

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ****НАВЧАЛЬНО–НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Кафедра інженерії програмного забезпечення

**Пояснювальна записка**

до магістерської роботи  
на ступінь вищої освіти магістр  
на тему: «Оптимізація системи зарядки електромобілів на основі методів  
дослідження операцій»

Виконав: студент 6 курсу, групи ПДМ–61  
спеціальності 121 Інженерія програмного забезпечення  
(шифр і назва спеціальності/спеціалізації)

Гуленко Володимир Сергійович

(прізвище та ініціали)

Керівник Жебка В.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент \_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль \_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

## ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій

Кафедра Інженерії програмного забезпечення

Ступінь вищої освіти -«Магістр»

Спеціальність підготовки – 121 «Інженерія програмного забезпечення»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

Інженерії програмного забезпечення Негоденко О.В.

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2022 року

### З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

**ГУЛЕНКУ ВОЛОДИМИРУ СЕРГІЙОВИЧУ**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Оптимізація системи зарядки електромобілів на основі методів дослідження операцій

Керівник роботи: Жебка Вікторія Вікторівна, д.т.н., доц., завідувач кафедри ТЦР,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом вищого навчального закладу від «12» жовтня 2022 року №122.

2. Строк подання студентом роботи \_\_\_\_\_

3. Вхідні дані до роботи

Історичні дані, які використовуються для навчання моделей машинного навчання.  
Оптимізаційні методи

Науково-технічна література з питань, пов'язаних з розробкою оптимізаційних систем.

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

4.1 Системи аналізу, прогнозування та моделі машинного навчання

4.2 Вимоги та оцінка якості системи.

4.3 Опис математичних моделей та проектування системи.

4.4 Опис проектування системи.

## 5. Перелік демонстраційного матеріалу (назва основних слайдів)

1. Актуальність проблеми
2. Існуюче програмне забезпечення та методи прогнозування
3. Побудова прогнозу на основі обраних методів
4. Аналіз статистичних даних для проведення прогнозу
5. Моделювання процесу розміщення зарядних станцій
6. Проектування системи
7. Аналіз ефективності розробленої системи

6. Дата видачі завдання 14.10.2022**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Підбір науково-технічної літератури	14.10-25.10	Виконано
2	Вимоги до системи	28.10-05.11	Виконано
3	Оцінка якості тестування до системи	06.11-09.11	Виконано
4	Метод побудо	11.11-20.11	Виконано
5	Концепція та архітектура програмного забезпечення	21.11-30.11	Виконано
6	Вступ, висновки, реферат	30.11-05.12	Виконано
7	Розробка презентації	06.11-11.12	Виконано

Студент \_\_\_\_\_

Керівник роботи \_\_\_\_\_





## РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської роботи 76 с., 18 рис., 33 джерела.

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ, ТУРИЗМ, МАШИННЕ НАВЧАННЯ,  
РЕКОМЕНДАЦІЙНІ СИСТЕМИ, ДЕРЕВО РІШЕНЬ, МЕТОД ОПОРНИХ  
ВЕКТОРІВ, БАГАТОШАРОВИЙ ПЕРСЕПТРОН

Мета: оптимізація процесу зарядки електромобілів за рахунок прогнозування навантаження та моделювання розташування зарядних станцій з використанням методів дослідження операцій.

Об'єкт: процес зарядки електромобілів.

Предмет: методи та засоби оптимізації та моделювання.

Методи дослідження: методи машинного навчання (модель лінійної регресії, дерево регресій та штучну нейрону мережу), методи оптимізації.

Широкомасштабна інтеграція електромобілів створить великий попит на зарядку, що може створити проблеми для поточних методологій планування та експлуатації енергосистеми, особливо на рівні розподілу.

Для проведення прогнозування завантаження ринку та класифікації даних в магістерській роботі було використано модель лінійної регресії, дерево регресій та штучну нейрону мережу. На основі використання запропонованих методів було проведено прогноз навантаження та обраховано похибку прогнозування. На основі оптимізаційних методів проведено моделювання транспортних потоків. Все це дозволило визначити оптимальний розподіл зарядних станцій по території України. При плануванні системи заряджання місце розташування та розмір зарядного пункту може вплинути на зручність послуги заряджання та вплинути на економічну вигоду оператора. Тому очікується максимізації охопленого попиту на зарядку в рамках планування зарядної станції для електромобілів.

В якості перспективних напрямків подальшого дослідження є визначення оптимальної напруги для зарядки електромобілів та розрахунок оптимальних тарифів оплати послуги зарядження електромобіля.

*Галузь використання – автомобільна галузь.*

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	8
РОЗДІЛ 1. ОСОБЛИВОСТІ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ .....	10
1.1.    Особливості електромобільного транспорту в Україні та світі .....	10
1.2.    Особливості зарядки електромобілів .....	13
1.3.    Особливості планування системи зарядки .....	15
РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ ДЛЯ ПЛАНУВАННЯ ЗАРЯДКИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ .....	20
2.1.    Підходи до прогнозування навантаження .....	20
2.2.    Планування зарядки транспортних засобів .....	29
2.3.    Результат прогнозування навантаження для планування зарядки електромобілів .....	34
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ПЛАНУВАННЯ СИСТЕМИ ЗАРЯДКИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ .....	39
3.1.    Моделювання транспортних потоків .....	39
3.2.    Методи оптимізації розташування системи зарядки .....	43
3.3.    Інформаційна технологія оптимального розподілу зарядних станцій по території України .....	62
ВИСНОВКИ .....	65
ЛІТЕРАТУРА .....	67
ДОДАТОК .....	71

## ВСТУП

Викопне паливо є домінуючим джерелом енергії як для виробництва електроенергії, так і для транспортної галузі. Проте в останні роки зміна клімату зумовила проведення дослідження та поширення інформації про негативні наслідки використання викопного палива. Уряди та промисловість рухаються до використання чистих джерел енергії та зменшення забруднення навколишнього середовища. У цьому випадку, швидше за все, мова йде про широке використання електромобілів для електрифікації транспорту та використання відновлюваних джерел енергії для виробництва електроенергії. Як спосіб транспортування з меншими викидами вуглекислого газу та споживанням енергії, електромобіль вважається можливим варіантом для заміни транспортних засобів, що працюють на нафтовому паливі. З розвитком електроніки та акумуляторних технологій мільйони електромобілів будуть використовуватися в транспорті та інтегровані в електричну систему. Однак відсутність достатньої зарядної інфраструктури є критичною перешкодою для успішного розгортання електромобілів у такому великому масштабі. А інтенсивне використання електромобілів створює кілька проблем у мережі розподілу. Тому сьогодні зростає потреба у створенні належним чином спланованої інфраструктури для зарядки електромобілів і розробки нових методів планування активної розподільчої мережі.

**Мета:** оптимізація процесу зарядки електромобілів за рахунок прогнозування навантаження та моделювання розташування зарядних станцій з використанням методів дослідження операцій.

**Об'єкт:** процес зарядки електромобілів.

**Предмет:** методи та засоби оптимізації та моделювання.

**Завдання дослідження:**

1. Аналіз процесу розвитку електромобільного транспорту в Україні.
2. Прогнозування навантаження ринку електромобілів
3. Визначення похибки прогнозування
4. Моделювання транспортних потоків



5. Оптимізація методів планування розміщення електростанцій
6. Аналіз ефективності запропонованих методів

**Наукова новизна** магістерської роботи: побудова інформаційної технології визначення оптимального розподілу зарядних станцій на основі прогнозованих даних завантаження мережі електромобілями та з використанням методів дослідження операцій.

**Методи дослідження:** оптимізаційні методи, методи лінійного програмування, методи теорії ймовірності та математичної статистики, нейронна мережа, модель лінійної регресії, регресійна модель дерева рішень.

**Практичне значення:** побудовану інформаційну технологію можна використовувати для оптимального розміщення зарядних станцій.

Запропоновані результати дослідження були апробовані на XV Науково-технічній конференції «Сучасні інфокомунікаційні технології» в Державному університеті телекомунікацій.

За результатами отриманих досліджень були опубліковані наступні матеріали:

1. Гуленко В.С. Оптимізація процесу розташування зарядних електростанцій на основі методів дослідження операцій // Зв'язок. №5, 2022.
2. Гуленко В.С. Прогнозування навантаження ринку електромобілів та аналіз похибки прогнозування // XV Науково-технічна конференція «Сучасні інфокомунікаційні технології» . – Київ: ДУТ, 2022.

## 1 ОСОБЛИВОСТІ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

### 1.1 Особливості електромобільного транспорту в Україні та світі

Електротранспорт набуває все більшого попиту у розвинених країнах світу, як більш економічний та екологічний. Для України також є характерним таке зростання. Проте, щоб люди з упевненістю пересідали на електромобілі, потрібна розвинена інфраструктура, зокрема, зарядні станції.

За останні чотири роки кількість електромобілів у країні зросла в чотири рази. Значно збільшилася кількість зарядних станцій. За 7 місяців 2022 року, за даними Auto Consulting, в Україні було зареєстровано 5914 електромобілів – на 34% більше, ніж за рік до того. В 2022 році частка нових електромобілів зросла до 30%. Минулого року ця цифра становила – 12% від загальної кількості реєстрацій.

Паливна криза в Україні зумовила такий колосальний попит на електромобілі в 2022 року. Ця криза загострилась у квітні-травні 2022. В Україні один із найнижчих тарифів на електроенергію для приватних споживачів. Для домогосподарств, що на місяць витрачають понад 250 кВт·год, – 1,68 грн за кВт·год. Нічний тариф передбачає знижку в 50% [21].

Попит на електромобілі в Україні формується під впливом наступних факторів:

1. Низькі податки: низька плата за розмитнення авто та не потрібно сплачувати збір до пенсійного фонду.
2. Паливна криза, яка загострилась у квітні-травні.

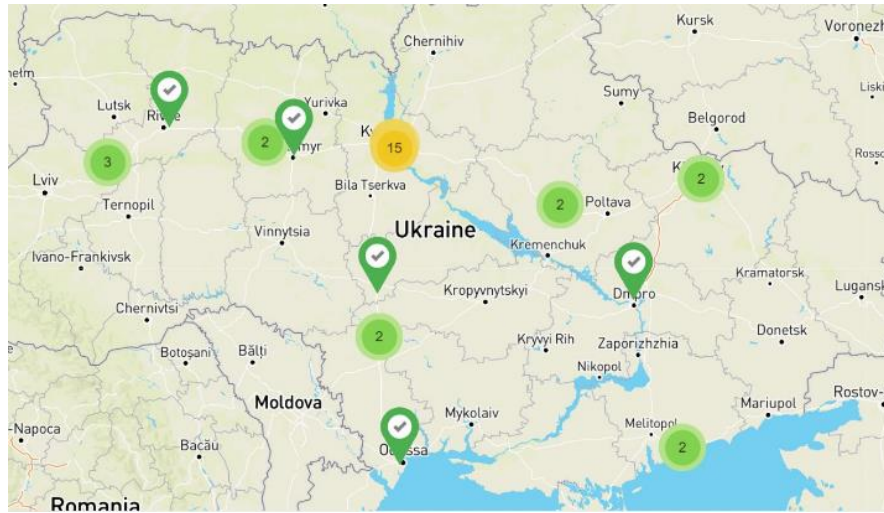
Перевагами електромобілів є:

1. Низький рівень шуму та забруднення навколишнього середовища.
2. Дешевше заправлення
3. Простіше технічне обслуговування.

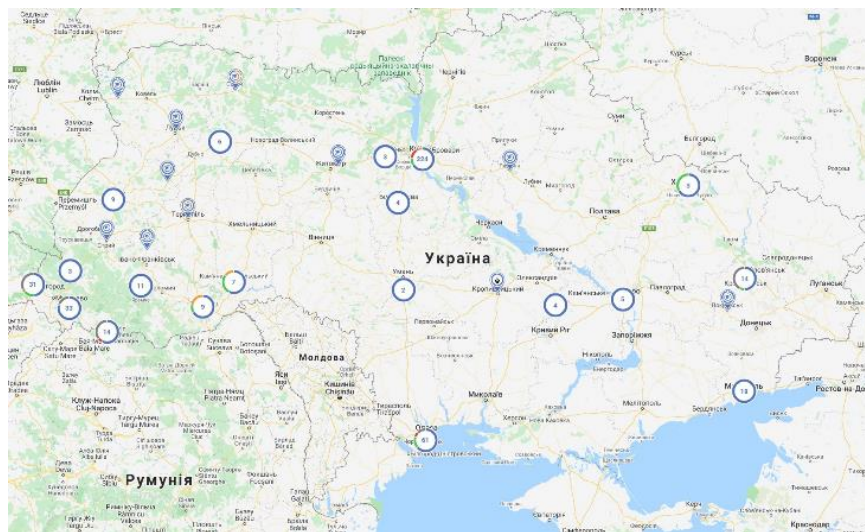
У 2017 році до мережі "Автоентерпрайз" було підключено 1 417 зарядних станцій. Зараз їх понад 3 тис.



а)



б)



в)

Рис. 1.1. Мережа зарядних станцій а) "Автоентерпрайз"; б) YASNO E-mobility; в) "Тока" [25]

Електромобілі все ще не такі конкурентоспроможні, як звичайні автомобілі. Обмеження електромобіля включають відносно короткий запас ходу, обмежені доступні зарядні засоби та довший час зарядки акумулятора. Усі ці фактори в поєднанні з незнайомістю споживачів з електромобілями перешкоджають широкому їх розповсюдженню. Автомобіль з бензиновим двигуном може проїхати 500 км або більше, що значно краще, ніж продуктивність електромобілів. На одному заряді електромобілі на ринку можуть проїхати лише 100-160 км. А для підзарядки електромобіля за допомогою систем зарядних станцій потрібні години. Крім того, громадськість також критикує неадекватні громадські зарядні засоби, які спричиняють багато незручностей у використанні електромобілів. Великі витрати на капітальні інвестиції та невизначеність майбутнього створюють проблеми для інвесторів або операторів мереж, щоб прийняти рішення про інвестиції в зарядні установки. Проте очікується, що технологічний прогрес у накопиченні енергії акумулятора та силовій електроніці може сприяти розвитку електромобілів, а просування електромобілів також може виграти від зростаючого попиту на електромобілі для полегшення роботи системи живлення.

Електромобілі, як правило, підключаються до джерела електроенергії для підзарядки. Кількість доступних моделей електромобілів і кількість електромобілів на вулиці стрімко зростає, як і потреба в зарядних станціях. Хоча поточна доступність громадських зарядних станцій обмежена, проекти будівництва зарядних станцій, що фінансуються з державного та приватного секторів, швидко зростають. Нові технології зарядки, урядова політика та ринкові тарифи прискорюють розгортання громадських станцій.

Встановлення або експлуатація зарядного пристрою чи станції має багато переваг, які залежать від типу закладу та місця розташування. Власник зарядної станції міг би отримувати прибуток безпосередньо, надаючи послуги зарядки та паркування. Витрати на встановлення та експлуатацію зарядної станції включають витрати на обладнання, землю, встановлення, обслуговування,

експлуатацію та електроенергію. Витрати можна зменшити, скориставшись політичними стимулами. І виробники працюють над тим, щоб суттєво зменшити ці витрати, оскільки обсяги зарядного обладнання збільшуються. Капітальна вартість зарядних пристроїв залежить від типів пропонованих функцій. Ціна зарядного пристрою рівня 2 становить приблизно від 1000 до 5000 доларів США. Продукти для швидкої зарядки зазвичай коштують від 20 000 до 50 000 доларів США, включаючи додаткові апаратні вимоги, пов'язані з роботою високої потужності. Вартість встановлення зарядного пристрою для електромобілів значно відрізняється. Одна оцінка становить від 15 000 до 18 000 доларів США для станції рівня 2, включаючи витрати на обладнання та встановлення. Вартість електроенергії буде залежати від типу встановленої зарядної станції та часу надання послуги зарядки електромобілів.

## **1.2 Особливості зарядки електромобілів**

Більшість електромобілів використовують проводове з'єднання для зарядження, проте вилки не є універсальними. Для вирішення цієї проблеми використовуються адаптери.

Електромобілі зазвичай заряджаються вночі від домашньої зарядної станції: точка зарядки, зарядний пристрій для настінної розетки або просто зарядний пристрій у гаражі чи зовні будинку. Станом на 2021 типові домашні зарядні пристрої мають потужність 7 кВт, але не всі з них підтримують інтелектуальну зарядку. Навідмінно від домашньої зарядної станції громадські зарядні станції швидші, та мають потужність приблизно 350 кВт.

На швидкість зарядження автомобіля впливають потужність зарядної станції та власної здатності автомобіля отримувати заряд. Станом на 2021 зафіксовані автомобілі на 400 вольт та на 800 вольт. Підключивши автомобіль, який підтримує дуже швидке зарядження, до зарядної станції з дуже високою швидкістю зарядки, можна зарядити акумулятор автомобіля до 80% за 15 хвилин. Автомобіль та зарядна станція з нижчою швидкістю зарядження може

знадобитися до 2 годин, щоб зарядити акумулятор до 80%. Як і у випадку з мобільним телефоном, останні 20% займають більше часу, тому що системи сповільнюються, щоб безпечно зарядити акумулятор і уникнути пошкодження. Це пов'язано з технологічними процесами зарядки/розрядження та направлено на збільшення терміну служби тягової батареї.

Більшість електромобілів мають вбудований перетворювач змінного струму на постійний. Це дозволяє підключати їх до стандартної побутової розетки змінного струму. Саме тому зарядка від звичайної розетки в гаражі, на дачі чи деінде є найпоширенішим і найбільш простим способом зарядки електромобіля. Всі електричні розетки євростандарту розраховані на показники 220/230 Вольт, 16 Ампер, що дозволяє безпечно підключати споживачів потужністю до 3,5 кВт.

Таблиця 1.1 – Таблиця часу та швидкості зарядження електромобілів у різних режимах зарядження

Режими заряду	Потужність заряду	Час	Тип заряджання
Режим 1	до 3,5 кВт	10–12 годин	Повільно
Режим 2	до 2 кВт (однофазна мережа АС)	12 – 14 годин	Повільно
Режим 3	3 кВт (однофазна мережа АС)	6 – 8 годин	Стандартний заряд
Режим 3	7кВт (одно/три — фазна мережа АС)	3 – 4 години	Стандартний заряд
Режим 3	11кВт (одно/три — фазна мережа АС)	2 –3 години	Прискорений заряд
Режим 3	22кВт (одно/три — фазна мережа АС)	1 – 2 години	Прискорений заряд
Режим 4	50кВт (зарядка постійним струмом DC)	20 — 30 хвилин	Швидкий заряд

Режим заряду 2 електромобіля по суті такий же, як і в першому випадку, але з використанням зарядного кабелю зі спеціальним блоком захисту, який розташовується на самому кабелі.

Режим 3 – зарядка змінним струмом підвищеної потужності. Це найпоширеніший режим зарядки, що застосовується на паркінгах, заправних станціях та в інших громадських місцях. Такий тип зарядки можливий завдяки спеціальній зарядній станції

Режим 4 – найшвидший варіант заряду батареї електромобіля. Кожен електромобіль забезпечений своєю (вже вбудованою) зарядною станцією, до якої подається живлення змінного струму, а вже від неї йде заряд на батарею постійним струмом. Але режим 4 має свою особливість – в ньому використовується постійний струм.

Автомобіль періодично використовує енергію акумулятора для системних тестів та підзарядки низьковольтної батареї в моменти коли він не працює і відключений від мережі. Слід наголосити, що не варто допускати повного розрядження батареї – вона буде найкраще працювати при регулярній зарядці. Якщо батарея розрядиться до 0 %, інші компоненти можуть бути пошкоджені або вимагати заміни (наприклад, низьковольтна батарея).

### **1.3 Особливості планування систем зарядки**

Широкомасштабна інтеграція електромобілів створить великий попит на зарядку, що може створити проблеми для поточних методологій планування та експлуатації енергосистеми, особливо на рівні розподілу. Однією з головних проблем великої інтеграції електромобілів у систему розподілу є стабільність системи. Очікується, що попит на електромобілі досягне найближчим часом значно зросте. Однак досягнення таких показників поширення вимагає широкого розгортання зарядних пристроїв і потужності для заряджання в часи пік під час заряджання від мережі. Збільшення рівня проникнення електромобілів на 20%

приведе до збільшення навантаження на 35,8%. Тому, якщо не спланувати розумно, заряджання електромобілів може легко призвести до перевантаження електромережі та може погіршити якість електроенергії та навіть поставити під загрозу безпеку постачання. Вплив зарядки електромобілів на мережу було добре проаналізовано в [2, 7, 8]. Було визначено, що знадобиться значна додаткова потужність і розширення виробництва електроенергії, якщо 5% електромобілів заряджатимуться одночасно за допомогою швидкої зарядки. Таким чином, розподільна мережа може легко стати наріжним каменем при розробці електромобілів. Тому при плануванні системи заряджання електромобілів необхідно враховувати обмеження розподільної мережі, а також планувати спільне планування розподільної мережі та системи заряджання електромобілів.

Інтеграція електромобілів вносить значні невизначеності у планування та роботу енергетичної та транспортної мережі. Ці невизначеності можуть включати рівні проникнення електромобілів, часовий і просторовий розподіл попиту на зарядку, а також впровадження різних скоординованих стратегій зарядки. По-перше, важко дати прогноз щодо майбутньої кількості електромобілів у певній місцевості, оскільки на рівень проникнення електромобілів можуть впливати різні фактори, такі як ринок, політика та технології. По-друге, поведінка водіння різноманітна, і, відповідно, характеристики часового та просторового розподілу попиту на зарядку електромобілів важко передбачити. По-третє, на зарядку електромобіля можуть впливати певні скоординовані стратегії заряджання, і ці стратегії можуть допомогти вирішити проблеми невизначеності. Однак реалізація узгоджених стратегій зарядки все ще залишається невизначеною, оскільки вона вимагає вдосконалення багатьох аспектів енергосистеми, таких як розумні зарядні пристрої, пристрої керування, комунікаційна мережа та механізм взаємодії. Тому важливо інтегрувати невизначеність у системне планування, щоб врахувати різні сценарії та забезпечити гнучкість результату планування.

Існує значна кількість досліджень, яка була присвячена проблемі заряджання електромобілів, щоб мінімізувати негативний вплив широкомасштабного проникнення електромобілів. Проведені дослідження



вивчити потенційні вигоди від інтеграції електромобілів. Планування системи заряджання електромобілів було добре вивчено з різних аспектів, таких як метод рішення, розширення розподільної мережі, аналіз транспортних потоків, ринок зарядки електромобілів, оперативне планування, часові рамки горизонту планування, скоординована зарядка та мікромережі.

Питання планування інфраструктури зарядки електромобілів включають моделювання попиту на зарядку, кваліфікацію впливу зарядки та оптимальне розміщення зарядних станцій електромобілів у певній місцевості. Загалом зарядка електромобілів, яка розглядається в проведеному магістерському дослідженні, включає зарядку в пункті призначення, таку як приватна, громадська та робоча парковка, а також швидку зарядку. Оскільки швидкісні зарядні станції відіграють важливу роль у з'єднанні транспортних і розподільних мереж, питання планування зарядних станцій має враховувати не лише розподільний потік електроенергії, але й транспортну систему та поведінку електромобілів. Тому при плануванні станцій швидкої зарядки слід враховувати як транспортні, так і електричні обмеження.

Планування автозаправних станцій вивчалось десятиліттями, і відповідні методології розподілу були прийняті та модифіковані для планування системи зарядки електромобілів. Система підтримки прийняття рішень на основі агентів представлена в [10] для визначення моделей володіння житловими електромобілями та профілів водіння для розробки можливостей стратегічного розгортання нових зарядних інфраструктур. Модель максимального покриття розроблена в [6] для розміщення певної кількості зарядних станцій у міській зоні.

Структуру планування системи зарядки електромобілів у транспортній системі можна розділити на три категорії:

1) Планування на основі вузлового попиту [1,5]:

Цей метод масштабує попит на зарядку в цільовій зоні планування до деяких географічних вузлів і визначає місцезнаходження зарядних станцій, щоб задовольнити попит на зарядку. Однак цей метод не враховує динамічну природу електромобілів.

## 2) Планування на основі симуляції дорожнього руху [1,5]:

Цей метод оцінює попит на зарядку електромобілів на основі симуляції даних реального світу та індивідуальних опитувань у режимі реального часу. Метод моделювання враховує реальну дорожню ситуацію та обмеження заторів. Однак кваліфіковані дані може бути важко отримати, і цей метод може бути непотрібним у питаннях прогностного планування.

## 3) Планування на основі моделі потоку [1,5]:

Цей метод враховує природу мобільності електромобілів і використовує потік відправлення-призначення для оцінки вимог до зарядки. Модель розташування з фіксацією потоку визначає місцезнаходження станцій у транспортній мережі, щоб максимізувати захоплений транспортний потік без урахування обмеження дальності руху електромобілів.

Як новий тип попиту на електроенергію, питання планування зарядних станцій в енергосистемі також привернуло увагу в дослідженнях. Розташування та розміри зарядної станції повинні бути розподілені розумно, щоб задовольнити попит на зарядку та забезпечити кваліфіковану послугу зарядки. Крім того, багато дослідників протягом тривалого часу вивчали оптимальні стратегії планування систем розподілу. Однак електромобілі створюють нові проблеми для планування системи розподілу, а невідповідне місце та розмір зарядної станції можуть спричинити проблеми в системі розподілу.

Планування системи зарядки електромобілів в електричній мережі враховує розташування та потужність зарядної станції для електромобілів в енергосистемах, щоб задовольнити економічні обмеження або обмеження безпеки енергосистеми. Однак цей метод не може задовольнити велику інтеграцію електромобілів в електричну мережу. Оскільки ємність системи розподілу, яка розглядається в цьому методі, не може вмістити велике зарядне навантаження в майбутньому через збільшення використання електромобілів. Двоетапний метод скринінгу може покращити цю ситуацію. Він спочатку розташовує зарядні станції в розподільчій мережі, а потім визначається оптимальний розмір за допомогою модифікованого алгоритму первинної подвійної внутрішньої точки.

За останні кілька років у значній кількості літератури запропоновано методології для планування зарядних засобів для електромобілів. Однак лише кілька опублікованих робіт щодо планування зарядних станцій для електромобілів розглядають як транспортні, так і електричні обмеження. У [5] розміщення громадських зарядних станцій оптимізовано для максимізації соціального добробуту, а також запропоновано структуру моделювання рівноваги в поєднаній транспортній та енергетичній мережі. Передбачається, що ціни на електроенергію на транспортних вузлах впливатимуть на поведінку водіїв при зарядці, а отже, на транспортний потік. Однак вузлові ціни на електроенергію навряд чи можуть вплинути на потік трафіку, оскільки зазвичай існує велика географічна відстань між двома вузлами передачі, а вартість подорожі електромобіля від одного вузла до іншого висока. У цій магістерській роботі вивчається оптимальне планування швидкісних зарядних станцій на автомагістралях, а також запропонована модель розташування потоку заправки, в якій явно включено обмеження пробігу електромобілів.

## 2 УДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ ДЛЯ ПЛАНУВАННЯ ЗАРЯДКИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

### 2.1 Підходи до прогнозування навантаження

Купівля та виробництво електроенергії та розвиток інфраструктури відіграють життєво важливу роль. Тому надзвичайно важливим є прогнозування електричного навантаження. У центрі уваги прогнозування навантаження – оцінка майбутнього попиту на навантаження. Це вимагає точного передбачення величини електричного навантаження для різних етапів планування. Прогнозування попиту на навантаження розглядається як один із серйозних аспектів вартості експлуатації системи живлення. Помилки прогнозування призводять до збільшення експлуатаційних витрат.

Прогнозування навантаження можна загалом розподілити на три групи, які базуються на тривалості:

1. Короткостроковий прогноз навантаження (від 1 години до 1 тижня).
2. Середньостроковий прогноз навантаження (від 1 місяця до 1 року).
3. Довгостроковий прогноз навантаження (від 1 до 10 років).
4. Значення прогнозування навантаження для електрики.

Розвинені країни світу активно переходять від автомобілів, що працюють на ископному паливі до електромобілів. Очікується збільшення кількості електромобілів по всьому світу. Для його ефективності буде необхідний надійний механізм зарядки електромобіля інтеграція в енергосистему, що необхідно для стабільності та надійності системи живлення. Неконтрольований спосіб зарядки електромобілів викликає величезні відхилення в електричній мережі, що впливає на якість електроенергії енергосистеми. Як результат відбувається високе енергоспоживання, високі піки навантаження та погіршення якості електроенергії. Планування та прогнозування в основному використовуються для контролю та мінімізації впливу цих факторів.

У підходах до прогнозування вирішальним фактором є уникнення помилок і забезпечення стабільності мережі з прогнозування повсякденного навантаження. Створення точної моделі прогнозування підтримуватиме вдосконалення зарядки електромобілів і надихатиме виробництва заохочувати використання електромобілів. Стабільність потужності мережі та гарантування балансу між пропозицією та попитом на електроенергію досягається шляхом відповідного планування зарядки електромобілів.

В процесі прогнозування навантаження використовуються вхідні дані та дані отримані в процесі вимірювання. Набір даних взято з ISO, призначеного для 2017-2021 років. Набір, який використовується в дослідженні, складається з історичних даних про навантаження щогодини та інформацію про погодні умови. Існує висока кореляція між погодними умовами та навантаження в регіоні. Потреба в електроенергії зростає, коли є зниження температури нижче 10 градусів, щоб задовольнити потреби в опаленні. Тоді як попит на електроенергію зростає, коли температура підвищується на 23 градуси, щоб задовольнити вимоги до охолодження. Історичні дані включають середнє навантаження попереднього дня, навантаження попереднього дня тієї ж години та навантаження попереднього тижня в той самий день і ту саму годину. Інші вхідні дані для прогнозування навантаження це година такого дня та день цього тижня. Щоб створити модель прогнозу навантаження, використовуються наступні кроки, які наведені нижче.

1. Створення матриці для прогнозування навантаження на основі історичних даних, таких як погодні умови та електричне навантаження.
2. Створення моделі прогнозування навантаження, таку як лінійна регресія, регресія з пакетним деревом і нейронна мережа.
3. Створення прогнозу навантаження на наступний день, тиждень або місяць на основі історичних даних

Набір даних розділено на наступні набори, які наведені нижче:

1. Навчальний комплект (з 2017 по 2020 рр.)
2. Тестовий набір (дані 2021 р.)

Для побудови моделі для апроксимації параметрів використовується навчальний набір системи. Продуктивність моделей перевіряється за даними тестування. Після цього моделі побудовані на даних із навчального набору даних використовуються для прогнозування навантаження.

Моделі перевіряються за даними тестового набору, що забезпечує продуктивність наступного використання моделі прогнозування навантаження. Після прогнозування навантаження необхідно порівняти фактичне навантаження з прогнозованим навантаженням, щоб знайти похибку прогнозування моделей.

Щоб перевірити продуктивність прогнозу використовують середньоквадратичну помилку моделі, середню абсолютну відсоткову помилку і щоденну пікову помилку прогнозованого навантаження. В магістерській роботі використовуються наступні методи прогнозування:

1. Модель лінійної регресії.
2. Регресійна модель дерева рішень.
3. Штучна нейронна мережа.

### **Модель лінійної регресії**

Для розуміння алгоритму лінійної регресії використовується підхід моделювання лінійної регресії між безперервною залежною змінною  $y$  та однією або кількома незалежними змінними  $x_1; x_2; \dots x_n$ .

Метою підходу лінійної регресії є розпізнавання функції, яка описує тісну кореляцію між цими змінними так, що значення залежних змінну можна оцінити серією незалежних змінних.

У методі лінійної регресії для прогнозування навантаження незалежна змінна для навантаження визначається як погодні умови, такі як температура з історичними даними навантаження. Ці значення безпосередньо впливають на електричне навантаження. Модель прогнозування навантаження за допомогою підходу лінійної регресії можна представити наступним чином:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + e$$

де  $y$  – навантаження,  $x_i$  – діючі властивості,  $\beta_i$  – параметри регресії відносно  $x_i$ , а  $e$  – значення помилки в відношенні. Середнє значення помилки дорівнює нулю з постійною дисперсією.

Параметр  $\beta_i$  невідомий, спостерігаючи за  $y$  і  $x_i$ , його слід спрогнозувати. Нехай  $b_i$  ( $i=0,1,2,\dots,k$ ) взято у формі  $i$  ( $i=0,1,2,\dots,k$ ). Тоді прогнозоване значення  $y$  наведено нижче:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k \quad (2.1)$$

У середньому різниця між прогнозованими значеннями навантаження  $y$  знайденим за формулою (2.1) і реальним значенням навантаження  $y$  буде прямувати до нуля. Отже, передбачається, що значення похибки у рівнянні (2.1) має очікуване або середнє значення нуль, якщо функція щільності ймовірності для залежної змінної  $y$  на різних рівнях незалежної змінної має нормальний розподіл. Тому необхідно виключити значення помилки в розрахунок прогнозованих параметрів. Після цього, щоб мінімізувати суму квадратів залишкових значень оцінюється значення за методом найменших квадратів, щоб отримати заданий параметр  $b_i$  за наступною формулою:

$$\underline{B} = [b_0 \ b_1 \ b_2 \dots b_k]^T = (\underline{X}^T \underline{X})^{-1} \underline{X}^T \underline{Y} \quad (2.2)$$

У наведеному вище виразі  $X$  і  $Y$  є вектором-стовпцем і матрицею:

$$\underline{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad i \quad \underline{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Модель готова до використання для прогнозування значень навантаження та розрахунку параметрів. Згодом, вважаючи, що всі значення незалежної змінної

оцінюються правильно, тому стандартна помилка буде меншою. Для отримання стандартної помилки рівняння знаходиться за формулою:

$$s = \sqrt{\frac{SSE}{n - (k + 1)}} \quad (2.4)$$

$$SSE = \sum (y_i(t) - \hat{y}_i(t))^2$$

де  $y_i(t)$  — реальне значення, а  $\hat{y}_i(t)$  — визначене значення.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n y_i(t) - \hat{y}_i(t))^2}{\sum_{i=1}^n y_i(t) - \bar{y}_i(t))^2} \quad (2.5)$$

де  $\bar{y}_i(t)$  — середнє значення  $y(t)$ .

### Модель дерева регресії

Дерево регресії – це непараметрична статистична класифікація та регресійний підхід, який також відомий як автоматичний класифікатор. Ця техніка використовується для покращення стабільності та точності алгоритмів машинного навчання. Цей підхід використовується для підвищення ефективності прогнозування базової моделі, наприклад дерева рішень або ті підходи, які роблять гнучкий вибір і налаштування в лінійній моделі.

Деревоподібна модель пакетної регресії є свого роду агрегованою завантажувальною системою, в якій вихід з останнього кроку подається на вхід до поточного кроку. У звичайних нейронних мережах, кожен вхід і вихід незалежні один від одного, але в сценаріях коли, наприклад, потрібно оцінити наступне слово речення потрібно запам'ятати попередні слова.

Для фази навчання вибірка складається з  $n$  кількості історичних випадків  $(x_1; y_1); (x_2; y_2); \dots (x_n; y_n)$ , де  $x$  є незалежна змінна з  $m$ -вимірним вектором, і  $y$  є



залежною змінною відгуку, що має числове значення, отже дерево регресії є структурою дерева.

Дерево складається шляхом повторюваних поділів підмножин ще на дві наступні підмножини на основі вибіркової вхідної змінної. Кожен спліт є оглядом про вхідну змінну, яка вказує на ліву та праву наступні підмножини на основі відповіді «так» або «ні». Оскільки підхід деревоподібної регресії має справу лише з дискретними значеннями, функція дискретизується на вектори входу та виходу змінної в домені.

У той же час для функції виводу використовується пакетна регресійна модель дерева. На основі цього дерева регресії будується модель, кожна з яких має набір дерев регресії з різних наборів інструкцій для виконання нелінійної регресії. Механізм починається зі структури з 20 таких дерев із найменшим розміром листа 40. Більший розмір листа дає менший розмір дерева.

### **Штучна нейронна мережа**

Штучні нейронні мережі мають дуже велику кількість застосувань завдяки своїй здатності до навчання. Нейронна мережа дає можливість подолати залежність від функціональної форми моделі прогнозування навантаження. Існує кілька типів нейронних мереж: багаторівневий персептрон, самоорганізаційні мережі тощо. В нейронній мережі є вхідний, прихований і вихідний рівень. Існують різні функції введення у вхідному шарі. Вхідні дані множаться на вагові коефіцієнти, які додаються до порогового значення, щоб отримати внутрішній номер продукту. Ключова перевага полягає в тому, що більшість підходів до прогнозування щодо нейронної мережі не потребують моделі навантаження. Хоча на етап навчання нейронних мереж зазвичай йде багато часу. Штучна нейронна мережа — це повна зв'язана нейронна мережа пересилання каналів. де вхідні та приховані шари підключені до вихідного блоку, який є лінійними функціями ваги. Після цього розв'язуються лінійні рівняння для цих вихідних ваг. Для оптимізації вихідних ваг метод зворотного розповсюдження використовується для кожної ітерації зразків навчальних даних. У запропонованій архітектурі штучної нейронної мережі сигмоїдна функція активації використовується для обчислення

виводу прихованого шару, тоді як лінійна функція використовується для обчислення виводу вхідного рівня.

Для прогнозування навантаження використовується рівняння (2.6).

$$Output = \sum_{j=1}^m \left( \frac{2v_j}{1 + e^{-2(\sum_{i=1}^n \omega_{ij} x_i) - T_j}} - T_{out} \right) \quad (2.6)$$

де  $v_j$  ( $j=1, 2, m$ ) і  $T_{out}$  представляють значення вагів та зміщення нейрона вихідного рівня відповідно. Ваги та зміщення кожного нейрона модифікуються через ітераційне навчання вхідних даних з метою виявлення меншої помилки прогнозу. Модель прогнозування навантаження ініціалізується 20 нейронами в прихованому шарі з 8 вхідними функціями. Термін навчання скоротився за рахунок використання функції Левенбурга-Марквардта. Весь набір даних розділено на 3 набори; 70% навчального набору, 15% перевірного набору та 15% тестових зразків, що залишилися.

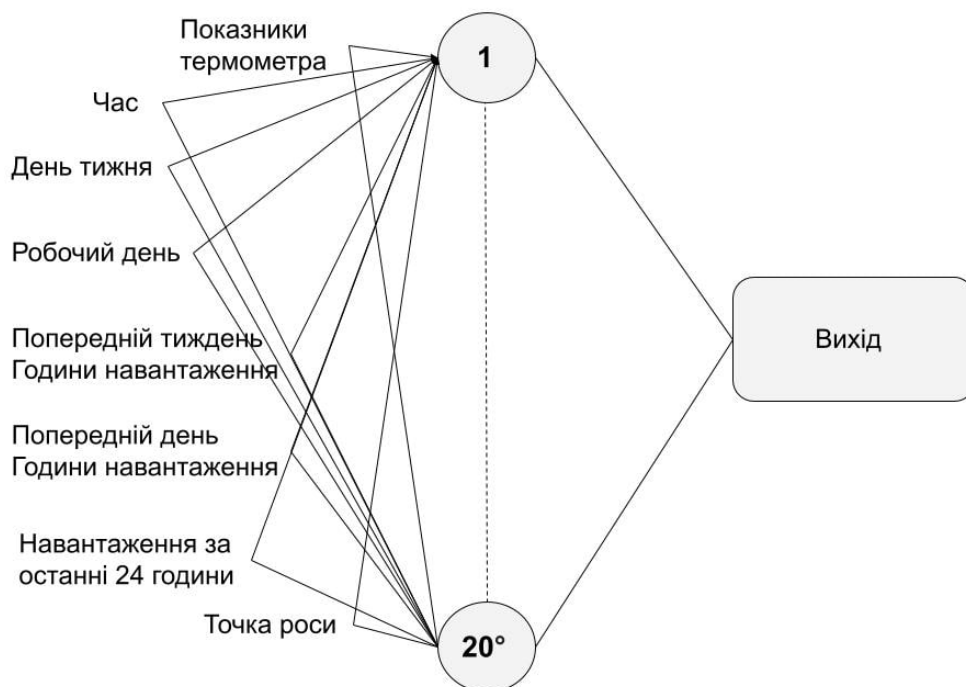


Рисунок 2.1 – Нейронна мережа

На рисунку 2.1 представлена нейронна мережа, яка використовується для прогнозування навантаження з 8 вхідними функціями, 20 нейронами та вихідним шаром у прихованому шарі.

Проте штучна нейронна мережа є найкращим методом для прогнозування навантаження через здатність до самонавчання. У той час як впровадження нейронної мережі є складним процесом і потребує великих історичних даних для навчання та визначення найменшої середньоквадратичної помилки.

В роботі для прогнозування використовуються такі три моделі: модель лінійної регресії, регресійна модель дерева рішень, штучна нейронна мережа, яка використовується для оптимізації планування зарядки електромобілів за рахунок мінімізації витрат.

Результати прогнозування навантаження поділяються на три частини, а саме:

1. Прогноз навантаження на добу вперед.
2. Прогноз навантаження на наступний тиждень.
3. Прогноз навантаження на наступний місяць.

Є три параметри, які використовуються для перевірки ефективності моделей прогнозування і підтвердити точність передбачення. Параметри є середня помилка, середня помилка у відсотках і щоденний пік.

Проведено порівняння прогнозованого навантаження з фактичним базовим навантаженням на добу представлено.

Таблиця 2.1 – Прогнозоване навантаження на добу

Моделі прогнозування	Середня помилка (кВт)	Середня помилка у відсотках (%)	Щоденний пік (%)
Нейронна мережа	16,09	1,24	1,55
Модель дерева регресій	45,55	3,2	5,12
Лінійна регресія	51,88	5,14	7,23

Результати помилок для прогнозу навантаження на добу представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.2 – Прогнозоване навантаження на тиждень

Моделі прогнозування	Середня помилка (кВт)	Середня помилка у відсотках (%)	Щоденний пік (%)
Нейронна мережа	7,82	1,04	1,18
Модель дерева регресій	33,14	3	3,78
Лінійна регресія	49,08	5,02	5,38

Результати помилок прогнозу навантаження на наступний тиждень представлені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.3 – Прогнозоване навантаження на тиждень

Моделі прогнозування	Середня помилка (кВт)	Середня помилка у відсотках (%)	Щоденний пік (%)
Нейронна мережа	5,03	0,94	1,09
Модель дерева регресій	21,6	2,01	2,34
Лінійна регресія	47,13	4,53	3,33

Результати помилок прогнозу навантаження на наступний місяць наведені в табл. 2.3.

Після цього, аналізуючи результати, отримані за допомогою цих моделей прогнозування можна припустити, що штучна нейронна мережа дає кращий

результат, ніж решта двох моделей прогнозування. Прогнозування нейронною мережею вимагає більше часу, оскільки є фаза навчання, але збігається за менший час, ніж модель дерева регресій завдяки статистичному підходу моделі нейронної мережі.

Розподіли прогнозованих похибок представлені на рис. 2.2 для прогнозування за допомогою штучної нейронної мережі.

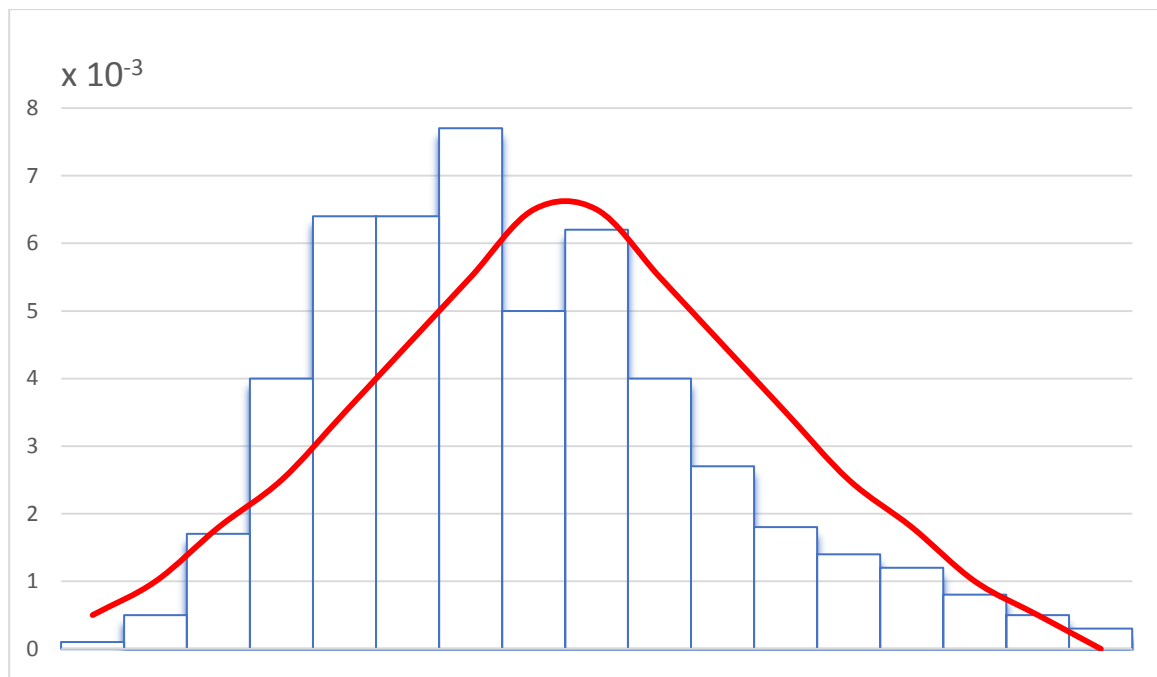


Рисунок 2.2 – Розподіл помилок за допомогою штучної нейронної мережі

Найбільш задовільний розподіл помилок спостерігається для штучної нейронної мережі порівняно з рештою двох моделей прогнозування.

## 2.2 Планування зарядки транспортних засобів

Оскільки кількість електромобілів на дорозі продовжує збільшуватися, приватна та загальнодоступна зарядна інфраструктура користується гострим попитом. Для полегшення заряджання електромобілів і відстрочки повторного

інвестування в електромережі необхідні відповідні заходи планування та правила системи зарядки електромобілів.

Географічними цільовими зонами планування системи зарядки електромобілів можуть бути міські райони та автомагістралі. Планування зарядної інфраструктури в міській місцевості характеризується великою щільністю проникнення електромобілів, високим коефіцієнтом використання зарядної інфраструктури та обмеженою середньою відстанню. Порівняно з міською територією, очікується, що щільність населення та рівень проникнення електромобілів у сільській місцевості будуть відносно невеликими. Під час вибору розташування зарядних станцій слід враховувати мережу автомобільного транспорту, яка зазвичай живиться від високовольтної розподільчої мережі з великим радіусом обслуговування та ємністю батареї електромобіля.

Для системи зарядки електромобілів у містах інфраструктура зарядки поділяється на дві частини:

1) Зарядні станції рівня 1 і 2, встановлені на приватних і громадських паркінгах, наприклад вдома, в житлових районах, на робочих місцях і в комерційних зонах як основних методів зарядки для регулярної зарядки електромобілів.

2) Станція швидкої зарядки рівня 3 є додатковим методом зарядки для заправки електромобілів у разі екстреної ситуації.

Зарядні пристрої рівня 1 і 2 постачають електроенергію для паркувальних електромобілів, яка базується на вузлах, тому попит на зарядку розраховується на основі навантаження вузла та включається в звичайний профіль навантаження. Зарядна станція рівня 3 в основному надає послуги заряджання електромобілів, що рухаються по маршруту, поєднуючи як транспортну, так і енергетичну мережі. Таким чином, розташування та розмір зарядної станції у транспортній системі повинні відповідати провідному попиту, зручності зарядки та пов'язаним обмеженнями. Також варто звернути увагу на мобільність зарядної станції, динамічну поведінку під час водіння та невизначеності пов'язані з розрядженням.

Крім того, швидке зростання кількості електромобілів і різні ринкові фактори викликають проблеми з прогнозуванням рівня поширення кількості електромобілів. Оцінки темпів використання електромобілів для пасажирів дуже різняться: деякі сценарії є поступовими, а інші – агресивними. І на рівень проникнення електромобілів значно вплинули стимули, податкові пільги та ринкова ціна.

Враховуючи це, магістерська робота присвячена стохастичному спільному плануванню як для системи зарядки електромобілів, так і для розподільчої мережі, де розглядається поведінка електромобілів як у транспортній мережі, так і в електричній системі. І питання планування сформульоване як багатоцільова модель з оптимізованою як вартістю капіталовкладень, так і зручністю обслуговування. Оптимальне планування системи зарядки електромобілів у міській місцевості є цільовою географічною зоною планування в цій роботі, де радіус обслуговування та відстань руху є відносно обмеженими.

Порівняно з існуючими методами, основні внески магістерської роботи можна узагальнити так:

1. Запропоновано модель гнучкого планування, в якій враховано невизначеність рівня проникнення електромобілів. Для оцінки цієї невизначеності використовується метод моделювання Монте-Карло. І довірчий інтервал використовується для забезпечення ефективності та результативності цього аналізу невизначеності.

2. Модель динамічного призначення трафіку об'єднана з моделлю розташування, що фіксує потоки, щоб оцінити захоплений потік трафіку на основі оптимального результату планування. Цей метод найкраще моделює поведінку електромобілів у міських умовах. З урахуванням теорії масового обслуговування та часу очікування результат моделювання вказує на концептуальну схему планування з найкращою комерційною цінністю, соціальною вигодою та можливістю обслуговування.

3. У цій роботі сформульована багатоцільова модель оптимізації. Зафіксований трафік у транспортній мережі використовується як індикатор

зручності подорожі та зарядки, а також ринкового потенціалу зарядної станції. Загальна вартість використовується для аналізу ефективності витрат, включаючи вартість капітальних інвестицій як для системи зарядки, так і для мережі розподілу, експлуатаційні витрати системи та втрати в мережі розподілу. А алгоритм багатоцільової еволюції на основі декомпозиції використовується для вирішення цієї багатоцільової оптимізаційної моделі та отримання оптимальної границі Парето. І тоді можна використовувати різні методи, щоб знайти остаточне рішення.

Система зарядки, проаналізована в цій роботі, призначена для міської місцевості з великою щільністю проникнення електромобілів, високим коефіцієнтом використання зарядної інфраструктури та обмеженою середньою відстанню проїзду (на прикладі міста Київ). Відповідно, зарядні інфраструктури поділяються на дві частини: зарядні станції рівня 1 і 2, встановлені вдома, і паркувальні майданчики житлових районів, робочих і комерційних районів тощо є кращим або загальним вибором для електромобілів; Рівень 3 забезпечує додатковий метод зарядки для термінової заправки електромобілів.

Розглянемо алгоритм Дейкстри для пошуку найкоротших шляхів в місті між зарядними станціями та автомобілями.

Алгоритм Дейкстри:

$$1. l^*(v_s) = 0, \forall v_j \neq v_s \quad l(v_j) = \infty.$$

$$2. G(v_i) = \{v_j : \exists(v_i, v_j)\};$$

$$\forall v_j \in G(v_i) \quad l(v_j) = \min \{l(v_j), l(v_i) + d(v_i, v_j)\},$$

$$l^*(v_j) = \min_{v_j} \{l(v_j)\}.$$

$$\forall v_j \in V \quad l^*(v_j) = d(v_s, v_j).$$



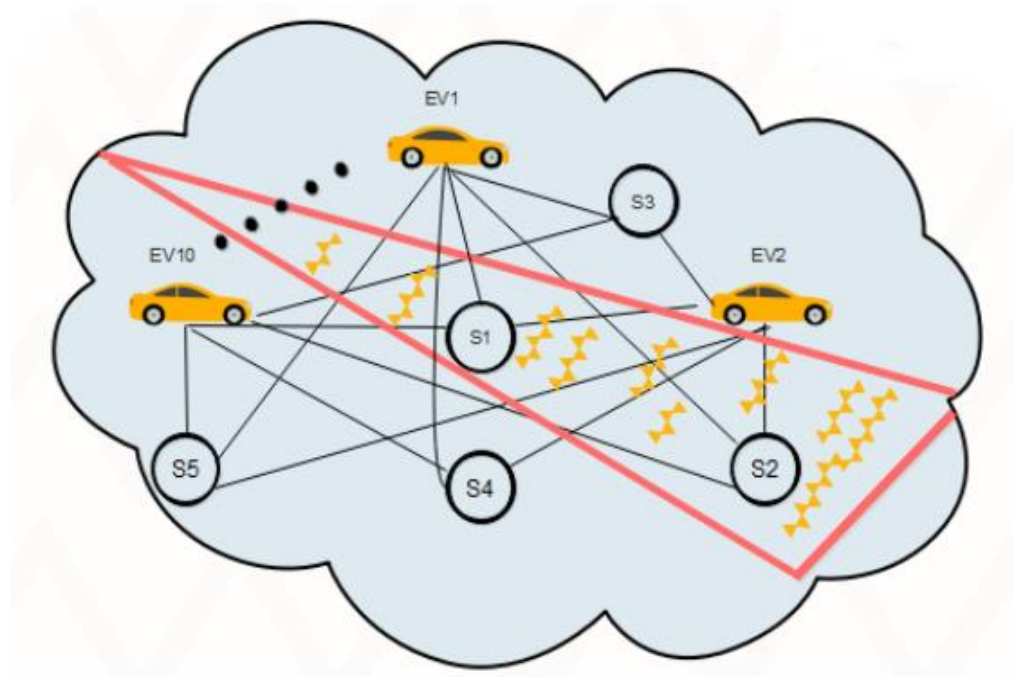


Рисунок 2.3 – Географічне представлення зарядних станцій та електромобілів

На першому кроці всі вузли помічаються: стартовий вузол  $v_s$  отримує постійну мітку 0, всі інші вузли отримують тимчасові мітки  $\infty$ .

На другому кроці (який є циклічним) для всіх вузлів  $v_j$  з тимчасовими мітками, в які заходять дуги з вузла  $v_i$  з постійною міткою, оновлюємо мітки. За нову мітку обираємо мінімум із старої мітки і суми мітки вузла  $v_i$  і відстані між  $v_i$  і  $v_j$ . Серед вузлів  $v_j$  з тимчасовими мітками, знаходимо вузол з найменшою міткою. Мітку цього вузла проголошуємо постійною. (При чисельному виконанні алгоритму вручну мітку підкреслюємо).

Якщо всі вузли отримали постійні мітки, закінчити роботу алгоритму. Отримані постійні мітки дають відстані від стартового вузла  $v_s$  до всіх інших вузлів орграфу.

Якщо залишилися вузли з тимчасовими мітками, повторити крок  $i$ .

Таким чином, спочатку виконується ініціалізація (крок 1), а потім виконується крок 2 доти, поки є тимчасові мітки.

### 2.3 Результат прогнозування навантаження для планування зарядки електромобілів

Отже проведений аналіз методів машинного навчання показав, що найбільш точні результати показує метод штучної нейронної мережі (рис. 2.4 – рис. 2.7).

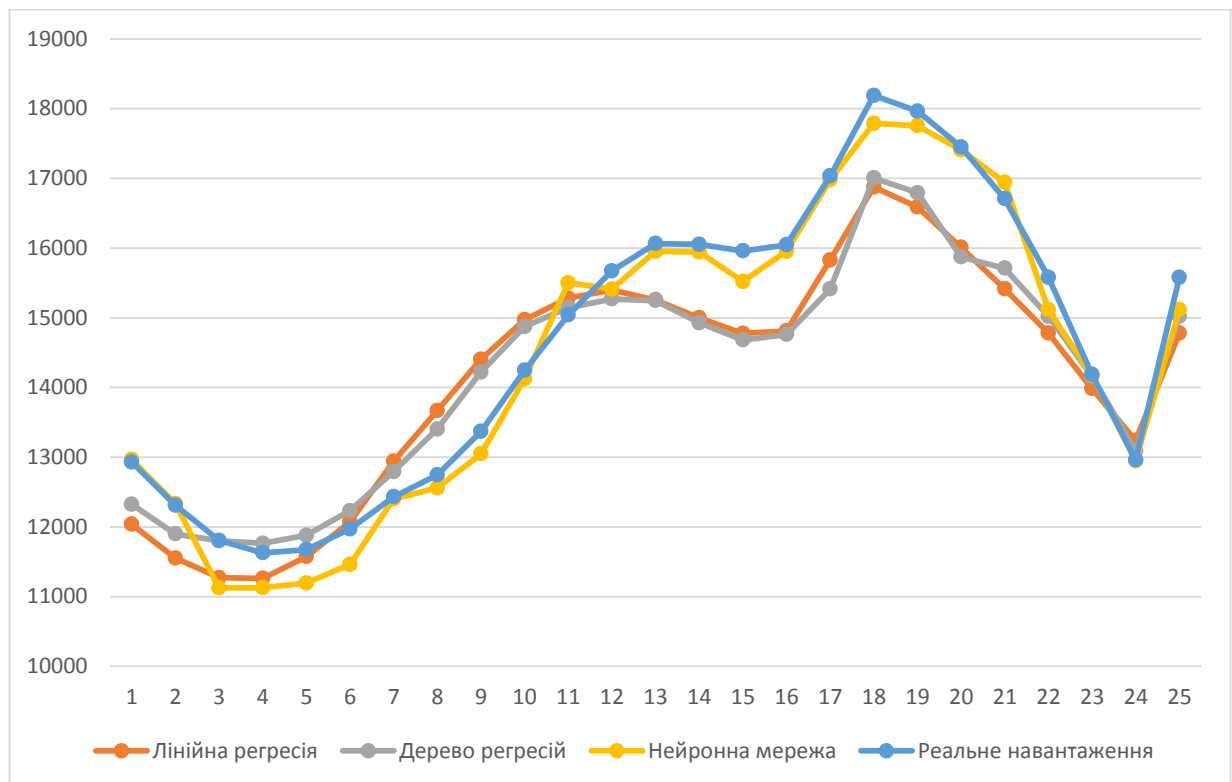


Рисунок 2.4 – Порівняння методів прогнозування

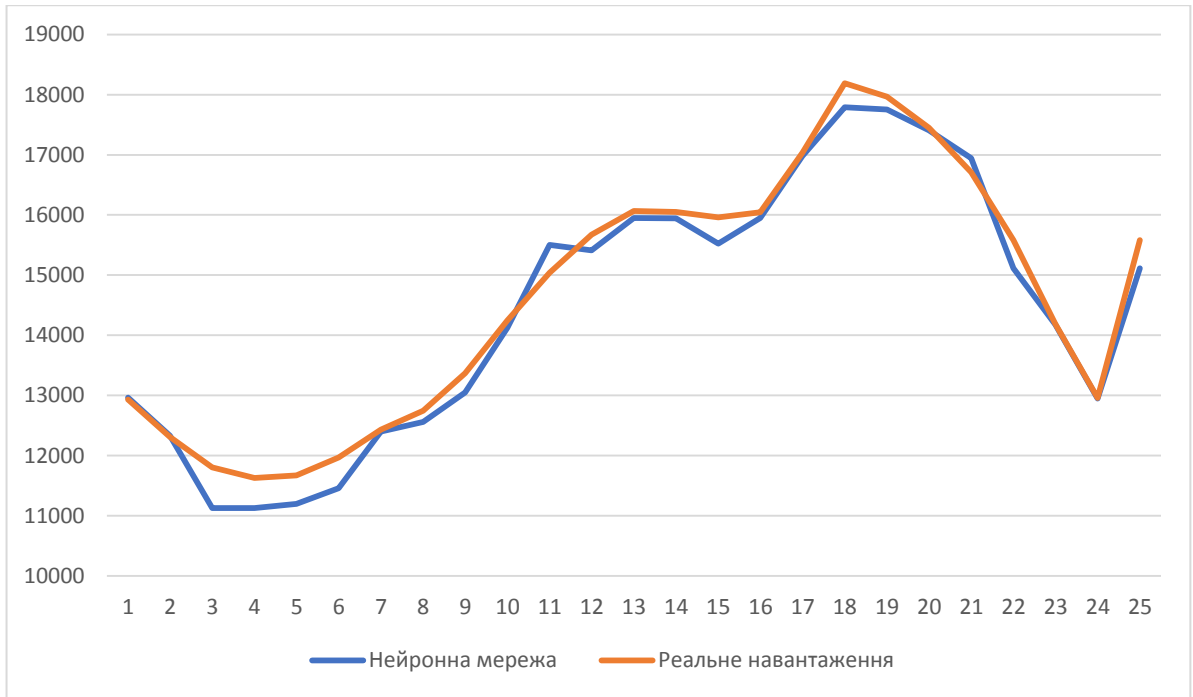


Рисунок 2.5 – Порівняння результатів штучної нейронної мережі та реального навантаження

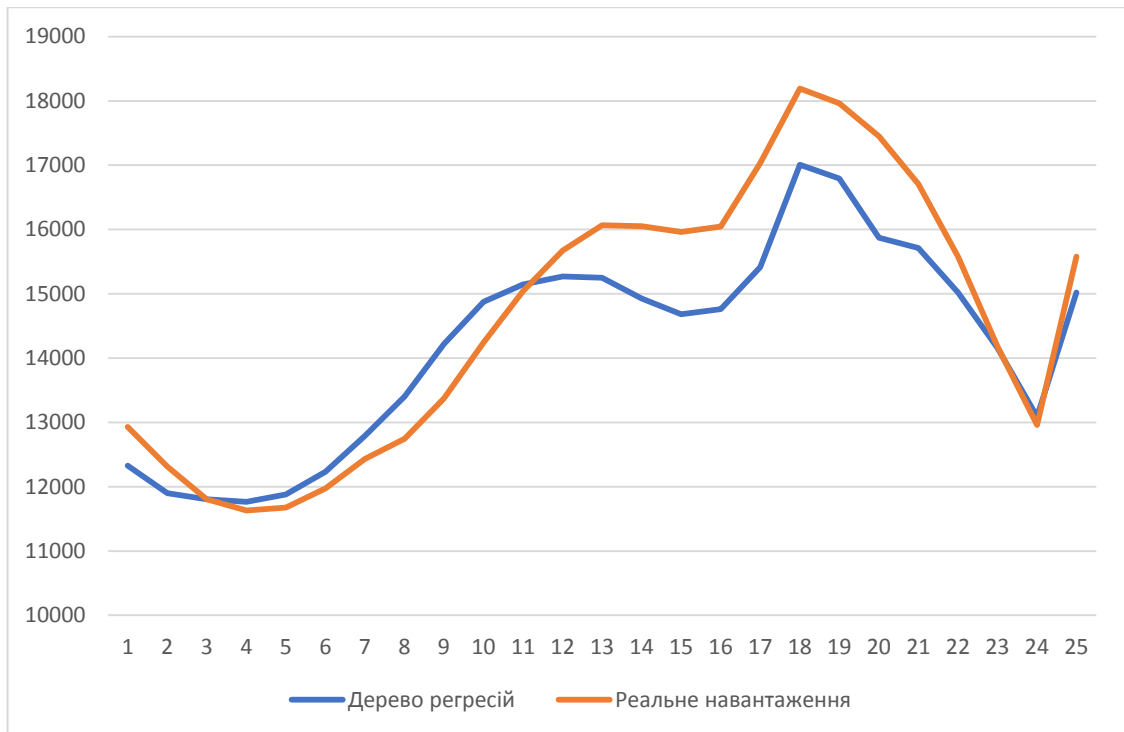


Рисунок 2.6 – Порівняння результатів методу дерева регресії та реального навантаження

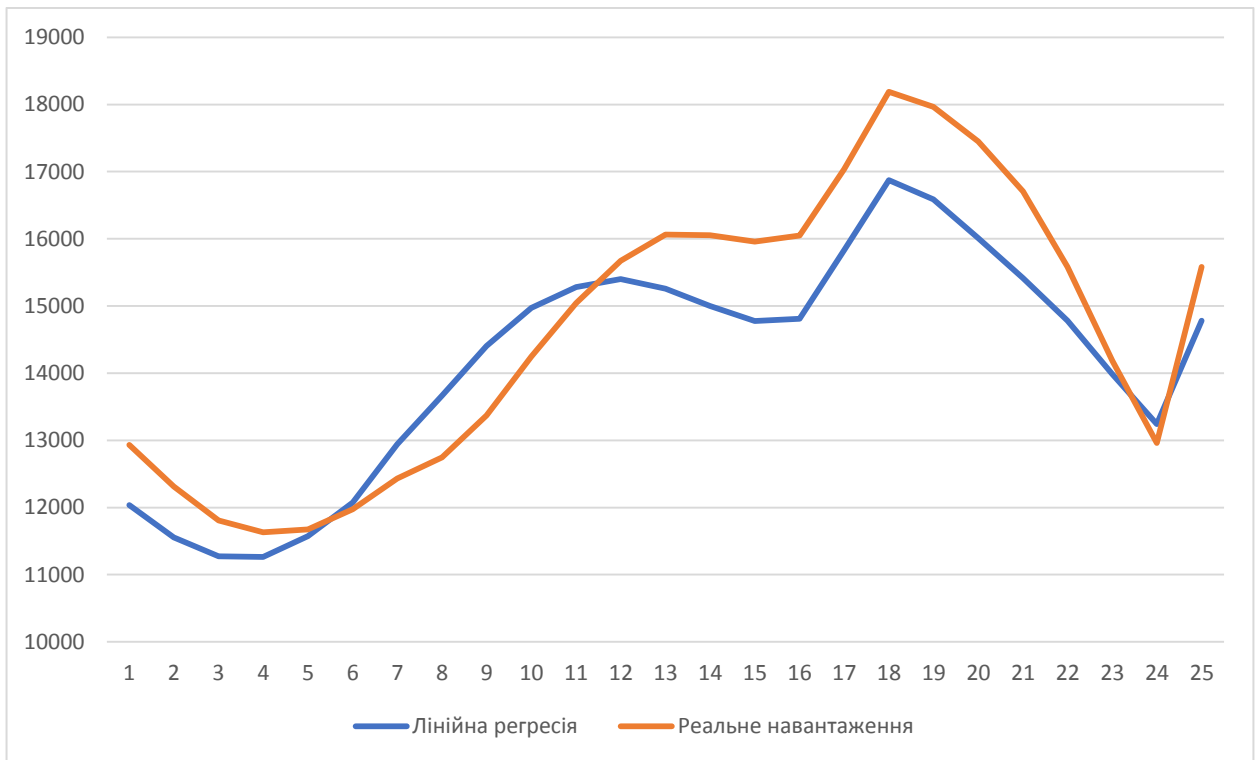


Рисунок 2.7 – Порівняння результатів методу лінійної регресії та реального навантаження

В результаті застосування запропонованих в роботі методів прогнозування було отримано наступні дані.

Кількість необхідних зарядних станцій:

в 2023 р.: 2785

в 2024 р.: 3250

Прогнозована кількість електромобілів:

в 2023 р.: 32 183

в 2024 р.: 35 236

В роботі за допомогою методу штучної нейронної мережі було побудовано прогноз кількості зарядних станцій необхідних для обслуговування зростаючої кількості електромобілів.

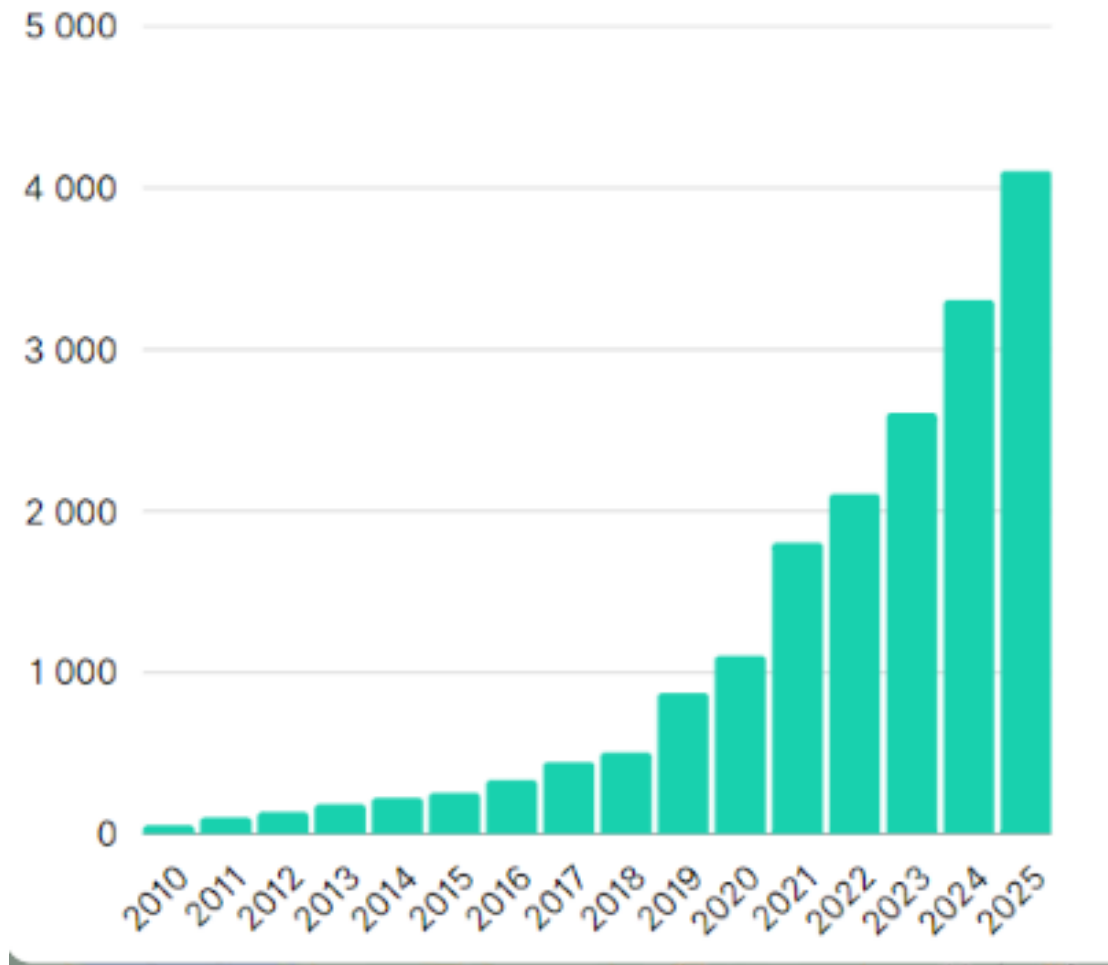


Рисунок 2.8 – Прогнозування кількості зарядних станцій

Саме рисунок 2.8 відображає результати побудованого прогнозу кількості зарядних станцій. Як видно з побудованого прогнозу кількість зарядних станцій постійно зростає зі збільшенням кількості електромобілів. Як показано на рисунку 2.8 кількість зарядних станцій в 2025 році має бути в кількості не меншій ніж 4000.

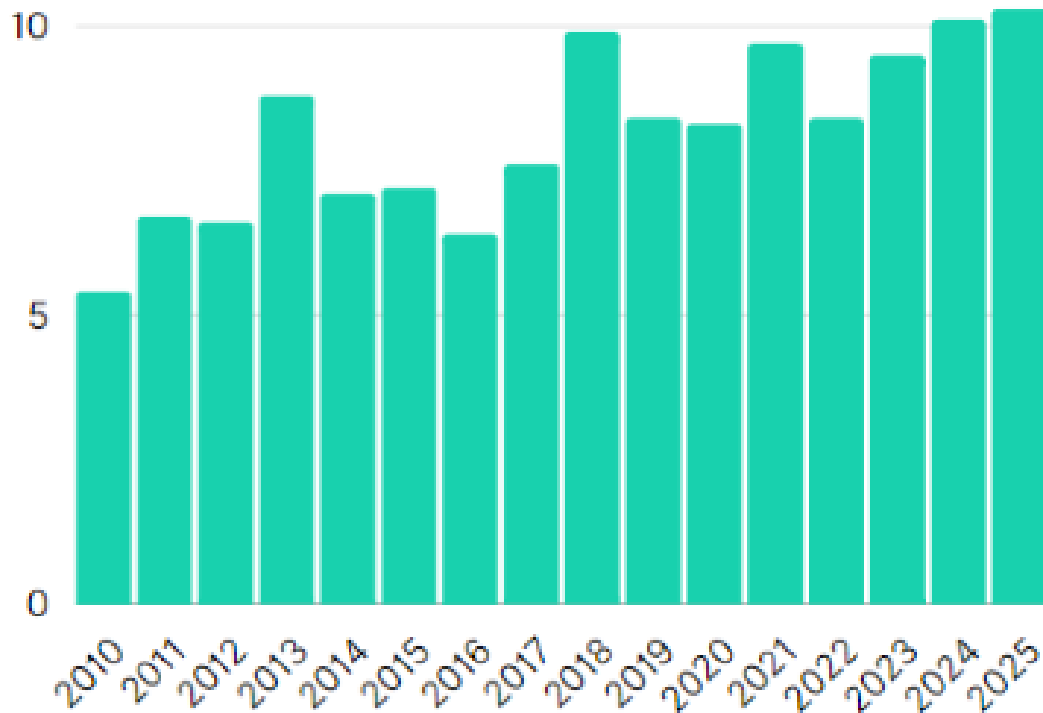


Рисунок 2.9 – Прогноз навантаження ринку електромобілів на 1 громадську зарядну станцію при умові їх рівномірного розподілу

Також в процесі дослідження було побудовано прогноз навантаження електромобілів на 1 громадську зарядну станцію при умові їх рівномірного розподілу. Отже постає завдання визначити оптимальну кількість зарядних станцій та їх оптимальне розміщення. Для цього необхідно використати оптимізаційні методи.

## 3 МЕТОДИКА ПЛАНУВАННЯ СИСТЕМИ ЗАРЯДКИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

### 3.1 Моделювання транспортних потоків

Для практичної транспортної системи дані транспортного потоку традиційних транспортних засобів можна отримати в реальному часі. Однак необхідно побудувати модель призначення транспортного потоку в наведеній транспортній системі для проблеми розташування зарядних станцій. Як правило, водії електромобілів зазвичай віддають перевагу маршрутам із найкоротшою відстанню між відправленням і пунктом призначення, і цей маршрут може ідентифікуватися добре розробленим алгоритмом Дейкстри, який представлений в попередньому розділі. В магістерській роботі запропоновано розглянути іншу модель призначення транспортного потоку.

**Гравітаційна просторова модель взаємодії** – це модель яку можна використовувати для штучного створення точки вихідного пункту призначення, щоб відобразити потік інфраструктура транспортної системи на основі ваги вузлів і довжини зв'язку. Вага вузла в транспортній системі фізично відображає здатність вузла залучати потік транспорту.

Математичне формулювання можна описати наступним чином:

$$A_{rs} = 1.5 \times \frac{W_r^T W_s^T}{d_{rs}^T}, \forall r \in N^T, s \in N^T, r \neq s$$

$$f = EV_t^{Total} \frac{A_{rs}}{\sum_{rs \in Q} A_{rs}} \quad (3.1)$$

де  $A_{rs}$  – потік інфраструктура транспортної системи,

$W_r^T W_s^T$  – вага вузлів в транспортній мережі – представляє потік трафіку,

$d_{rs}^T$  – відстань між парами пунктів призначення в транспортній мережі,

$EV_t^{Total}$  – кількість електромобілів.

Трафік на шляху в транспортній мережі можна отримати на основі моделі розподілу трафіку на основі рівноваги користувача на кожному часовому інтервалі. Формулювання математичної моделі описано нижче.

Цільова функція полягає в розв'язанні задачі рівноваги шляхом мінімізації суми інтегралів функції виконання.

Цільова функція:

$$\text{Min}f(x) = \sum_{m \in A^T} \int_0^{f_{m,t}^T} PF(f) df = \sum_{m \in A^T} t_m^0 \left[ f_{m,t}^T + 0.03 \left( \frac{(f_{m,t}^T)^5}{(C_m^T)^4} \right) \right] \quad (3.2)$$

де  $PF(f)$  – функція виконання,

$f_{m,t}^T$  – кількість потоків трафіку на каналі  $m$  на етапі часу  $t$ ,

$C_m^T$  – пропускна здатність потоку ланки  $m$ .

Функція ефективності зв'язку в цьому випадку визначається як функція залежності від потоку часу подорожі. Метод враховує як довжину зв'язку, так і вплив перевантаження трафіку:

$$t_{m,t}^T = t_m^0 \left[ 1 + 0.15 \left( \frac{(f_{m,t}^T)^4}{(C_m^T)^4} \right) \right], \forall m \in A^T \quad (3.3)$$

де  $t_{m,t}^T$  – час проходження в ланці  $m$  на кроці часу  $t$ ,

$t_m^0$  – час проходження вільного потоку по ланці  $m$ ,

$f_{m,t}^T$  – кількість потоків трафіку на каналі  $m$  на етапі часу  $t$ ,

$C_m^T$  – пропускна здатність потоку ланки  $m$ .

Час подорожі пов'язаного шляху на основі потоку можна розрахувати за допомогою:

$$t_{q,t}^{rs} = \sum_{m \in A^T} (\delta_{m,q}^{rs} \times t_{m,t}^T), \forall q \in Q_{rs}, r \in N^T, s \in N^T \quad (3.4)$$



де  $t_{q,t}^{rs}$  – час руху по маршруту на основі потоку,

$\delta_{m,q}^{rs}$  – додатній параметр масштабування для наявності зарядної станції,

$f_{m,t}^T$  – кількість потоків трафіку на каналі  $m$  на етапі часу  $t$ .

Обмеження збереження потоку, що позначає суму потоків на всіх можливих шляхах, які з'єднують вузол  $rs$  повинен дорівнювати швидкості відключення точки пункту призначення  $rs$ :

$$\sum_{q \in Q_{rs}} f_{q,t}^{rs} = f_t^{rs}, \forall r \in N^T, s \in N^T \quad (3.5)$$

де  $f_{q,t}^{rs}$  – кількість потоків трафіку на шляху, що з'єднує точку пункту призначення на кроці часу  $t$ ,

$f_t^{rs}$  – попит на маршрут від точки відправлення до точки призначення.

Потік по кожному посилянню:

$$f_{m,t}^T = \sum_{r \in N^T} \sum_{s \in N^T} \sum_{q \in Q_{rs}} (\delta_{m,q}^{rs} \times f_{q,t}^{rs}), \forall m \in A^T \quad (3.6)$$

Модель розподілу трафіку на основі рівноваги користувача — це проблема нелінійного програмування, яка може бути розв'язана відомими методами нелінійного програмування. В магістерській роботі було використано метод Лагранжа.

У попередніх дослідженнях для моделювання зазвичай використовується потік традиційних транспортних засобів. Однак це могло не повністю описувати поведінку електромобілів у майбутній транспортній мережі. Тому запропоновано використовувати модель розподілу трафіку на основі ймовірностей для моделювання транспортного потоку електромобілів у транспортній системі із взаємодією між схемами транспортного потоку, заторами та розташуванням швидких вбудованих зарядних пристроїв. При визначенні схеми потоку мережевого трафіку користувача стохастичний принцип рівноваги застосовано до моделі поведінки водіїв щодо вибору маршруту. Змінні моделі рівноваги

користувача включають план розташування зарядної станції, а також схему рівноважного потоку, які отримуються з модельного розподілу. Логічно зробити щоб водії могли мати доступ до транспортної інформації та розташування зарядних станцій через використання навігаційної системи автомобіля.

Математичне формулювання моделі розподілу трафіку на основі ймовірностей зображується наступним чином:

Потік по кожному посилянню:

$$f_{m,t}^T = \sum_{r \in N^T} \sum_{s \in N^T} \sum_{q \in Q_{rs}} (\delta_{m,q}^{rs} \times f_{q,t}^{rs}), \forall m \in A^T \quad (3.7)$$

де  $t_{q,t}^{rs}$  – час руху по маршруту на основі потоку,

$\delta_{m,q}^{rs}$  – додатний параметр масштабування для наявності зарядної станції.

Залежний від потоку час у дорозі з урахуванням довжини маршруту та ефекту заторів.

$$t_{m,t}^T = t_m^0 \left[ 1 + 0.15 \left( \frac{(f_{m,t}^T)^4}{(C_m^T)^4} \right) \right], \forall m \in A^T$$

$$t_{q,t}^{rs} = \sum_{m \in A^r} (\delta_{m,q}^{rs} \times t_{m,t}^T), \forall q \in Q_{rs}, r \in N^T, s \in N^T \quad (3.8)$$

де  $t_{m,t}^T$  – час проходження в ланці  $m$  на кроці часу  $t$ ,

$f_{m,t}^T$  – кількість потоків трафіку на каналі  $m$  на етапі часу  $t$ ,

$C_m^T$  – пропускна здатність потоку ланки  $m$ ,

$\delta_{m,q}^{rs}$  – додатний параметр масштабування для наявності зарядної станції,

$t_{q,t}^{rs}$  – час руху по маршруту на основі потоку.

Ймовірність вибору маршруту подорожуючими з урахуванням наявності зарядної станції і залежить від потоку час подорожі:

$$g_{q,t}^{rs} = \frac{e^{\alpha \text{time}_{q,t}^{rs} + \beta \text{FCS}_{\tau_q}^{rs}}}{\sum_{rs \in Q_{rs}} (\alpha \text{time}_{q,t}^{rs} + \beta \text{FCS}_{\tau_q}^{rs})}, \forall q \in Q_{rs}, r \in N^T, s \in N^T \quad (3.9)$$

де  $g_{q,t}^{rs}$  – ймовірність вибору маршруту,

$\alpha^{time}$  – від’ємний параметр масштабування для часу подорожі,

$t_{q,t}^{rs}$  – час руху по маршруту на основі потоку,

$\beta^{FCS}$  – двійкова змінна, що вказує чи існує зарядна станція на маршруті,

$\tau_q^{rs}$  – двійкова змінна, що вказує чи можна зафіксувати потік трафіку на шляху.

Імовірісне призначення потоку трафіку на кожному можливому шляху:

$$f_{q,t}^{rs} = f_t^{rs} g_{q,t}^{rs}, \forall q \in Q_{rs}, r \in N^T, s \in N^T \quad (3.10)$$

де  $g_{q,t}^{rs}$  – імовірність вибору маршруту,

$f_{q,t}^{rs}$  – кількість потоків трафіку на шляху  $q$ , що з’єднує точку пункту призначення,

$f_t^{rs}$  – попит на маршрути точки відправлення та призначення.

### 3.2 Методи оптимізації розташування системи зарядки

У дослідженні трафіку та логістиці були розроблені усталені методи, такі як теорія розташування, які дозволяють аналітикам і особам, які приймають рішення, досліджувати компроміси між різними цілями та проаналізувати вплив обмежень на прийняття рішень щодо розміщення та потужності об’єктів.

А при плануванні системи заряджання місце розташування та розмір зарядного пункту може вплинути на зручність послуги заряджання та вплинути на економічну вигоду оператора. Тому необхідно забезпечити максимізацію охопленого попиту на зарядку в рамках планування зарядної станції для електромобілів.

Частина досліджень можна класифікувати як проблему максимального охоплення розташування, яка прагне максимізувати покриття попиту шляхом розміщення певної кількості об’єктів. Однак такі розробки використовують статичні вимоги у вузлах і не включають природу мобільності транспортних

засобів. Цей метод більше підходить для вирішення проблеми розташування зарядного пункту низької або середньої напруги.

У цій моделі попит на зарядку в певній області оцінюється та призначається певному вузлу. Враховуючи це припущення, мета планування розташування зарядних установок у мережі полягає в тому, щоб максимально обслуговувати попит у цих вузлах. Цю модель планування можна математично сформулювати наступним чином.

Цільова функція має бути максимізована для кількості покритих вимог:

$$\text{Max } F = \sum_{t \in T} \sum_{n \in N^T} D_{n,t}^{CP} \tau_n \quad (3.11)$$

де  $D_{n,t}^{CP}$  – охоплений попит на зарядку електромобіля у вузлі за крок часу  $t$ ,

$\tau_n$  – двійкова змінна, що вказує чи можна зафіксувати потік трафіку у вузлі  $n$ .

Попит на зарядку у вузлі  $n$  не може бути покритий, якщо принаймні один із вибраних об'єктів не може покрити попит у вузлі  $n$ . Зазвичай це визначається радіусом обслуговування та вибором об'єктів-кандидатів:

$$\sum_{n \in N^T} C_{mn} \alpha_n^{CP} \geq \tau_n, \forall n \in N^T, \quad (3.12)$$

де  $C_{mn}$  – пропускна здатність потоку.

$\alpha_n^{CP}$  – двійкова змінна розв'язку для побудови попиту у вузлі  $n$ ,

$\tau_n$  – двійкова змінна, що вказує чи можна зафіксувати потік трафіку у вузлі  $n$ .

Задоволений попит у вузлі  $n$  протягом часу  $t$  визначається загальним попитом на послугу тарифікації та обмежений розміром тарифікації, розташованої у вузлі  $n$ .

$$D_{n,t}^{CP} = \begin{cases} D_{n,t}^{Total} & \text{якщо } D_{n,t}^{Total} \leq S_n^{CP} P^{CP} \\ S_n^{CP} P^{CP} & \text{якщо } D_{n,t}^{Total} > S_n^{CP} P^{CP} \end{cases} \quad (3.13)$$

де  $D_{n,t}^{CP}$  – охоплений попит на зарядку електромобіля у вузлі за час  $t$ ,

$D_{n,t}^{Total}$  – охоплений попит на зарядку електромобіля у вузлі за крок часу  $t$ ,

Обмеження щодо загальної кількості пунктів заряджання задається наступним чином:

$$\sum_{n \in N^T} \alpha_n^{CP} S_n^{CP} = N_{Total}^{CP} \quad (3.14)$$

де  $N_{Total}^{CP}$  – набір вузлів транспортної системи,

$\alpha_n^{CP}$  – двійкова змінна розв'язку для побудови попиту у вузлі  $n$ ,

$S_n^{CP}$  – кількість зарядних станцій у вузлі.

Ця модель враховує географічну інформацію мережі, а також відмінності вузлового попиту, і її можна використовувати для розподілу заряджання, який зазвичай обслуговує попит у фіксованому місці.

Однак попит на зарядку імітується як статичний і фіксований на кожному вузлі, що не може повністю описати динамічну та мобільну природу зарядки електромобілів на маршруті. А отже, статичний вузол орієнтований на попит моделювання в моделі місця максимального покриття не може відобразити складність попиту на швидку зарядку електромобілів і є недоречним у плануванні швидкої зарядної станції.

Модель розташування з фіксацією потоку призначена для дрібномасштабної транспортної системи.

Дрібномасштабна транспортна система розташована на невеликій або середній території, де щоденна відстань їзди порівняно мала. Для планування швидкої зарядної станції в дрібномасштабній транспортній системі споживання акумулятора на маршруті не є очевидним. Моделі розташування для захоплення потоку, призначені для вибору місця і розміру зарядних установок для задоволення попиту на зарядку на основі потоку. Через природу мобільності електромобілів кількість електромобілів для зарядки в транспортній системі змінюється в часі, і це залежить від низки факторів, таких як поведінка окремих

електромобілів під час водіння, місцеві дорожні умови. Цей попит на зарядку на маршруті важко оцінити через диверсифіковані моделі подорожей і відсутність відповідних статистичних цифр водіння електромобілів. У цьому випадку зафіксований потік трафіку всередині мережі трафіку може бути індикатором зручність тарифного сервісу, ринковий потенціал суб'єкта господарювання та тарифний попит зарядної станції.

Транспортний потік визначається кількістю електромобілів, що рухаються вздовж ліній або країв, що з'єднують різні вузли вздовж попередньо визначеного маршруту. Якщо зарядна станція розташована на маршруті подорожі певного електромобіля, тоді він може обрати послугу заряджання там. У цьому випадку очікується, що станція швидкої зарядки зможе обслуговувати якомога більше електромобілів. Ця модель базується на моделі розташування потоку, а математична основа може бути представлена наступним чином:

Цільова функція полягає в тому, щоб максимізувати загальний захоплений потік трафіку, який може бути стягнений станціями-кандидатами:

$$\text{Min}F = \sum_{r \in N^T} \sum_{s \in N^T} \sum_{q \in Q_{rs}} \tau_q^{rs} \times 365 \times \sum_{t \in T} f_{q,t}^{rs} \quad (3.15)$$

де  $\tau_q^{rs}$  – двійкова змінна, яка вказує чи можна зафіксувати потік трафіку на шляху  $n$ ,

$f_{q,t}^{rs}$  – кількість потоків трафіку на шляху, що з'єднує точку вихідного пункту призначення  $rs$  на момент часу  $t$ .

Відповідно, транспортний потік, зафіксований потенційною станцією швидкої зарядки за час  $t$ , можна розрахувати за формулою:

$$f_{n,t}^{FCS} = \sum_{r \in N^T} \sum_{s \in N^T} \sum_{q \in Q_{rs}} f_{q,t}^{rs} \delta_{n,q}^{FCS} \alpha_n^{FCS} \quad (3.16)$$

$$\delta_{n,q}^{FCS} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } n \in Q_{rs} \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$$

де  $\delta_{n,q}^{FCS}$  – двійкова змінна, яка вказує на те чи існує зарядна станція на шляху,

$f_{q,t}^{rs}$  – кількість потоків трафіку на шляху, що з'єднує точку вихідного пункту призначення  $rs$  на момент часу  $t$ ,

$\alpha_n^{FCS}$  – двійкова змінна рішень для будівництва швидкої зарядної станції на транспортній ділянці  $n$ .

Потік трафіку на шляху  $q$ , що з'єднує пару пунктів призначення  $rs$ , можна зафіксувати, лише якщо існує принаймні одна станція швидкої зарядки на шляху  $q$ .

$$\sum_{n \in \phi_q^{FCS}} \alpha_n^{FCS} \geq \tau_q^{rs} \quad (3.17)$$

де  $\tau_q^{rs}$  – двійкова змінна, яка вказує чи можна зафіксувати потік трафіку на шляху  $n$ ,

$\alpha_n^{FCS}$  – двійкова змінна рішень для будівництва швидкої зарядної станції на транспортній ділянці  $n$ .

Модель розташування з захопленням потоку, які запропоновані в літературі, визначають призначення потоку трафіку в мережі шляхом призначення запиту вхідному пункту призначення найкоротшому шляху або шляху з найменшою вартістю. Це базується на припущенні, що поведінка водія у виборі маршруту регулюється лише відстанню подорожі або вартістю часу. Проте будівництво станції може вплинути на вибір маршруту водіями та ще більше вплинути на трафік. Важливо, щоб модель розташування відображала поведінку водіїв електромобілів у виборі маршруту, що впливає на оптимальне розташування зарядних станцій і надалі визначає попит на зарядку від зарядних станцій. У цьому випадку в магістерській роботі запропоновано дві моделі: модель місця підзарядки, яка фіксує відхилення потоку, і стохастичну модель розташування, що фіксує потік, на основі рівноваги.

Модель розташування з захопленням потоку на основі відхилення

Ключовим аспектом цієї моделі є те, що водій буде відхилитися від заздалегідь визначеного шляху, щоб зарядити свої транспортні засоби в найближчій зарядній станції, якщо заряд батареї електромобіля нижчий за

порогове значення. Зі збільшенням використання бортових навігаційних систем транспортного засобу, логічно припустити, що водії можуть пройти найкоротший або найменш дорогий шлях до цільової станції підзарядки, а потім до місця призначення. Ця модель може краще відображати поведінку їзди електромобілів, коли мережа зарядних станцій розріджена, і може краще оцінити вплив зарядного навантаження зарядної станції на розподільчу мережу.

Цільова функція полягає в тому, щоб максимізувати загальний захоплений потік трафіку, який може заряджатися станціями-кандидатами для підзарядки. У першій частині оцінюється кількість електромобілів, які отримують послугу заряджання за заздалегідь визначеним маршрутом, а в другій частині обчислюється загальна кількість електромобілів, які повторно виберуть маршрут для послуги зарядки.

$$\text{Max } F = 365$$

$$\begin{aligned} & \times \left[ \sum_{r \in N^T} \sum_{s \in N^T} \sum_{q \in Q_{rs}} \left( \tau_q^{rs} \times g_q^{char} \times \sum_{t \in T} f_{q,t}^{rs} \right) \right. \\ & \left. + \sum_{r \in N^T} \sum_{s \in N^T} \sum_{q \in Q_{rs}} \left( (1 - \tau_q^{rs}) \times g_q^{dev} \times \sum_{t \in T} f_{q,t}^{rs} \right) \right] \end{aligned}$$

де  $\tau_q^{rs}$  – двійкова змінна, яка вказує чи можна зафіксувати потік трафіку на шляху  $n$ ,

$g_q^{dev}$  – частка потоку зарядних станцій на шляху  $q$  за умови переходу на шлях відхилення  $dev$ .

$f_{q,t}^{rs}$  – кількість потоків трафіку на шляху, що з'єднує точку вихідного пункту призначення  $rs$  на момент часу  $t$ ,

$g_q^{char}$  – частка автомобілів, які обслуговуються зарядною станцією на заздалегідь визначеному маршруту.



Відповідно, транспортний потік, зафіксований потенційною станцією швидкої зарядки за час  $t$ , можна розрахувати за формулою:

$$f_{n,t}^{rs} = \sum_{r \in N^T} \sum_{s \in N^T} \sum_{q \in Q_{rs}} f_{q,t}^{rs} g_q^{char} \delta_{n,q}^{FCS} \alpha_n^{FCS} + \sum_{r \in N^T} \sum_{s \in N^T} \sum_{q \in Q_{rs}} f_{q,t}^{rs} g_q^{dev} \delta_{n,q}^{FCS} \alpha_n^{FCS}$$

де  $g_q^{dev}$  – частка потоку зарядних станцій на шляху  $q$  за умови переходу на шлях відхилення  $dev$ .

$f_{q,t}^{rs}$  – кількість потоків трафіку на шляху, що з'єднує точку вихідного пункту призначення  $rs$  на момент часу  $t$ ,

$g_q^{char}$  – частка автомобілів, які обслуговуються зарядною станцією на заздалегідь визначеному маршруту,

$\delta_{n,q}^{FCS}$  – двійкова змінна, яка вказує на те чи існує зарядна станція на шляху,

$\alpha_n^{FCS}$  – двійкова змінна рішень для будівництва швидкої зарядної станції на транспортній ділянці  $n$ .

Потік трафіку на шляху  $q$ , що з'єднує точки вхідного пункту та пункту призначення  $rs$ , можна зафіксувати, лише якщо принаймні одна швидка зарядна станція існує на шляху  $q$ .

$$\sum_{n \in \emptyset_q^{FCS}} \alpha_n^{FCS} \geq \tau_q^{rs} \quad (3.18)$$

де  $\tau_q^{rs}$  – двійкова змінна, яка вказує чи можна зафіксувати потік трафіку на шляху  $n$ ,

$\alpha_n^{FCS}$  – двійкова змінна рішень для будівництва швидкої зарядної станції на транспортній ділянці  $n$ .

Частка потоку електромобілів, яка перейде на шлях відхилення, визначається додатковою відстанню для зарядки та існуючим зарядом

електромобілів. Тому використовується сигмоподібна крива, яка використовується для обчислення дробу. А параметри можна уточнити за результатами опитування.

$$g_{qd}^{dev}(SoC_q^{EV}, d_{qd}^{extra}) = \frac{1}{1 + e^{\alpha d_{qd}^{extra} + \beta SoC_q^{EV}}}$$

$$g_q^{char}(SoC_q^{EV}) = \frac{1}{1 + e^{\beta SoC_q^{EV}}} \quad (3.19)$$

де  $\beta$  – додатний параметр масштабування для наявності зарядної станції.

Розподіл заряду електромобілів визначається методом нормальної підгонки на основі центральної граничної теореми в теорії ймовірностей. Використовуємо симуляцію для створення випадкових зарядів електромобілів, які їздять по маршрутах.

$$p(SoC^{EV}, \mu^{SoC}, \sigma^{SoC}) = \frac{1}{\sigma^{SoC} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\mu^{SoC} - SoC^{EV})^2}{2(\sigma^{SoC})^2}} \quad (3.20)$$

Імовірнісна модель розташування з захопленням потоку.

Взаємодія між моделями транспортних потоків, заторами та розташуванням станцій швидкої зарядки включено в цю модель. При визначенні схеми потоку мережевого трафіку застосовується стохастичний принцип рівноваги користувача для моделювання поведінки водіїв щодо вибору маршруту. Змінні рішення моделі рівноваги користувача включають план розташування зарядної станції, а також схему рівноважного потоку, обидва з яких отримані ендогенним шляхом із модельного рішення. Відповідно, звідси впливає можливість призначити потік трафіку в мережі, враховуючи як час у дорозі, так і наявність зарядних станцій.

У запропонованій моделі зроблені наступні припущення:

1. Щоб зменшити складність моделі, розглядаються лише електромобілі в мережі.

2. Потік маршруту фіксується, якщо транспортні засоби на цьому маршруті можуть отримати послугу заряджання під час поїздки.

Формулювання математичної моделі представлено наступним чином:

Цільова функція полягає в тому, щоб максимізувати загальний захоплений потік трафіку, який може заряджатися станціями-кандидатами для підзарядки:

$$\text{Max } F = 365 \times \left[ \sum_{r \in N^T} \sum_{s \in N^T} \sum_{q \in Q_{rs}} \left( \tau_q^{rs} \sum_{t \in T} f_{q,t}^{rs} \right) \right], \quad (3.21)$$

де  $\tau_q^{rs}$  – двійкова змінна, яка вказує чи можна зафіксувати потік трафіку на шляху  $n$ ,

$f_{q,t}^{rs}$  – кількість потоків трафіку на шляху, що з'єднує точку вихідного пункту призначення  $rs$  на момент часу  $t$ .

Відповідно, потік трафіку, зафіксований потенційною станцією швидкої зарядки на кроці часу  $t$ , можна розрахувати за формулою:

$$f_{n,t}^{FCS} = \sum_{r \in N^T} \sum_{s \in N^T} \sum_{q \in Q_{rs}} f_{q,t}^{rs} \delta_{n,q}^{FCS} \alpha_n^{FCS}, \quad (3.22)$$

де  $f_{q,t}^{rs}$  – кількість потоків трафіку на шляху, що з'єднує точку вихідного пункту призначення  $rs$  на момент часу  $t$ ,

$\delta_{n,q}^{FCS}$  – двійкова змінна, яка вказує на те чи існує зарядна станція на шляху,

$\alpha_n^{FCS}$  – двійкова змінна рішень для будівництва швидкої зарядної станції на транспортній ділянці  $n$ .

А потік трафіку на шляху  $q$ , що з'єднує пару пунктів призначення  $rs$ , може бути зафіксований, лише якщо на шляху  $q$  існує принаймні одна станція швидкої зарядки.

$$r_q^{rs} = \begin{cases} 1, & \text{якщо існує станція швидкої зарядки на шляху } q \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases} \quad (3.23)$$

$$\sum_{n \in \phi_q^{FCS}} \alpha_n^{FCS} \geq \tau_q^{rs}, \quad \forall q \in Q_{rs}, r \in N^T, s \in N^T$$

де  $\tau_q^{rs}$  – двійкова змінна, яка вказує чи можна зафіксувати потік трафіку на шляху  $n$ ,

$\alpha_n^{FCS}$  – двійкова змінна рішень для будівництва швидкої зарядної станції на транспортній ділянці  $n$ .

Транспортний потік,  $f_{q,t}^{rs}$  у цільовій функції задано екзогенно на основі наступного принципу рівноваги користувача. Потік кожного можна описати так:

$$f_{m,t}^T = \sum_{r \in N^T} \sum_{s \in N^T} \sum_{q \in Q_{rs}} (\delta_{m,q}^{rs} \times f_{q,t}^{rs}), \quad \forall m \in A^T \quad (3.24)$$

де  $f_{q,t}^{rs}$  – кількість потоків трафіку на шляху, що з'єднує точку вихідного пункту призначення  $rs$  на момент часу  $t$ ,

$\delta_{m,q}^{rs}$  – додатній параметр масштабування для наявності зарядної станції.

Залежний від потоку час у дорозі з урахуванням довжини маршруту та ефекту заторів:

$$t_{m,t}^T = t_m^0 \left[ 1 + 0.15 \left( \frac{(f_{m,t}^T)^4}{(c_m^T)^4} \right) \right], \quad \forall m \in A^T \quad (3.25)$$

$$t_{q,t}^{rs} = \sum_{m \in A^T} (\delta_{m,q}^{rs} \times t_{m,t}^T), \quad \forall q \in Q_{rs}, r \in N^T, s \in N^T$$

де  $\delta_{m,q}^{rs}$  – додатній параметр масштабування для наявності зарядної станції;

$t_{m,t}^T$  – час проходження в ланці  $m$  на кроці часу  $t$ ,

$f_{m,t}^T$  – кількість потоків трафіку на каналі  $m$  на етапі часу  $t$ ,

$t_m^0$  – час проходження вільного потоку по ланці  $m$ ,

$c_m^T$  – пропускна здатність потоку ланки  $m$ ,

$t_{q,t}^{rs}$  – час руху по маршруту на основі потоку.

Імовірність вибору маршруту водіями з огляду на наявність станції швидкої зарядки залежний від потоку час у дорозі:

$$g_{q,t}^{rs} = \frac{e^{(\alpha^{time} t_{q,t}^{rs} + \beta^{FCS} \tau_q^{rs})}}{\sum_{rs \in Q_{rs}} e^{(\alpha^{time} t_{rs,t}^{rs} + \beta^{FCS} \tau_{rs}^{rs})}}, \quad \forall q \in Q_{rs}, r \in N^T, s \in N^T, \quad (3.26)$$

де  $t_{q,t}^{rs}$  – час руху по маршруту на основі потоку,

$\tau_q^{rs}$  – двійкова змінна, яка вказує чи можна зафіксувати потік трафіку на шляху  $q$ ,

$\alpha^{time}$  – від'ємний параметр масштабування для часу подорожі,

$\beta^{FCS}$  – двійкова змінна, що вказує чи існує зарядна станція на маршруті.

Імовірнісне призначення потоку трафіку на кожному шляху кандидата:

$$f_{q,t}^{rs} = f_t^{rs} g_{q,t}^{rs}, \quad \forall q \in Q_{rs}, r \in N^T, s \in N^T \quad (3.27)$$

де  $g_{q,t}^{rs}$  – ймовірність вибору маршруту,

$f_{q,t}^{rs}$  – кількість потоків трафіку на шляху  $q$ , що з'єднує точку пункту призначення,

$f_t^{rs}$  – попит на маршрути точки відправлення та призначення.

У цій моделі використовуються зафіксовані електромобілі для послуги зарядки на різних маршрутах подорожей, щоб змодельовати попит на зарядку та енергоспоживання станції швидкої зарядки, а не просто обчислити зафіксований потік трафіку. Кількість електромобілів, які потребують зарядки, оцінюється на основі стохастичного моделювання потоку електромобілів, а сервісні можливості станції швидкої зарядки об'єднані з теорією масового обслуговування.

Цільова функція полягає в тому, щоб максимізувати загальний захоплений потік трафіку, який може бути стягнений станціями-кандидатами:

$$\begin{aligned}
Max F &= 365 \times \sum_t \lambda_{n,t} \\
\lambda_{n,t} &= \sum_{r \in N^T} \sum_{s \in N^T} \sum_{q \in Q_{rs}} \sum_{q \in Q_{rs}} g_q^{char} f_{q,t}^{rs} \delta_{n,q}^{FCS} \alpha_n^{FCS}
\end{aligned} \tag{3.28}$$

де  $\lambda_{n,t}$  – потік трафіку, охоплений станцією швидкої зарядки, розташованою у вузлі  $n$  у час  $t$ ,

$f_{q,t}^{rs}$  – кількість потоків трафіку на шляху, що з'єднує точку вихідного пункту призначення  $rs$  на момент часу  $t$ ,

$g_q^{char}$  – частка автомобілів, які обслуговуються зарядною станцією на заздалегідь визначеному маршруту.

$\delta_{n,q}^{FCS}$  – двійкова змінна, яка вказує на те чи існує зарядна станція на шляху,

$\alpha_n^{FCS}$  – двійкова змінна рішень для будівництва швидкої зарядної станції на транспортній ділянці  $n$ .

У цій цільовій функції  $\lambda_{n,t}$  позначає потік трафіку, охоплений станцією швидкої зарядки, розташованою у вузлі  $n$  у час  $t$ . Ця змінна залежить від кількості транспортних потоків електромобілів.

Залежний від потужності станції швидкої зарядки середній час очікування електромобіля у вузлі  $n$  за час  $t$  обмежений максимальним часом очікування:

$$AW_{n,t}(z_n) \leq \overline{AW}. \tag{3.29}$$

Час очікування електромобілів на послугу зарядки можна розрахувати на основі закону Літтла:

$$AW_{n,t} = \frac{1}{z_n!} \left( \frac{\lambda_{n,t}}{\mu} \right)^{z_n} \frac{z_n \mu}{(z_n \mu - \lambda_{n,t})^2} \left[ \sum_{i=0}^{z_n-1} \frac{1}{i!} \left( \frac{\lambda_{n,t}}{\mu} \right)^i + \frac{1}{z_n!} \left( \frac{\lambda_{n,t}}{\mu} \right)^{z_n} \left( \frac{z_n \mu}{z_n \mu - \lambda_{n,t}} \right) \right]^{-1} \quad \forall n \in \phi^{FCS}, \forall t \in T$$

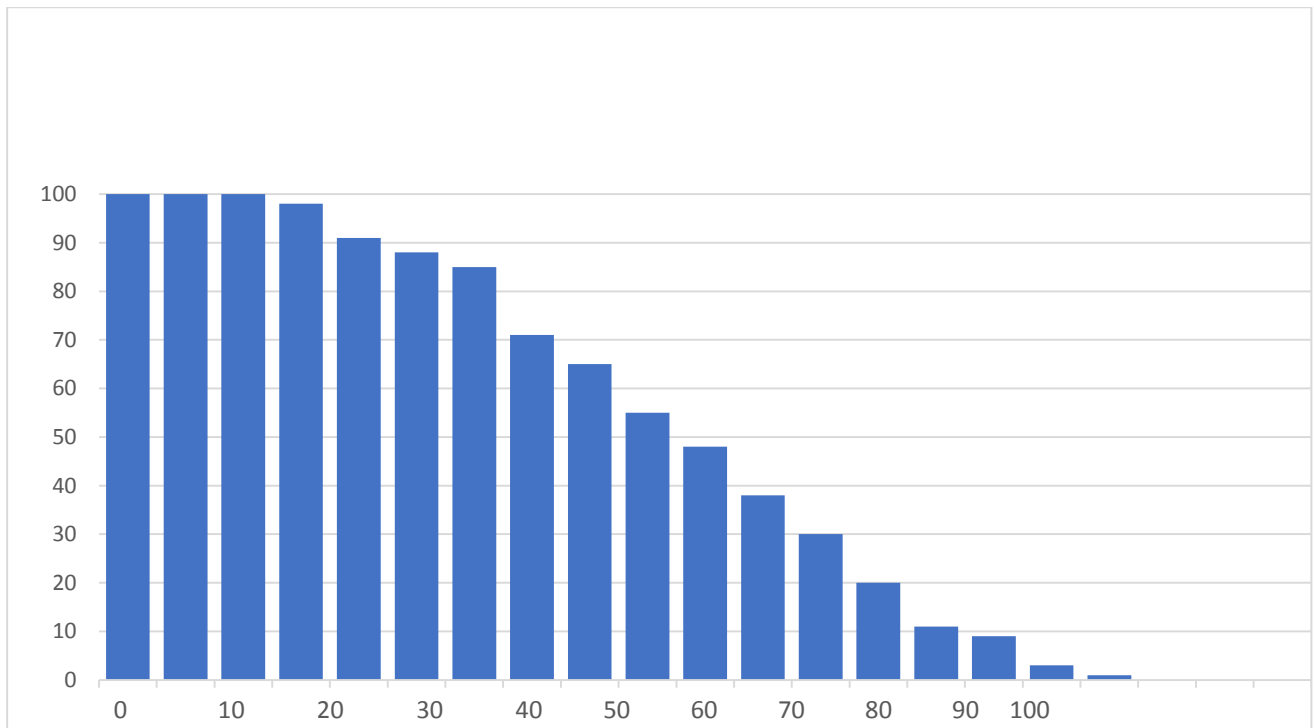


Рис. 3.1 Відсоток користувачів, які вирішили заряджати свої електромобілі для різних діапазонів SOC

Отже, виходячи з отриманих математичних обрахунків впливає оптимізаційна модель побудови заправних станцій для електромобілів на території України. Модель можна представити у вигляді графу (рис.3.2), вершинами якого є заправні станції, а лініями дороги між відповідними заправними станціями:

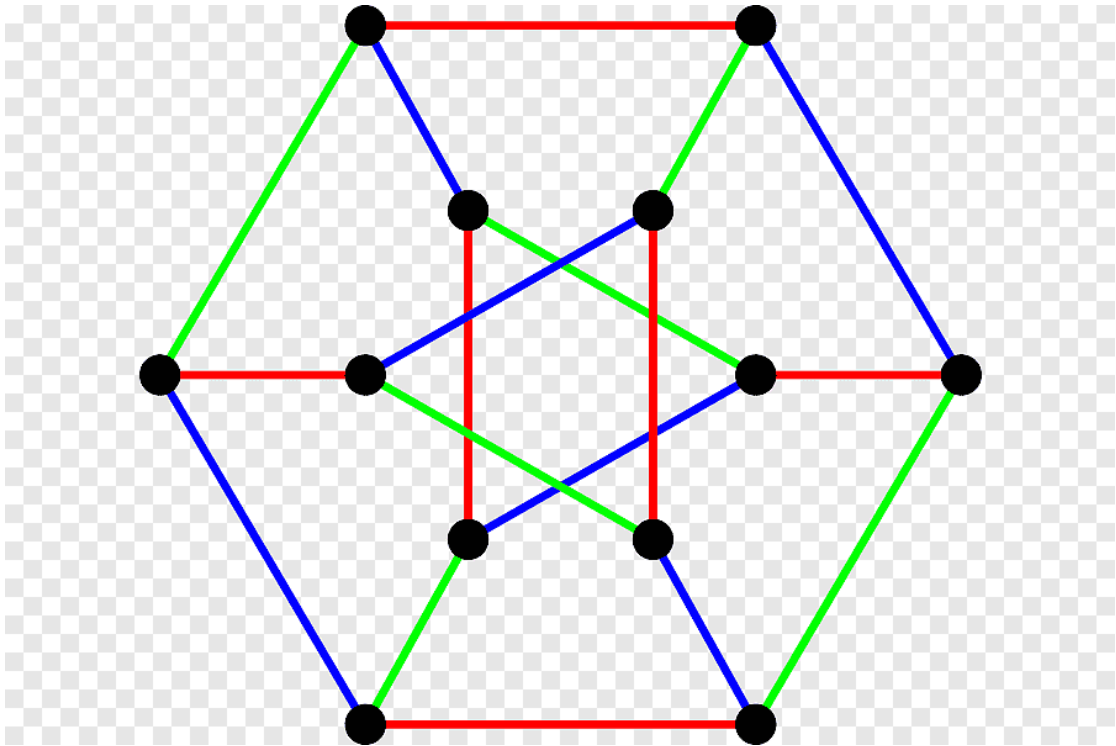


Рис. 3.2. Представлення оптимального розміщення зарядних станцій у вигляді графу

Отже модель визначення оптимальної кількості зарядних станцій на основі прогнозованих даних можна представити наступним чином:

$$\text{Max } F = 365$$

$$\begin{aligned} & \times \left[ \sum_{r \in N^T} \sum_{s \in N^T} \sum_{q \in Q_{rs}} \left( \tau_q^{rs} \times g_q^{char} \times \sum_{t \in T} f_{q,t}^{rs} \right) \right. \\ & \left. + \sum_{r \in N^T} \sum_{s \in N^T} \sum_{q \in Q_{rs}} \left( (1 - \tau_q^{rs}) \times g_q^{dev} \times \sum_{t \in T} f_{q,t}^{rs} \right) \right] \\ & \sum_{n \in \emptyset_q^{FCS}} \alpha_n^{FCS} \geq \tau_q^{rs} \end{aligned} \quad (3.30)$$

Дана задача відноситься до класу задач лінійного програмування. Для розв'язання такої задачі було досліджено симплекс-метод (та його розширення – метод штучного базису) та двоїтий симплекс-метод.

**Алгоритм симплекс-методу:**



1. Звести задачу лінійного програмування до канонічного вигляду:

- Цільова функція прямує до максимуму.
- Всі значення  $b_i$  повинні бути невід'ємними.
- Всі знаки в обмеженнях необхідно звести до  $=$ .
- Всі змінні мають бути невід'ємними.

Якщо задана цільова функція прямує до мінімуму, то потрібно домножити цільову функцію на (-1).

Якщо  $b_i$  менше за 0, то потрібно домножити обмеження на (-1).

Якщо в системі нерівності знак менше або менше рівне, то необхідно ввести додаткову змінну  $u_i$  зі знаком «+» до лівої частини нерівності. При цьому змінюємо знак нерівності на знак дорівнює.

Якщо в системі нерівності знак більше або більше рівне, то вводимо додаткову змінну  $u_i$  зі знаком «-» до лівої частини нерівності. При цьому  $u_i > 0$  та змінюємо знак нерівності на знак рівності.

Якщо на змінні задачі не накладена умова невід'ємності, тобто вона довільна, тоді замість  $x$  вводимо  $u_j - u_i$ . При цьому накладаємо умову, що нові змінні є додатніми.

Канонічна форма цільової функції має вигляд:

$$\begin{aligned}
 & F = c_1x_1 + \dots + c_nx_n \rightarrow \max \\
 & \begin{cases} a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n + u_1 = b_1 \\ \dots \dots \dots \dots \dots \\ a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_n + u_m = b_m \end{cases} \\
 & x_i \geq 0, b_i \geq 0, u_i \geq 0
 \end{aligned} \tag{3.31}$$

2. Будуємо вектор-стовпчиків коефіцієнтів при невідомих в системі обмежень та обираємо базис, тобто вектори, які в поєднанні дають одиничну матрицю.

Кількість рядочків в отриманій одиничній матриці повинна дорівнювати кількості нерівності в обмеженні.

$$p_1 = \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ a_{31} \\ \vdots \\ a_{m1} \end{pmatrix}, \dots, p_m = \begin{pmatrix} a_{1n} \\ a_{2n} \\ a_{3n} \\ \vdots \\ a_{mn} \end{pmatrix}, \dots, p_{m+1} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix}, \dots, p_n = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix}$$

3. Будуємо симплекс таблицю, та перевіряємо критерій оптимальності.

Критерій оптимальності: задача є оптимальною, якщо в рядку оцінок всі значення є невід'ємними.

4. Якщо задача є неоптимальною, то обираємо стовпчик з найменшим від'ємним значенням оцінки – розв'язувальний стовпчик. А також рядочок з найменшим значенням частки  $b_i$  на додатні значення в розв'язувальному стовпчику.

5. На перетині розв'язувального рядка та розв'язувального стовпчика знаходиться розв'язувальний елемент.

6. Переходимо до нової симплекс-таблиці. Базисну з небазисною змінною для розв'язувального елемента змінюємо місцями. Замість розв'язувального елемента записуємо обернене число. Розв'язувальний рядок ділимо на розв'язувальний елемент, а розв'язувальний стовпчик ділимо на протилежне число до розв'язувального елемента. Решту чисел знаходимо за правилом визначника у якого головною буде діагональ на якій розміщується розв'язувальний елемент.

7. Циклічний процес продовжуємо до тих пір, поки не буде виконуватися критерій оптимальності.

При цьому можуть виконуватися нерозв'язності:

1. Задача може зациклитися і кількість від'ємних елементів в рядку оцінки не зменшуватиметься.

2. В розв'язувальному стовпчику відсутні додатні змінні.

В цих випадках задача лінійного програмування розв'язку немає.

Детальний алгоритм симплекс-методу представлений на рис. 3.4.

В матриці  $A$  повний набір одиничних стовпців може біти відсутнім. Тоді від симплекс-методу необхідно перейти до методу штучного базису. Замість початкової задачі розглядається допоміжна наступного вигляду:

$$\begin{aligned}
 F(x, w) &= -\sum_{i=1}^m w_i \rightarrow \max \\
 \begin{cases} Ax + Ew = b \\ x \geq 0, w \geq 0 \end{cases}
 \end{aligned}
 \tag{3.32}$$

Тобто в матрицю обмежень додається одиничний набір стовпців.

Максимум цієї функції досягається в нулі при нульових значеннях змінних  $w_i$  (всі  $w_i = 0, f = \max$ ).

Даний метод зводиться до симплекс-методу, але необхідно спочатку розв'язати задачу для допоміжної функції, а потім перейти до основної.

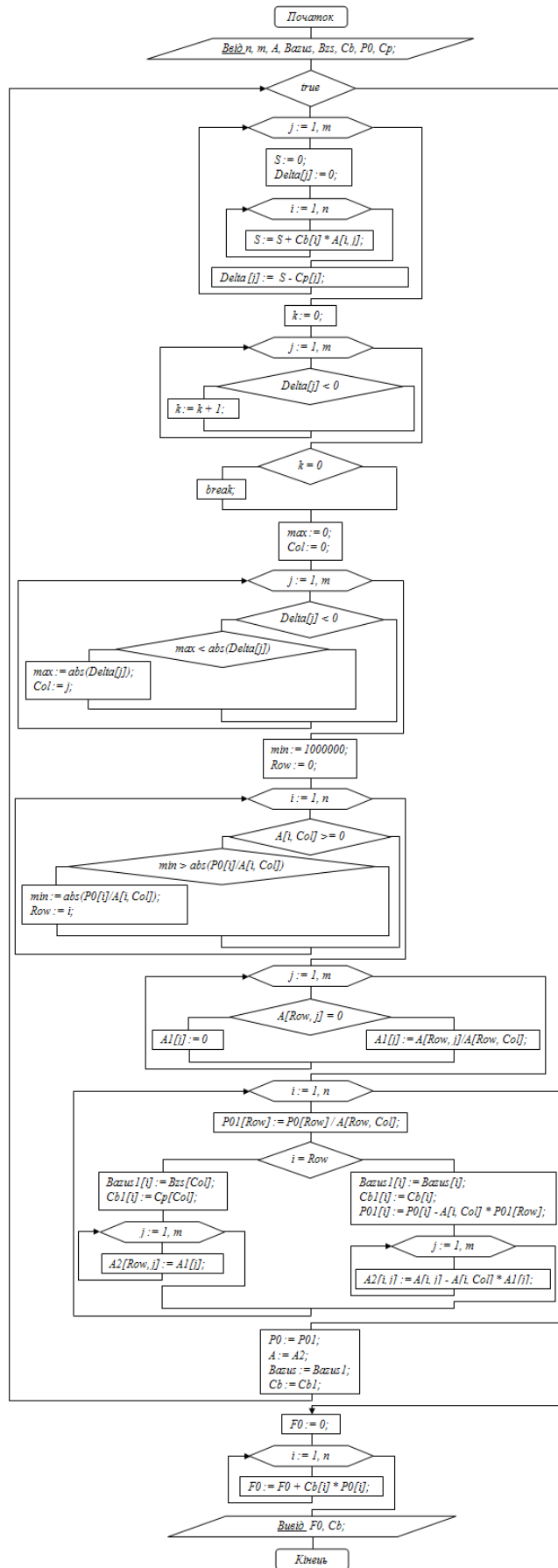


Рисунок 3.3 – Алгоритм симплекс-методу

Двоїстий симплекс-метод застосовується до задач в «майже канонічній формі». Тобто, виконується умова – всі знаки в обмеженнях повинні бути «= $\geq$ ».

**Зауваження:** При розв'язуванні двоїстим симплекс-метод необхідно аналогічно до симплекс-методу забезпечувати умову  $x_i \geq 0, i = \overline{1, n}$ . Якщо дана умова не виконується, то для відповідної змінної необхідно ввести умову  $x_i = u_i - v_j$ .

Двоїстий симплекс метод має обмежену множину задач до яких він застосовується, оскільки в такій задачі обов'язковим є наявність базису, який можна отримати шляхом перетворень.

Критерій оптимальності для двоїстого симплекс-методу: розв'язок  $X_i$  є оптимальним  $X^*$  якщо всі значення  $b_i \geq 0$ .

Двоїстий симплекс метод ґрунтується на методі Жордана-Гауса. Даний метод працює з обмеженим класом задач для який виконується умова канонічності.

Умови отримання нерозв'язностей двоїстого симплекс-методу:

1. В розв'язувальному рядку відсутні від'ємні значення.
2. Цільова функція прямує до  $max$ , проте значення функції з кожною таблицею зменшується. І навпаки.
3. Кількість від'ємних значень  $b_i$  не зменшується.

В результаті проведеного дослідження було обрано симплекс-метод розв'язування задач лінійного програмування, оскільки він є універсальним, легко програмується та має швидку збіжність.

В результаті застосування запропонованого методу отримано максимальний загальний захоплений потік трафіку, який може заряджатися станціями-кандидатами для підзарядки та оптимальну кількість зарядних станцій.

### 3.3 Інформаційна технологія оптимального розподілу зарядних станцій по території України

В роботі запропоновано інформаційну технологію оптимального розподілу зарядних станцій. Запропонована технологія, на основі визначених в роботі методів машинного навчання, будує прогноз кількості електромобілів на певній місцевості (рис. 3.4) та на основі отриманих даних, а також на основі технічних характеристик наявних моделей електромобілів визначає оптимальну кількість та розміщення зарядних станцій на території України (рис. 3.5).

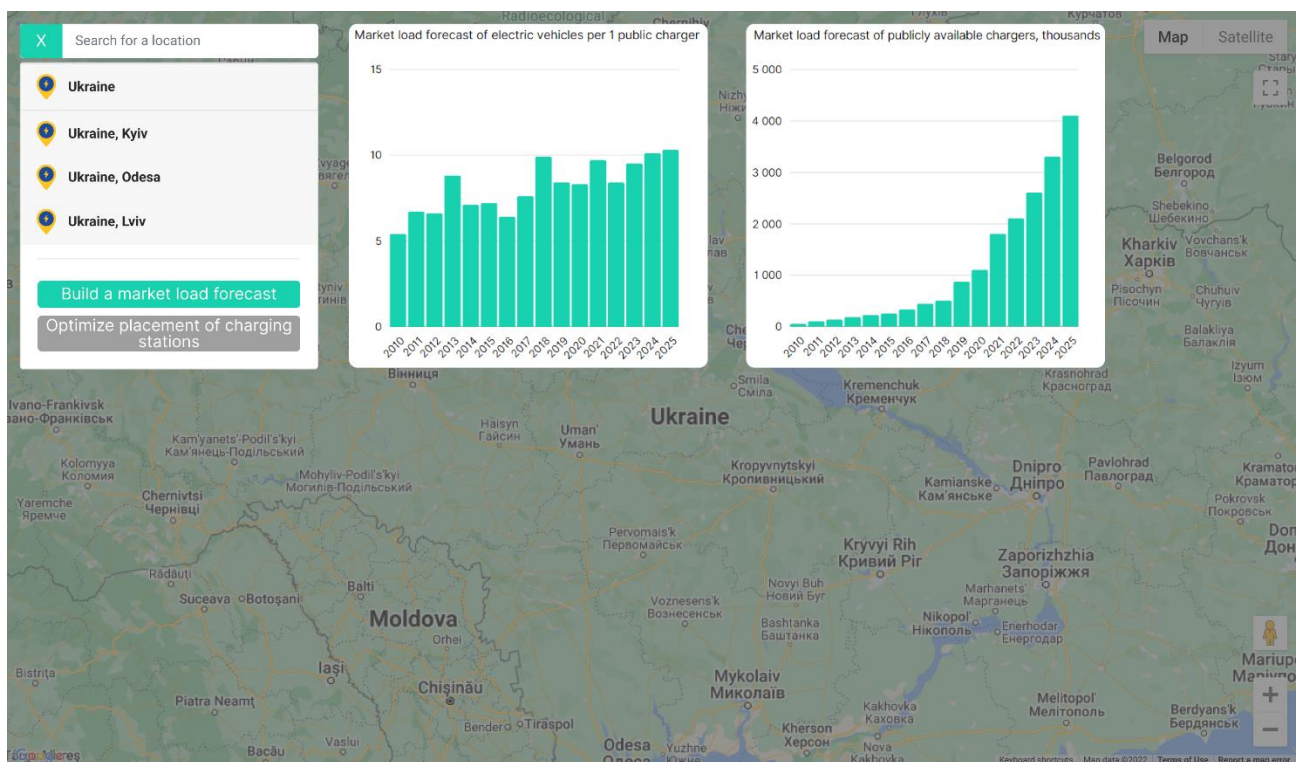


Рисунок 3.4 – Прогноз кількості електромобілів

Розроблено програмне забезпечення та web-додаток, що дозволяє оптимізувати роботу як власникам заправок для електромобілів так і допомагає власникам цих автомобілів швидко знаходити найближчу заправну станцію. Це дозволяє водіям не перейматися про кількість заряду та швидко знаходити відповідну найближчу станцію.

Для цього в програмному забезпеченні необхідно увімкнути геолокацію та натиснути кнопку «Заправка». Програма автоматично видасть всі найближчі станції, маршрути до них та час їзди. Обравши необхідну станцію зі списку, водію буде надано маршрут за яким він проїде до обраної заправної станції.

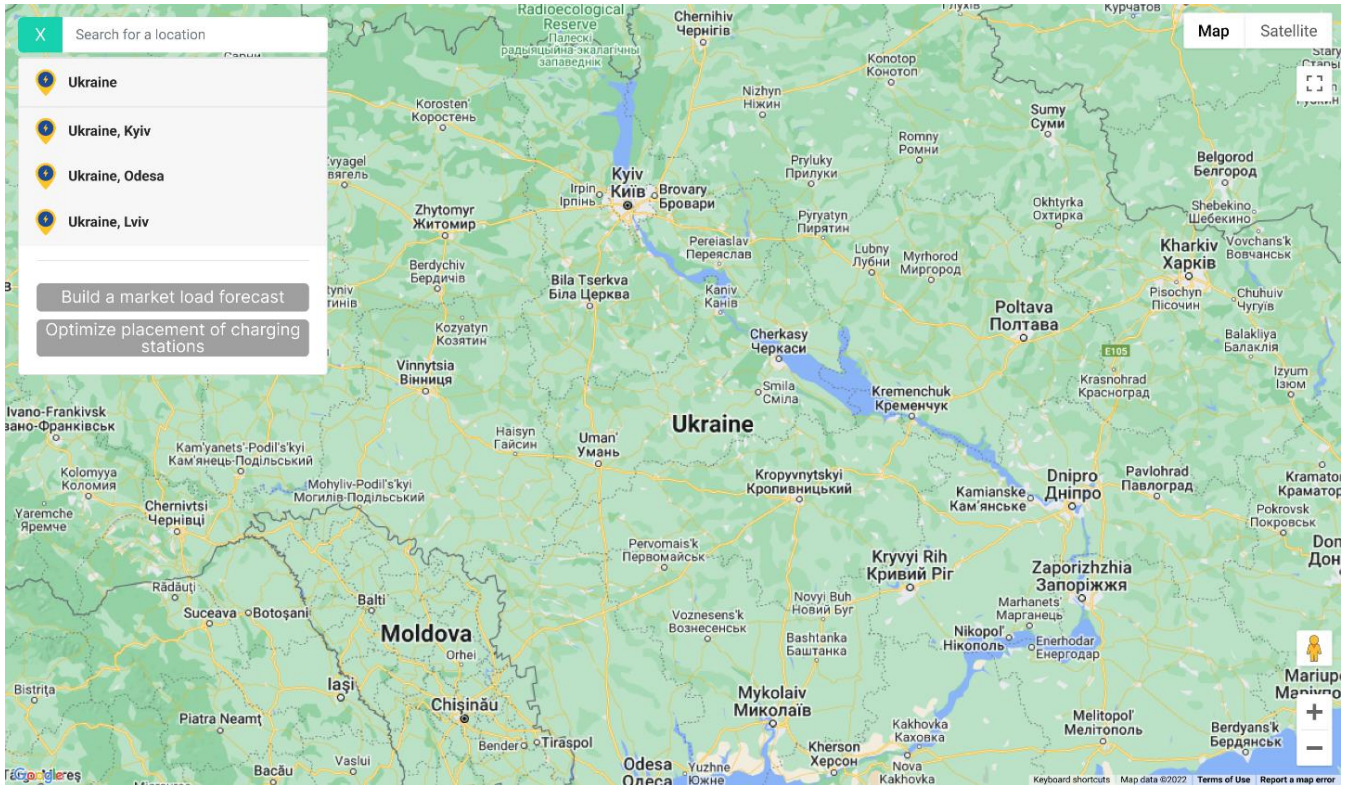


Рисунок 3.5 – Загальний вигляд програмного забезпечення

Що ж стосується безпосередньо власників заправних станцій, то для них в програмному забезпеченні передбачено функціонал, за яким видається оптимальний розподіл кількості заправних станцій виходячи із прогнозованих даних кількості електромобілів та наявних станцій на території України. Це дозволяє розширити мережу заправних станцій та побудувати їх саме в тих місцях, які будуть оптимальними для власників електромобілів та економічно-вигідними для власників заправних електростанцій.



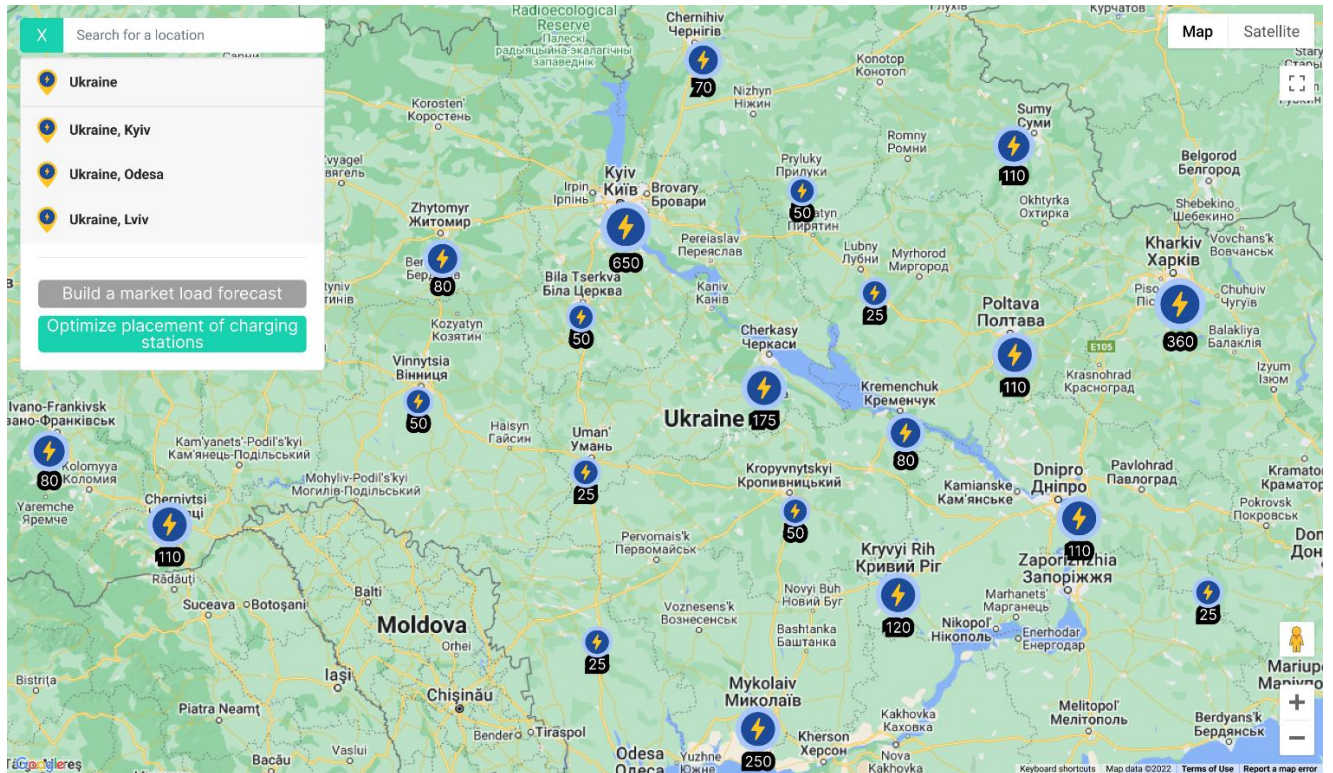


Рисунок 3.6 – Оптимальне розміщення зарядних станцій на території України

Попередні дані про кількість розміщення заправних станцій на території України представлено на рис. 3.6. На рисунку представлена загальна кількість необхідних заправних станцій по областях. При збільшенні карти можна побачити кількість заправних станцій на певній території або в певному районі.



## ВИСНОВКИ

В магістерській роботі запропонована інформаційна технологія визначення оптимального розподілу зарядних станцій на основі прогнозованих даних завантаження мережі електромобілями та з використанням методів дослідження операцій.

Мета магістерської роботи оптимізація процесу зарядки електромобілів за рахунок прогнозування навантаження та моделювання розташування зарядних станцій з використанням методів дослідження операцій досягнута.

В процесі проведення магістерського дослідження було проведено аналіз процесу розвитку електромобільного транспорту в Україні та показано перспективи його розвитку. Встановлено, що для забезпечення ефективного розвитку автомобільного транспорту в Україні необхідно розробити якісну інфраструктуру зарядних станцій, які забезпечать ефективне функціонування електромобілів. А для цього необхідні вхідні дані, одним з яких є проведення прогнозу завантаження мережі електромобілями.

Для отримання якісного прогнозу було проаналізовано три методи: модель лінійної регресії, регресійна модель дерева рішень та штучна нейронна мережа. Проведено порівняння отриманих за цими алгоритмами даних з реальними даними та проведено оцінку помилки. За результатами дослідження встановлено, що найкращі результати прогнозу дає метод штучної нейронної мережі, результати якого і використані в інформаційній технології.

На основі оптимізаційних методів було побудовано модель розташування зарядних станцій, яка включає в себе результати прогнозу завантаження мережі електромобілями, а також ймовірність вибору маршруту, пропускна здатність потоку електромережі та інші.

В результаті проведеного дослідження було отриману оптимальну кількість зарядних станцій, які дозволяють максимізувати загальний захоплений потік трафіку та повністю забезпечити електротранспорт України.

Незважаючи на досить нестабільні умови, які на даний момент спостерігаються в енергетичній інфраструктурі – питання розвитку електротранспорту в Україні є досить перспективним, оскільки Україна є енергетично країною з 4ма АЕС та значною кількістю ТЕС та ГЕС. Тому тема роботи є актуальною та потребує обов'язкового подальшого розвитку.

В якості перспективних напрямків подальшого дослідження є визначення оптимальної напруги для зарядки електромобілів та розрахунок оптимальних тарифів оплати послуги зарядження електромобіля.

Оскільки для прогнозування навантаження використовували три різні моделі, у майбутньому гібрид з цих трьох моделей можна використовувати для зменшення помилки та досягнення точності.

## ЛІТЕРАТУРА

1. A. Ip, S. Fong, E. Liu, "Optimization for allocating BEV recharging stations in urban areas by using hierarchical clustering", *Proc. 6th Int. Conf. Advanced Inf. Management and Service (IMS)*, pp. 460-465, 2010.
2. A. Shortt and M. O'Malley, "Quantifying the long-term impact of electric vehicles on the generation portfolio," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 1, pp. 71–83, Jan. 2014.
3. Bayram, G. Michailidis, M. Devetsikiotis, and F. Granelli, "Electric power allocation in a network of fast charging stations," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, no. 7, pp. 1235–1246, Jul. 2013.
4. "Global EV Outlook 2017," International Energy Agency, France, Jun. 2017. [Online].  
<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GlobalEVOutlook2017.pdf>
5. H. Xu, S. Miao, C. Zhang, and D. Shi, "Optimal placement of charging infrastructures for large-scale integration of pure electric vehicles into grid," *Int. J. Elec. Power.*, vol. 53, no. 1, pp. 159–165, 2013.
6. I. Frade, A. Ribeiro, A. P. Antunes, G. Gonçalves, "An optimization model for locating electric vehicle charging stations in central urban areas", *Proc. 90th Annu. Meeting Transp. Res. Board*, 2011.
7. K. Clement-Nyns, E. Haesen, and J. Driesen, "The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 1, pp. 371–380, Feb. 2010.
8. S. W. Hadley, "Impact of plug-in hybrid vehicles on the electric grid," U.S. Dept. Energy, Oak Ridge Nat. Lab., Oak Ridge, TN, USA, Tech. Rep. ORNL/TM-2006/554, Oct. 2006.
9. Shortt and M. O'Malley, "Quantifying the long-term impact of electric vehicles on the generation portfolio," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 1, pp. 71–83, Jan. 2014.

10. T. Sweda, D. Klabjan, "An agent-based decision support system for electric vehicle charging infrastructure deployment", *Proc. IEEE Veh. Power and Propulsion Conf.*, pp. 1-5, 2011.

11. В Украине хотят довести долю электромобилей до 20-25% к 2028 году [Електронний ресурс].- Режим доступу : <http://www.autoconsulting.com.ua/article.php?sid=41029> 3. Сосько С. П. Ринок і регіоналістика [Текст]: Навч. посібник / С. П. Сосько, В. В. Кулішов, В. І. Мустафін. — К. : Ельга, Ніка-Центр, 2002. — 287 с.

12. Волкова И. О. Проблемы формирования оптового рынка электроэнергии и мощности [Текст] / И. О. Волкова, В. Р. Огороков, Ю. А. Соколов. — К. : Об-во «Знание» Украины, 1998. — 20 с.

13. Гібридні автомобілі / О.В. Бажинов, О.П. Смирнов, С.А. Серіков та ін.; за заг. ред. О.В. Бажинова. — Х.: ХНАДУ, 2008. — 328 с.

14. Губрієнко О. Теоретико-правовий аналіз деяких функцій державного управління в галузі енергетики в Україні / О. Губрієнко // Підприємництво, господарство і право.- 2004.- № 5.- С.113-116.

15. Дикань В. Л. Стратегічне управління конкурентоспроможністю як чинник інноваційного розвитку підприємства //Маркетинг: теорія і практика. Зб. наук. праць Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. Вип. – 2010. – Т. 16. – С. 55-58.

16. Долгальова О. В. Державне регулювання електроенергетичної галузі України [Текст] / О.В. Долгальова // Науково-виробничий журнал Держава та регіон: Серія: Державне управління. — 2009. — № 3. — С. 33 — 37.

17. Дослідження операцій. Конспект лекцій / Уклад.: О.І. Лисенко, І.В. Алексеєва, — К: НТУУ «КПІ», 2016. — 196 с.

18. Дупак О. С. Інформаційноаналітичне дослідження стану паливноенергетичного комплексу України [Текст] / О. С. Дупак // Електроінформ: Енергетика. Електротехніка. Електроніка. — 2006. — № 1. — С. 7 — 10. 6 Кулицький С. Економічна ситуація в електроенергетиці України: стан і перспективи [Текст] / С. Кулицький // України: події, факти коментарії. — 2008. — № 22. — С. 16 — 33.

19. Карамян О.Ю., Чебанов К.А., Соловьева Ж.А. Електромобіль та перспективи розвитку // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 12-4. – С. 693-696

20. Карта електрозаправок України [Електронний ресурс]. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <https://ecocars.in.ua/elektrozapravky/>.

21. Кацило Д. Український бум на електрокари розігнався ще більше. Китайці витісняють Tesla й Nissan. Коли в країні буде 100 000 «зелених» авто [Електронний ресурс] / Д. Кацило, Д. Уляницький. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: [https://forbes.ua/inside/ukrainskiy-bum-na-elektrokari-rozignavsya-shche-bilshe-kitaytsi-vitisnyayut-tesla-i-nissan-koli-v-kraini-bude-100-000-zelenikh-avto-26082022-](https://forbes.ua/inside/ukrainskiy-bum-na-elektrokari-rozignavsya-shche-bilshe-kitaytsi-vitisnyayut-tesla-i-nissan-koli-v-kraini-bude-100-000-zelenikh-avto-26082022-7900#:~:text=%D0%97%D0%B0%20%D1%81%D1%96%D0%BC%20%D0%BC%D1%96%D1%81%D1%8F%D1%86%D1%96%D0%B2%202022%20%D1%80%D0%BE%D0%BA%D1%83,30%25%20%D0%B2%D1%96%D0%B4%20%D0%B7%D0%B0%D0%B3%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D1%97%20%D0%BA%D1%96%D0%BB%D1%8C%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%96%20%D1%80%D0%B5%D1%94%D1%81%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%86%D1%96%D0%B9)

[7900#:~:text=%D0%97%D0%B0%20%D1%81%D1%96%D0%BC%20%D0%BC%D1%96%D1%81%D1%8F%D1%86%D1%96%D0%B2%202022%20%D1%80%D0%BE%D0%BA%D1%83,30%25%20%D0%B2%D1%96%D0%B4%20%D0%B7%D0%B0%D0%B3%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D1%97%20%D0%BA%D1%96%D0%BB%D1%8C%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%96%20%D1%80%D0%B5%D1%94%D1%81%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%86%D1%96%D0%B9](https://forbes.ua/inside/ukrainskiy-bum-na-elektrokari-rozignavsya-shche-bilshe-kitaytsi-vitisnyayut-tesla-i-nissan-koli-v-kraini-bude-100-000-zelenikh-avto-26082022-7900#:~:text=%D0%97%D0%B0%20%D1%81%D1%96%D0%BC%20%D0%BC%D1%96%D1%81%D1%8F%D1%86%D1%96%D0%B2%202022%20%D1%80%D0%BE%D0%BA%D1%83,30%25%20%D0%B2%D1%96%D0%B4%20%D0%B7%D0%B0%D0%B3%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D1%97%20%D0%BA%D1%96%D0%BB%D1%8C%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%96%20%D1%80%D0%B5%D1%94%D1%81%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%86%D1%96%D0%B9).

22. Косар Н. С. Адаптація енергопостачальних компаній до ринкових умов функціонування на засадах маркетингу [Текст]: дис... кандидата екон. наук: 08.06.02 / Косар Наталія Степанівна. — Л., 1999. — 278 с.

23. Математичні методи дослідження операцій : підручник / Є. А. Лавров, Л. П. Перхун, В. В. Шендрик та ін. – Суми : Сумський державний університет, 2017. – 212 с.

24. Математичні методи дослідження операцій. Лінійне програмування. Частина 1 : навчальний посібник / А. А. Яровий, Л. М. Ваховська, Л. В. Крилик. – Вінниця : ВНТУ, 2020. – 86 с.

25. Некрасов В. Минуло три роки: як змінилася в Україні зарядна інфраструктура для електромобілів [Електронний ресурс] / Всеволод Некрасов. –

2021. – Режим доступу до ресурсу:  
<https://www.epravda.com.ua/publications/2021/02/8/670779/>.

26. Олійник Я. І. Розробка державної програми розвитку електроенергетики Західного регіону України [Текст] / Я. І. Олійник // Вісник Хмельницького Економіка та управління національним господарством Вісник економіки транспорту і промисловості № 64, 2018 179 національного університету. — 2010. — Т. 3, № 2. — С. 169 — 172.

27. Офіційний сайт AutoEnterprise [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.autoenterprise.com.ua>

28. Полтавець Т. Ринок електромобілів в Україні: становлення та перспективи  
[http://nbuviar.gov.ua/index.php?option=com\\_content&view=article&id=3013:rinok-elektromobiliv-v-ukrajinistanovlennya-ta-perspektivi&catid=8&Itemid=350](http://nbuviar.gov.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=3013:rinok-elektromobiliv-v-ukrajinistanovlennya-ta-perspektivi&catid=8&Itemid=350)

29. Розвиток інфраструктури для електромобілів 05.04.2021 [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://eu4business.org.ua/success-stories/developing-the-infrastructure-for-electric-cars/>.

30. У Києві розвиватимуть інфраструктуру для електрокарів [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: [https://kyivcity.gov.ua/news/u\\_kiyevi\\_rozvivatimut\\_infrastrukturu\\_dlya\\_elektrokariv/](https://kyivcity.gov.ua/news/u_kiyevi_rozvivatimut_infrastrukturu_dlya_elektrokariv/).

31. Україна стремительно наращивает инфраструктуру для электромобилей [Електронний ресурс].- Режим доступу : <https://www.segodnya.ua/economics/avto/ukraina-stremitelno-narashchivaet-infrastrukturu-dlya-elektromobiley1070005.html>

32. Франчук І. А. Державна політика розвитку енергетики в Україні: стан, тенденції, перспективи [Текст]: [монографія] / І. А. Франчук. — Донецьк: ТОВ «Юго-Восток, Лтд», 2008. — 356 с.

33. Хрипунова О.Ю., Копнина А.И. Анализ перспектив строительства электроавтозаправочных станций в республике башкортостан // Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия: Экономика, - 2017. - №2 (20). – С. 114-120

## ДОДАТОК



ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ



Кафедра інженерії програмного забезпечення

### МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА на тему:

#### «ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ЗАРЯДКИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ОПЕРАЦІЙ»

Виконав: Студент групи ПДМ-62 Гуленко Володимир Сергійович

Керівник: д.т.н., доц., завідувач кафедри ТЦР Жебка Вікторія Вікторівна

Київ - 2022

### ОСОБЛИВОСТІ СИСТЕМ ЗАРЯДКИ ЕЛЕКТРОМОБІЛЕЙ

Недоліки  
планування систем  
зарядки  
електромобілів

- Перевантаження існуючих зарядних станцій
- Невизначеності у часовому та просторовому розподілу попиту
- Нерівномірний розподіл зарядних станцій

Методи планування  
системи зарядки  
електромобілів

- Планування на основі вузлового попиту
- Планування на основі симуляції дорожнього руху
- Планування на основі моделі потоку

## МЕТА, ОБ'ЄКТА ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

2

**Мета:** оптимізація процесу зарядки електромобілів за рахунок прогнозування навантаження та моделювання розташування зарядних станцій з використанням методів дослідження операцій.

**Об'єкт:** процес зарядки електромобілів.

**Предмет:** методи та засоби оптимізації та моделювання

## МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ ДЛЯ ПЛАНУВАННЯ ЗАРЯДКИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Модель лінійної регресії	Штучна нейронна мережа	Регресійна модель дерева рішень
$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \epsilon$	$Output = \sum_{j=1}^n \left( \frac{2x_j}{1 + e^{-2(\sum_{i=1}^m \omega_{ij} x_i) - T_j}} \right) - T_{out}$	

Модель прогнозування	Середня помилка (МВР)	Середня помилка у відсотках	Шедюлінг і пік (%)
Нейронна мережа	5,03	0,94	1,09
Модель лінійної регресії	21,6	2,01	2,34
Лінійна регресія	47,13	4,53	3,33

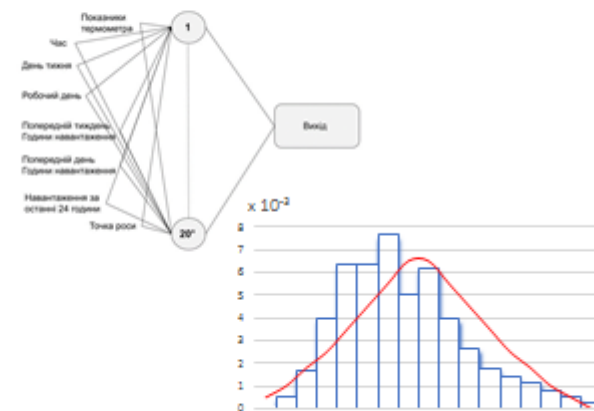


Рис. 1. Розподіл помилок за допомогою штучної нейронної мережі



## МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗТАШУВАННЯ СИСТЕМИ ЗАРЯДКИ

Max  $F = 365$

$$\times \left[ \sum_{i \in N^T} \sum_{j \in N^T} \sum_{q \in Q_{i,j}} \left( \tau_i^q \times g_i^{q,t} \times \sum_{i \in N^T} f_{i,j}^q \right) + \sum_{i \in N^T} \sum_{j \in N^T} \sum_{q \in Q_{i,j}} \left( (1 - \tau_i^q) \times g_i^{q,t} \times \sum_{i \in N^T} f_{i,j}^q \right) \right]$$

$$f_{i,j}^q = \sum_{i \in N^T} \sum_{j \in N^T} \sum_{q \in Q_{i,j}} f_{i,j}^q \delta_i^{q,t} - \delta_i^{q,t} = \tau_i^{q,t} + \sum_{i \in N^T} \sum_{j \in N^T} \sum_{q \in Q_{i,j}} f_{i,j}^q \delta_i^{q,t} \delta_i^{q,t} = \tau_i^{q,t}$$

$$\sum_{i \in N^T} \sum_{j \in N^T} \sum_{q \in Q_{i,j}} a_i^{q,t} \geq \tau_i^{q,t}$$

де  $\tau_i^q$  – двійкова змінна, яка вказує чи можна зафіксувати потік трафіку на шилку  $i$ ,

$g_i^{q,t}$  – частка потоку зарядних станцій на шилку  $q$  за умови перетону на шилку відхилення  $d$  на  $i$ .

$f_{i,j}^q$  – кількість потоків трафіку на шилку, що  $i$  є вузлом вихідного пункту призначення  $i$  та на момент часу  $t$ ,

$g_i^{q,t}$  – частка автомобілів, які обслуговуються зарядною станцією на заданій  $i$ тій визначеному маршруту,

$f_{i,j}^q$  – кількість потоків трафіку на шилку, що  $i$  є вузлом вихідного пункту призначення  $i$  та на момент часу  $t$ ,

$g_i^{q,t}$  – частка автомобілів, які обслуговуються зарядною станцією на заданій  $i$ тій визначеному маршруту,

$\delta_i^{q,t}$  – двійкова змінна, яка вказує на те чи існує зарядна станція на шилку,

$a_i^{q,t}$  – двійкова змінна рівня для будівництва швидко зарядної станції на транспортній ділянці  $i$ .

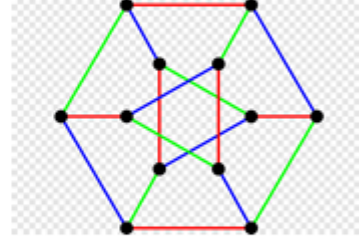


Рис. 1. Представлення оптимального розташування зарядних станцій у вигляді графу

## СИМПЛЕКС-МЕТОД РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧІ РОЗТАШУВАННЯ СИСТЕМ ЗАРЯДКИ

Симплекс-метод працює з задачею в канонічному вигляду:

1. Цільова функція прямує до максимуму.
2. Всі значення  $b_i$  повинні бути невід'ємними.
3. Всі знаки в обмеженнях необхідно звести до  $=$ .
4. Всі змінні мають бути невід'ємними.

Нерозв'язності, які вказують на відсутність оптимального значення:

1. Задача може зациклитися і кількість від'ємних елементів в рядку оцінки не зменшуватиметься.
2. В розв'язувальному стовпчику відсутні додатні змінні.



## ЕКРАННІ ФОРМИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ

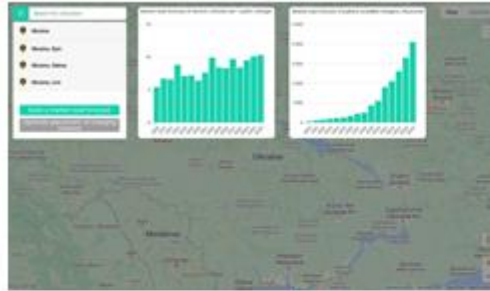
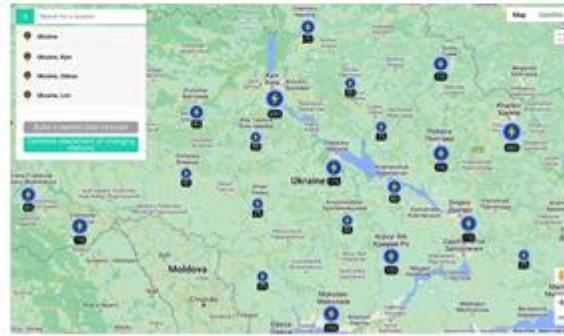


Рис. 1. Прогноз кількості електростанцій

Рис. 2. Оптимальне розміщення зарядних станцій на території України



## РЕЗУЛЬТАТИ ПРОГНОЗУВАННЯ РИНКУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

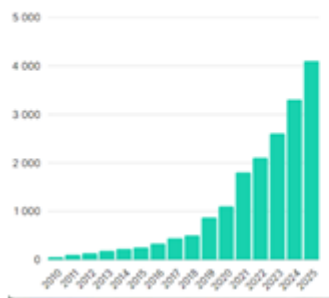


Рис. 1. Результати прогнозування кількості необхідних зарядних станцій



Рис.2. Порівняння різних методів прогнозування



Рис. 3. Порівняння результатів моделювання з використанням нейронної мережі, яка дала найвищу точність прогнозу

## ПРОГНОЗОВАНІ ЗНАЧЕННЯ

- Кількість існуючих зарядних станцій 3244 станції з 7661 терміналом.
- Кількість необхідних зарядних станцій
- в 2023 р.: 2785
- в 2024 р.: 3250
- Прогнозована кількість електромобілів:
- в 2023 р.: 32 183
- в 2024 р.: 35 236

## ПУБЛІКАЦІЇ ТА АПРОБАЦІЯ

8

### Статті:

1. Гуленко В.С. Оптимізація процесу розташування зарядних електростанцій на основі методів дослідження операцій // Зв'язок. №5, 2022, Подана до друку

### Тези доповідей:

1. Гуленко В.С. Прогнозування навантаження ринку електромобілів та аналіз похибки прогнозування // XV Науково-технічна конференція «Сучасні інфокомунікаційні технології» . – Київ: ДУТ, 2022. – Подана до друку

## ВИСНОВКИ

1. В магістерській роботі запропонована інформаційна технологія визначення оптимального розподілу зарядних станцій на основі прогнозованих даних завантаження мережі електромобілями та з використанням методів дослідження операцій.
2. Мета магістерської роботи оптимізація процесу зарядки електромобілів за рахунок прогнозування навантаження та моделювання розташування зарядних станцій з використанням методів дослідження операцій досягнута.
3. Для отримання якісного прогнозу було проаналізовано три методи: модель лінійної регресії, регресійна модель дерева рішень та штучна нейронна мережа. Проведено порівняння отриманих за цими алгоритмами даних з реальними даними та проведено оцінку помилки. За результатами дослідження встановлено, що найкращі результати прогнозу дає метод штучної нейронної мережі, результати якого і використані в інформаційній технології.
4. На основі оптимізаційних методів було побудовано модель розташування зарядних станцій, яка включає в себе результати прогнозу завантаження мережі електромобілями, а також ймовірність вибору маршруту, пропускна здатність потоку електромережі та інші.
5. В результаті проведеного дослідження було отриману оптимальну кількість зарядних станцій, які дозволяють максимізувати загальний захоплений потік трафіку та повністю забезпечити електротранспорт України.

**ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!**