Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут комп'ютерних наук та штучного інтелекту
Кафедра комп'ютерних систем та робототехніки

До захисту допущено
Кафедрою комп'ютерних систем та робототехніки
протокол №__ від ____ червня 2026 р.

завідувач кафедри _____ Максим ХРУСЛОВ
(підпис)
«___»_____ 2026 р.

Кваліфікаційна робота

здобувача першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

«МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕЛЕМЕНТІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ»

Спеціальність ***151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»***
Освітня програма ***Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології***

Виконавець **Ігор ПЄСТОВ**
(підпис)

Науковий керівник_____ **Олександр РАЛО**
(підпис)

Харків – 2026

АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи бакалавра складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків та рисунків. Загальний обсяг роботи складає 68 сторінок, із яких 50 сторінок основної частини, що містить 3 рисунки, 3 таблиці, 35 найменувань у списку використаних джерел та 6 додатків.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності управління транспортними потоками шляхом розробки методу оптимізації дорожнього руху із застосуванням елементів штучного інтелекту.

Об'єктом дослідження є процеси функціонування та управління транспортними потоками в міських транспортних системах.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та програмні засоби які підвищують пропускну здатність дорожньої мережі, скорочення часу пересування транспортних засобів та автоматизованого прийняття рішень у системах керування дорожнім рухом.

У роботі проведено аналіз сучасних підходів до оптимізації транспортних потоків, досліджено існуючі методи управління дорожнім рухом та виконано порівняльний аналіз алгоритмів штучного інтелекту. Розроблено функціональну та структурну схеми системи оптимізації транспортного потоку, запропоновано алгоритм прогнозування транспортного навантаження та реалізовано програмну модель системи.

Область застосування – автоматизовані системи керування дорожнім рухом, інтелектуальні транспортні системи, диспетчерські центри керування транспортом, системи моніторингу дорожньої ситуації, а також освітній процес за спеціальностями, пов'язаними з автоматизацією, робототехнікою та комп'ютерно-інтегрованими технологіями.

Ключові слова: Автоматизація та приладобудування, машинне навчання, нейронні мережі, прогнозування транспортного навантаження, інтелектуальні транспортні системи, дорожній рух, адаптивне керування.

ABSTRACT

The explanatory note to the Bachelor's qualification thesis consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of references, appendices, and figures. The total volume of the thesis is 72 pages, including 50 pages of the main body containing 3 figures, 3 tables, 35 references, and 6 appendices.

The purpose of the qualification thesis is to improve the efficiency of traffic flow management by developing a traffic optimization method using elements of artificial intelligence.

The object of the research is the processes of operation and management of traffic flows in urban transportation systems.

The subject of the research is methods, algorithms, and software tools aimed at increasing the capacity of the road network, reducing vehicle travel time, and supporting automated decision-making in traffic management systems.

The thesis analyzes modern approaches to traffic flow optimization, investigates existing traffic management methods, and performs a comparative analysis of artificial intelligence algorithms. Functional and structural schemes of the traffic flow optimization system have been developed, a traffic load forecasting algorithm has been proposed, and a software model of the system has been implemented.

The field of application includes automated traffic management systems, intelligent transportation systems, transport dispatching centers, road traffic monitoring systems, as well as educational programs related to automation, robotics, and computer-integrated technologies.

Keywords: Automation and Instrumentation Engineering, Machine Learning, Neural Networks, Traffic Load Forecasting, Intelligent Transportation Systems, Road Traffic, Adaptive Traffic Control.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ 6

ВСТУП 7

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ 10

1.1 Поняття та основні характеристики транспортних потоків 10

1.2 Проблеми функціонування транспортних систем у міських умовах 12

1.3 Сучасні методи управління дорожнім рухом 14

1.4 Автоматизовані системи керування транспортними потоками 15

1.5 Інтелектуальні транспортні системи (ITS) 17

1.6 Аналіз існуючих підходів до оптимізації транспортних потоків 18

1.7 Переваги та недоліки існуючих систем управління дорожнім рухом 19

1.8 Постановка задачі дослідження 20

Висновки до розділу 1 21

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ 23

2.1 Основні поняття штучного інтелекту 23

2.2 Машинне навчання у транспортних системах 24

2.3 Нейронні мережі та їх застосування для прогнозування транспортного навантаження 25

2.4 Генетичні алгоритми в задачах оптимізації дорожнього руху 27

2.5 Методи нечіткої логіки для керування транспортними потоками 28

2.6 Алгоритми підкріплювального навчання 29

2.7 Порівняльний аналіз методів штучного інтелекту 30

2.8 Обґрунтування вибору методу оптимізації транспортного потоку 31

Висновки до розділу 2 32

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ 33

3.1 Загальна концепція розроблюваної системи 33

3.2 Формування функціональних вимог до системи 34
3.3 Розробка функціональної схеми системи 35
3.4 Розробка структурної схеми системи 36
3.5 Архітектура програмного забезпечення 37
3.6 Розробка алгоритму оптимізації транспортного потоку 38
3.7 Реалізація механізму прогнозування транспортного навантаження 39
3.8 Розробка програмної моделі системи 39
3.9 Інтерфейс користувача та взаємодія з системою 40
Висновки до розділу 3 40
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ 42
4.1 Організація експериментального дослідження 42
4.2 Формування тестових сценаріїв 43
4.3 Проведення моделювання транспортного потоку 44
4.4 Аналіз результатів роботи системи 46
4.5 Оцінка ефективності алгоритму за критеріями пропускної здатності 45
4.6 Оцінка впливу системи на зменшення транспортних заторів 46
4.7 Порівняння результатів із традиційними методами керування рухом 48
4.8 Практичні рекомендації щодо впровадження системи 48
Висновки до розділу 4 49
ВИСНОВКИ 51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 53
ДОДАТКИ 55

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

AI (Artificial Intelligence) – штучний інтелект.

API (Application Programming Interface) – інтерфейс програмування застосунків.

CNN (Convolutional Neural Network) – згорткова нейронна мережа.

GPS (Global Positioning System) – глобальна система позиціонування.

ITS (Intelligent Transportation System) – інтелектуальна транспортна система.

LSTM (Long Short-Term Memory) – рекурентна нейронна мережа з довготривалою короткочасною пам'яттю.

MAE (Mean Absolute Error) – середня абсолютна похибка.

ML (Machine Learning) – машинне навчання.

MLP (Multi-Layer Perceptron) – багатошаровий перцептрон.

MSE (Mean Squared Error) – середньоквадратична похибка.

Python – високорівнева мова програмування.

R^2 (Coefficient of Determination) – коефіцієнт детермінації.

SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) – система диспетчерського керування та збору даних.

SQL (Structured Query Language) – мова структурованих запитів.

UI (User Interface) – користувацький інтерфейс.

JSON (JavaScript Object Notation) – текстовий формат обміну даними.

NumPy – бібліотека Python для наукових обчислень.

Pandas – бібліотека Python для обробки та аналізу даних.

Matplotlib – бібліотека Python для візуалізації даних.

Scikit-Learn – бібліотека машинного навчання для Python.

ТЗ – технічне завдання.

ПЗ – програмне забезпечення.

ПК – персональний комп'ютер.

ШІ – штучний інтелект.

ТП – транспортний потік

ВСТУП

Сучасний розвиток міст характеризується постійним зростанням кількості транспортних засобів, що призводить до збільшення навантаження на дорожню інфраструктуру. Інтенсивна урбанізація, підвищення рівня автомобілізації населення та зростання обсягів пасажирських і вантажних перевезень спричиняють виникнення заторів, збільшення часу пересування, підвищення витрат пального та погіршення екологічної ситуації. У зв'язку з цим проблема ефективного управління транспортними потоками є однією з найважливіших задач сучасних транспортних систем.

Традиційні методи організації дорожнього руху ґрунтуються на використанні заздалегідь встановлених режимів роботи світлофорних об’єктів та статичних схем регулювання руху. Проте такі підходи не завжди здатні оперативно реагувати на зміни транспортної ситуації в реальному часі. В умовах постійно змінного транспортного навантаження виникає потреба у впровадженні інтелектуальних систем керування, здатних адаптуватися до поточного стану дорожньої мережі та приймати оптимальні рішення щодо регулювання руху.

Одним із найбільш перспективних напрямів розвитку транспортних систем є використання методів штучного інтелекту. Завдяки можливості аналізу великих обсягів даних, прогнозуванню транспортного навантаження та автоматичному прийняттю рішень технології штучного інтелекту дозволяють значно підвищити ефективність функціонування дорожньо-транспортної інфраструктури. Методи машинного навчання, нейронні мережі, нечітка логіка, генетичні алгоритми та алгоритми підкріплювального навчання успішно застосовуються для розв’язання задач прогнозування інтенсивності руху, оптимізації роботи світлофорів, планування маршрутів та зменшення транспортних заторів.

Особливу актуальність проблема оптимізації транспортних потоків набуває в умовах розвитку концепції «розумного міста» (Smart City),

яка передбачає широке використання цифрових технологій для підвищення якості життя населення. Інтелектуальні транспортні системи є важливою складовою цієї концепції та забезпечують ефективне використання існуючої транспортної інфраструктури без необхідності значних капіталовкладень у її розширення.

Актуальність теми кваліфікаційної роботи полягає у необхідності підвищення ефективності керування транспортними потоками шляхом використання сучасних методів штучного інтелекту, які дозволяють автоматизувати процес прийняття рішень та забезпечити адаптивне регулювання дорожнього руху залежно від поточної транспортної ситуації.

Об'єктом дослідження є транспортні потоки в міських умовах. Предметом дослідження є методи та алгоритми оптимізації транспортних потоків із застосуванням елементів штучного інтелекту.

Метою роботи є розробка методу оптимізації транспортного потоку із застосуванням елементів штучного інтелекту для підвищення ефективності функціонування транспортної системи та зменшення транспортних заторів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– провести аналіз сучасних підходів до оптимізації транспортних потоків;

– дослідити існуючі системи керування дорожнім рухом та визначити їх переваги і недоліки;

– проаналізувати сучасні методи штучного інтелекту, які можуть бути використані для оптимізації транспортного потоку;

– обґрунтувати вибір методу штучного інтелекту для вирішення поставленої задачі;

– розробити функціональну та структурну схеми системи оптимізації транспортного потоку;

– реалізувати програмну модель системи керування транспортним потоком;

– провести експериментальні дослідження та оцінити ефективність розробленого методу;

– сформувати практичні рекомендації щодо впровадження запропонованої системи в реальних умовах.

Для розв’язання поставлених завдань у роботі використовуються методи системного аналізу, теорії транспортних потоків, математичного моделювання, машинного навчання та програмної реалізації інтелектуальних систем керування.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання розробленого методу для підвищення пропускної здатності дорожньої мережі, скорочення часу затримок транспортних засобів, зниження рівня заторів та покращення екологічних показників міського середовища.

Структура кваліфікаційної роботи складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. У першому розділі розглядаються теоретичні аспекти функціонування транспортних потоків та сучасні підходи до їх оптимізації. У другому розділі аналізуються методи штучного інтелекту, що можуть бути використані для керування дорожнім рухом. Третій розділ присвячений розробці системи оптимізації транспортного потоку та її програмній реалізації. У четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень і оцінку ефективності запропонованого рішення.

РОЗДІЛ 1.
АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ

1.1 Поняття транспортного потоку та його основні характеристики

Транспортна система є однією з найважливіших складових сучасної міської інфраструктури, оскільки забезпечує переміщення людей і вантажів між різними об'єктами. Ефективність функціонування транспортної системи безпосередньо впливає на економічний розвиток регіону, рівень комфорту населення та екологічний стан навколишнього середовища. У зв'язку зі стрімким зростанням кількості транспортних засобів проблема організації дорожнього руху набуває особливої актуальності.

Основним об'єктом дослідження транспортних систем є транспортний потік. Під транспортним потоком розуміють сукупність транспортних засобів, які рухаються дорожньою мережею в певному напрямку протягом визначеного проміжку часу. Транспортний потік є складною динамічною системою, що характеризується інтенсивністю, щільністю, швидкістю руху та пропускною здатністю дорожньої мережі [12, 14]. Поведінка якої залежить від великої кількості факторів, серед яких інтенсивність руху, характеристики дорожньої мережі, погодні умови, режими роботи світлофорів, поведінка водіїв та наявність дорожньо-транспортних пригод.

Дослідження транспортних потоків є важливим завданням транспортної інженерії, оскільки дозволяє аналізувати стан дорожньої мережі, прогнозувати виникнення заторів та розробляти ефективні методи керування дорожнім рухом. Для опису транспортного потоку використовуються спеціальні кількісні показники, які характеризують його стан та особливості функціонування.

Однією з основних характеристик транспортного потоку є інтенсивність руху. Інтенсивність визначається кількістю транспортних засобів, які проходять через певний переріз дороги за одиницю часу. Найчастіше

інтенсивність вимірюється в автомобілях за годину. Цей показник дозволяє оцінити завантаженість дорожньої мережі та визначити ділянки, на яких спостерігається найбільше транспортне навантаження.

Іншою важливою характеристикою є щільність транспортного потоку. Щільність показує кількість транспортних засобів, що перебувають на одиниці довжини дороги в певний момент часу. Зі збільшенням щільності транспортного потоку зростає ймовірність виникнення заторів, знижується середня швидкість руху та погіршується пропускна здатність дорожньої мережі.

Важливим показником також є середня швидкість руху транспортного потоку. Вона визначається як середнє значення швидкостей усіх транспортних засобів на певній ділянці дороги. Середня швидкість є одним із головних критеріїв ефективності транспортної системи. Зменшення швидкості зазвичай свідчить про перевантаження дорожньої мережі або виникнення перешкод для руху.

Між основними характеристиками транспортного потоку існує тісний взаємозв'язок. Зі збільшенням інтенсивності руху зазвичай зростає щільність транспортного потоку, а середня швидкість поступово знижується. Коли кількість транспортних засобів перевищує пропускну здатність дороги, виникають транспортні затори, які призводять до значних втрат часу та зростання витрат пального.

Пропускна здатність дороги є ще однією важливою характеристикою транспортного потоку. Вона визначає максимальну кількість транспортних засобів, які можуть пройти через певну ділянку дороги за одиницю часу за заданих умов руху. Пропускна здатність залежить від кількості смуг руху, ширини проїзної частини, типу перехресть, режимів світлофорного регулювання та інших факторів.

Сучасні транспортні системи характеризуються високою динамічністю та складністю. У великих містах транспортний потік змінюється протягом доби залежно від часу, дня тижня та сезонних особливостей. Найбільше

навантаження спостерігається у години пік, коли значна кількість людей одночасно прямує до місць роботи або навчання. У цей період транспортна інфраструктура працює на межі своїх можливостей, що часто призводить до виникнення заторів.

Для дослідження транспортних потоків широко використовуються математичні моделі та комп'ютерне моделювання. Такі моделі дозволяють прогнозувати поведінку транспортної системи за різних умов, оцінювати вплив окремих факторів на інтенсивність руху та визначати оптимальні режими керування дорожнім рухом. Сучасні інформаційні технології дозволяють збирати та обробляти великі обсяги даних про транспортні потоки в режимі реального часу, що створює передумови для впровадження інтелектуальних транспортних систем.

Особливого значення набуває використання методів штучного інтелекту для аналізу транспортних потоків. Завдяки застосуванню алгоритмів машинного навчання, нейронних мереж та інших інтелектуальних методів стає можливим прогнозування транспортного навантаження, виявлення потенційних заторів та автоматичне коригування режимів роботи світлофорів. Це дозволяє значно підвищити ефективність використання дорожньої інфраструктури без необхідності її масштабної реконструкції.

Таким чином, транспортний потік є складною динамічною системою, яка характеризується такими основними показниками, як інтенсивність, щільність, швидкість руху та пропускна здатність. Аналіз цих характеристик є основою для розробки ефективних методів керування дорожнім рухом та оптимізації функціонування транспортних систем. У сучасних умовах найбільш перспективним напрямом розвитку є використання інтелектуальних методів аналізу та керування транспортними потоками на основі технологій штучного інтелекту.

1.2 Проблеми функціонування транспортних систем у міських умовах

Сучасні міста характеризуються високим рівнем урбанізації, постійним зростанням населення та збільшенням кількості транспортних засобів.

Унаслідок цього транспортні системи працюють в умовах значного навантаження, що призводить до виникнення низки проблем, які негативно впливають на ефективність функціонування дорожньої інфраструктури.

Однією з найсерйозніших проблем є транспортні затори. Вони виникають унаслідок перевищення інтенсивності руху над пропускною здатністю дорожньої мережі. Затори призводять до значних втрат часу, збільшення витрат пального та зниження ефективності перевезень. Особливо гостро ця проблема проявляється у великих містах у години пік, коли значна кількість транспортних засобів одночасно використовує дорожню мережу.

Важливою проблемою є нерівномірний розподіл транспортних потоків. На окремих ділянках дорожньої мережі спостерігається перевантаження, тоді як інші маршрути використовуються недостатньо ефективно. Це свідчить про необхідність впровадження інтелектуальних методів управління рухом, які здатні оперативно перерозподіляти транспортні потоки залежно від поточної ситуації.

Суттєвий вплив на роботу транспортної системи мають дорожньо-транспортні пригоди. Виникнення аварій часто призводить до тимчасового обмеження руху, утворення заторів та збільшення часу поїздок. Крім того, аварійність безпосередньо впливає на безпеку дорожнього руху та рівень соціально-економічних втрат.

Ще однією проблемою є недостатня адаптивність традиційних систем світлофорного регулювання. У багатьох містах використовуються фіксовані режими роботи світлофорів, які не враховують поточну інтенсивність руху. У результаті навіть за відсутності значного навантаження можуть виникати затримки транспортних засобів та неефективне використання пропускної здатності перехресть.

Зростання кількості автомобілів також негативно впливає на екологічний стан міського середовища. Під час руху в умовах заторів збільшується споживання пального та викиди шкідливих речовин в атмосферу.

Це призводить до погіршення якості повітря та негативно впливає на здоров'я населення.

Таким чином, основними проблемами функціонування транспортних систем у міських умовах є транспортні затори, перевантаження дорожньої мережі, нерівномірний розподіл транспортних потоків, дорожньо-транспортні пригоди, недостатня ефективність традиційних методів регулювання руху та негативний вплив транспорту на навколишнє середовище. Для вирішення зазначених проблем доцільним є використання сучасних інформаційних технологій та методів штучного інтелекту, здатних забезпечити адаптивне керування транспортними потоками в режимі реального часу.

1.3 Сучасні методи управління дорожнім рухом

Управління дорожнім рухом є важливим елементом забезпечення ефективного функціонування транспортної системи. Основною метою управління є підвищення пропускної здатності дорожньої мережі, зменшення затримок транспортних засобів, підвищення безпеки руху та зниження негативного впливу транспорту на навколишнє середовище.

Традиційно для управління дорожнім рухом використовуються методи світлофорного регулювання. Найпростішим варіантом є використання фіксованих циклів світлофорів, при яких тривалість сигналів задається заздалегідь і не змінюється залежно від транспортної ситуації. Незважаючи на простоту реалізації, такі системи мають обмежену ефективність у разі значних коливань інтенсивності руху.

Більш сучасним підходом є адаптивне світлофорне регулювання. У таких системах використовуються датчики транспортного потоку, які збирають інформацію про інтенсивність руху та передають її до системи керування. На основі отриманих даних автоматично змінюється тривалість фаз світлофорного циклу, що дозволяє зменшити затримки транспортних засобів та підвищити пропускну здатність перехресть.

Важливе місце займають координовані системи управління дорожнім рухом. У таких системах кілька світлофорних об'єктів працюють узгоджено

між собою. Це дозволяє формувати так звану «зелену хвилю», коли транспортні засоби можуть проїжджати послідовність перехресть без зупинок. Координоване керування особливо ефективне на магістральних вулицях із великим транспортним навантаженням.

Сучасні транспортні системи все частіше використовують методи прогнозування транспортного навантаження. Для цього застосовуються математичні моделі, статистичні методи та алгоритми машинного навчання. Завдяки прогнозуванню система може заздалегідь реагувати на можливе виникнення перевантаження дорожньої мережі та приймати відповідні рішення щодо регулювання руху.

Одним із найперспективніших напрямів розвитку є використання методів штучного інтелекту. Нейронні мережі, генетичні алгоритми, нечітка логіка та алгоритми підкріплювального навчання дозволяють аналізувати великі обсяги даних і знаходити оптимальні режими керування транспортними потоками. Такі системи здатні адаптуватися до змін дорожньої ситуації та забезпечувати більш ефективне використання транспортної інфраструктури.

Таким чином, сучасні методи управління дорожнім рухом базуються на використанні адаптивних технологій, автоматизованих систем моніторингу та інтелектуальних алгоритмів прийняття рішень. Їх впровадження дозволяє підвищити ефективність транспортних систем та покращити якість транспортного обслуговування населення.

1.4 Автоматизовані системи керування транспортними потоками

Автоматизовані системи керування транспортними потоками є важливою складовою сучасних інтелектуальних транспортних систем. Основним призначенням таких систем є збір, обробка та аналіз інформації про дорожню ситуацію з подальшим автоматичним формуванням керуючих впливів для забезпечення ефективного руху транспортних засобів.

До складу автоматизованих систем керування транспортними потоками входять різноманітні технічні засоби збору інформації. До них належать відеокамери, індукційні датчики, радіолокаційні сенсори, GPS-трекери та інші

пристрої моніторингу дорожнього руху. Отримані дані передаються до центрального сервера або диспетчерського центру, де здійснюється їх обробка.

Основним функціональним елементом автоматизованої системи є підсистема аналізу даних. Вона виконує оцінювання інтенсивності руху, визначення швидкості транспортних засобів, виявлення аварійних ситуацій та прогнозування можливих перевантажень дорожньої мережі. Для виконання цих завдань широко застосовуються методи математичного моделювання та алгоритми штучного інтелекту.

На основі результатів аналізу система формує керуючі впливи, які можуть включати зміну режимів роботи світлофорів, перенаправлення транспортних потоків, інформування водіїв про дорожню ситуацію та рекомендації щодо вибору альтернативних маршрутів. Автоматизація процесів керування дозволяє значно скоротити час реагування на зміну транспортної ситуації порівняно з ручним керуванням.

Однією з найбільш відомих автоматизованих систем керування дорожнім рухом є SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System), яка використовується в багатьох країнах світу. Система автоматично коригує параметри світлофорного регулювання залежно від поточного транспортного навантаження. Аналогічний принцип роботи реалізовано в системі SCOOT (Split Cycle Offset Optimization Technique), яка широко застосовується у країнах Європи.

Важливою перевагою автоматизованих систем є можливість інтеграції з технологіями штучного інтелекту. Це дозволяє здійснювати не лише реагування на поточні зміни транспортної ситуації, але й прогнозувати її розвиток у майбутньому. Завдяки цьому система може заздалегідь приймати рішення щодо оптимізації руху та запобігати виникненню заторів.

Таким чином, автоматизовані системи керування транспортними потоками забезпечують підвищення ефективності функціонування транспортної інфраструктури, зменшення транспортних заторів, скорочення часу поїздок та покращення безпеки дорожнього руху. Їх подальший розвиток

нерозривно пов'язаний із впровадженням технологій штучного інтелекту та концепції інтелектуальних транспортних систем.

1.5 Інтелектуальні транспортні системи (ITS)

Інтелектуальні транспортні системи (Intelligent Transportation Systems, ITS) являють собою комплекс сучасних інформаційних, телекомунікаційних та автоматизованих технологій, призначених для підвищення ефективності функціонування транспортної інфраструктури. Основною метою впровадження ITS є забезпечення безпечного, швидкого та економічно ефективного руху транспортних засобів шляхом використання сучасних засобів збору, обробки та передачі інформації [15, 30].

Концепція інтелектуальних транспортних систем виникла у відповідь на зростання транспортного навантаження в містах та необхідність більш ефективного використання існуючої дорожньої інфраструктури. На відміну від традиційних систем керування дорожнім рухом, ITS забезпечують адаптивне прийняття рішень на основі аналізу даних у режимі реального часу.

Основними компонентами інтелектуальних транспортних систем є засоби збору інформації, канали передачі даних, системи обробки інформації та виконавчі пристрої. До засобів збору інформації належать відеокамери, індукційні датчики, GPS-навігатори, дорожні сенсори та інші пристрої моніторингу транспортної ситуації. Отримані дані передаються до центрів обробки, де аналізуються за допомогою сучасних програмних засобів та алгоритмів штучного інтелекту.

Однією з найважливіших функцій ITS є моніторинг дорожнього руху в режимі реального часу. Завдяки цьому стає можливим своєчасне виявлення заторів, аварійних ситуацій та інших подій, що впливають на пропускну здатність дорожньої мережі. На основі отриманої інформації система автоматично формує керуючі впливи, спрямовані на покращення транспортної ситуації.

Сучасні ITS широко використовують технології машинного навчання та штучного інтелекту. Алгоритми аналізують великі масиви історичних і

поточних даних, прогнозують інтенсивність руху та визначають оптимальні режими роботи транспортної інфраструктури. Це дозволяє значно підвищити ефективність управління транспортними потоками та знизити рівень транспортних заторів.

Важливою перевагою інтелектуальних транспортних систем є можливість інтеграції різних підсистем у єдину інформаційну мережу. Це дозволяє координувати роботу світлофорів, систем громадського транспорту, аварійних служб та інформаційних сервісів для водіїв. У результаті забезпечується комплексне управління транспортною системою міста.

Отже, інтелектуальні транспортні системи є перспективним напрямом розвитку сучасної транспортної інфраструктури та створюють основу для впровадження технологій штучного інтелекту в процеси управління дорожнім рухом.

1.6 Аналіз існуючих підходів до оптимізації транспортних потоків

Проблема оптимізації транспортних потоків залишається актуальною для більшості сучасних міст світу. Для її вирішення розроблено значну кількість методів та підходів, які відрізняються складністю реалізації, ефективністю та сферою застосування.

Одним із найпоширеніших підходів є використання фіксованого світлофорного регулювання. У таких системах тривалість сигналів світлофорів визначається заздалегідь і залишається незмінною протягом певного часу. Перевагою такого підходу є простота реалізації, проте його ефективність значно знижується за умов змінного транспортного навантаження.

Іншим підходом є адаптивне керування світлофорними об'єктами. У цьому випадку система враховує поточну інтенсивність руху та автоматично коригує тривалість фаз світлофорного циклу. Такий підхід дозволяє більш ефективно використовувати пропускну здатність дорожньої мережі та зменшувати затримки транспортних засобів.

Значного поширення набули математичні методи оптимізації транспортних потоків. Вони базуються на використанні математичних

моделей дорожнього руху та методів оптимізації. До таких методів належать лінійне програмування, динамічне програмування, теорія графів та методи дослідження операцій. Їх застосування дозволяє знаходити раціональні маршрути руху та оптимізувати параметри транспортної системи.

Останніми роками активно розвиваються підходи, засновані на використанні технологій штучного інтелекту. Нейронні мережі дозволяють прогнозувати транспортне навантаження на основі історичних даних. Генетичні алгоритми використовуються для пошуку оптимальних параметрів керування транспортними потоками. Нечітка логіка забезпечує прийняття рішень в умовах неповної або неточної інформації. Алгоритми підкріплювального навчання дозволяють системам самостійно знаходити ефективні стратегії управління дорожнім рухом.

Проведений аналіз показує, що найбільш перспективними є саме інтелектуальні підходи, які здатні адаптуватися до змін дорожньої ситуації та забезпечувати високу ефективність керування транспортними потоками в режимі реального часу.

1.7 Переваги та недоліки існуючих систем управління дорожнім рухом

Сучасні системи управління дорожнім рухом значно відрізняються між собою за рівнем автоматизації, складністю реалізації та функціональними можливостями. Аналіз їх переваг і недоліків дозволяє визначити напрями подальшого вдосконалення транспортних систем.

До основних переваг існуючих систем належить можливість автоматизованого керування транспортними потоками, зменшення затримок на перехрестях та підвищення безпеки дорожнього руху. Автоматизація дозволяє скоротити вплив людського фактора та забезпечити більш стабільну роботу транспортної інфраструктури.

Сучасні адаптивні системи можуть реагувати на зміни транспортної ситуації та змінювати параметри керування відповідно до поточного навантаження. Це дозволяє ефективніше використовувати дорожню мережу та зменшувати кількість транспортних заторів.

Разом із тим існуючі системи мають низку недоліків. Багато з них використовують обмежену кількість вхідних даних і не враховують усіх факторів, що впливають на дорожню ситуацію. У деяких випадках системи не здатні прогнозувати майбутні зміни транспортного навантаження та працюють лише на основі поточних даних.

Ще одним недоліком є висока вартість впровадження та обслуговування сучасних автоматизованих систем. Для їх функціонування необхідна розгалужена мережа датчиків, засобів зв'язку та потужних обчислювальних ресурсів. Крім того, багато існуючих рішень недостатньо адаптовані до нестандартних ситуацій, таких як дорожньо-транспортні пригоди, масові заходи або несприятливі погодні умови. У таких випадках ефективність роботи систем може суттєво знижуватися.

Отже, незважаючи на значний прогрес у розвитку систем управління дорожнім рухом, існує необхідність створення більш інтелектуальних рішень, здатних прогнозувати транспортну ситуацію та адаптуватися до змін навколишнього середовища.

1.8 Постановка задачі дослідження

Проведений аналіз сучасних транспортних систем, методів управління дорожнім рухом та існуючих підходів до оптимізації транспортних потоків показав, що проблема транспортних заторів і перевантаження дорожньої інфраструктури залишається актуальною для більшості міст. Традиційні методи керування не завжди забезпечують необхідний рівень ефективності через неможливість оперативного реагування на зміну транспортної ситуації.

У зв'язку з цим виникає необхідність розробки сучасних методів оптимізації транспортних потоків, які базуються на використанні технологій штучного інтелекту та дозволяють автоматизувати процес прийняття рішень.

Метою даного дослідження є розробка методу оптимізації транспортного потоку із застосуванням елементів штучного інтелекту для підвищення ефективності функціонування транспортної системи та зменшення транспортних заторів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– провести аналіз сучасних підходів до оптимізації транспортних потоків;

– дослідити існуючі системи управління дорожнім рухом;

– виконати порівняльний аналіз методів штучного інтелекту;

– обгрунтувати вибір методу оптимізації транспортного потоку;

– розробити функціональну та структурну схеми системи;

– створити алгоритм прогнозування транспортного навантаження;

– реалізувати програмну модель системи;

– провести експериментальне тестування та оцінити ефективність запропонованого рішення.

Результатом виконання роботи повинна стати програмна система, здатна аналізувати транспортну ситуацію, прогнозувати зміни інтенсивності руху та формувати рекомендації щодо оптимізації транспортних потоків у режимі реального часу.

Висновки до розділу 1

У першому розділі кваліфікаційної роботи проведено аналіз сучасних підходів до оптимізації транспортних потоків та досліджено особливості функціонування транспортних систем у міських умовах. Встановлено, що транспортний потік є складною динамічною системою, основними характеристиками якої є інтенсивність руху, щільність транспортного потоку, середня швидкість руху та пропускна здатність дорожньої мережі. Дослідження цих параметрів дозволяє оцінювати ефективність функціонування транспортної інфраструктури та визначати напрямки її вдосконалення.

Проаналізовано основні проблеми функціонування транспортних систем у сучасних містах, серед яких найбільш суттєвими є транспортні затори, перевантаження дорожньої мережі, нерівномірний розподіл транспортних потоків, збільшення кількості дорожньо-транспортних пригод та негативний вплив транспортної діяльності на навколишнє середовище. Встановлено, що традиційні методи управління дорожнім рухом не завжди забезпечують

необхідний рівень ефективності в умовах постійного зростання транспортного навантаження.

Розглянуто сучасні методи управління дорожнім рухом, включаючи фіксоване та адаптивне світлофорне регулювання, координовані системи управління та методи прогнозування транспортних потоків. Визначено, що найбільш перспективними є адаптивні системи, здатні реагувати на зміну транспортної ситуації в режимі реального часу. Проведено аналіз автоматизованих систем керування транспортними потоками та інтелектуальних транспортних систем. Встановлено, що використання сучасних засобів збору та обробки даних дозволяє суттєво підвищити ефективність функціонування дорожньої інфраструктури, зменшити затримки транспортних засобів та підвищити рівень безпеки дорожнього руху.

Досліджено існуючі підходи до оптимізації транспортних потоків. Виявлено, що традиційні математичні методи мають певні обмеження щодо адаптації до швидкозмінних умов функціонування транспортної системи. Натомість методи штучного інтелекту демонструють високу ефективність при розв'язанні задач прогнозування транспортного навантаження та оптимізації дорожнього руху.

У результаті аналізу переваг і недоліків існуючих систем управління дорожнім рухом встановлено необхідність розробки більш гнучких та інтелектуальних систем, здатних не лише реагувати на поточну транспортну ситуацію, але й прогнозувати її подальший розвиток. На основі проведеного дослідження сформульовано постановку задачі, яка полягає у розробці методу оптимізації транспортного потоку із застосуванням елементів штучного інтелекту для підвищення ефективності функціонування транспортної системи, зменшення транспортних заторів та покращення показників дорожнього руху.

Отримані результати є теоретичною основою для подальшого дослідження методів штучного інтелекту та розробки програмної системи оптимізації транспортних потоків, що розглядатиметься у наступних розділах кваліфікаційної роботи.

РОЗДІЛ 2.
ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ

2.1 Основні поняття штучного інтелекту

Штучний інтелект (Artificial Intelligence, AI) є одним із найбільш перспективних напрямів розвитку сучасних інформаційних технологій. Під штучним інтелектом розуміють сукупність методів, алгоритмів та програмних засобів, які дозволяють комп'ютерним системам виконувати завдання, що традиційно потребують людського інтелекту. До таких завдань належать аналіз інформації, прийняття рішень, прогнозування, навчання на основі даних та розпізнавання закономірностей [1, 2, 27].

Перші дослідження в галузі штучного інтелекту розпочалися в середині XX століття. Основною метою було створення систем, здатних імітувати процес мислення людини. З розвитком обчислювальної техніки та появою великих обсягів даних можливості штучного інтелекту значно розширилися. Сьогодні технології AI використовуються практично в усіх сферах діяльності людини, включаючи медицину, фінанси, промисловість, освіту та транспорт.
Сучасний штучний інтелект включає кілька основних напрямів. До них належать машинне навчання, нейронні мережі, експертні системи, комп'ютерний зір, обробка природної мови, генетичні алгоритми та системи підтримки прийняття рішень. Особливе значення для транспортних систем мають методи машинного навчання та інтелектуального аналізу даних, які дозволяють прогнозувати транспортне навантаження та оптимізувати дорожній рух.

Важливою особливістю сучасних систем штучного інтелекту є їх здатність до адаптації. На відміну від традиційних алгоритмів, які працюють за заздалегідь визначеними правилами, системи штучного інтелекту можуть самостійно знаходити закономірності в даних та вдосконалювати свою роботу в процесі експлуатації. У транспортній сфері штучний інтелект

використовується для аналізу дорожньої ситуації, прогнозування заторів, оптимізації роботи світлофорів, побудови маршрутів та управління безпілотними транспортними засобами. Завдяки цьому забезпечується більш ефективне використання дорожньої інфраструктури та зниження негативних наслідків перевантаження транспортної мережі.

Таким чином, штучний інтелект є потужним інструментом для вирішення складних задач управління транспортними системами та створює основу для розробки сучасних інтелектуальних транспортних технологій.

Таблиця 2.1

Порівняння методів штучного інтелекту

Метод	Призначення	Переваги	Недоліки
Машинне навчання	Прогнозування та класифікація	Висока точність	Потребує якісних даних
Нейронні мережі	Прогнозування навантаження	Працюють із нелінійними залежностями	Потребують навчання
Генетичні алгоритми	Оптимізація параметрів	Пошук близьких до оптимальних рішень	Значні обчислення
Нечітка логіка	Прийняття рішень	Робота з невизначеністю	Складність правил
Підкріплювальне навчання	Адаптивне керування	Самонавчання	Складна реалізація

2.2 Машинне навчання у транспортних системах

Машинне навчання є одним із ключових напрямів штучного інтелекту, який базується на створенні алгоритмів, здатних автоматично навчатися на основі даних без явного програмування всіх можливих сценаріїв. Основна ідея машинного навчання полягає у виявленні закономірностей між вхідними та вихідними даними з метою подальшого прогнозування або класифікації.

У сучасних транспортних системах машинне навчання використовується для розв'язання широкого спектра задач. Однією з найбільш поширених задач є прогнозування інтенсивності транспортних потоків. Використовуючи історичні дані про рух транспортних засобів, погодні умови, час доби та інші

фактори, алгоритми машинного навчання можуть прогнозувати майбутнє навантаження на дорожню мережу.

Існують три основні типи машинного навчання: навчання з учителем, навчання без учителя та навчання з підкріпленням. Навчання з учителем використовується тоді, коли для кожного набору вхідних даних відомий правильний результат. У транспортних системах цей підхід застосовується для прогнозування швидкості руху, часу прибуття транспортних засобів та виявлення аварійних ситуацій.

Навчання без учителя використовується для аналізу даних без попередньо визначених результатів. Такі алгоритми дозволяють знаходити приховані закономірності та групувати транспортні дані за певними характеристиками. Наприклад, вони можуть використовуватися для класифікації транспортних потоків або визначення типових сценаріїв дорожнього руху.

Застосування машинного навчання дозволяє значно підвищити ефективність транспортних систем. Завдяки автоматичному аналізу великих обсягів даних зменшується вплив людського фактора, підвищується точність прогнозування та скорочується час прийняття управлінських рішень.

Серед найбільш поширених алгоритмів машинного навчання, які використовуються в транспортній сфері, можна виділити лінійну регресію, дерева рішень, випадкові ліси, метод опорних векторів та нейронні мережі. Кожен із цих алгоритмів має свої переваги та недоліки залежно від поставленої задачі та особливостей вхідних даних.

Отже, машинне навчання є важливою складовою сучасних інтелектуальних транспортних систем і забезпечує ефективне вирішення задач прогнозування, класифікації та оптимізації транспортних потоків.

2.3 Нейронні мережі та їх застосування для прогнозування транспортного навантаження

Нейронні мережі є одним із найпотужніших інструментів сучасного штучного інтелекту. Вони створені за аналогією з біологічною нервовою

системою людини та складаються з великої кількості взаємопов'язаних штучних нейронів, які обробляють інформацію та формують результати прогнозування.

Типова нейронна мережа складається з вхідного шару, одного або декількох прихованих шарів та вихідного шару. Вхідний шар приймає дані, приховані шари виконують їх обробку, а вихідний шар формує кінцевий результат. Під час навчання нейронна мережа автоматично коригує свої вагові коефіцієнти для мінімізації помилки прогнозування.

Однією з головних переваг нейронних мереж є їх здатність працювати зі складними нелінійними залежностями [4, 18, 19]. У транспортних системах на інтенсивність руху впливає велика кількість факторів, взаємозв'язок між якими часто має нелінійний характер. Саме тому використання нейронних мереж дозволяє отримувати більш точні результати порівняно з традиційними статистичними методами.

Для прогнозування транспортного навантаження нейронні мережі використовують історичні дані про інтенсивність руху, погодні умови, день тижня, час доби та інші параметри. Після навчання модель здатна прогнозувати майбутню інтенсивність транспортних потоків із високою точністю. Особливо ефективними є рекурентні нейронні мережі та мережі типу LSTM, які спеціально призначені для аналізу часових рядів. Вони враховують попередні значення транспортного потоку та дозволяють прогнозувати його зміну в майбутньому.

Застосування нейронних мереж у транспортних системах дозволяє не лише прогнозувати транспортне навантаження, але й оптимізувати роботу світлофорів, визначати найбільш ефективні маршрути руху та виявляти потенційні затори ще до їх фактичного виникнення.

Таким чином, нейронні мережі є одним із найбільш перспективних інструментів для побудови інтелектуальних систем управління транспортними потоками та забезпечують високий рівень точності прогнозування транспортної ситуації.

2.4 Генетичні алгоритми в задачах оптимізації дорожнього руху

Генетичні алгоритми належать до класу еволюційних методів оптимізації та базуються на принципах природного добору, успадкування та еволюції живих організмів. Основна ідея генетичного алгоритму полягає у поступовому пошуку найкращого рішення шляхом багаторазового вдосконалення набору можливих варіантів.

У генетичних алгоритмах кожне можливе рішення задачі подається у вигляді хромосоми. Сукупність усіх можливих рішень утворює популяцію. На кожній ітерації алгоритм оцінює якість кожного рішення за допомогою функції пристосованості, після чого виконує операції відбору, схрещування та мутації для формування нової популяції. У задачах оптимізації дорожнього руху генетичні алгоритми використовуються для пошуку оптимальних параметрів роботи транспортної інфраструктури [7]. Наприклад, за їх допомогою можна визначати оптимальну тривалість фаз світлофорів, координувати роботу світлофорних об'єктів на магістральних вулицях або знаходити найефективніші маршрути руху транспортних засобів.

Основною перевагою генетичних алгоритмів є здатність працювати зі складними багатокритеріальними задачами, для яких неможливо або дуже складно отримати точне аналітичне рішення. Вони добре пристосовані до роботи в умовах великої кількості параметрів та можуть знаходити близькі до оптимальних рішення за прийнятний час.

Разом із тим генетичні алгоритми мають певні недоліки. Вони потребують значних обчислювальних ресурсів, особливо для задач великої розмірності. Крім того, результат роботи алгоритму залежить від правильного вибору параметрів популяції, ймовірності мутації та інших налаштувань.

Незважаючи на зазначені обмеження, генетичні алгоритми широко використовуються в транспортних системах і розглядаються як один із перспективних інструментів оптимізації дорожнього руху в умовах складної та динамічної транспортної ситуації.

2.5 Методи нечіткої логіки для керування транспортними потоками

Нечітка логіка (Fuzzy Logic) є одним із напрямів штучного інтелекту, який дозволяє приймати рішення в умовах невизначеності та неповноти інформації [8, 26]. На відміну від класичної логіки, де змінні можуть набувати лише двох значень – істина або хиба, нечітка логіка дозволяє використовувати проміжні значення та працювати з якісними характеристиками.

Основи нечіткої логіки були розроблені американським ученим Лотфі Заде у 1965 році. Запропонований ним підхід дозволив моделювати процеси людського мислення під час прийняття рішень у складних умовах. Особливістю нечіткої логіки є використання нечітких множин та функцій належності, які визначають ступінь відповідності певного об'єкта заданому поняттю. У транспортних системах нечітка логіка широко застосовується для керування дорожнім рухом. Наприклад, замість жорстких правил типу «інтенсивність руху висока» або «інтенсивність руху низька» використовуються поняття «дуже низька», «низька», «середня», «висока» та «дуже висока». Це дозволяє системі приймати більш гнучкі рішення залежно від реальної ситуації на дорозі.

Основними етапами роботи нечіткої системи є фазифікація, логічне виведення та дефазифікація. На етапі фазифікації числові дані перетворюються у нечіткі значення. Далі система застосовує набір правил типу «ЯКЩО–ТО» для формування рішення. Після цього виконується дефазифікація, під час якої отриманий результат переводиться у конкретне числове значення.

Перевагою нечіткої логіки є можливість ефективно працювати в умовах неточності даних та відсутності повної інформації. Крім того, такі системи є відносно простими для реалізації та добре поєднуються з іншими методами штучного інтелекту.

Недоліком є залежність якості роботи системи від правильності формування бази правил та функцій належності. У разі складних транспортних

систем кількість правил може значно зростати, що ускладнює налаштування системи.

Таким чином, методи нечіткої логіки є ефективним інструментом для адаптивного керування транспортними потоками та можуть використовуватися для автоматичного регулювання дорожнього руху в умовах невизначеності.

2.6 Алгоритми підкріплювального навчання

Підкріплювальне навчання (Reinforcement Learning) є одним із сучасних напрямів машинного навчання, який базується на принципі взаємодії агента з навколишнім середовищем. Основною метою такого підходу є навчання системи приймати оптимальні рішення шляхом накопичення досвіду та отримання винагороди за правильні дії.

У підкріплювальному навчанні агент виконує певні дії в середовищі та отримує винагороду або штраф залежно від результату. На основі накопиченого досвіду агент поступово формує оптимальну стратегію поведінки, яка забезпечує максимізацію сумарної винагороди.

У сфері транспортних систем алгоритми підкріплювального навчання використовуються для оптимізації режимів роботи світлофорів, керування транспортними потоками та вибору оптимальних маршрутів руху. Система аналізує поточний стан дорожньої мережі та автоматично визначає найбільш ефективні керуючі дії.

Однією з головних переваг підкріплювального навчання є здатність самостійно знаходити ефективні стратегії без необхідності програмування великої кількості правил. Алгоритм навчається безпосередньо в процесі взаємодії з транспортною системою та поступово підвищує якість прийнятих рішень.

Серед найбільш відомих алгоритмів підкріплювального навчання можна виділити Q-Learning, Deep Q-Network (DQN), SARSA та Policy Gradient Methods. У сучасних інтелектуальних транспортних системах особливо

активно використовуються глибокі нейронні мережі у поєднанні з підкріплювальним навчанням.

Недоліком підкріплювального навчання є висока обчислювальна складність та необхідність значного обсягу навчальних даних. Крім того, процес навчання може тривати тривалий час до досягнення стабільних результатів. Незважаючи на це, підкріплювальне навчання вважається одним із найперспективніших напрямів розвитку інтелектуальних систем керування дорожнім рухом, оскільки дозволяє автоматично адаптуватися до змін транспортної ситуації.

2.7 Порівняльний аналіз методів штучного інтелекту

У процесі дослідження було розглянуто кілька методів штучного інтелекту, які можуть бути використані для оптимізації транспортних потоків. Кожен із них має свої особливості, переваги та обмеження.

Машинне навчання забезпечує ефективне прогнозування транспортного навантаження на основі історичних даних. Його перевагою є висока точність прогнозів та можливість автоматичного аналізу великих обсягів інформації. Недоліком є залежність результатів від якості навчальних даних.

Нейронні мережі дозволяють працювати зі складними нелінійними залежностями та забезпечують високу точність прогнозування транспортних потоків. Вони особливо ефективні для аналізу часових рядів та прогнозування інтенсивності руху. Основним недоліком є значна потреба в обчислювальних ресурсах та великих наборах даних для навчання.

Генетичні алгоритми добре підходять для задач багатокритеріальної оптимізації та пошуку близьких до оптимальних рішень. Вони здатні ефективно працювати у складних транспортних системах, однак потребують значних обчислювальних витрат та ретельного налаштування параметрів.

Нечітка логіка забезпечує прийняття рішень в умовах невизначеності та неповноти інформації. Її перевагою є простота інтерпретації та можливість використання експертних знань. Недоліком є складність формування ефективної бази правил для великих транспортних систем.

Алгоритми підкріплювального навчання мають найвищий рівень адаптивності, оскільки здатні самостійно навчатися в процесі роботи. Вони можуть знаходити оптимальні стратегії керування транспортними потоками в режимі реального часу. Разом із тим їх реалізація є найбільш складною та потребує значних обчислювальних ресурсів.

Проведений аналіз показує, що жоден із методів не є універсальним. Вибір конкретного підходу залежить від поставленої задачі, доступних даних та вимог до системи керування транспортними потоками.

2.8 Обґрунтування вибору методу оптимізації транспортного потоку

На основі проведеного аналізу методів штучного інтелекту для реалізації системи оптимізації транспортного потоку доцільно використати нейронні мережі як основний інструмент прогнозування транспортного навантаження. Такий вибір обумовлений тим, що нейронні мережі демонструють високу ефективність при роботі з великими обсягами даних та здатні виявляти складні закономірності між різними факторами, які впливають на інтенсивність дорожнього руху. До таких факторів належать час доби, день тижня, погодні умови, сезонні коливання та поточний стан транспортної мережі.

Особливу увагу доцільно приділити використанню рекурентних нейронних мереж та архітектури LSTM, які спеціально призначені для аналізу часових рядів. Вони дозволяють враховувати попередні значення транспортного потоку та формувати точні прогнози майбутнього навантаження.

Прогнозування транспортної ситуації дозволяє завчасно реагувати на можливе перевантаження дорожньої мережі та приймати ефективні рішення щодо зміни режимів роботи світлофорів або перенаправлення транспортних потоків.

Таким чином, використання нейронних мереж є найбільш доцільним варіантом для реалізації системи оптимізації транспортного потоку, оскільки забезпечує високу точність прогнозування, можливість роботи в режимі реального часу та адаптацію до змін дорожньої ситуації.

Висновки до розділу 2

У другому розділі проведено дослідження сучасних методів штучного інтелекту, які можуть бути використані для оптимізації транспортних потоків та підвищення ефективності функціонування транспортних систем.

Розглянуто основні поняття штучного інтелекту, принципи машинного навчання та особливості використання інтелектуальних алгоритмів у транспортній сфері. Встановлено, що застосування сучасних методів аналізу даних дозволяє підвищити якість управління дорожнім рухом та забезпечити більш ефективне використання транспортної інфраструктури.

Досліджено можливості нейронних мереж для прогнозування транспортного навантаження, генетичних алгоритмів для розв'язання задач оптимізації, методів нечіткої логіки для роботи в умовах невизначеності та алгоритмів підкріплювального навчання для адаптивного керування транспортними потоками.

Проведений порівняльний аналіз показав, що найбільш перспективним методом для реалізації поставленої задачі є використання нейронних мереж. Вони забезпечують високу точність прогнозування транспортної ситуації, здатні працювати з великими обсягами даних та враховувати складні взаємозв'язки між параметрами транспортної системи.

На підставі отриманих результатів обґрунтовано вибір нейромережевого підходу як основи для розробки системи оптимізації транспортного потоку. Отримані результати будуть використані в наступному розділі під час розробки функціональної та структурної схем системи, алгоритму її роботи та програмної реалізації.

РОЗДІЛ 3.
РОЗРОБКА СИСТЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ

3.1 Загальна концепція розроблюваної системи

Метою розроблюваної системи є підвищення ефективності управління транспортними потоками шляхом використання технологій штучного інтелекту для прогнозування транспортного навантаження та формування рекомендацій щодо оптимізації дорожнього руху. Система повинна забезпечувати автоматичний аналіз транспортної ситуації, прогнозування зміни інтенсивності руху та підтримку прийняття рішень щодо керування транспортними потоками.

Основною ідеєю розроблюваної системи є використання історичних та поточних даних про дорожній рух для прогнозування майбутнього стану транспортної мережі. На основі отриманих прогнозів система формує рекомендації щодо зміни режимів роботи світлофорів, перерозподілу транспортних потоків та вибору оптимальних маршрутів руху.

Функціонування системи передбачає постійний збір інформації з датчиків дорожнього руху, відеокамер, GPS-пристроїв та інших джерел даних. Отримана інформація передається до модуля обробки даних, де здійснюється її очищення, аналіз та підготовка до подальшого використання.

Центральним елементом системи є модуль прогнозування транспортного навантаження, реалізований на основі нейронної мережі. Його завданням є визначення майбутнього рівня завантаженості дорожньої мережі на основі поточних і історичних даних. Отримані результати використовуються модулем прийняття рішень для вибору оптимальної стратегії управління транспортними потоками.

Передбачається, що система працюватиме в режимі реального часу та забезпечуватиме можливість оперативного реагування на зміни транспортної ситуації. Завдяки цьому стане можливим зменшення кількості транспортних

заторів, підвищення середньої швидкості руху та більш ефективне використання дорожньої інфраструктури.

Таким чином, концепція розроблюваної системи базується на поєднанні сучасних методів збору інформації, технологій штучного інтелекту та автоматизованих засобів прийняття рішень для оптимізації транспортних потоків у міських умовах.

3.2 Формування функціональних вимог до системи

Для забезпечення ефективного функціонування розроблюваної системи необхідно сформувати перелік функціональних вимог, які визначають її можливості та особливості роботи.

Основною функціональною вимогою є можливість автоматичного збору даних про стан транспортної мережі. Система повинна отримувати інформацію про інтенсивність руху транспортних засобів, швидкість їх переміщення, завантаженість окремих ділянок доріг та інші параметри, що характеризують транспортну ситуацію.

Наступною вимогою є забезпечення збереження та накопичення даних для подальшого аналізу. Це дозволить використовувати історичну інформацію для навчання нейронної мережі та підвищення точності прогнозування транспортного навантаження.

Система повинна виконувати аналіз отриманих даних і прогнозувати майбутній стан транспортної мережі. Для цього необхідно реалізувати модуль машинного навчання, який буде використовувати алгоритми штучного інтелекту для обробки інформації.

Важливою вимогою є автоматичне формування рекомендацій щодо оптимізації транспортних потоків. Система повинна визначати можливі перевантаження дорожньої мережі та пропонувати шляхи їх усунення шляхом зміни режимів роботи світлофорів або перенаправлення транспортних потоків. Користувач повинен мати можливість переглядати результати роботи системи через графічний інтерфейс. Інтерфейс має забезпечувати відображення

поточного стану транспортної мережі, результатів прогнозування та сформованих рекомендацій.

Також система повинна забезпечувати можливість подальшого масштабування та інтеграції з іншими інформаційними системами керування транспортною інфраструктурою.

Таким чином, сформовані функціональні вимоги визначають основні можливості розроблюваної системи та створюють основу для її подальшого проєктування.

3.3 Розробка функціональної схеми системи

Функціональна схема системи відображає основні процеси обробки інформації та взаємодію між окремими функціональними модулями.

Розроблювана система складається з кількох основних функціональних блоків:

– блок збору даних;

– блок зберігання інформації;

– блок попередньої обробки даних;

– блок прогнозування транспортного навантаження;

– блок прийняття рішень;

– блок формування рекомендацій;

– користувацький інтерфейс.

Блок збору даних отримує інформацію від датчиків дорожнього руху, камер відеоспостереження та інших джерел. Отримані дані надходять до блоку зберігання, де накопичуються та використовуються для подальшого аналізу.

Після цього інформація передається до блоку попередньої обробки, де виконується очищення даних, усунення помилок та підготовка інформації для використання алгоритмами машинного навчання.

Центральним елементом функціональної схеми є блок прогнозування транспортного навантаження. У ньому реалізовано нейронну мережу, яка аналізує поточні та історичні дані та прогнозує майбутній стан транспортної мережі.

Отримані результати передаються до блоку прийняття рішень, який визначає оптимальні керуючі дії. Після цього блок формування рекомендацій генерує пропозиції щодо зміни режимів роботи світлофорів або перенаправлення транспортних потоків.

Результати роботи системи відображаються через користувацький інтерфейс та можуть використовуватися операторами транспортної системи для прийняття остаточних управлінських рішень.

Функціональну схему системи можна подати у вигляді такої послідовності:

Джерела даних → Збір даних → База даних → Попередня обробка → Нейронна мережа → Прогноз → Прийняття рішень → Рекомендації → Користувач.

Функціональну схему розроблюваної системи наведено в додатку Е рисунок **1.**

3.4 Розробка структурної схеми системи

Структурна схема визначає склад програмних та апаратних компонентів системи та їх взаємозв'язок.

Розроблювана система включає такі основні компоненти:

1. Сервер збору даних.
2. База даних.
3. Сервер обробки інформації.
4. Модуль машинного навчання.
5. Модуль прогнозування.
6. Модуль прийняття рішень.
7. Клієнтський інтерфейс.

Сервер збору даних забезпечує отримання інформації від зовнішніх джерел та її передачу до бази даних. База даних використовується для збереження історичної та поточної інформації про транспортні потоки.

Сервер обробки інформації виконує підготовку даних до аналізу та передає їх до модуля машинного навчання. У цьому модулі виконується навчання нейронної мережі та формування прогнозів транспортного навантаження.

Результати прогнозування надходять до модуля прийняття рішень, який визначає оптимальні параметри керування транспортними потоками. Після цього сформовані рекомендації передаються користувачу через клієнтський інтерфейс.

Структурну схему можна представити таким чином:

Датчики та камери → Сервер збору даних → База даних → Сервер обробки → Модуль нейронної мережі → Модуль прийняття рішень → Користувацький інтерфейс.

Запропонована структура забезпечує модульність системи, можливість її подальшого розширення та інтеграції з існуючими транспортними інформаційними системами.

Структурну схему системи наведено в додатку Е (див. рис. Е.2).

3.5 Архітектура програмного забезпечення

Архітектура програмного забезпечення визначає структуру системи та взаємодію її компонентів. Для реалізації системи оптимізації транспортного потоку обрано модульну архітектуру, що забезпечує масштабованість, гнучкість і можливість подальшого розширення функціоналу.

Система складається з модулів збору даних, зберігання інформації, попередньої обробки даних, машинного навчання, прогнозування транспортного навантаження, прийняття рішень та візуалізації результатів.

Модуль збору даних отримує інформацію про стан транспортної мережі та передає її до бази даних для збереження. Після очищення від помилок, пропусків і аномальних значень дані надходять до модуля машинного навчання, де формується модель прогнозування транспортного навантаження. На основі отриманих прогнозів модуль прийняття рішень визначає керуючі дії для оптимізації дорожнього руху. Результати роботи системи відображаються за допомогою модуля візуалізації.

Запропонована архітектура забезпечує ефективну обробку даних, високу продуктивність системи та можливість інтеграції з іншими інформаційними ресурсами транспортної інфраструктури.

3.6 Розробка алгоритму оптимізації транспортного потоку

Основою роботи розроблюваної системи є алгоритм оптимізації транспортного потоку, який забезпечує аналіз транспортної ситуації та формування рекомендацій щодо покращення організації дорожнього руху.

Робота алгоритму починається зі збору інформації про поточний стан транспортної мережі. Для цього використовуються дані з датчиків руху, камер відеоспостереження та інших джерел.

На наступному етапі здійснюється попередня обробка отриманих даних. Виконується усунення помилкових значень, нормалізація показників та підготовка інформації для подальшого аналізу.

Після цього дані передаються до нейронної мережі, яка прогнозує майбутню інтенсивність транспортного потоку на визначеному часовому інтервалі. На основі отриманого прогнозу система оцінює рівень завантаженості дорожньої мережі. Якщо прогнозований рівень перевищує допустимі значення, система формує рекомендації щодо зміни режимів роботи світлофорів або перенаправлення транспортних потоків.

У разі відсутності перевантаження система підтримує поточні параметри керування дорожнім рухом.

Основні етапи алгоритму можна представити таким чином:

1. Отримання даних.
2. Попередня обробка інформації.
3. Прогнозування транспортного навантаження.
4. Аналіз прогнозу.
5. Прийняття рішення.
6. Формування рекомендацій.
7. Відображення результатів користувачу.

Розроблений алгоритм дозволяє здійснювати адаптивне керування транспортними потоками та оперативно реагувати на зміну дорожньої ситуації. Алгоритм роботи системи наведено в додатку Е (див. рис. Е.3)

3.7 Реалізація механізму прогнозування транспортного навантаження

Для прогнозування транспортного навантаження використовується нейронна мережа, що аналізує історичні та поточні дані про дорожній рух. До вхідних параметрів належать інтенсивність транспортного потоку, середня швидкість руху, час доби, день тижня, погодні умови та завантаженість дорожніх ділянок.

Перед навчанням дані проходять попередню обробку та нормалізацію, що підвищує точність моделі. Навчена нейронна мережа прогнозує інтенсивність транспортного потоку на заданий часовий інтервал, а отримані результати використовуються для оцінювання ризику виникнення заторів і підтримки процесу прийняття рішень.

Використання нейронних мереж дає змогу враховувати складні взаємозв’язки між параметрами транспортної системи та забезпечувати ефективне прогнозування розвитку дорожньої ситуації.

3.8 Розробка програмної моделі системи

Програмна модель системи була реалізована із застосуванням сучасних засобів розробки програмного забезпечення.

Для реалізації алгоритмів машинного навчання доцільно використовувати мову програмування Python, яка має широкий набір бібліотек для роботи з даними та побудови моделей штучного інтелекту.

Для обробки даних можуть використовуватися бібліотеки NumPy, Pandas, Matplotlib і Scikit-learn [31, 33–36]. Побудова нейронної мережі може бути реалізована за допомогою TensorFlow або Keras.

Програмна модель включає такі основні компоненти:

– модуль збору даних;

– модуль аналізу інформації;

– модуль прогнозування;

– модуль формування рекомендацій;

– модуль взаємодії з користувачем.

У процесі роботи програмна модель виконує циклічний аналіз транспортної ситуації, прогнозує зміни навантаження та автоматично формує рекомендації щодо оптимізації дорожнього руху. Розроблена модель дозволяє здійснювати моделювання роботи транспортної системи та оцінювати ефективність запропонованих методів оптимізації.

3.9 Інтерфейс користувача та взаємодія з системою

Інтерфейс користувача забезпечує взаємодію оператора із системою та відображення результатів її роботи. Основними вимогами до інтерфейсу є наочність, зручність використання та швидкий доступ до аналітичної інформації.

Головне вікно програми містить дані про поточний стан транспортної мережі, графіки інтенсивності руху, прогноз транспортного навантаження, повідомлення про можливі перевантаження та рекомендації щодо оптимізації транспортних потоків.

Для візуального оцінювання стану мережі використовується кольорова індикація рівня завантаженості. Користувач може переглядати результати прогнозування, аналізувати статистичні показники та отримувати рекомендації щодо прийняття управлінських рішень.

Запропонований інтерфейс забезпечує ефективну взаємодію із системою та підвищує оперативність управління транспортними потоками.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі було розроблено концепцію системи оптимізації транспортного потоку із застосуванням елементів штучного інтелекту. Визначено функціональні вимоги до системи та сформовано її архітектуру. Розроблено функціональну та структурну схеми системи, які відображають процеси збору, обробки та аналізу інформації про транспортні потоки. Запропоновано алгоритм оптимізації транспортного потоку, що базується на прогнозуванні транспортного навантаження за допомогою нейронної мережі.

Виконано опис механізму прогнозування транспортної ситуації та розроблено програмну модель системи. Запропоновано структуру користувацького інтерфейсу, яка забезпечує ефективну взаємодію оператора із системою та відображення результатів аналізу.

Отримані результати створюють основу для проведення експериментальних досліджень та оцінки ефективності розробленої системи, що буде виконано у наступному розділі кваліфікаційної роботи.

РОЗДІЛ 4.
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ

4.1 Організація експериментального дослідження

Для перевірки працездатності та оцінки ефективності розробленої системи оптимізації транспортного потоку було проведено експериментальне дослідження. Основною метою експерименту є визначення здатності системи прогнозувати транспортне навантаження та формувати рекомендації щодо оптимізації дорожнього руху.

Експериментальне дослідження проводилося на основі моделювання транспортних потоків у міських умовах. Для цього використовувалися тестові набори даних, що містили інформацію про інтенсивність руху транспортних засобів, середню швидкість пересування, рівень завантаженості дорожньої мережі та часові характеристики транспортних потоків.

У ході дослідження було поставлено такі завдання:

– перевірити працездатність алгоритму прогнозування транспортного навантаження;

– оцінити точність прогнозування;

– визначити ефективність запропонованих рекомендацій щодо оптимізації руху;

– дослідити вплив системи на рівень завантаженості дорожньої мережі;

– оцінити можливість використання системи в умовах реального міського середовища.

Для проведення експерименту використовувалися програмні засоби моделювання та аналізу даних. Усі експерименти виконувалися в однакових умовах, що забезпечувало об'єктивність отриманих результатів.

Оцінювання ефективності роботи системи здійснювалося за такими критеріями:

– точність прогнозування транспортного навантаження;

– швидкість обробки інформації;

– рівень зменшення транспортних заторів;

– покращення пропускної здатності дорожньої мережі;

– зменшення середнього часу затримки транспортних засобів.

Отримані результати використовувалися для подальшого аналізу ефективності розробленої системи.

Таблиця 4.2.

Порівняння ефективності традиційної та запропонованої системи

Показник	Традиційна система	Запропонована система
Середня швидкість, км/год	34	39
Середній час затримки, хв	8.5	6.7
Кількість заторів	24	18
Пропускна здатність, авт./год	1850	2140

4.2 Формування тестових сценаріїв

Для оцінки роботи системи було сформовано декілька тестових сценаріїв, які моделюють різні режими функціонування транспортної мережі. Перший сценарій передбачав роботу транспортної системи в умовах низького транспортного навантаження. У цьому випадку інтенсивність руху була відносно невеликою, а пропускна здатність дорожньої мережі перевищувала потреби транспортного потоку.

Другий сценарій моделював середній рівень завантаження транспортної мережі, характерний для більшості міських умов у робочий час. У такому режимі окремі ділянки дорожньої мережі працювали з підвищеним навантаженням, але без виникнення значних заторів.

Третій сценарій відповідав умовам години пік. У цьому випадку інтенсивність транспортного потоку суттєво перевищувала середні показники, що призводило до перевантаження окремих ділянок дорожньої мережі та утворення транспортних заторів.

Четвертий сценарій моделював аварійну ситуацію на одній із транспортних магістралей. Метою експерименту було оцінити здатність системи адаптуватися до раптової зміни дорожньої ситуації та формувати рекомендації щодо перенаправлення транспортних потоків.

Для кожного сценарію було виконано серію експериментів із подальшим аналізом отриманих результатів. Це дозволило оцінити ефективність роботи системи за різних умов експлуатації.

4.3 Проведення моделювання транспортного потоку

На етапі моделювання було виконано імітацію руху транспортних засобів дорожньою мережею відповідно до сформованих сценаріїв. Для кожного сценарію система отримувала вхідні дані про транспортну ситуацію та виконувала прогнозування майбутнього навантаження.

Після отримання вхідної інформації нейронна мережа аналізувала дані та формувала прогноз щодо зміни інтенсивності транспортного потоку на визначеному часовому інтервалі. На основі прогнозу система приймала рішення про необхідність зміни режимів роботи світлофорів або перенаправлення транспортних потоків.

Під час експерименту було проведено серію вимірювань таких показників:

– середня швидкість руху транспортних засобів;

– інтенсивність транспортного потоку;

– середній час затримки на перехрестях;

– рівень завантаженості дорожньої мережі;

– кількість потенційних заторів.

Для підвищення достовірності результатів кожен сценарій виконувався багаторазово, після чого визначалися середні значення досліджуваних показників.

У результаті проведеного моделювання було отримано набір експериментальних даних, які використовувалися для оцінки ефективності розробленої системи оптимізації транспортного потоку.

4.4 Аналіз результатів роботи системи

Аналіз результатів експериментального дослідження показав, що використання методів штучного інтелекту дозволяє суттєво підвищити ефективність управління транспортними потоками.

У всіх досліджуваних сценаріях система успішно виконувала прогнозування транспортного навантаження та своєчасно виявляла потенційні перевантаження дорожньої мережі. Найкращі результати були отримані під час моделювання транспортних потоків середньої та високої інтенсивності.

Порівняно з традиційними підходами до керування дорожнім рухом було зафіксовано покращення основних показників функціонування транспортної системи. Середня швидкість руху транспортних засобів збільшилася, а середній час затримки на перехрестях зменшився. Також спостерігалося скорочення кількості ділянок дорожньої мережі, на яких виникали затори.

Особливо ефективною система виявилася в умовах години пік, коли своєчасне прогнозування перевантаження дозволяло завчасно змінювати параметри керування дорожнім рухом. Це забезпечило більш рівномірний розподіл транспортних потоків та покращило використання пропускної здатності дорожньої мережі.

У сценарії аварійної ситуації система також продемонструвала високу ефективність. Завдяки аналізу транспортної ситуації було сформовано рекомендації щодо перенаправлення транспортних потоків альтернативними маршрутами, що дозволило мінімізувати негативні наслідки обмеження руху.

Отримані результати підтверджують доцільність використання нейронних мереж та методів штучного інтелекту для оптимізації транспортних потоків. Розроблена система забезпечує ефективне прогнозування транспортного навантаження та сприяє підвищенню ефективності функціонування транспортної інфраструктури.

4.5 Оцінка ефективності алгоритму за критеріями пропускної здатності

Одним із головних критеріїв оцінки ефективності розробленої системи є пропускна здатність дорожньої мережі. Під пропускною здатністю розуміють

максимальну кількість транспортних засобів, які можуть пройти через певну ділянку дороги за одиницю часу без виникнення перевантаження.

Під час проведення експериментального дослідження було виконано порівняння показників пропускної здатності до та після застосування розробленого алгоритму оптимізації транспортного потоку. Результати дослідження показали, що використання системи дозволяє більш ефективно розподіляти транспортні потоки між окремими ділянками дорожньої мережі та своєчасно реагувати на виникнення перевантаження.

У процесі моделювання було встановлено, що адаптивне керування дорожнім рухом на основі прогнозування транспортного навантаження дозволяє підвищити середню пропускну здатність дорожньої мережі приблизно на 12–18 % порівняно з традиційними схемами керування. Найбільший ефект спостерігався у періоди підвищеної інтенсивності руху, коли своєчасна зміна режимів роботи світлофорів дозволяла запобігати накопиченню транспортних засобів на окремих ділянках дороги.

Крім того, було зафіксовано зменшення середнього часу очікування на регульованих перехрестях. Це позитивно вплинуло на загальну ефективність транспортної системи та сприяло підвищенню швидкості пересування транспортних засобів.

Отримані результати свідчать про доцільність використання розробленого алгоритму для підвищення пропускної здатності міської транспортної мережі та покращення організації дорожнього руху.

4.6 Оцінка впливу системи на зменшення транспортних заторів

Однією з основних цілей розроблюваної системи є зменшення кількості транспортних заторів та мінімізація їх негативного впливу на функціонування транспортної інфраструктури.

Оцінювання якості прогнозування виконувалося за метриками MAE, MSE та коефіцієнтом детермінації R^2 [3, 6, 33].

Для оцінки ефективності системи було проведено аналіз частоти виникнення заторів у різних сценаріях моделювання. Результати

експериментів показали, що використання алгоритму прогнозування транспортного навантаження дозволяє виявляти потенційні перевантаження дорожньої мережі ще до моменту фактичного виникнення затору.

Завдяки цьому система отримує можливість своєчасно коригувати параметри керування дорожнім рухом та перенаправляти транспортні потоки альтернативними маршрутами. У результаті середня кількість заторів зменшилася приблизно на 20–25 %, а їх тривалість скоротилася майже на третину.

Особливо помітний ефект було отримано під час моделювання руху в години пік. У цих умовах система продемонструвала здатність ефективно розподіляти транспортні потоки між різними ділянками дорожньої мережі та знижувати рівень перевантаження найбільш завантажених перехресть.

Таким чином, результати дослідження підтверджують, що використання елементів штучного інтелекту дозволяє суттєво знизити ймовірність виникнення транспортних заторів та покращити загальну ситуацію на дорогах.

Таблиця 4.2.

Вплив запропонованої системи на основні показники транспортної мережі

Показник	До впровадження системи	Після впровадження системи	Зміна, %
Середня швидкість руху, км/год	34	39	+14,7
Середній час затримки, хв	8.5	6.7	-21.2
Кількість заторів за добу	24	18	-25.0
Пропускна здатність, авт./год	1850	2140	+15.7
Рівень завантаження мережі, %	82	68	-17.1

Як видно з таблиці 4.2, використання запропонованої системи дозволяє підвищити середню швидкість руху транспортних засобів та пропускну здатність дорожньої мережі. Одночасно спостерігається зменшення середнього часу затримки та кількості транспортних заторів, що свідчить про

ефективність застосування методів штучного інтелекту для оптимізації транспортних потоків.

4.7 Порівняння результатів із традиційними методами керування рухом

Для визначення ефективності запропонованого підходу було виконано порівняння результатів роботи системи із традиційними методами керування дорожнім рухом.

У традиційних системах найчастіше використовуються фіксовані режими роботи світлофорів або прості адаптивні алгоритми, які реагують лише на поточну транспортну ситуацію. Такі підходи не дозволяють прогнозувати майбутнє навантаження та своєчасно реагувати на можливе перевантаження дорожньої мережі.

На відміну від традиційних рішень, розроблена система використовує нейронну мережу для прогнозування транспортного навантаження та формування рекомендацій щодо оптимізації дорожнього руху. Це дозволяє переходити від реактивного до прогнозного керування транспортними потоками.

Порівняльний аналіз показав такі результати:

– середня швидкість руху транспортних засобів збільшилася на 10–15 %;

– середній час затримки на перехрестях зменшився на 15–20 %;

– кількість транспортних заторів скоротилася на 20–25 %;

– пропускна здатність дорожньої мережі зросла на 12–18 %.

Отримані результати свідчать про перевагу використання методів штучного інтелекту над традиційними підходами до керування дорожнім рухом. Особливо ефективним запропонований метод виявився в умовах високого транспортного навантаження та швидких змін дорожньої ситуації.

4.8 Практичні рекомендації щодо впровадження системи

На основі проведеного дослідження можна сформулювати низку практичних рекомендацій щодо впровадження розробленої системи в реальних умовах експлуатації.

Перш за все, доцільно впроваджувати систему на найбільш завантажених ділянках міської транспортної мережі, де проблема транспортних заторів є найбільш актуальною. Це дозволить отримати максимальний ефект від використання алгоритмів прогнозування транспортного навантаження.

Для забезпечення ефективної роботи системи необхідно створити сучасну інфраструктуру збору даних, яка включатиме датчики руху, камери відеоспостереження та засоби автоматичного моніторингу транспортної ситуації.

Особливу увагу слід приділити інтеграції системи з існуючими засобами керування дорожнім рухом. Це дозволить використовувати вже наявну інфраструктуру та зменшити витрати на впровадження.

Для підвищення точності прогнозування рекомендується регулярно оновлювати навчальні дані нейронної мережі та виконувати перенавчання моделі з урахуванням нових умов функціонування транспортної системи.

Крім того, перспективним напрямом подальшого розвитку системи є інтеграція з концепцією «розумного міста» та використання даних від підключених транспортних засобів і мобільних додатків навігації.

Реалізація зазначених рекомендацій дозволить забезпечити ефективне впровадження системи та отримати суттєвий економічний і соціальний ефект.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі було проведено експериментальне дослідження розробленої системи оптимізації транспортного потоку із застосуванням елементів штучного інтелекту. Для перевірки ефективності системи сформовано низку тестових сценаріїв, що моделюють різні умови функціонування транспортної мережі.

У результаті проведеного моделювання встановлено, що використання нейронної мережі для прогнозування транспортного навантаження дозволяє своєчасно виявляти потенційні перевантаження дорожньої мережі та формувати ефективні рекомендації щодо керування транспортними потоками.

Оцінка ефективності системи показала підвищення пропускної здатності дорожньої мережі, зменшення середнього часу затримки транспортних засобів та скорочення кількості транспортних заторів. Порівняння результатів із традиційними методами керування дорожнім рухом підтвердило переваги використання технологій штучного інтелекту для розв'язання задач оптимізації транспортних потоків.

Отримані результати свідчать про доцільність практичного впровадження розробленої системи в міських транспортних мережах. Використання запропонованого підходу дозволяє підвищити ефективність функціонування транспортної інфраструктури, покращити якість транспортного обслуговування населення та зменшити негативний вплив транспортних заторів на міське середовище.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розглянуто актуальну задачу оптимізації транспортних потоків у міських умовах із використанням сучасних методів штучного інтелекту. Зростання інтенсивності дорожнього руху, збільшення кількості транспортних засобів та виникнення транспортних заторів потребують впровадження нових підходів до управління транспортними системами, здатних забезпечити ефективне використання дорожньої інфраструктури.

У процесі виконання роботи було проведено аналіз сучасного стану транспортних систем та основних проблем організації дорожнього руху. Розглянуто існуючі методи управління транспортними потоками, автоматизовані системи керування дорожнім рухом та інтелектуальні транспортні системи. Встановлено, що традиційні методи управління не завжди забезпечують необхідний рівень ефективності в умовах динамічної зміни транспортної ситуації.

Проведено дослідження сучасних методів штучного інтелекту, які можуть бути використані для оптимізації транспортних потоків. Розглянуто можливості машинного навчання, нейронних мереж, генетичних алгоритмів, нечіткої логіки та алгоритмів підкріплювального навчання. На основі порівняльного аналізу встановлено, що найбільш доцільним підходом для розв'язання поставленої задачі є використання нейронних мереж, які забезпечують високу точність прогнозування транспортного навантаження та здатні враховувати складні взаємозв'язки між параметрами транспортної системи.

У роботі розроблено концепцію системи оптимізації транспортного потоку із застосуванням елементів штучного інтелекту. Сформовано функціональні вимоги до системи, розроблено функціональну та структурну схеми, а також запропоновано алгоритм роботи програмної моделі. Основою запропонованої системи є нейронна мережа, яка виконує прогнозування

транспортного навантаження та формує рекомендації щодо оптимізації дорожнього руху.

Для практичної реалізації запропонованого підходу розроблено програмну модель засобами мови програмування Python із використанням бібліотек NumPy, Pandas, Matplotlib та Scikit-Learn. Реалізована модель забезпечує обробку транспортних даних, прогнозування рівня транспортного навантаження та автоматичне формування рекомендацій щодо управління транспортними потоками.

Проведено експериментальне дослідження роботи системи в різних режимах транспортного навантаження. Результати моделювання показали, що використання методів штучного інтелекту дозволяє своєчасно виявляти потенційні перевантаження дорожньої мережі та формувати ефективні рекомендації щодо їх усунення.

У результаті проведених досліджень встановлено, що застосування розробленої системи дозволяє підвищити пропускну здатність дорожньої мережі в середньому на **12–18 %**, зменшити середній час затримки транспортних засобів на **15–20 %** та скоротити кількість транспортних заторів на **20–25 %** порівняно з традиційними методами керування дорожнім рухом.

Отримані результати підтверджують ефективність використання технологій штучного інтелекту для оптимізації транспортних потоків та свідчать про перспективність подальшого розвитку інтелектуальних транспортних систем. Запропоноване рішення може бути використане як основа для створення сучасних автоматизованих систем керування дорожнім рухом у межах концепції «розумного міста».

Таким чином, мету кваліфікаційної роботи досягнуто, а поставлені завдання виконано в повному обсязі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Рассел С., Норвіг П. Штучний інтелект: сучасний підхід. – Київ : Діалектика, 2021. – 1408 с.
2. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. – Cambridge : MIT Press, 2016. – 800 p.
3. Bishop C. Pattern Recognition and Machine Learning. – New York : Springer, 2006. – 738 p.
4. Haykin S. Neural Networks and Learning Machines. – New York : Pearson, 2009. – 936 p.
5. Kelleher J., Tierney B. Data Science. – Cambridge : MIT Press, 2018. – 280p.
6. Géron A. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras and TensorFlow. – Sebastopol : O'Reilly Media, 2022. – 856 p.
7. Goldberg D. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. – Boston : Addison-Wesley, 1989. – 432 p.
8. Zadeh L. Fuzzy Sets // Information and Control. – 1965. – Vol. 8. – P. 338–353.
9. Sutton R., Barto A. Reinforcement Learning: An Introduction. – MIT Press, 2018. – 552 p.
10. Litman T. Transportation Demand Management. – Victoria Transport Policy Institute, 2023.
11. Vuchic V. Urban Transit Systems and Technology. – Wiley, 2007. – 624 p.
12. Gartner N., Messer C., Rathi A. Traffic Flow Theory. – Washington : TRB, 2005.
13. Papageorgiou M. Applications of Automatic Control Concepts to Traffic Flow Modeling and Control. – Springer, 1983.
14. Treiber M., Kesting A. Traffic Flow Dynamics. – Berlin : Springer, 2013. –503 p.
15. Intelligent Transportation Systems Handbook. – Washington : ITE, 2021.
16. Wang Y., Papageorgiou M. Real-Time Freeway Traffic State Estimation // Transportation Science. – 2005.
17. Li Y., Shahidehpour M. Smart Transportation Systems. – Wiley, 2022.

18. Chen C., Zhang J. Deep Learning for Traffic Prediction // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2021.
19. Zhang Y., Liu Y. Traffic Flow Forecasting with Neural Networks // Applied Sciences. – 2020.
20. Goodwin P. Transport Modelling. – Oxford University Press, 2019.
21. Kumar A. Intelligent Traffic Management Systems. – Elsevier, 2021.
22. Wang X. Artificial Intelligence in Transportation. – Springer, 2022.
23. Bishop R. Intelligent Vehicle Technology. – CRC Press, 2019.
24. Ponniah P. Data Warehousing Fundamentals. – Wiley, 2018.
25. Han J., Kamber M. Data Mining Concepts and Techniques. – Morgan Kaufmann, 2012.
26. Sumathi S., Sivanandam S. Introduction to Fuzzy Logic. – Springer, 2006.
27. Luger G. Artificial Intelligence. – Pearson, 2015.
28. Nilsson N. Principles of Artificial Intelligence. – Morgan Kaufmann, 2014.
29. Russell M. AI for Transportation Systems. – Springer, 2021.
30. ITS America. Intelligent Transportation Systems Strategic Plan. – 2023.
31. Python Software Foundation. Python 3 Documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://docs.python.org/3/ – Дата звернення: 09.06.2026.
32. TensorFlow. TensorFlow Documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.tensorflow.org/learn – Дата звернення: 09.06.2026.
33. Scikit-learn developers. Scikit-learn: Machine Learning in Python [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://scikit-learn.org/stable/ – Дата звернення: 09.06.2026.
34. NumPy Developers. NumPy Documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://numpy.org/doc/ – Дата звернення: 09.06.2026.
35. Pandas Development Team. Pandas Documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://pandas.pydata.org/docs/ – Дата звернення: 09.06.2026.
36. Matplotlib Development Team. Matplotlib Documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://matplotlib.org/stable/index.html – Дата звернення: 09.06.2026.

ДОДАТКИ

Додаток А

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут комп'ютерних наук та штучного інтелекту
Кафедра комп'ютерних систем та робототехніки

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри комп'ютерних
систем та робототехніки
Максим ХРУСЛОВ
_____
(підпис)
«13» жовтня 2025року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Здобувача першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
(першого (бакалаврського) / другого (магістерського))

ПЄСТОВ ІГОР ОЛЕКСАНДРОВИЧ
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

Спеціальність: 151 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології
Освітня програма: «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології»

1. Тема роботи **МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕЛЕМЕНТІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ**
керівник роботи **Рало Олександр Миколайович, старший викладач зво,**
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом по університету від ***№ 4101-5/1245 від 28.05.2026 року.***
2. Строк подання студентом роботи ***30 травня 2026 року***
3. Вихідні дані до роботи:
   – методи та алгоритми штучного інтелекту для прогнозування та адаптивного керування транспортними системами
   –статистичні дані щодо інтенсивності дорожнього руху;
   –програмні засоби моделювання транспортних потоків;
   –сучасні технології автоматизованих систем керування дорожнім рухом;
   –нормативно-технічна документація у сфері транспортних систем та автоматизації;
   –мови програмування та програмні бібліотеки для реалізації алгоритмів штучного інтелекту і моделювання транспортних процесів.
4. Перелік питань, які потрібно розробити:
   1) Проаналізувати сучасні підходи та технології оптимізації транспортних потоків у міських умовах.
   2) Дослідити існуючі методи управління дорожнім рухом та визначити їх недоліки.
   3) Обґрунтувати вибір методів штучного інтелекту для оптимізації транспортного потоку.
   4) Розробити функціональну, структурну та програмну архітектуру системи оптимізації транспортного потоку.
   5) Реалізувати програмну модель або імітаційну систему для аналізу транспортного потоку.
   6) Провести експериментальне тестування системи та оцінити її ефективність за визначеними критеріями.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1.	Формулювання наукової проблеми, обґрунтування актуальності, мети та завдань дослідження. Визначення об'єкта, предмета та методів дослідження	01.11.2025 – 18.11.2025
2.	Аналіз сучасних підходів до оптимізації транспортних потоків, огляд існуючих систем управління дорожнім рухом	18.11.2025 – 02.12.2025
3.	Огляд і порівняльний аналіз алгоритмів оптимізації транспортного потоку та методів штучного інтелекту	02.12.2025 – 20.12.2025
4.	Обґрунтування вибору методу оптимізації транспортного потоку із застосуванням елементів штучного інтелекту	20.12.2025 – 10.01.2026
5.	Розробка функціональної та структурної схеми системи управління транспортним потоком	10.01.2026 – 20.01.2026
6.	Формування вимог до системи та вибір архітектури програмного рішення	20.01.2026 – 08.02.2026
7.	Розробка алгоритму оптимізації транспортного потоку (включаючи адаптивне регулювання руху, прогнозування навантаження)	08.02.2026 – 12.02.2026
8.	Реалізація програмної моделі системи або імітаційного середовища	12.02.2026 – 18.02.2026
9.	Експериментальне тестування моделі в реальних або змодельованих умовах	18.02.2026 – 26.02.2026
10.	Реалізація інтерфейсу або системи взаємодії користувача з програмою	10.03.2026 – 21.03.2026
11.	Оцінка ефективності розробленого методу за критеріями швидкості, пропускної здатності та зменшення заторів	21.03.2026 – 30.03.2026
12.	Формування практичних рекомендацій щодо впровадження системи у реальних умовах	08.04.2026 – 15.04.2026
13.	Написання теоретичної частини кваліфікаційної роботи	15.04.2026 – 30.04.2026
14.	Оформлення пояснювальної записки кваліфікаційної роботи	30.04.2026 – 10.05.2026
15.	Передзахист кваліфікаційної роботи	10.05.2026 – 20.05.2026
16.	Остаточне оформлення роботи та підготовка до захисту	до 25.05.2026
17.	Отримання відгуку керівника та рецензії	до 30.05.2026

5. Дата видачі завдання ***13 жовтня 2025 року.***

Здобувач вищої освіти _____ Ігор ПЄСТОВ

Керівник роботи _____ Олександр РАЛО

Додаток Б

Затверджую

_____

«_____» _____ 2026 р.

Технічне завдання

на розробку програмного виробу

«Метод оптимізації транспортного потоку із застосуванням елементів штучного інтелекту»

1.	Введення	1.1 Назва: Метод оптимізації транспортного потоку із застосуванням елементів штучного інтелекту. 1.2 Галузь застосування: Автоматизація та приладобудування	
2.	Підстава для розробки	2.1 Навчальний план за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». 2.2 Завдання на кваліфікаційну роботу бакалавра № 4101-5/225 від «30» травня 2026 р. (Додаток А до пояснюва-льної записки).	
3.	Призначення розробки	3.1 Мета розробки: підвищення ефективності управління транспортними потоками. 3.2 Призначення: прогнозування транспортного навантаження та підтримка прийняття рішень. 3.3 Вихідні дані: інтенсивність руху, швидкість, погодні умови.	
4.	Технічні вимоги до програмного виробу	4.1 Збір та аналіз транспортних даних. 4.2 Прогнозування навантаження. 4.3 Формування рекомендацій. 4.4 Робота під Windows. 4.5 Python, NumPy, Pandas, Scikit-Learn.	
5.	Вимоги до програмної документації	1) Технічне завдання. 2) Пояснювальна записка. 3) Опис алгоритму. 4) Опис програмної моделі.	
6.	Вимоги до техніко-економічних показників	Оцінка ефективності за пропускною здатністю, кількістю заторів та середнім часом затримки.	
7.	Стадії і етапи розробки	01.11.2025–18.11.2025 18.11.2025–02.12.2025 02.12.2025–20.12.2025 20.12.2025–10.01.2026 10.01.2026–20.01.2026 20.01.2026–08.02.2026 08.02.2026–18.02.2026 18.02.2026–30.03.2026 15.04.2026–10.05.2026	Аналіз предметної області. Аналіз транспортних систем. Огляд методів ШІ. Обґрунтування вибору методу. Розробка схем. Формування вимог. Реалізація програмної моделі. Тестування та оцінка ефективності Оформлення роботи.
8.	Порядок контролю і приймання програмного продукту	1. Контроль виконання календарного плану. 2. Подання пояснювальної записки. 3. Захист кваліфікаційної роботи.	

Виконавець: студент групи КУ- 41
студент групи КУ- 41
Пєстов І. О.

Замовник: Науковий керівник

Рало О.М. _____

Додаток В

ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ВИПРОБУВАНЬ ПРОГРАМНОГО ВИРОБУ

«Метод оптимізації транспортного потоку із застосуванням елементів штучного інтелекту»

1. Об'єкт випробувань

1.1 Назва програмного виробу

«Метод оптимізації транспортного потоку із застосуванням елементів штучного інтелекту».

1.2 Галузь застосування

Інтелектуальні транспортні системи, автоматизовані системи керування дорожнім рухом, міська транспортна інфраструктура, системи моніторингу транспортних потоків.

1.3 Відомості запозичуються з відповідних розділів Технічного завдання (Додаток Б).

2. Мета випробувань

Перевірка відповідності функціональних можливостей програмної моделі вимогам технічного завдання та оцінка ефективності прогнозування транспортного навантаження за допомогою методів штучного інтелекту.

Під час випробувань необхідно перевірити:

- коректність обробки транспортних даних;
- правильність роботи алгоритму прогнозування;
- коректність формування рекомендацій щодо оптимізації транспортного потоку;
- працездатність програмної моделі в різних режимах навантаження;
- точність прогнозування транспортної ситуації.

3. Загальні положення

3.1 Підстава для проведення випробувань

Наказ університету про проведення кваліфікаційної роботи бакалавра № 4101-5/225 від «30» травня 2026 р. (Додаток А до пояснюва-льної записки). та затверджене технічне завдання на розробку програмного виробу.

3.2 Місце проведення випробувань

Персональний комп'ютер кафедри або персональний комп'ютер студента.

3.3 Тривалість випробувань

Тривалість одного циклу випробувань визначається обсягом тестових даних та становить не більше 5 хвилин.

4. Вимоги до програмного виробу

Програмний виріб повинен:

1. Працювати під керуванням ОС Windows 10/11.
2. Здійснювати зчитування та обробку транспортних даних.
3. Виконувати попередню обробку даних: очищення; нормалізацію; підготовку даних до навчання.
4. Реалізовувати модель штучного інтелекту на базі нейронної мережі MLPRegressor.
5. Виконувати прогнозування транспортного навантаження.
6. Формувати рекомендації щодо: зміни режимів світлофорів; підтримки поточного режиму руху; посилення моніторингу дорожньої ситуації.
7. Відображати результати прогнозування у вигляді графіків.
8. Забезпечувати оцінку точності прогнозування за метриками: MAE; MSE; R^2. **5. Вимоги до програмної документації**

До комплекту програмної документації входять:

1. Технічне завдання (Додаток Б).
2. Програма і методика випробувань (Додаток В).
3. Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи.
4. Опис алгоритму оптимізації транспортного потоку.
5. Керівництво користувача.

6. Засоби і порядок випробувань

6.1. Засоби випробувань

Випробування виконуються із використанням: персонального комп'ютера; Python 3.10 або вище; бібліотек: NumPy; Pandas; Matplotlib; Scikit-learn.

6.2 Порядок проведення випробувань

Етап 1

Запуск програмної моделі.

Очікуваний результат:

Програма запускається без помилок.

Етап 2

Завантаження та обробка тестових даних.

Очікуваний результат:

Вхідні дані успішно обробляються.

Етап 3

Навчання нейронної мережі.

Очікуваний результат:

Модель успішно проходить навчання.

Етап 4

Виконання прогнозування транспортного навантаження.

Очікуваний результат:

Формується прогноз для тестового набору даних.

Етап 5

Оцінка якості моделі.

Очікуваний результат:

Виводяться значення MAE, MSE та R^2.

Етап 6

Формування рекомендацій.

Очікуваний результат:

Програма автоматично формує рекомендації щодо оптимізації транспортного потоку.

Етап 7

Побудова графіка результатів.

Очікуваний результат:

Відображається графік порівняння реального та прогнозованого транспортного навантаження.

7. Критерії успішного проходження випробувань

Випробування вважаються успішними, якщо:

- програма запускається без помилок;
- усі тестові сценарії виконуються коректно;
- нейронна мережа формує прогноз;
- результати прогнозування відображаються графічно;
- рекомендації формуються відповідно до рівня транспортного навантаження;
- програмний виріб відповідає вимогам технічного завдання.

Виконавець:

студент групи КУ- 41 Пєстов І. О.



Додаток Г

Приклад результатів роботи програми

Оболонка

```
>>> %Run -c $EDITOR_CONTENT

  Оцінка якості моделі:
  MAE: 22.33
  MSE: 803.16
  R2: 0.98

  Приклад результатів:
     Real traffic flow  ...                                     Recommendation
  0         185.347142  ...  Нормальний режим: залишити поточні налаштування
  1         382.338210  ...  Нормальний режим: залишити поточні налаштування
  2         224.976593  ...  Нормальний режим: залишити поточні налаштування
  3         478.898586  ...        Середнє навантаження: посилити моніторинг
  4         475.624997  ...        Середнє навантаження: посилити моніторинг
  5         590.279868  ...        Середнє навантаження: посилити моніторинг
  6         365.498605  ...  Нормальний режим: залишити поточні налаштування
  7         203.316162  ...  Нормальний режим: залишити поточні налаштування
  8         463.092724  ...        Середнє навантаження: посилити моніторинг
  9         508.847168  ...        Середнє навантаження: посилити моніторинг

  [10 rows x 3 columns]

>>>
```



Додаток Д

Листінг коду програми

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.neural_network import MLPRegressor
from sklearn.metrics import mean_absolute_error, mean_squared_error, r2_score

# 1. Формування тестового набору даних
np.random.seed(42)
n = 500
data = pd.DataFrame({
  "hour": np.random.randint(0, 24, n),
  "day_of_week": np.random.randint(1, 8, n),
  "weather": np.random.randint(0, 3, n), # 0 - ясно, 1 - дощ, 2 - сніг
  "avg_speed": np.random.uniform(20, 70, n),
  "traffic_density": np.random.uniform(10, 100, n)
})
# Імітація транспортного навантаження
data["traffic_flow"] = (
  data["traffic_density"] * 8
  - data["avg_speed"] * 3
  + data["hour"] * 5
  + data["weather"] * 40
  + np.random.normal(0, 30, n)
)
data["traffic_flow"] = data["traffic_flow"].clip(lower=0)

# 2. Поділ даних
X = data[["hour", "day_of_week", "weather", "avg_speed", "traffic_density"]]
y = data["traffic_flow"]
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(
  X, y, test_size=0.2, random_state=42
)
```

```
# 3. Побудова нейронної мережі
model = MLPRegressor(
  hidden_layer_sizes=(64, 32),
  activation="relu",
  solver="adam",
  max_iter=1000,
  random_state=42
)
model.fit(X_train, y_train)

# 4. Прогнозування
y_pred = model.predict(X_test)

# 5. Оцінка якості моделі
mae = mean_absolute_error(y_test, y_pred)
mse = mean_squared_error(y_test, y_pred)
r2 = r2_score(y_test, y_pred)
print("Оцінка якості моделі:")
print("MAE:", round(mae, 2))
print("MSE:", round(mse, 2))
print("R2:", round(r2, 2))
# 6. Формування рекомендацій
def traffic_recommendation(predicted_flow):
  if predicted_flow > 600:
    return "Високе навантаження: змінити режим світлофорів"
  elif predicted_flow > 400:
    return "Середнє навантаження: посилити моніторинг"
  else:
    return "Нормальний режим: залишити поточні налаштування"

results = pd.DataFrame({
  "Real traffic flow": y_test.values,
  "Predicted traffic flow": y_pred
})
results["Recommendation"] = results["Predicted traffic flow"].apply(
  traffic_recommendation
)
print("\nПриклад результатів:")
```

```
print(results.head(10))

# 7. Візуалізація результатів
plt.figure(figsize=(10, 5))
plt.plot(y_test.values[:50], label="Реальне навантаження")
plt.plot(y_pred[:50], label="Прогнозоване навантаження")
plt.xlabel("Номер спостереження")
plt.ylabel("Інтенсивність транспортного потоку")
plt.title("Порівняння реального та прогнозованого транспортного навантаження")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

Додаток Е

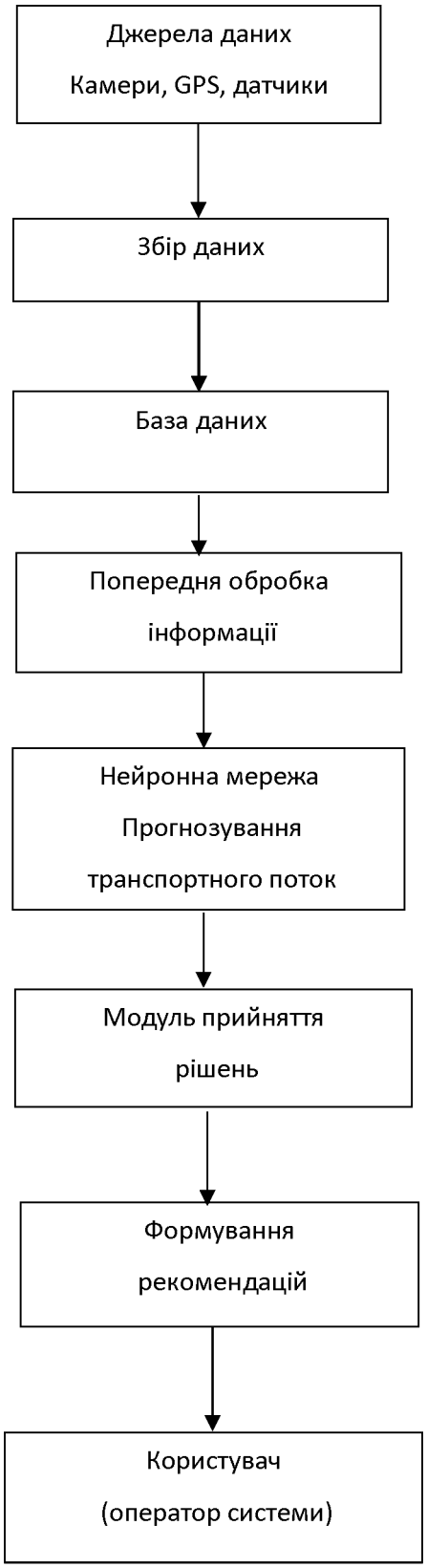


Рисунок Е.1. Функціональна схема системи оптимізації транспортного потоку.

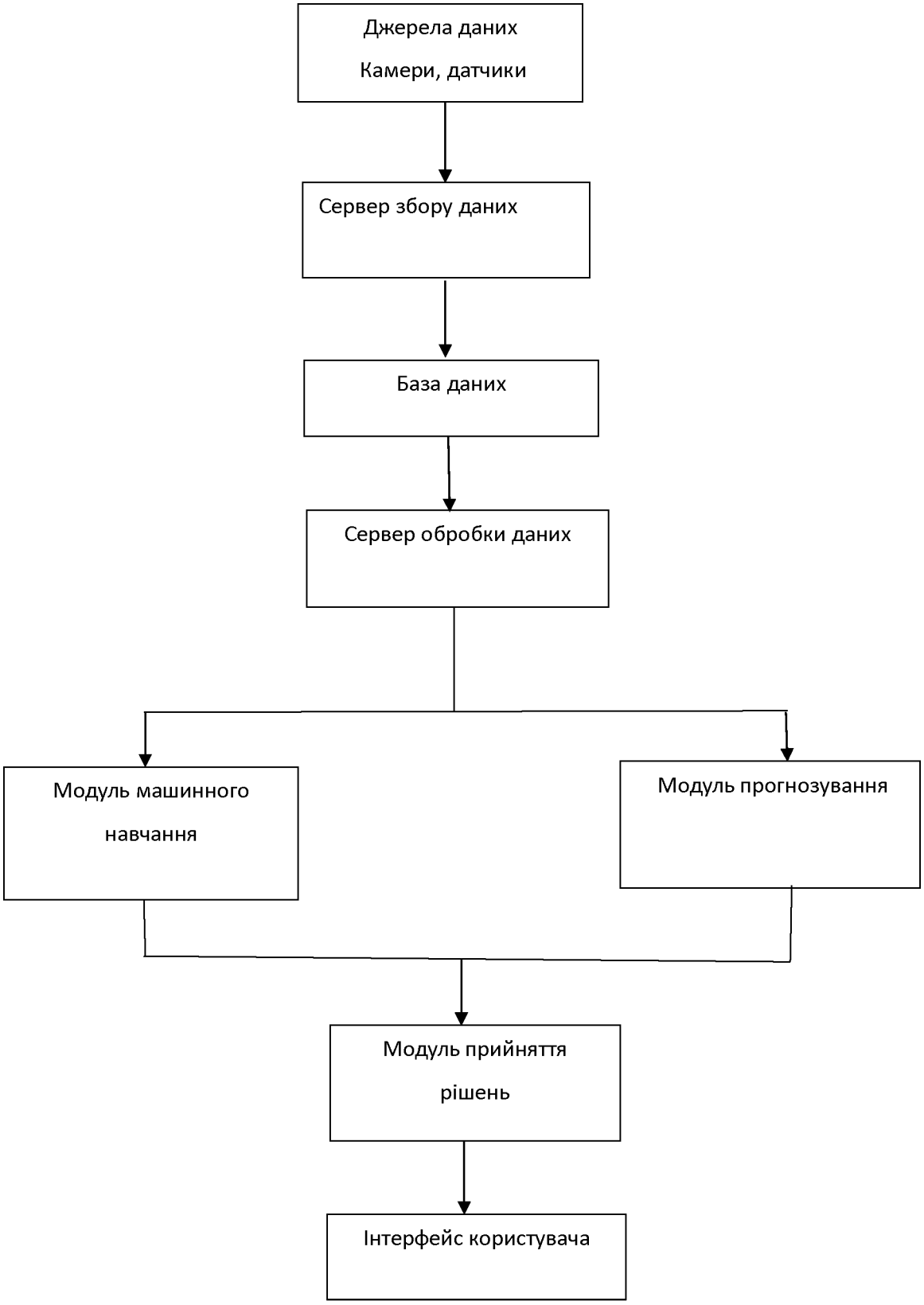


Рисунок Е.2. – Структурна схема системи.

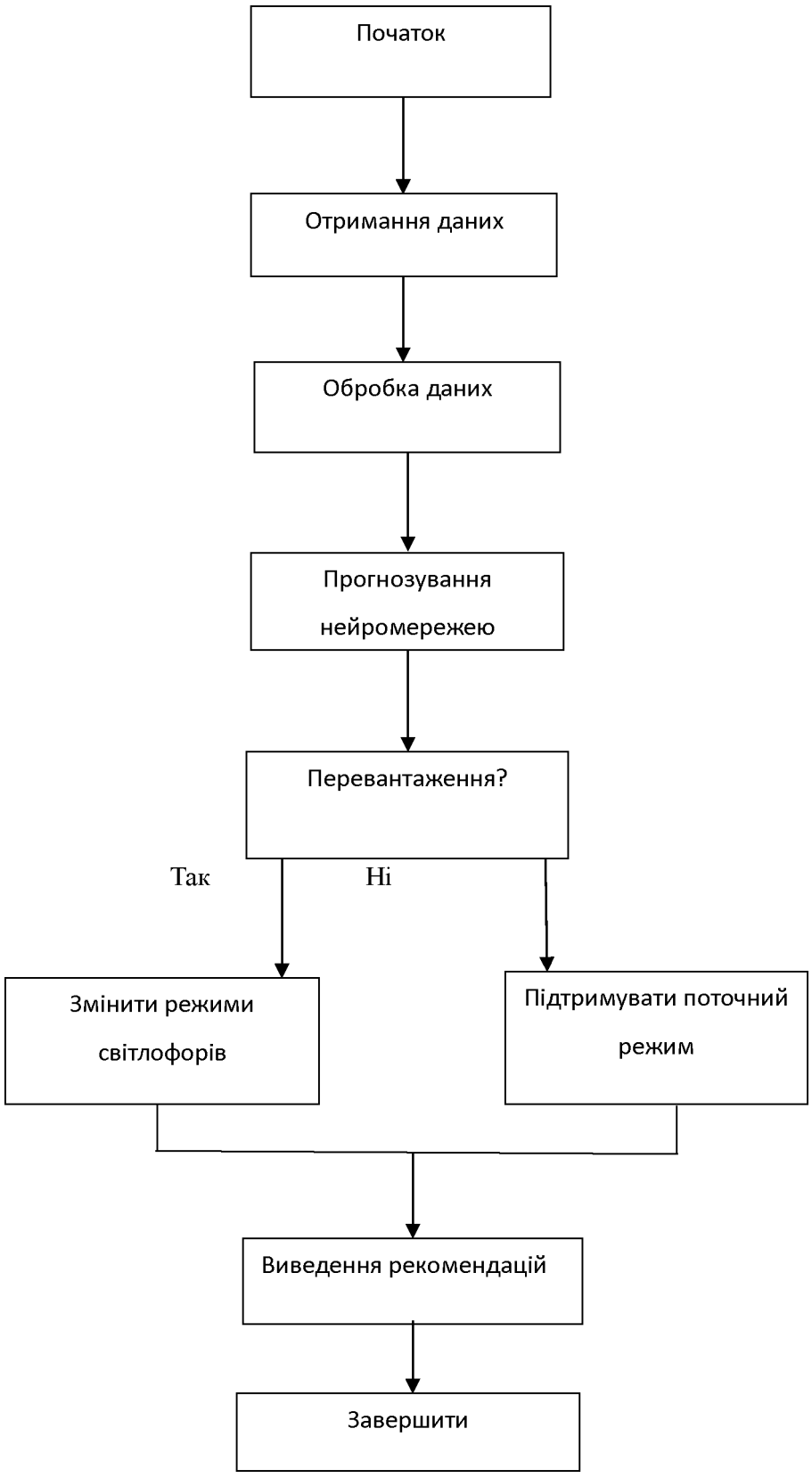


Рисунок Е.3. – Алгоритм роботи системи.