

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

**Факультет комп'ютерних наук та кібернетики
Кафедра системного аналізу та теорії прийняття рішень**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

за спеціальністю 124 «Системний аналіз»

на тему:

**ЗАДАЧІ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ ІНФРАСТРУКТУРНИХ
РІШЕНЬ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ**

Студента 4 курсу



Галинського Миколи Володимировича

Науковий керівник:

доцент, кандидат фіз.-мат. наук

Доленко Г.О.



Робота заслухана на засіданні кафедри системного аналізу та теорії прийняття рішень та рекомендована до захисту в ДЕК, протокол №10 від 07 червня 2022 р.

Завідувач кафедри системного аналізу та теорії прийняття рішень

професор, доктор фіз.-мат. наук



Наконечний О.Г.

Київ – 2022

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ.....	3
АНОТАЦІЇ	5
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ОПИС МОДЕЛІ ПЛАНУВАННЯ ЗАРЯДНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ. ПРОГНОЗУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ ТА ПОПИТУ НА ПОСЛУГИ ЗАРЯДУ ..	10
1.1 Опис моделі планування інфраструктури зарядних станцій для електромобілів.....	10
1.2 Постановка задач та загальний опис етапів вирішення.....	11
1.3 Прогнозування транспортних потоків та попиту на послуги заряду для електромобілів.....	13
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЬ ТЕОРІЇ ІГОР ДЛЯ РОЗГОРТАННЯ ЗАРЯДНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ.....	19
2.1 Модель конкуренції Курно	19
2.2 Рівновага в конкуренції Курно	23
2.3 Паралельне обчислення для рівноваги Курно	24
2.4 Кількісна оптимальність зарядних установок	27
2.5 Оптимальна стратегія визначення бюджету	31
ВИСНОВКИ	33
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	34
ДОДАТОК А.....	38

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

Умовні позначення:

k – рівень зарядної станції /
установки у відповідності до поділу
таблиці 2.1

i – номер зони поділу

I – кількість зон

m – номер компанії постачальника
послуг заряду для електромобілів

M – кількість компаній-
постачальників послуг заряду для
електромобілів

\mathbf{x}_m – змінна стратегій компанії m

\mathbf{x}_{-m} – змінна стратегій всіх
компаній, окрім m

π_i – базова вартість послуги в зоні i

B_m – бюджет компанії m

S_i – попит на заряд в зоні i

$C_i(\cdot)$ – функція вартості в зоні i

v_i – вартість витрат на будівництво
в зоні i

μ_m – коефіцієнт корисності
відносно часу заряджання для
компанії m

$x_{m,i}$ – змінна стратегій компанії m в
зоні i

θ_i – задає значення часу очікування
відносно попиту S_i в зоні i

\mathbf{f}_m – функція виграшу компанії m

χ_m – множина допустимих значень
стратегій розподілу бюджету
компанії m

E_i^{min} – мінімальне обмеження
кількості зарядних установок в зоні
 i , встановлене органами державної
влади

E_i^{max} – максимальне обмеження
розподільчої мережі зони i

Γ – задача конкурентності Курно

Ψ – множина компаній-
постачальників заряду для
електромобілів

h_m – позначення від'ємної функції
виграшу \mathbf{f}_m

\mathbb{R} – множина дійсних чисел

ρ – параметр керування

Φ : – ρ -регульована функція
Нікайдо-Ізода з $(\chi \times \chi) \rightarrow \mathbb{R}$

U_m – змінна стратегії \mathbf{x}_m для ρ -
регульована функція Нікайдо-Ізода

χ - множина взаємних обмежень
усіх m компаній

τ, ζ – змінні прогнозування для
«прискореної» фіксованої точки

\mathbf{x}^* - вектор рівноваги за Нешем
моделі конкурентності Курно Γ

$F(z)$ – фіксована точка, що
породжує рівновагу Неша

E – одинична матриця

$\vartheta_{i,k}^m$ – двійкова змінна існування
зарядної станції рівня k компанії m
в зоні i

$c_{1,i,k}$ – вартість розгортання
зарядної станції рівня k в зоні i

$c_{1,i,k}$ – вартість розгортання зарядної установки рівня k в зоні i	$\hat{x}_{m,i}$ – бюджет будівництва зарядної станції та зарядних установок в зоні i для компанії m
$n_{i,k}^m$ – кількість зарядних установок рівня k на станції в зоні i для компанії m	$F_{s,t}$ – потік потужності по лінії s, t
ΔT – період часу	f_s – значення потужності у вузлі s
η_i – параметр коригування прибутку	$\xi_{s,t}$ – імпеданс на лінії s, t
r_k – виручка від зарядної установки рівня k	$\xi_{s,t}^*$ - спряжене до $\xi_{s,t}$
c_e – фактична вартість заряду	$l_{s,t}$ – квадрат величини струму на лінії s, t
c_p – штраф за незадоволення попиту на заряд	ζ_s – квадрат потужності у вузлі s
$\lambda_{ВП}^q$ – частка незадоволеного потоку трафіку з «В» в «П» на шляху q	ζ_t – квадрат потужності у вузлі t
S_q – потік транспорту на шляху q	$\bar{L}_{s,t}$ – граничне значення струму по лінії s, t
λ_{ij}^q – частка транспортного потоку на шляху q із зони i в j	ϖ – фазовий кут між зарядною напругою та струмом електромобіля та коефіцієнтом потужності $\cos\varpi$
Λ – множина зон транспортної мережі	$\underline{V}_s / \bar{V}_s$ – верхня/нижня границя потужності у вузлі s
$\hat{\Lambda}_q$ – множина зон розширеної транспортної мережі на шляху q	p_k – зарядна потужність зарядної установки рівня k
\hat{A}_q – множина дуг розширеної транспортної мережі на шляху q	\otimes – добуток Кронекера
Q – множина шляхів	<i>Скорочення та терміни:</i>
$\psi(\cdot)$ – функція зарядної працездатності	AC – Alternating current – змінний струм
$\hat{n}_{i,k}^m$ – це значення максимальної кількості зарядних станцій рівня k в зоні i	DC – Direct current – постійний струм

АНОТАЦІЇ

Дипломна робота складається із вступу, 2 розділів, висновків, списку використаних джерел (33 найменування). Загальний обсяг роботи становить 40 сторінок, основний текст роботи викладено на 23 сторінках.

Ключові слова: електромобілі, зарядна інфраструктура, задачі планування, модель Курно, ринкова конкуренція.

Реферат. Зі збереженням тенденцій популяризації електромобілів серед свідомого населення, збільшенням дальності ходу і скороченням вартості, а також витрат на утримання, електромобілі надалі набувають вдосконалення та поширення, як новий варіант транспорту, що створює чудові можливості для розвитку «розумного міста» з точки зору електрифікації транспорту. Розширюється кількість задач в плануванні розташування, а також потужності зарядних станцій для електромобілів.

Відступаючи від планування глобальної оптимальної мережі зарядних станцій, для забезпечення конкурентної стратегії в майбутньому, в дослідженні пропонується ринковий механізм для проблеми планування розміщення зарядних станцій на більш локальному рівні, на прикладі міста Київ. Представлена діаграма «спрогнозувати – оптимізувати», яка допоможе спрогнозувати попит на заряд для електромобілів на основі вбудованого функціоналу прогнозування «MS Excel» суміжно з іншими обчисленнями та аналізом, а також оптимізувати конкурентоспроможну стратегію розподілу ресурсів для планування розміщення зарядних станцій на рівні бюджету за допомогою економічної моделі ринкової конкуренції Антуана Курно.

Для пошуку рівноваги за моделлю Курно пропонується алгоритм паралельного обчислення з аналізом збіжності. Задача ж кількісної оптимальності полягає в отриманні числа зарядних станцій для кожного з учасників ринку, компаній-постачальників послуг заряду для електромобілів, в кожній із частин міста. Дослідження проводилось з використанням даних

про транспорт в місті Києві та відповідних ключових соціально-економічних показників. Результати показують ефективність запропонованого підходу, який допомагає побудувати корисний прикладний зв'язок між даними та оптимальним плануванням інфраструктури зарядних станцій для електромобілів.

ВСТУП

Завдяки досягненням людства в області технологій за останні 10-15 років, а також стрімкому розвитку та поширенню ідей екологічної свідомості серед суспільства, станом на сьогодні, електротранспорт вже змінив і продовжує змінювати велику кількість аспектів життя людства. При цьому, зі збільшенням дальності ходу і скороченням вартості електромобілів, а також витрат на утримання, вони надалі набувають популярності серед населення. Електрифікація автотранспорту у світі останні роки зростає дуже швидко: близько 6.5 млн. електромобілів було продано протягом 2021 року, понад 9.5 млн. очікується за 2022 [1]. Тобто за рік число зростає на 145%, і це цілком логічно впливає з поточної і запланованої політики провідних високорозвинених країн Північної Америки, Європи та Азії [2][3][4][5]. Постійно постає велика кількість проблем в плануванні інфраструктури для підтримки розвитку цього напрямку «зеленого» транспорту, зокрема в Україні [6][7].

Задачі планування інфраструктури для розташування зарядних станцій електромобілів, можуть бути умовно поділені на дві категорії [8]: у відповідності попиту транспортних потоків та попиту на місце розташування, тобто мається на увазі, що зарядна інфраструктура географічно обслуговує попит різними представленнями, у відповідності потокам та точкам (також – багатокутникам) [9].

Зокрема, відповідність потокам означає, що водії електромобілів шукають зарядні станції під час поїздки від певної початкової точки до пункту призначення, що дозволяє описати попит на заряд моделлю локалізації транспортного потоку [10]. Таким чином, для оцінки розподілу попиту між парами «відправлення-призначення» (ВП) і для визначення розташування зарядних станцій з ціллю максимізації охоплення транспортного потоку застосовується так звана матриця «пункт відправлення – пункт призначення»

[11]. Враховуючи потужність мережі електропостачання, пропонується ємкісна модель алокації заправки потоку, що використовує потоки трафіку ВП для оцінки попиту на заряд електромобілів і застосовує теорію масового обслуговування для визначення локацій розміщення зарядних станцій в мережі інфраструктури [8]. Під відповідністю попиту певним точкам мається на увазі те, що попит спостерігається в різних окремих локаціях, включаючи комерційні та житлові зони, а також місця вздовж доріг і трас, де попит на заряд електромобілів визначається з підрахунку кількості транспорту в межах локації за певний період [12]. Час в дорозі вважається основним фактором корисності системи, за яким метод пошуку націлений на мінімізацію вартості поїздки при максимізації покриття попиту на заряд для електромобілів кількома об'єктами [13].

Однак, без глибинного розуміння транспортних даних і знань, енергетичний сектор має обмежене уявлення цілісної ситуації, що може призвести до провалів в процесі визначення розміщення інфраструктури зарядних станцій для електромобілів. При цьому, оскільки в Україні інфраструктура зарядних станцій практично не підтримується державою, а існує в умовах ринкової конкуренції [14], для стійкого розвитку компаній-постачальників послуг і їхньої спроможності надавати якісні послуги вкрай важливим є впровадження відповідного ринкового механізму, який заохочував би приватний сектор робити подальші інвестиції в інфраструктуру зарядних станцій. Для моделювання конкурентного ринку компаній-постачальників послуг заряду для електромобілів приводиться універсальна модель теорії ігор, при якій кожна компанія націлена на максимізацію прибутку шляхом оптимізації локацій, кількості і вартості послуг, що надаються [15]. Для задачі розміщення зарядних станцій, де враховується конкурентна поведінка, сформована гра перенасичення [16][17]. Крім того, при розгляді запропонованого ринкового механізму, для реалістичності стратегії застосовуються локальні соціально-економічні фактори.

В цілому, основні завдання роботи полягають в:

- Введенні процесу із залучення даних з метою довгострокового оптимального планування інфраструктури зарядних станцій електромобілів для приватного сектору на основі ринкового конкурентного середовища. Ціллю є побудова підходу, що дозволяє спрогнозувати потоки транспорту в довгостроковій перспективі і оптимізувати стратегію інвестування в інфраструктуру для електромобілів.
- Представленні моделі теорії ігор для опису конкуренції між кількома компаніями-постачальниками послуг заряду для електромобілів. Опис математичної моделі, що націлена на розрахунок бюджетів компанії у відповідності кожній із зон, а також на підрахунок кількості зарядних установок для кожної з компаній-постачальників послуг заряду для електромобілів у відповідності кожній окремій зоні, що розглядаються.

РОЗДІЛ 1

ОПИС МОДЕЛІ ПЛАНУВАННЯ ЗАРЯДНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ. ПРОГНОЗУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ ТА ПОПИТУ НА ПОСЛУГИ ЗАРЯДУ

1.1 Опис моделі планування інфраструктури зарядних станцій для електромобілів

Розглядається ситуація, коли певна кількість компаній-постачальників конкурують між собою в задачі розбудови інфраструктури зарядних станцій для електромобілів. Кожна з компаній має обмежений бюджет і націлена на максимізацію своїх потенційних прибутків. Пропонується метод на основі даних, що має на меті максимізацію прибутку власників зарядної інфраструктури для електромобілів, при цьому максимізуються також об'єм витрат на створення цієї інфраструктури, тобто компанії готові вкладати значні суми у розбудову і найвищий рівень якості послуг, а також «дискомфорт» попиту власників електромобілів, який потрібно задовольнити. Як показано на рисунку 1.1, врегулювання питань розгортання зарядної інфраструктури включає діаграму «спрогнозувати – оптимізувати», де прогнозується попит на заряд з попереднім аналізом потенційних транспортних потоків, а також за допомогою моделі теорії ігор оптимізується планування зарядної інфраструктури для електромобілів, зокрема бюджети компаній, що мають на меті інвестування в неї. Також наводиться математична модель оптимізації з метою визначення оптимального значення кількостей зарядних станцій кожного рівня потужності, що враховує вартість електроенергії, баланс потужності розподільчої мережі, обмеження напруги та сили струму тощо.



Рисунок 1.1 – Загальний огляд підходу до планування інфраструктури зарядних станцій для електромобілів

1.2 Постановка задач та загальний опис етапів вирішення кожної із задач

На етапі пошуку та збору даних, транспортні потоки, соціально-економічні дані та опис розподільчої електромережі були взяті з інтернет джерел [18][19][20][21][22] та електронних онлайн сервісів Google Maps [23], PlugShare [24], DTEK Energy Map [25]. Дані зібрані в межах можливостей, адже для проведення більш точних та громіздких досліджень фактично не існує наборів даних в реаліях роботи. На етапі попередньої обробки статистичні дані були зведені у таблиці (Додаток А, ст. 38) з певними допоміжними розрахунками.

На етапі прогнозування, для визначення попиту на заряд для електромобілів, проводиться аналіз транспортних потоків в місті Київ.

Соціально-економічні показники певним чином дають характеристику населенню та його діяльності, що допомагає при більш ґрунтовному підході пошуку можливостей покращення оцінки. Як показує дослідження [26], попит на заряд для електромобілів прямо пропорційний до щоденних транспортних потоків в місті. Таким чином, застосувавши функціонал для роботи з даними програмного додатку «MS Excel» з метою прогнозування транспортних потоків та кількості транспортних засобів, а також, після виконання деяких інших прийомів прогнозування, можна отримати наближену, наскільки це можливо, характеристику майбутніх транспортних потоків, результати якої можна використовувати для оцінки попиту на заряд для електромобілів у місті Київ повсюдно.

На етапі розподілу бюджету, вводиться модель конкурентності Курно, що характеризує конкуренцію в розподілі ресурсів інфраструктури зарядних станцій для електромобілів у відношенні до кожної зони на «ринку». Для кращого розуміння шляху пошуку оптимальної стратегії планування зарядної інфраструктури і відповідного алгоритму пошуку рівноваги за Нешем, наведено теоретичний аналіз моделі теорії ігор і ефективний алгоритм. Результатом буде опис оптимальної стратегії кожної компанії з розподілу коштів бюджету для розгортання зарядної інфраструктури в кожній частині міста.

На етапі оптимального розгортання зарядних станцій для електромобілів, буде розроблена оптимізаційна модель для вирішення проблеми визначення оптимальної кількісної потужності зарядних станцій з урахуванням обмежень локальної розподільної мережі, а також обмежень, що виникають в процесі обслуговування.

1.3 Прогнозування транспортних потоків та попиту на послуги заряду

Набір даних для прогнозування зібраний з різних ресурсів. Основу даних таблиць А.1 та А.2 (Додаток А, ст. 38) складають значення кількості одиниць транспорту за період восьми років (з 2015 по 2022 включно), зібрані в географічно визначених межах території міста Київ. Таблиця А.3 (Додаток А, ст. 39) дає характеристику населення Києва, дані якої будуть застосовані при аналізі транспортних потоків, а А.4 – зображає ціни на житло в різних частинах Києва, що цілком відповідає платоспроможності населення, як один із соціально-економічних показників.

Як вже зазначалось, оскільки попит на заряд для електромобілів прямо пропорційний до щоденних транспортних потоків, то в першу чергу варто побудувати ймовірний прогноз безпосередньо для даних транспортних потоків. Графіки прогнозу на рисунках 1.2 та 1.3 сформовані на основі даних таблиць А.1 та А.2 (Додаток А, ст. 38) відповідно, за допомогою вбудованої функції «Excel» FORECAST.ETS(.). Таким чином, для періоду з 2023 року по 2027 включно функція розраховує майбутні кількісні значення одиниць транспорту на основі ретроспективних даних з відповідних таблиць із застосуванням експоненційного згладжування (ETS) [27][28] і певних закономірностей. Довірчий інтервал проігноровано, адже пріоритетними є чітко визначені числа, хоч і з певною невизначеною похибкою.



Рисунок 1.2 – Прогнозування кількості зареєстрованих транспортних засобів у м. Київ (2023-2027)



Рисунок 1.3 – Прогнозування середньодобової кількості унікальних транспортних засобів на дорогах міста Києва (2023-2027, в тому числі заміських та інших транзитних)

Також, для загального розуміння ситуації на дорогах Києва станом на 2015 рік, на рисунку 1.4 представлена карта інтенсивності пересування індивідуального транспорту. Напрями є зрозумілими: перевантаженими є мости, значна частина центру міста, а також основні під'їзди до столиці, адже третина транспортного потоку міста відноситься до мешканців області [18]. Звісно, відображення завантаженості має усереднений вигляд, адже

сезонність неймовірно впливає на потоки транспорту та затори. Статистично, кілька одночасних випадкових подій, зокрема дорожньо-транспортні пригоди під час зимових снігів в час-пік доводять транспорту систему до і без того критичного стану, затримки і завантаженість зростають в рази.

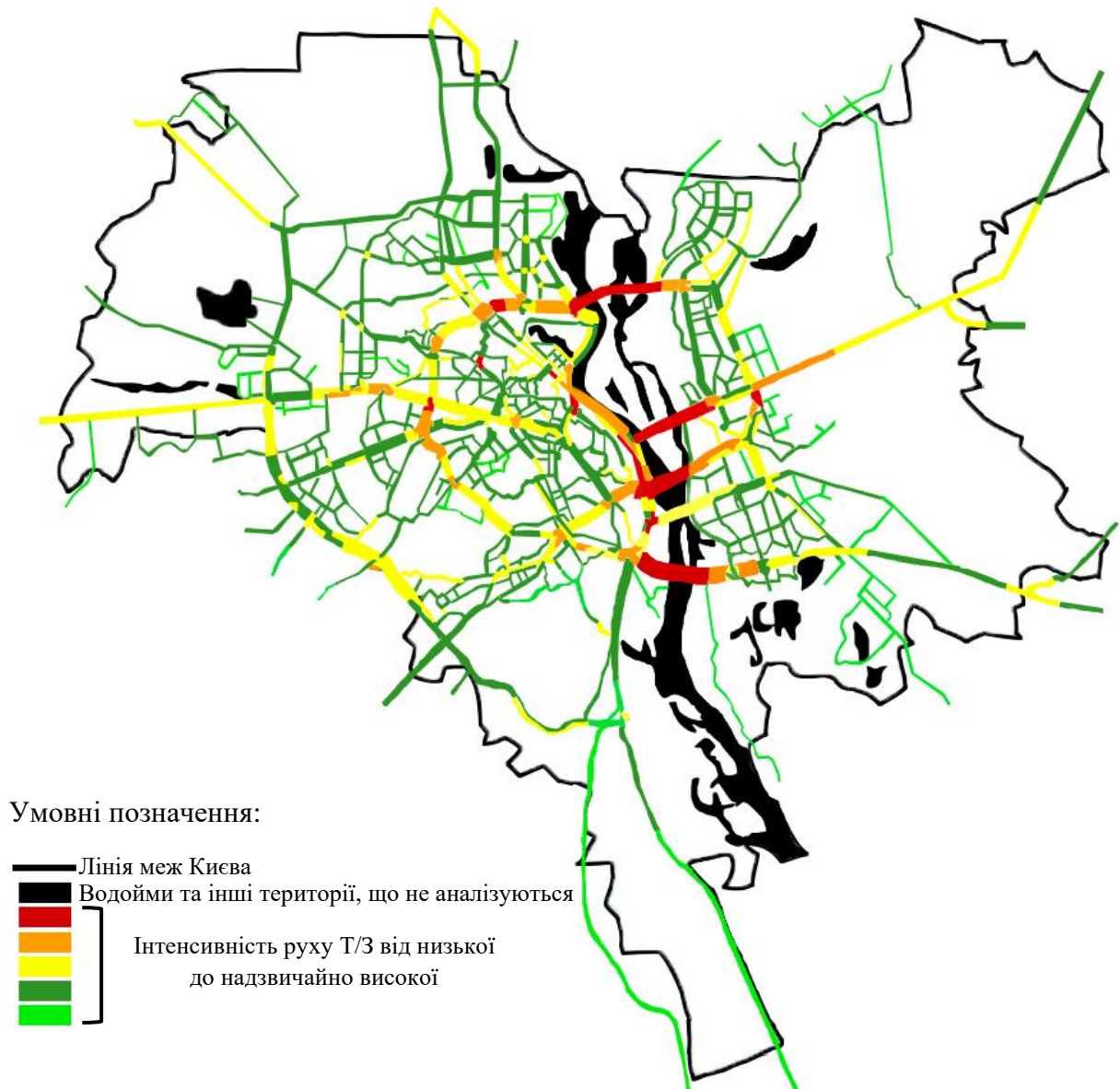


Рисунок 1.4 – Середня завантаженість доріг м. Київ, 2015

Тенденції 2015 року зберігаються і донині. Великою проблемою є те, що дорожньою мережею столиці, яка практично не розбудовується і розрахована на 500 тис. автомобілів, користується вже понад мільйон [18], а також значна забудова сприяє зростанню напруги на дорогах. Проте це не заважає зобразити прогнозовані транспортні потоки у відношенні до просторових та часових

кореляцій транспортних потоків [19][22][23], а також деяких соціально-економічних показників [31], оскільки планування інфраструктури зарядних станцій для електромобілів націлено на встановлення зарядної станції для довгострокової соціальної вигоди. Таким чином, на рисунках 1.5 та 1.6 узагальнено зображені прогнозовані транспортні потоки та зони концентрації транспорту відповідно.

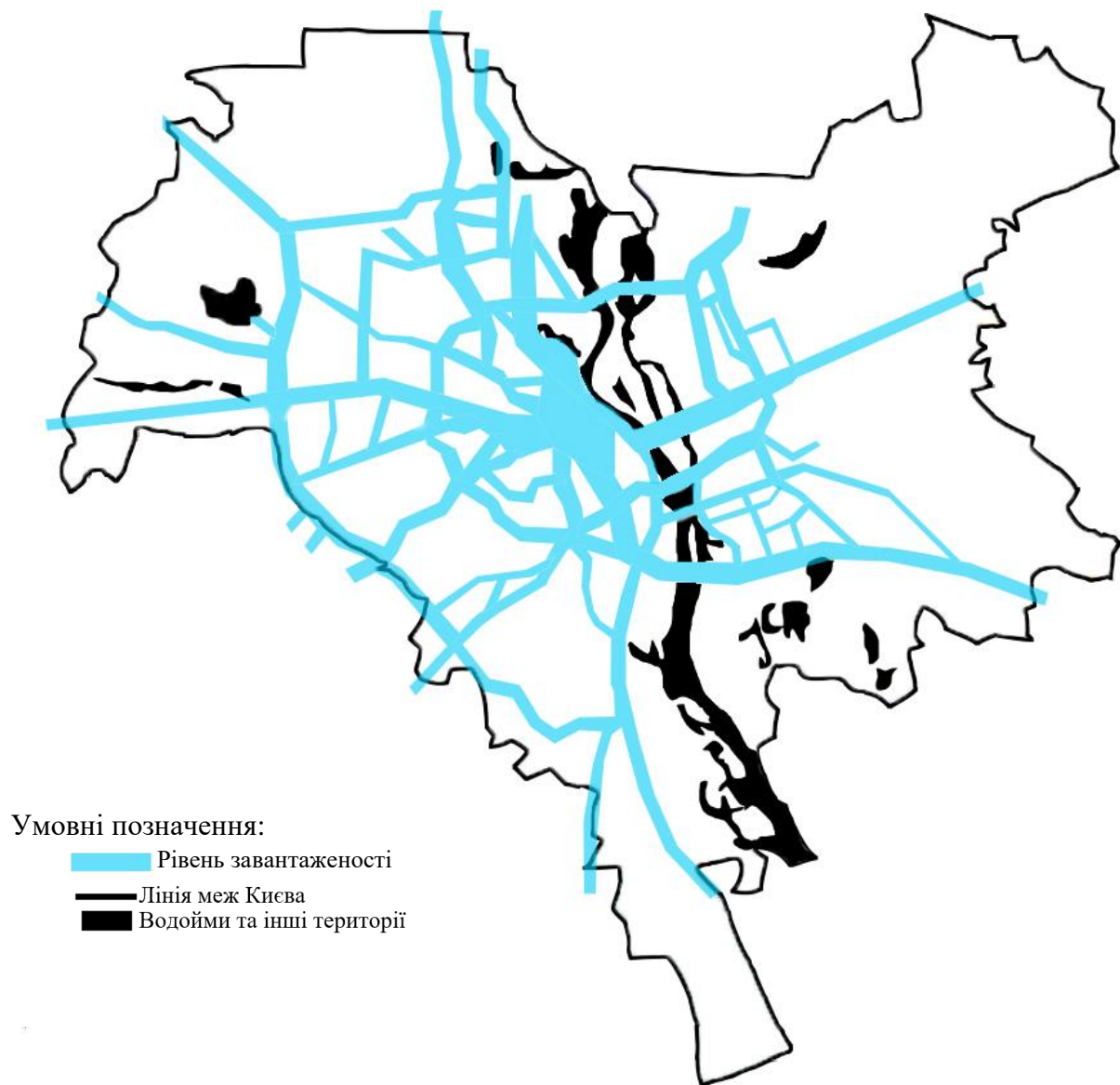


Рисунок 1.5 – Схематичний прогноз завантаженості основних доріг м. Київ

З огляду на провали розвитку транспортної системи Києва останні щонайменше десять років через стрімкий зріст кількості власників транспортних засобів, невдалу політику громадського транспорту [18], а також

невиконання плану побудови нових доріг [22] – очевидним є те, що потоки транспорту навряд чи будуть скорочуватись або ж кардинально змінювати напрями руху. Тому, в силу концентрації автомобілів в межах густонаселених територій Києва, зокрема за зростання щільності нової забудови, справедливо вважати зони з високою щільністю населення також зонами найбільшого попиту на заряд для електромобілів, що проілюстровано на рисунку 1.6 з прив'язкою до рисунку 1.2

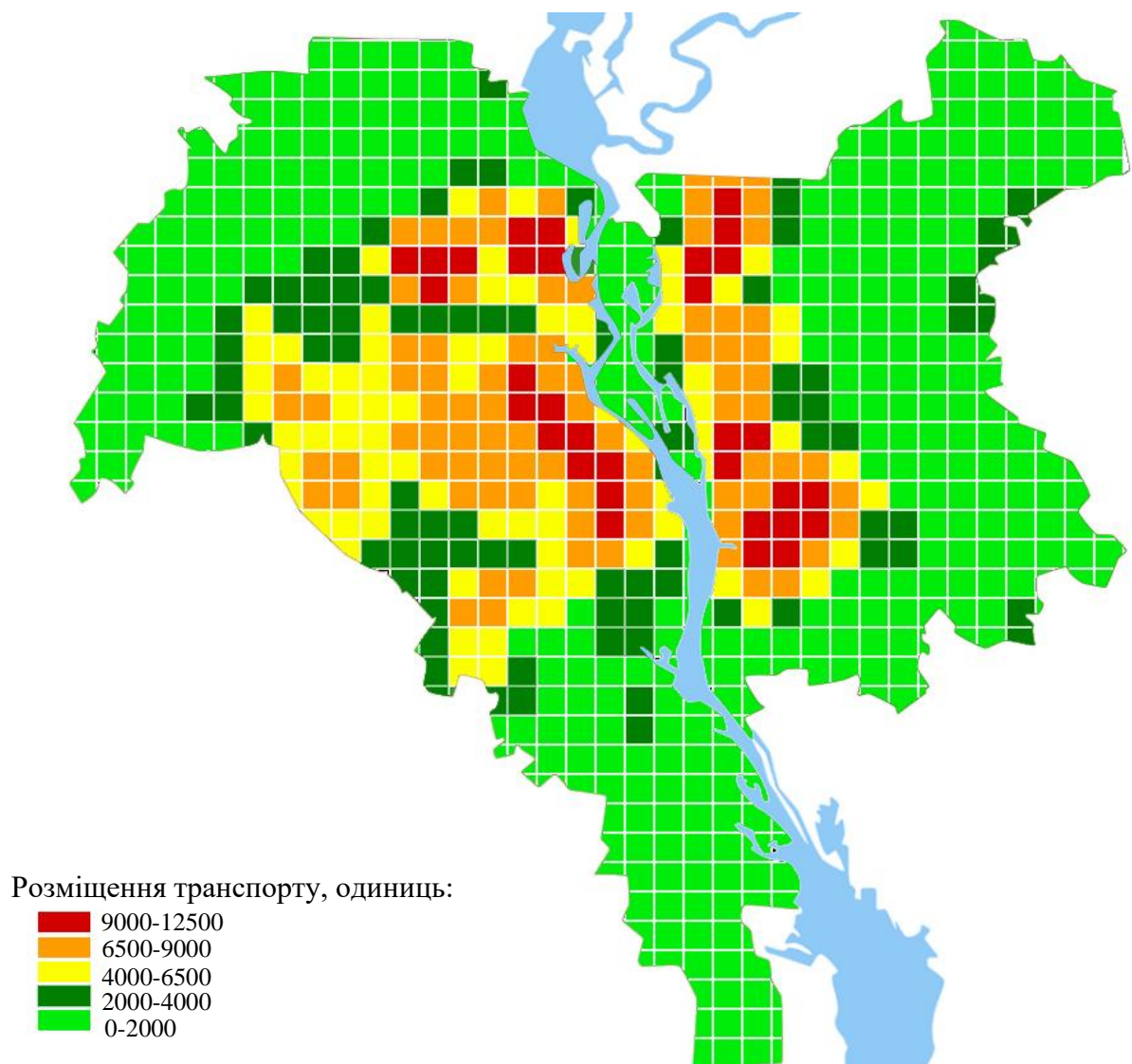


Рисунок 1.6 – Зональність прогнозованого попиту на заряд для електромобілів з прив'язкою до розміщення населення Києва, 2027

Отже, сформоване базове розуміння ситуації на дорогах міста, а також визначення напрямів та зон попиту на заряд для електромобілів в перспективі,

тому доцільним є перехід до побудови та розгляду конкретних завдань вирішення проблем планування інфраструктури зарядних станцій для електромобілів. Зокрема, до формування задач планування зарядної інфраструктури в умовах ринкової економіки: визначення розподілу бюджетів компаній-постачальників послуг заряду, а також до кількісного

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЬ ТЕОРІЇ ІГОР ДЛЯ РОЗГОРТАННЯ ЗАРЯДНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

2.1. Модель конкуренції Курно

Модель використовується для комерційного погляду на розміщення зарядних станцій для кількох компаній, що надають відповідні послуги в місті Київ. Модель вводиться для забезпечення кожної компанії-постачальника оптимальною інструкцією планування, з огляду максимізації прибутку. Задача розміщення інфраструктури зарядних станцій для електромобілів формулюється як гра з розподілу ресурсів між різними компаніями, що конкурують між собою в межах ринкового середовища.

Основні припущення моделі:

- Всі зарядні станції для електромобілів певної компанії ідентичні (одного рівня) і відносяться до класифікації в таблиці 2.1, а також мають термін служби не менше десяти років;
- Процес зарядження не може бути перерваний або зупинений до моменту повного зарядження електромобіля (взято статистично найрозповсюдженіший процес зарядки, що відбувається від показника у 20% до 80%, що, зокрема продовжує термін служби батареї електромобіля);
- Попит на заряд в певній зоні прямо пропорційний потоку транспорту через цю зону.

Таблиця 2.1 – Трирівнева класифікація зарядних станцій

Рівень (k)	Потужність, кВт	Час повного зарядження для батареї ~100 кВт-год, год	Швидкість зарядки, км. пробігу/год	Вартість, \$
1	~7-19, АС	~6-14	~40-100	~500-1500
2	~20-45 АС	~2-5	~120-300	~1200-6000
3	~60 DC	~1.5	~400	~10000-40000

Припустимо, що карта міста поділена на I зон, де M компаній надають свої послуги із заряду для електромобілів на різних рівнях. Оптимальна стратегія планування компанії m в зоні i визначається як

$$\mathbf{x}_m = [x_{m,1}, \dots, x_{m,i}, \dots, x_{m,I}]^T,$$

при цьому всі інші компанії позначені як \mathbf{x}_{-m} . π_i це базова вартість послуги в конкретній зоні i , що визначається за рівнем локального споживання. Бюджет компанії m це B_m . S_i це спрогнозований попит на заряд в зоні i , при цьому $C_i(\cdot)$ – відповідна функція встановлення зарядної станції (у вартість входять витрати на будівництво та якість обслуговування).

Основні інвестиції в зарядну станцію складаються з фіксованих витрат на її встановлення і на користування земельною ділянкою. Таким чином, ці показники пропорційні середнім показникам вартості нерухомості та комерційної активності зони i , що можна представити як $v_i x_{m,i}$. v_i це значення витрат на будівництво, включно з вартістю ділянки, витратами на встановлення і оплатою праці в i -й зоні.

Вища якість послуг завжди потребує більших інвестицій. Показник якості послуг в напрямку надання послуг заряду для електромобілів включає в себе швидкість зарядження і, відповідно, скорочення часу очікування. Час зарядження залежить від потужності зарядної станції, тобто значення

$-\frac{1}{\mu_m}x_{m,i}^2$ [21], де μ_m – коефіцієнт корисності. Час очікування залежить від довжини черги, яка значною мірою пропорційна попиту в зоні i . Таким чином, якість послуг може бути представлена у вигляді

$$-\frac{1}{\mu_m}x_{m,i}^2 + \theta_i S_i x_{m,i},$$

де θ_i – задає значення часу очікування відносно попиту S_i . Кінцева функцію вартості задається як

$$C_i(x_{m,i}) = -\frac{1}{\mu_m}x_{m,i}^2 + (v_i + \theta_i S_i)x_{m,i}. \quad (1)$$

Задача 1 (Модель теорії ігор). Для проблеми планування у відношенні кожної компанії m формулюється модель конкурентності Курно.

$$\max_{x_m} \mathbf{f}_m(\mathbf{x}_m, \mathbf{x}_{-m}) = \quad (2)$$

$$= \sum_{i=0}^I \left\{ \pi_i \left(1 - \frac{x_{m,i} + \sum_{i=0, j \neq m}^M x_{j,i}}{S_i} \right) x_{m,i} - C_{m,i}(x_{m,i}) \right\},$$

ТАКИМ ЧИНОМ,

$$\chi_m = \{ \mathbf{x}_m \mid \sum_{i=1}^I x_{m,i} \leq B_m, \quad (3)$$

$$E_i^{min} \leq \sum_{m=1}^M x_{m,i} \leq E_i^{max}, \quad (4)$$

$$0 \leq x_{m,i} \}. \quad (5)$$

У виразі (2) функція виграшу кожної компанії m націлена на максимізацію покриття попиту для отримання максимального прибутку при мінімальних витратах. Конкуренція Курно введена, щоб зобразити конкурентність між компаніями-постачальниками. Вона також допомагає показати, що індивідуальна вигода компанії зменшуватиметься, якщо багато учасників ринку сконцентрують велику кількість фінансових ресурсів в одній зоні. Варто зауважити, що ця модель Курно допускає кількох «гравців», що

може призвести до множинної рівноваги Неша. Вираз (3) є обмеженням бюджету кожної компанії для усіх зон міста. B_m – це бюджет компанії m для всього міста. У виразі (4) E_i^{min} – це значення мінімальної кількості зарядних станцій, що встановлене органами державної влади, E_i^{max} – обмеження пропускної спроможності локальної мережі дистрибуції. Підходящими для E_i^{min} та E_i^{max} є цілі значення, однак, вони можуть спричинити відсутність рівноваги Неша. Великі об'єми попиту на заряд для електромобілів можуть потенційно погіршити стабільність потужності системи і спричинити дисбаланс вольтажу, що у свою чергу значним чином повпливає на енергосистему негативним чином. Для цього і варто вводити вищезгадані обмеження, щоб забезпечити надійність системи в кожній із зон i . Останній ж вираз (5) забезпечить невід'ємну стратегію розгортання інфраструктури.

Задача оптимізації для кожної компанії-постачальника формулюється у вигляді моделі теорії ігор конкурентності Курно таким чином, що кожна компанія намагається обрати оптимальне планування зарядної інфраструктури, при цьому максимізувавши свою вигоду

$$\Gamma = \left\{ \Psi, \{\chi_m\}_{m \in \Psi}, \{f_m(\mathbf{x}_m, \mathbf{x}_{-m})\}_{m \in \Psi} \right\} \text{ так, що:}$$

- компанії (гравці) належать множині Ψ ;
- множина стратегій $\chi_m \forall m \in \Psi$ – непорожня, компактна, випукла;
- функція виграшу $f_m(\mathbf{x}_m, \mathbf{x}_{-m}) \forall m \in \Psi$ показана в (7).

Визначення 1 (Стратегія оптимального планування): Розглянемо модель теорії ігор конкуренції Курно планування зарядної інфраструктури для електромобілів

$$\Gamma = \left\{ \Psi, \{\chi_m\}_{m \in \Psi}, \{f_m(\mathbf{x}_m, \mathbf{x}_{-m})\}_{m \in \Psi} \right\},$$

де $f_m(\mathbf{x}_m, \mathbf{x}_{-m})$ і χ_m визначені в (7) і (3)-(5) відповідно. Вектор $\mathbf{x}^* = (\mathbf{x}_m, \mathbf{x}_{-m})$ це рівновага за Нешем конкурентної моделі Курно Γ , при цьому жоден із

гравців не зможе отримати більше вигоду шляхом зміни своєї теорії, тоді і тільки тоді, коли виконується наступна нерівність:

$$\mathbf{f}_m(\mathbf{x}_m^*, \mathbf{x}_{-m}^*) \leq \mathbf{f}_m(\mathbf{x}_m, \mathbf{x}_{-m}^*) \forall m \in \Psi. \quad (6)$$

Отже, маємо: оптимальна стратегія планування для кожної компанії-постачальника це бюджет, що виділений на будівництво зарядної станції для електромобілів в кожній із зон міста.

2.2 Рівновага в конкуренції Курно

В цілому, рівновага Неша моделі конкуренції Курно означає, що жодна компанія-постачальник не зможе отримати більшої вигоди за рахунок зміни своєї стратегії «розгортання», що і є рівновагою конкурентності Курно. Перш ніж описати алгоритм паралельного обчислення, необхідно визначити існування рівноваги конкурентності Курно у відношенні моделі.

Теорема 1: Якщо $4 \left(\frac{\pi_i}{S_i} - \frac{1}{\mu_m} \right) \geq \frac{1}{I-1} \sum_{j=2}^I \frac{\pi_i}{S_i}$ справджується для всіх $i = 1, 2, \dots, I$ і $m = 1, 2, \dots, M$, тоді для моделі існує рівновага конкурентності Курно.

Доведення: Для перевірки випуклості всіх функцій виграшу, мінімізуємо від'ємні функції виграшу кожної компанії наступним чином

$$h_m = - \sum_{i=0}^I \left\{ \pi_i \left(1 - \frac{x_{m,i} + \sum_{i=0, j \neq i}^M x_{j,i}}{S_i} \right) x_{m,i} - C_{m,i}(x_{m,i}) \right\}, \quad (7)$$

що дає нам матрицю Гесе у вигляді

$$\nabla^2 h_m = \begin{bmatrix} 2\left(\frac{\pi_1}{S_1} - \frac{1}{\mu_m}\right) & \frac{\pi_2}{S_2} & \dots & \frac{\pi_I}{S_I} \\ \frac{\pi_2}{S_2} & 2\left(\frac{\pi_2}{S_2} - \frac{1}{\mu_m}\right) & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\pi_I}{S_I} & \dots & \dots & 2\left(\frac{\pi_I}{S_I} - \frac{1}{\mu_m}\right) \end{bmatrix}.$$

Оскільки матриця Гесе $\nabla^2 h_m$ додатна,

$$4\left(\frac{\pi_i}{S_i} - \frac{1}{\mu_m}\right) \geq \frac{1}{I-1} \sum_{j=2}^I \frac{\pi_j}{S_j} \quad (8)$$

$\forall i (i = 1, 2, \dots, I), \forall m (m = 1, 2, \dots, M)$. Таким чином, за істинності (8), усі функції виграшу – сильно випуклі, що і забезпечує існування рівноваги конкурентності Курно. ■

2.3 Паралельне обчислення для рівноваги Курно

Коли місто поділено на велику кількість зон, модель конкурентності Курно для розгортання інфраструктури зарядних станцій для електромобілів потребує ефективного алгоритму розрахунку. Для пошуку рівноваги конкурентності Курно розглядається паралельна динаміка найкращого відклику за допомогою функції Нікайдо-Ізода [33]. Спочатку, визначається ρ -регульована функція Нікайдо-Ізода $\Phi: (\chi \times \chi) \rightarrow \mathbb{R}$, як

$$\Phi: (\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{j=1}^M (\mathbf{f}_m(\mathbf{x}_m, \mathbf{x}_{-m}) - \mathbf{f}_m(\mathbf{y}_m, \mathbf{x}_{-m}) - \frac{\rho}{2} \|\mathbf{x}_m - \mathbf{y}_m\|^2), \quad (9)$$

де $\chi = \prod_{m=1}^M \chi_m$ – взаємні обмеження компаній,

$$\mathbf{y}_m = [y_{m,1}, \dots, y_{m,i}, \dots, y_I]^T \in \chi.$$

Ця функція рівномірно увігнута по \mathbf{y}_m при фіксованому $\rho \geq 0$.

Точка $\mathbf{x} \in \chi$ є нормалізованою рівновагою Неша для моделі конкурентності Курно (7), якщо справджується $\min_{\mathbf{y} \in \chi} \Phi(\mathbf{x}^*, \mathbf{y}) = 0$.

Алгоритм 1. Прискорена динаміка найкращого відклику для рівноваги конкурентності Курно:

1. **for** $\forall m \in \{1, 2, \dots, M\}, \forall i \in \{1, 2, \dots, I\}$ **do**
 - a. ініціалізується стратегія $\mathbf{x}_{m,i}$ розгортання зарядної інфраструктури для електромобілів;
 - b. у випадковому порядку ініціалізується $\mathbf{y}_{m,i}$;
2. **end for**
3. $n = 1$;
4. **while** $\|\mathbf{x} - \mathbf{y}\| \leq \epsilon$ **do**
 - a. найкращий відклик кожної компанії m : паралельно обчислювати $\mathbf{y}_m = \underset{\mathbf{y}_m \in \chi}{\operatorname{argmin}} \Phi(\mathbf{x}_m^*, \mathbf{y}_m)$;
 - b. нова стратегія планування зарядної інфраструктури визначається як
$$\mathbf{x}(n+1) = \mathbf{x}(n) + \tau(\mathbf{y} - \mathbf{x}(n)) - \zeta(\mathbf{x}(n) - \mathbf{x}(n-1)); \quad (10)$$
5. $n++$;
6. **end while**
7. результат: оптимальна стратегія розрахунку бюджету \mathbf{x} для всіх компаній-постачальників послуг заряду для електромобілів.

Отже, алгоритм, що відповідає динаміці найкращого відклику може бути зображений як випукла комбінація найкращого відклику \mathbf{y} і поточної стратегії $\mathbf{x}(n)$ наступним чином:

$$\begin{cases} \mathbf{y} := \underset{\mathbf{y}_m \in \chi}{\operatorname{argmin}} \Phi(\mathbf{x}^*, \mathbf{y}), \\ \mathbf{x}(n+1) = \tau \mathbf{x}(n) + (1 - \tau) \mathbf{y}, \end{cases} \quad (11)$$

де $\tau \in [0, 1)$ введено для пошуку нової стратегії найкращого відклику \mathbf{x} на ітерації $n + 1$. Динаміка найкращого відклику (11) може бути пояснена як фіксована точка, що відповідає $\mathbb{F}(\mathbf{z}) = \mathbf{y} - \mathbf{x}$ і породжує нормалізовану рівновагу Неша.

Як відомо з джерел [32], звичайний алгоритм, що базується на динаміці найкращого відклику, призводить до лінійної швидкості збіжності для знаходження нормалізованої рівноваги Неша. Для цього необхідна прискорена стратегія на рівні алгоритму, де метод імпульсу застосовується для прискорення динаміки найкращого відгуку в Алгоритмі 1. Таким чином, можна отримати аналіз збіжності Алгоритму 1.

Теорема 2: Якщо параметри передумови τ і ζ фіксованої точки для (10) задовольняють

$$\tau = \left(\frac{2}{\sqrt{\lambda_{\max}(\partial F(\mathbf{x}^*))} + \sqrt{\lambda_{\min}(\partial F(\mathbf{x}^*))}} \right)^2, \quad (12)$$

$$\zeta = \left(\frac{\sqrt{\lambda_{\max}(\partial F(\mathbf{x}^*))} - \sqrt{\lambda_{\min}(\partial F(\mathbf{x}^*))}}{\sqrt{\lambda_{\max}(\partial F(\mathbf{x}^*))} + \sqrt{\lambda_{\min}(\partial F(\mathbf{x}^*))}} \right)^2, \quad (13)$$

де $\lambda_{\max}(\cdot)$ і $\lambda_{\min}(\cdot)$ відповідно найбільше і найменше власні значення матриці відповідно до субградієнту

$$\partial F(\mathbf{x}^*) = \nabla \mathbf{y}^T(\mathbf{x}^*) - E \quad (14)$$

в місці рівноваги конкурентності Курно \mathbf{x}^* . E – одинична матриця відповідної розмірності. Тоді Алгоритм 1 може бути сверхлінійно збіжний до конкурентної рівноваги Курно.

Доведення: З огляду на нову динаміку найкращого відклику, фіксована точка (11) прискорюється імпульсом. Зауважимо, що $\zeta(\mathbf{x}(n) - \mathbf{x}(n-1))$ включає в себе диференціальний оператор, що є наближенням градієнту $\partial_{\mathbf{x}} F(\cdot)$. Таким чином, градієнт виглядає як

$$\nabla \mathbf{y}^T(\mathbf{x}^*) = G^{-1}H - G^{-1}J(J^T G^{-1}J)^{-1}J^T G^{-1}H,$$

$$\text{де } G := -\nabla_{\mathbf{y}\mathbf{y}}^2 \Phi(\mathbf{x}, \mathbf{y}(\mathbf{x})) = 2 * A \otimes E^M + \rho E^{IM},$$

$$H := \nabla_{\mathbf{x}\mathbf{y}}^2 \Phi(\mathbf{x}, \mathbf{y}(\mathbf{x})) = \rho B \otimes E^M,$$

$$J := \nabla g(\mathbf{y}(\mathbf{x})),$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\pi_1}{S_1} - \frac{1}{\mu_m} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{\pi_2}{S_2} - \frac{1}{\mu_m} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \frac{\pi_I}{S_I} - \frac{1}{\mu_m} \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\pi_2}{S_2} & \dots & \frac{\pi}{S_I} \\ \frac{\pi_2}{S_2} & 0 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\pi_I}{S_I} & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}.$$

\otimes – добуток Кронекера, $g(\mathbf{y}(\mathbf{x})) \leq 0$ – набір обмежень виразів (3)-(5). Відповідно до методу важкого шарика, в (12)-(13) наведено оптимальні передумови для покрокового покращення (10) з метою прискорення динаміки найкращого відклику.

2.4 Кількісна оптимальність зарядних установок

Маючи стратегію оптимального розподілу бюджету для кожної зони, далі розглядається оптимізаційна модель пошуку числа зарядних станцій для електромобілів з метою визначення оптимального значення кількостей зарядних станцій кожного рівня потужності.

Відповідно до розподілу в таблиці 2.1 існує три рівня потужності для зарядних станцій. За $\vartheta_{i,k}^m$ позначено двійкову змінну, що визначає, чи існує зарядна станція рівня k ($k \in \{1,2,3\}$) в зоні i . Тобто, значення $\vartheta_{10,2}^m = 1$ визначає існування зарядної станції рівня 2 в зоні 10 для компанії m . Вартість розгортання зарядної станції відповідає її рівню в таблиці 2.1. $c_{1,i,k}$ – вартість розгортання зарядної станції рівня k в зоні i . $c_{2,i,k}$ – вартість розгортання зарядної установки рівня k в зоні i . $n_{i,k}^m$ – цілочисельна змінна, що відповідає числу зарядних установок рівня k на станції в зоні i для компанії m .

Задача 2 (Оптимальна потужність). Для максимізації прибутку кожної зони в місті шляхом підрахунку кількості різних типів зарядних станцій для оптимізації потужностей зарядних станцій, представлена наступна модель алокації заправки потенційних транспортних потоків. Вона виглядає як:

$$\max_{\{\vartheta_{i,k}^m, n_{i,k}^m\}} \left\{ \sum_{m \in \Psi} \sum_{i \in \Lambda} \sum_{k=1}^3 (\Delta T \eta_i (r_k - c_e) p_k n_{i,k}^m - c_{1,i,k} \vartheta_{i,k}^m - c_{2,i,k} n_{i,k}^m) - \sum_{q \in Q} c_p \lambda_{\text{ВП}}^q S_q \right\} \quad (15)$$

з обмеженнями:

$$\sum_{\{j|(i,j) \in \hat{A}_q\}} \lambda_{ij}^q - \sum_{\{j|(j,i) \in \hat{A}_q\}} \lambda_{ji}^q = \begin{cases} 1, & i = \text{В} \\ -1, & i = \text{П} \\ 0, & i \neq \text{В, П} \end{cases}$$

$$\forall q \in Q, \forall i \in \hat{\Lambda}_q \quad (16)$$

$$\lambda_{ij}^q \geq 0, \forall q \in Q, \forall (i,j) \in \hat{A}_q, \quad (17)$$

$$\sum_{q \in Q} \sum_{\{j|(j,i) \in A_q\}} T_q \lambda_{ji}^q \leq \sum_{m \in \Psi} \sum_{k=1}^3 \psi(n_{i,k}^m) \quad \forall i \in \Lambda, \quad (18)$$

$$n_{i,k}^m \leq \vartheta_{i,k}^m \hat{n}_{i,k}^m \quad \forall i \in \Lambda, k \in \{1,2,3\}, \quad (19)$$

$$\sum_{k=1}^3 (c_{1,i,k} \vartheta_{i,k}^m + c_{2,i,k} n_{i,k}^m) \leq \hat{x}_{m,i}, \quad (20)$$

$$F_{s,t} = f_s + \sum_{u \in U_{\rightarrow s}} (F_{u,s} - \xi_{u,s} l_{u,s}), \quad (21)$$

$$0 = f_0 + \sum_{u \in U_{\rightarrow 0}} (F_{u,0} - \xi_{u,0} l_{u,0}), \quad (22)$$

$$\varsigma_s - \varsigma_t = 2 \text{Re}(\xi_{s,t}^*) - |\xi_{u,s}|^2 l_{s,t}, \quad (23)$$

$$|F_{s,t}|^2 \leq l_{s,t} \varsigma_s, \quad (24)$$

$$l_{s,t} \leq |\bar{\Lambda}_{s,t}|^2, \quad (25)$$

$$|\underline{V}_s|^2 \leq \varsigma_s \leq |\bar{V}_s|^2, \quad (26)$$

$$f_s = -f_s^{EV} - f_s^B, \quad (27)$$

$$f_s^{EV} = p_s^{EV} + J \tan \varpi p_s^{EV}, \quad (28)$$

$$p_s^{EV} = \sum_{m \in \Psi} \sum_{i \in \Lambda_s} \sum_{k=1}^3 p_k n_{i,k}^m, \quad (29)$$

$$n_{i,k}^m \in \mathbb{Z}, \vartheta_{i,k}^m \in \{0,1\} \forall i \in \Lambda, k \in \{1,2,3\}, \quad (30)$$

де період часу ΔT в годинах підраховано в (44), з огляду на середній термін служби зарядної установки для електромобілів, що складає 10 років.

$$\Delta T = 10 * 365 * 24 = 87600. \quad (31)$$

Введена модель прибутку також має на увазі, що люди з вищими доходами готові платити за послуги більше. Таким чином, чистий прибуток є результатом базового доходу $r_k - c_e$ і параметру коригування прибутку η_i в зоні i . c_p – штраф за незадоволення попиту на заряд для електромобілів. $\lambda_{ВП}^q$ – частка незадоволеного потоку трафіку на шляху q . S_q – потік транспорту на шляху q . λ_{ij}^q – частка транспортного потоку на шляху q із зони i в j . Λ – множина зон транспортної мережі. $\hat{\Lambda}_q$ – множина зон розширеної транспортної мережі на шляху q . \hat{A}_q – множина дуг розширеної транспортної мережі на шляху q . Q – множина шляхів. $\psi(\cdot)$ – функція зарядної працездатності. Вираз $\psi(n_{i,k}^m)$ можна подати як $\psi(n_{i,k}^m) = \alpha_k n_{i,k}^m$, де α_k – коефіцієнт, що співвідноситься з типом зарядної установки. $\hat{n}_{i,k}^m$ – це значення максимальної кількості зарядних станцій рівня k в зоні i . $\hat{x}_{m,i}$ – бюджет будівництва зарядної станції та зарядних установок в зоні i для компанії-постачальника m .

$F_{s,t}$ – потік потужності по лінії s, t . f_s – вузлове значення потужності в s . $\xi_{s,t}$ – імпеданс на лінії s, t . $\xi_{s,t}^*$ - спряжене до $\xi_{s,t}$. $l_{s,t}$ – квадрат величини струму на лінії s, t від s до t . ζ_s – квадрат потужності у вузлі s . $\bar{L}_{s,t}$ – граничне значення струму по лінії s, t . $\underline{V}_s / \bar{V}_s$ – верхня/нижня границя потужності у вузлі s .

Вираз $\Delta T \eta_i (r_k - c_e) p_k n_{i,k}^m$ включає як вартість електроенергії c_e , так і виручку r_k , гарантовану зарядною установкою рівня k протягом періоду ΔT .

p_k – зарядна потужність зарядної установки рівня k . Виручка за кВт-год r_k встановлена як 1.5-кратна до операційних витрат c_k . c_k отримано з (32), де \bar{n} – середнє значення зарядних місць для розміщення на зарядній станції. $c_{1,k}$ і $c_{2,k}$ – базова вартість розгортання зарядної станції і зарядної установки рівня k відповідно.

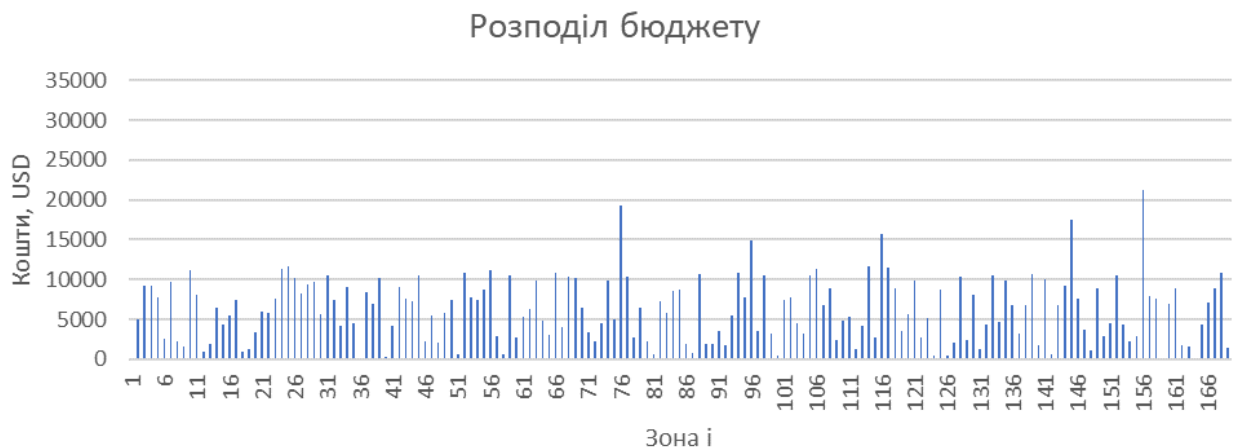
$$\frac{c_{1,k}}{\bar{n}} + c_{2,k} + p_k c_e t = p_k c_k t \quad \forall k \in \{1,2,3\}, \quad (32)$$

Вираз (7) має на меті максимізувати різницю виручки та інвестиційних витрат, при цьому намагаючись задовольняти попит на заряд для електромобілів наскільки це максимально можливо. $c_{1,i,k} \vartheta_{i,k}^m - c_{2,i,k} n_{i,k}^m$ в (7) – це загальна вартість розгортання зарядної станції, включаючи базові витрати і змінні, в залежності від кількості зарядних установок і локації. Вираз $\sum_{q \in Q} c_p \lambda_{ВП}^q S_q$ в (7) являє собою певні штрафні витрати, що зумовлені незадоволеним попитом на заряд для електромобілів. Вирази (16) та (17) є обмеженнями транспортних потоків, де повинні задовольнятися уявні попит та пропозиція для кожної зони міста. Вираз (18) гарантує, що транспортний потік в кожній із зон не перевищує її експлуатаційних можливостей. Вираз (19) гарантує те, що кількість зарядних установок не перевищить максимального значення, а також те, що зарядна установка може бути встановлена лише на підходящій для цього зарядній станції. Вираз (20) накладає обмеження на бюджет, при цьому $\hat{x}_{m,i}$ отримано з оптимальної стратегії Задачі 2.

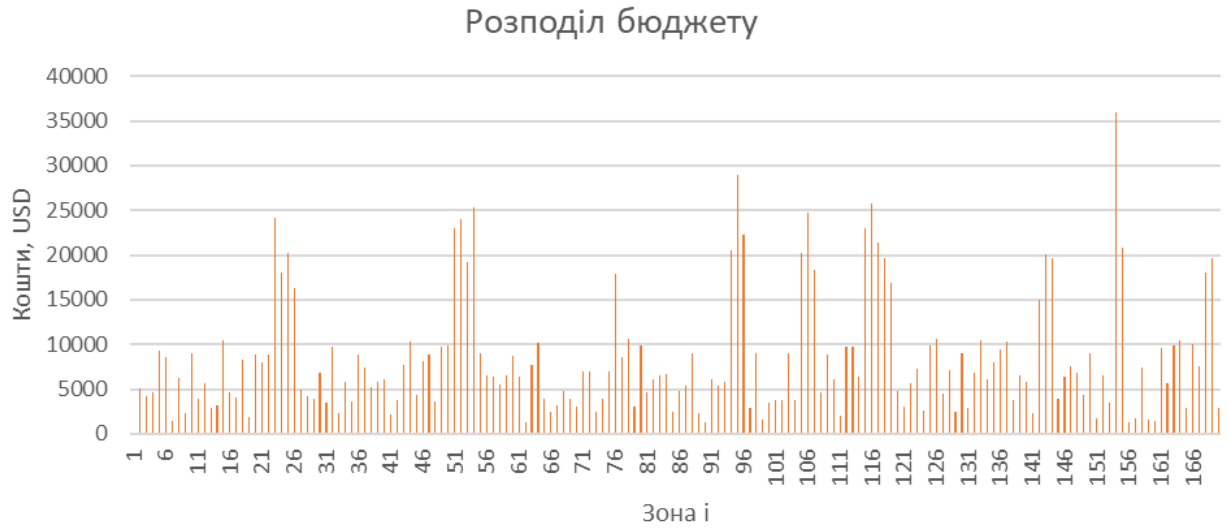
Вирази (25) і (26) є обмеженнями значення струму по лінії та рівня напруги у вузлі, щоб вони не виходили за межі допустимих значень. Вирази (28)-(29) використовуються для розрахунку навантаження кожного зарядного вузла мережі, де ϖ – фазовий кут між зарядною напругою та струмом електромобіля та коефіцієнтом потужності $\cos \varpi$. Оскільки коефіцієнт потужності зарядних установок близький до 1, то $\cos \varpi = 1$, і тоді $\tan \varpi = 0$.

2.5 Оптимальна стратегія визначення бюджету

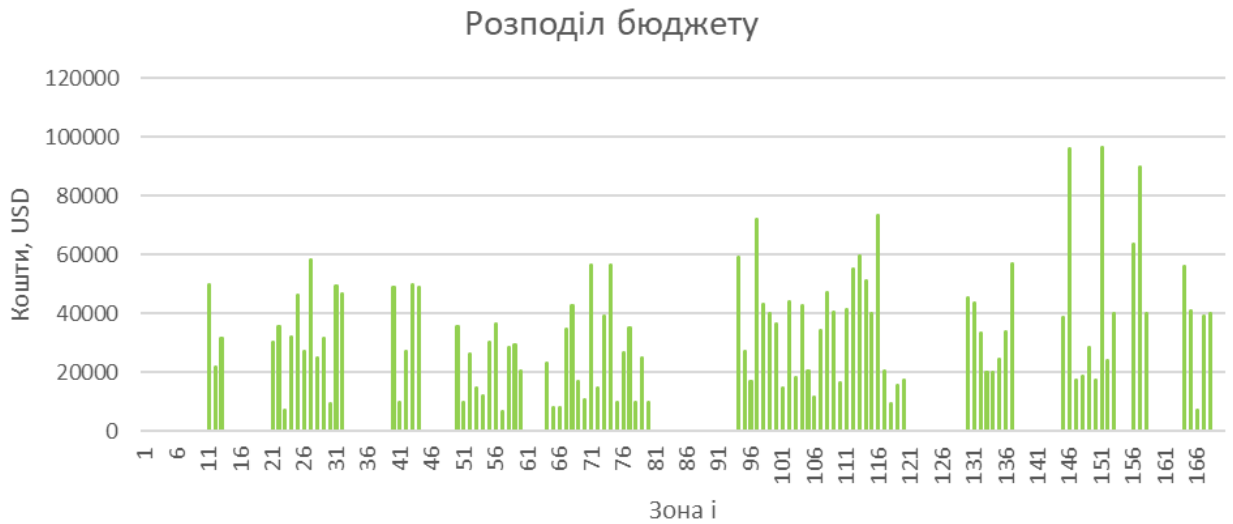
Розглядається ситуація, коли три компанії-постачальника послуг заряду для електромобілів ($m = 1,2,3$) конкурують між собою в задачі планування зарядної інфраструктури. Компанії мають бюджети відповідно 1, 2 та 3 млн. доларів США. Вважається, що зарядні пристрої рівнів $k = 1,2,3$ таблиці 2.1 обслуговують відповідно 3, 12 та 72 електромобілі. Звичайний термін служби зарядної установки – 10 років. Нехай параметр часу зарядки $\mu_m = 1000$ для усіх трьох компаній. У відповідності кількості індексів [29], Київ поділено на $m = 169$ зон. Нехай $\theta_i = 0.01S_i$, що означає значне збільшення часу очікування. Витрати на будівництво v_i у відповідності зоні i визначаються вартістю встановлення устаткування та ціною продажу ділянки. π_i – базова вартість послуги – визначається середнім значенням вартості оренди ділянки. Нехай $E_i^{min} = 0$, E_i^{max} визначається з пропускної здатності розподільчої мережі Києва. Далі, за умови використання алгоритму 1 для того можливо визначити оптимальні стратегії для кожної з компаній в кожній із зон. Ймовірний результат показано на рисунку 2.1, з бажаним розподілом коштів інвестицій бюджету для кожної зони. Логічно, що грошові ресурси компаній зосереджуються переважно в густонаселених міських зонах Києва.



(a) Компанія $m = 1$ з бюджетом $B_1 = 1\,000\,000$ USD



(b) Компанія $m = 2$ з бюджетом $B_2 = 2\,000\,000$ USD



(c) Компанія $m = 3$ з бюджетом $B_3 = 3\,000\,000$ USD

Рисунок 2.1 – Оптимальна стратегія визначення бюджету компаній для розбудови зарядної інфраструктури для електромобілів у кожній із зон

ВИСНОВКИ

В роботі викладено підхід до довгострокового оптимального планування інфраструктури зарядних станцій для електромобілів на основі ринкового конкурентного середовища моделі Курно за використання певного набору даних, в межах запропонованої структури «спрогнозувати – оптимізувати». В загальному, побудовано підхід, що дозволяє спрогнозувати потоки транспорту в довгостроковій перспективі і оптимізувати стратегію інвестування в інфраструктуру для електромобілів.

Застосовано просторово-часовий аналіз транспортних потоків для прогнозування попиту на заряд для електромобілів. Для опису конкуренції між кількома компаніями-постачальниками послуг заряду для електромобілів представлено відповідну модель теорії ігор. Здійснено опис математичної моделі, що націлена на розрахунок бюджетів компанії, а також на підрахунок кількості зарядних установок у відповідності кожній із зон «ринку».

За наявності певних обмежених вхідних даних, що були зібрані в процесі дослідження, а також локальних соціально-економічних факторів для реалістичності стратегії, проведено експерименти, що певним чином демонструють прикладний характер етапів дослідження та частково засвідчують ефективність викладеного підходу. Повного практичного застосування на реаліях міста Київ, яке було залучено для експериментів над викладеними моделями оптимізації та планування, провести не вдалося, адже відсутні набори необхідних даних.

Робота задає перспективу для розвитку схожих досліджень з пошуку підходів до розв'язання задач планування інфраструктури зарядних станцій для електромобілів, а також для вдосконалення представлених поглядів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. How many electric cars are there in the world? [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.carsguide.com.au/ev/advice/how-many-electric-cars-are-there-in-the-world-85961>
2. FACT SHEET: President Biden Announces Steps to Drive American Leadership Forward on Clean Cars and Trucks [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/08/05/fact-sheet-president-biden-announces-steps-to-drive-american-leadership-forward-on-clean-cars-and-trucks/>
3. Incentives for purchasing zero-emission vehicles [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://tc.canada.ca/en/road-transportation/innovative-technologies/zero-emission-vehicles/incentives-purchasing-zero-emission-vehicles>
4. On the electrification path: Europe's progress towards clean transportation [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.eafo.eu/sites/default/files/2021-03/EAFO%20Europe%20on%20the%20electrification%20path%20March%202021.pdf>
5. EXCLUSIVE China in talks with automakers on EV subsidy extension - sources [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/exclusive-china-talks-with-automakers-ev-subsidy-extension-sources-2022-05-18/>
6. Як в Україні розвивається інфраструктура зарядок для електромобілів | РБК-Україна [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://auto.rbc.ua/ukr/show/zaryadnaya-infrastruktura-1637906584.html>
7. Минуло три роки: як змінилася в Україні зарядна інфраструктура для електромобілів | Економічна правда [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.epravda.com.ua/publications/2021/02/8/670779/>

8. H. Zhang, S. J. Moura, Z. Hu, Y. Song «PEV fast-charging station siting and sizing on coupled transportation and power networks», *IEEE Trans. Smart Grid*, 2018. Vol. 9, no. 4, pp. 2595–2605.
9. M. Gentili, P. B. Mirchandani, «Locating sensors on traffic networks: Models, challenges and research opportunities», *Transp. Res. C, Emerg. Technol.* 2012. Vol. 24, pp. 227–255.
10. M. J. Hodgson, «A flow-capturing location-allocation model», *Geograph. Anal.*, 1990. Vol. 22, no. 3, pp. 270–279.
11. B. Zhou, G. Chen, T. Huang, Q. Song, Y. Yuan, «Planning PEV fastcharging stations using data-driven distributionally robust optimization approach based on ϕ -divergence», *IEEE Trans. Transp. Electrific.*, 2020. Vol. 6, no. 1, pp. 170–180.
12. D. Tong, «Regional coverage maximization: A new model to account implicitly for complementary coverage», *Geograph. Anal.*, 2012. Vol. 44, no. 1, pp. 1–14.
13. G. Alexandris, I. Giannikos, «A new model for maximal coverage exploiting GIS capabilities», *Eur. J. Oper. Res.*, 2010. Vol. 202, no. 2, pp. 328–338.
14. Эскиз украинского рынка зарядок для электромобилей [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ua-electro.com/ru/opublikovan-svezhij-obzor-rynka-zaryadok-dlya-elektromobilej/>
15. E. Zavvos «Planning and analysing competing en-route charging stations for electric vehicles: A game-theoretic approach» Ph.D. dissertation, Dept. Eng. Phys. Sci. Electron. Comput. Sci., Univ. Southampton, Southampton, U.K., 2019.
16. Y. Xiong, J. Gan, B. An, C. Miao, A. L. C. Bazzan «Optimal electric vehicle fast charging station placement based on game theoretical framework» *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, 2018. Vol. 19, no. 8, pp. 2493–2504.
17. Congestion game – Wikipedia [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Congestion_game#:~:text=Congestion%20games%20are%20a%20class,special%20case%20of%20potential%20games

18. Затори Київ – що відбувається з трафіком і транспортом в столиці | Економічна правда [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.epravda.com.ua/publications/2022/02/10/682256/#comments>
19. Транспортна модель Києва – інструмент змін у місті – Хмарочос [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://hmarochos.kiev.ua/2015/12/17/transportna-model-kiyeva-instrument-zmin-u-misti/>
20. Освободить мощности: карта подключений для потенциальных инвесторов | Mind.ua [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://mind.ua/ru/publications/20187327-osvobodit-moshchnosti-karta-podklyuchenij-dlya-potencialnyh-investorov>
21. Райони Києва - Портал Києва [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://kyivcity.gov.ua/kyiv_ta_miska_vlada/pro_kyiv/raiony_kyieva/
22. Нові дороги і розв'язки в Києві – будівництво – карта, план [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://auto.24tv.ua/novi_dorohy_rozviazky_v_kyievi_budivnytstvo_karta_p_lan_n26399
23. Google Maps [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.google.com/maps/@50.407937,30.5883887,10.61z>
24. PlugShare – EV Charging Station Map – Find a place to charge [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.plugshare.com/>
25. DTEK Energy Map [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://connect.dtek-kem.com.ua/energymap/>
26. W. Tu, Q. Li, Z. Fang, S.-L. Shaw, B. Zhou, X. Chang, «Optimizing the locations of electric taxi charging stations: A spatial–temporal demand coverage approach», *Transp. Res. C, Emerg. Technol.*, 2016. Vol. 65, pp. 172–189.
27. Exponential smoothing - Wikipedia [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Exponential_smoothing

28. Forecast in Excel: linear and exponential smoothing forecasting models - Ablebits.com [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.ablebits.com/office-addins-blog/2019/03/20/forecast-excel-linear-exponential-smoothing-forecasting-models/>
29. Справочник Почтовых Индексов Украины [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://ukrindex.5balov.net/oblastnye-centry-ukrainy-indeksy/indeks-kiev/>
30. Ціни на квартири в Києві - середня вартість житла на DOM.RIA [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://dom.ria.com/uk/prodazha-kvartir/kiev/ceny/>
31. ЛУН - Facebook [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.facebook.com/lun.ua/photos/a.165309236815680/2285463984800184/?type=3&theater>
32. Analysis of Best Response Dynamics in Potential Games [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02953991/document>
33. Н. Nikaido, К. Isoda «Note on Non-Cooperative Convex Game», BadMonth, 1955. Vol. 5, No. 5, pp. 2-9.

ДОДАТОК А. Табличний набір даних

Таблиця А.1 – Кількість зареєстрованого транспорту в м. Київ станом на січень кожного року в період з 2015 по 2022

Рік	Кількість транспорту, од.	Приріст у відношенні до попереднього року, %
2015	695114	-
2016	735551	1,06
2017	787648	1,07
2018	850201	1,08
2019	927049	1,09
2020	1042676	1,12
2021	1173754	1,13
2022	1375583	1,17

Таблиця А.2 – Середньодобова кількість унікальних транспортних засобів, зафіксованого на дорогах міста Києва (в тому числі заміських та інших транзитних)

Рік	Кількість транспорту, од.	Приріст у відношенні до попереднього року, %
2015	421315	-
2016	438168	1,04
2017	460076	1,05
2018	487681	1,06
2019	521819	1,07
2020	579219	1,11
2021	700855	1,21
2022	820000	1,17

Таблиця А.3 – Кількісна характеристика населення по районах міста Києва

Назва району	Кількість населення, тис. осіб	Частка від загального населення, %	Густота населення, осіб/км ²	Співвідношення густоти, %
Голосіївський	247,6	8,58	1587	3,38
Дарницький	314,7	10,90	2349	5,00
Деснянський	358,3	12,41	2421	5,16
Дніпровський	354,7	12,29	5294	11,28
Оболонський	319	11,05	2937	6,26
Печерський	152	5,26	5630	11,99
Подільський	198,1	6,86	5826	12,41
Святошинський	340,7	11,80	3097	6,60
Солом'янський	383,259	13,27	9581	20,41
Шевченківський	218,9	7,58	8229	17,53

Таблиця А.4 – Середня ціна за м² у місті Київ у різних зонах станом на травень 2022 [30]

Назва зони	Ціна, грн	Показник співвідношення, %
Печерський район	118079	0,072275
Поділ	86879	0,053178
Жуляни	85669	0,052437
Шевченківський район	85206	0,052154
Подільський район	77700	0,047559
Голосіївський район	77415	0,047385
Лук'янівка	73857	0,045207
Дніпровський район	68521	0,041941
Теремки	68051	0,041653

Лівобережний масив	67916	0,041571
Солом'янський район	65782	0,040264
Оболонь	64323	0,039371
Осокорки	63540	0,038892
Оболонський район	61014	0,037346
Дарницький район	59947	0,036693
Нивки	59733	0,036562
Шулявка	58915	0,036061
ВДНГ	57563	0,035234
Мостицький масив	55108	0,033731
Харківський масив	50839	0,031118
Академмістечко	49558	0,030334
Святошинський район	49487	0,03029
Виноградар	46534	0,028483
Деснянський район	41447	0,025369
Троєщина	40664	0,02489