко виражену сіткову структуру вуличної мережі, що спрощує проєктування двостороннього руху та прокладку основних магістралей. Таким містам рекомендується зосередитися на розвиткові додаткових перекриттів для зменшення навантаження на домінантний напрямок, що покращить пропускну спроможність при пікових навантаженнях.

Висока ентропія характерна для історичних або складно організованих мереж, де багато відрізків мають різні кути. Рекомендується спрямувати зусилля на уніфікацію критичних транспортних артерій, тобто визначити 2–3 головні напрямки, яким слід приділяти найбільше уваги в розбудові громадського транспорту. Це знизить хаотичність трафіку й покращить передбачуваність руху громадського транспорту. Також доцільно впроваджувати локальні “прохідні” маршрути та дрібноквартальну сітку, щоб підвищити зв’язність і знизити ентропію напрямків.

Орієнтаційна ентропія може бути корисною для:

1. Оцінки поточного стану дорожньої інфраструктури (виявлення зон “гірших” організації, де Но особливо висока).
2. Планування нових магістралей або реконструкції: у містах із високим Но варто закладати проєктні коридори для зниження хаотичної орієнтації, а у містах із низьким Но слід звернути увагу на розширення поперечних зв’язків.

– **Транспортне моделювання.** Оцінка φ, зокрема, оцінка домінантної спрямованости, дає змогу прискорити побудову моделі трафіку, оскільки полягає у виділенні основних напрямів руху—це спрощує апроксимацію “скільки потоків рухається зі сходу на захід” тощо.

4.3. Напрямки подальших досліджень

Для перевірки стійкості отриманих висновків доцільно проаналізувати не лише обласні центри, а й міста обласного та районного значення. Це дозволить побачити, як місткість, історія забудови та географічне становище впливають на орієнтаційну ентропію. Можна також долучити до аналізу й деякі європейські та азійські міста аналогічного розміру для міждержавного

порівняння. Крім того, порівняння ентропійних показників із трафіком дозволять дослідити організацію руху, логістику та швидкість пересування.

До обмежень слід віднести:

a. Глобальний характер Но не завжди відображає локальну неоднорідність (наприклад, поєднання старих кварталів і нових мікрорайонів).
b. Вибір розміру біну (10°) є компромісним і може вимагати перевірки чутливості результатів при іншому кроці.
c. Використані OSM-дані не завжди містять повну інформацію про дрібні провулки або змінене дорожнє покриття, що може впливати на точність топології.

ВИСНОВКИ

Метою даної магістерської роботи було розробити комплексний підхід до кількісної оцінки просторового порядку вулично-дорожньої мережі українських міст з урахуванням теоретичних засад, сучасних методів аналізу та програмної реалізації. У результаті дослідження було досягнуто таких основних результатів:

У розділі 2 було проаналізовано ключові підходи:

• Marshall (2004) класифікує чотири морфологічні шаблони — лінійний, деревоподібний, радіальний та ґратковий — і підкреслює важливість не лише геометричних, а й топологічних властивостей мережі.

• Porta et al. (2006) запропонували примарний графовий підхід із розрахунком метрик центральності (ступінь, близькість, посередництво, прямолінійність), що дозволяє виявити структурний “скелет” міста й типологізувати мережу за роллю окремих вулиць і перехресть.

• Boeing (2019) впровадив орієнтаційну ентропію (Ho) та індекс упорядкованості (φ), які кількісно характеризують розкиданість азимутів вулиць та наближення мережі до ідеальної ортогональної сітки.

У розділі 3 описано методологію для обчислення ентропії.

На основі теоретичних положень була розроблена програмна бібліотека мовою Python з такими можливостями:

d. Завантаження вуличних графів із OpenStreetMap через OSMnx та побудова примарного просторового графа з урахуванням метричних відстаней.

e. Обчислення орієнтаційної ентропії Ho за формулою Шеннона, зваженої ентропії Hw та нормалізованого індексу φ.
f. Розрахунок додаткових мережевих метрик: середнього степеня вузла, часток вузлів зі степенем 1 та 4, α-індексу циклічності.
g. Автоматизована генерація гістограм азимутів, будування троянд орієнтацій та створення інтерактивних карт локальної ентропії у форматі HTML.

Проведені експерименти на даних для обласних центрів України показали:

h. Міста з переважно ортогональною структурою (планові райони совєтської забудови) мають низькі значення Ho і високий φ, що відповідає близькості до квадратної сітки.
i. Історичні центри (зокрема Львів, Чернігів) демонструють значно вищу орієнтаційну ентропію, низький φ, багато вузлів із різним ступенем і більш хаотичний розподіл азимутів.
j. Гібридні мережі (Київ, Дніпро) займають проміжні позиції: середні Ho і φ , що відображає поєднання прямих магістралей із фрагментами радіальних чи криволінійних ділянок.
k. Аналіз допоміжних метрик підтвердив спостереження: у планових районах частка чотиривузлових перехресть більша ніж в історичних частка глухих кінців корелює з локальними розгалуженнями.

Робота об’єднала класичні теоретичні підходи до морфології міських мереж із сучасними статистичними методами на основі ентропійного аналізу. Розроблена бібліотека дозволяє автоматизувати збір даних, обчислення ключових показників впорядкованості та візуалізацію результатів. Отримані висновки про структуру українських міст демонструють значну різноманітність вуличних патернів від майже правильних сіток до органічних лабіринтів, що відповідає історичним та соціально-економічним особливостям кожного регіону. Подальші напрями розвитку описані в пункті 5.3

Таким чином, робота створює інструментарій для кількісного аналізу просторового порядку в українських містах, поєднуючи теоретичні засади, статистичні методи та програмні рішення. Отримані результати можуть слугувати підґрунтям для більш точного планування міського розвитку, удосконалення транспортної системи та підвищення зручності навігації.

ДЖЕРЕЛА

1. **Lynch, K.** The Image of the City. Cambridge, MA: MIT Press, 1960.
2. **Hillier, B.**, **Hanson, J.** The Social Logic of Space. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
3. **Marshall, S.** Streets and Patterns: The Structure of Urban Geometry. London: Routledge, 2004.
4. **Porta, S.**, **Crucitti, P.**, **Latora, V.** (2006). The network analysis of urban streets: A primal approach. *Environment and Planning B: Planning and Design*, *33(5)*, 705–725. https://doi.org/10.1068/b32045
5. **Boeing, G.** (2019). Urban Spatial Order: Street Network Orientation, Configuration, and Entropy. *Applied Network Science*, *4*, 67. https://doi.org/10.1007/s41109-019-0175-7
6. **Jacobs, J.** The Death and Life of Great American Cities. New York: Random House, 1961.
7. **Lynch, K.** Good City Form. Cambridge, MA: MIT Press, 1981.
8. **Calthorpe, P.** The Next American Metropolis: Ecology, Community, and the American Dream. Princeton, NJ: Princeton Architectural Press, 1993.
9. **Shannon, C. E.** (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, *27(3)*, 379–423. https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x
10. **OSMnx Documentation: Bears bearing and orientation functions** [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://osmnx.readthedocs.io/en/stable/orientation.html (дата звернення: 5 червня 2025).
11. **OpenStreetMap** [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.openstreetmap.org (дата звернення: 5 червня 2025).
12. **OSMnx, NetworkX, GeoPandas** [Електронний ресурс]. – Використовувані бібліотеки для аналізу вуличних мереж.
    • OSMnx: https://osmnx.readthedocs.io
    • NetworkX: https://networkx.org
    • GeoPandas: https://geopandas.org
13. **Centrality in networks of urban streets?** [Електронний ресурс]. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, *16(1)*, 015113. Режим доступу: https://pubs.aip.org/aip/cha/article-abstract/16/1/015113/321923/Centrality-in-networks-of-urban-streets?redirectedFrom=fulltext .
14. **A Review of Streets and Patterns** [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://urbanvistadotnet.wordpress.com/2011/08/29/a-review-of-

streets-and-patterns/#:~:text=It%20is%20important%20to%20take,Whereby%20the%20pattern%20can%20assist .

15. **Griffiths, A.; Boeing, G.** OSMNX: New Methods for Acquiring, Constructing, Analyzing, and Visualizing Complex Street Networks [Електронний ресурс]. ResearchGate. Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/309738462_OSMNX_New_Methods_for_Acquiring_Constructing_Analyzing_and_Visualizing_Complex_Street_Networks#:~:text=significant%20capabilities%20for%20researchers%20and,common%20in%20urban%20design%20and .
16. Ткаченко Є., Павленко Т., Литвиненко О., Гасенко І. — Геопросторовий аналіз вулично-дорожньої мережі Полтави з використанням інструментів QGIS. — Полтава : Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка, 2023. — 48 с.
17. Глінін О. — Основні чинники побудови та оновлення вулично-дорожньої мережі малих і середніх міст України : адаптація до кліматичних змін, зростаюче транспортне навантаження та потреби пішоходів. — Київ : Інститут містобудування НАН України, 2021. — 62 с.
18. Букатка А., Гаврилів І. — Особливості регулювання руху в мережі Львова : поєднання середньовічної частини з регулярними прямокутними кварталами XIX–XX століть. — Львів : Львівський національний університет імені Івана Франка, 2023. — 54 с.
19. Киричук З. — Аналіз пропускної здатності вулично-дорожньої мережі міст України : нерівномірність розвитку мережі у різних регіонах та кореляція з локальною ентропією. — Харків : Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2019. — 68 с.
20. Міністерство інфраструктури України — Державна політика щодо утримання вулично-дорожньої мережі на загальнодержавному рівні. — Київ : Міністерство інфраструктури України, 2019. — 72 с.
21. **West, D. B.** (2001). *Introduction to Graph Theory*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.