

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "бакалавр"
спеціальність: 151 – Автоматизація такокомп'ютерно-інтегровані технології
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри СКС

_____ А.І.Сегін
“ ____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Ріжок Андрій Євгенович
(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

Інтелектуальна система керування режимами руху міського електротранспорту/ Intelligent system for controlling the traffic modes of urban electric transport

затверджені наказом по університету від 1 грудня 2025р. №894

2. Строк подання студентом закінченої випускної кваліфікаційної роботи 25 травня 2026р.

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

1. Аналіз сучасного стану досліджень у сфері автоматизації інтелектуальних систем керування режимами руху міського електротранспорту.

1.1. Дослідження інтелектуальних систем керування режимами руху електротранспорту як складової концепції «Розумне місто».

1.2. Дослідження українських систем керування режимами руху міського електротранспорту.

2. Програмно-апаратні компоненти системи керування режимами руху міського електротранспорту.

2.1. Дослідження сенсорів збору даних та пристроїв мережевої архітектури системи управління режимами руху міського електротранспорту.

2.2. Аналіз архітектури платформи обробки даних, аналітики та прогнозування в інтелектуальній транспортній системі.

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. 1. Провести аналіз сучасного стану розвитку інтелектуальних систем керування режимами руху міського електротранспорту та визначити їх роль у концепції «Розумне місто».

2. Проаналізувати сенсори збору даних, мережеву архітектуру та програмно-апаратні компоненти інтелектуальної транспортної системи.

3. Розробити алгоритм керування інтелектуальною транспортною системою руху міського електротранспорту.

4. Реалізувати імітаційну модель руху електротранспорту в середовищі MATLAB/Simulink.

5. Перелік графічного матеріалу:

1. Модель сигналу керування транспортним засобом.

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	П.В. Гуменний к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		
2	П.В. Гуменний к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		
3	П.В. Гуменний к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		

7. Дата видачі завдання 1 грудня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ У СФЕРІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РУХУ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ	01.12.2025-15.01.2026	виконано
2	ПРОГРАМНО-АПАРАТНІ КОМПОНЕНТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РУХУ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ	16.01.2026-15.03.2026	виконано
3	РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ МОДЕЛЕЙ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ РУХУ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ	16.03.2026-30.04.2026	виконано
4.	Остаточне оформлення та подача кваліфікаційної роботи на перевірку щодо плагіату	1.05.2026-25.05.2026	виконано

Студент

Андрій РІЖОК

(підпис)

Керівник роботи

к.т.н., доц. Петро ГУМЕННИЙ

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Ріжок А.Є. Інтелектуальна система керування режимами руху міського електротранспорту – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – Західноукраїнський національний університет. Тернопіль, 2026.

У роботі розроблено інтелектуальну систему керування режимами руху міського електротранспорту. Досліджено принципи побудови працюючих інтелектуальних систем керування режимами руху міського електротранспорту. Проаналізовано сучасні підходи та компоненти для реалізації системи керування режимами руху міського електротранспорту.

ANOTATION

Rizhok A.Ye. Intelligent Control System for Urban Electric Transport Motion Modes – Manuscript.

Qualification thesis submitted for obtaining the Bachelor's degree in Specialty 151 “Automation and Computer-Integrated Technologies”, Educational and Professional Program “Automation and Computer-Integrated Technologies” – West Ukrainian National University, Ternopil, 2026.

The thesis presents the development of an intelligent control system for urban electric transport motion modes. The principles of designing and implementing existing intelligent control systems for urban electric transport operation were investigated. Modern approaches and technical components for implementing a control system for urban electric transport motion modes were analyzed.

3MICT

ВСТУП.....	9
1.АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ У СФЕРІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РУХУ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ	12
1.1 Інтелектуальні системи керування режимами руху електротранспорту як складова концепції «Розумне місто».....	12
1.2 Дослідження працюючих інтелектуальних систем керування режимами руху міського електротранспорту розроблених у світі....	21
1.3 Дослідження українських систем керування режимами руху міського електротранспорту	29
2. ПРОГРАМНО-АПАРАТНІ КОМПОНЕНТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РУХУ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ	37
2.1 Дослідження сенсорів збору даних та пристроїв мережевої архітектури системи управління режимами руху міського електротранспорту	32
2.2 Аналіз архітектури платформи обробки даних, аналітики та прогнозування в інтелектуальній транспортній системі	45
2.3 Архітектура підсистем управління й візуалізації даних інтелектуальної транспортної системи	54
3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ МОДЕЛЕЙ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ РУХУ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ	64
3.1 Розробка алгоритму управління інтелектуальною транспортною системою руху міського електротранспорту.....	64

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ				
					Інтелектуальна система керування режимами руху міського електротранспорту	Літ.	Арк.	Акрушів	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Ріжок А.Є.							
Перевір.		Гуменний П.В.					6		
Консульт.						ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-41 ₄			
Н. Контр.		Заставний О.							
Затверд.		Сегін А.І.							

3.2 Розробка Simulink-моделі руху електротранспорту інтелектуальної транспортної системи	71
3.3 Розробка структурної схеми та мобільного додатку інтелектуальної транспортної системи управління рухом електротранспорту	80
ВИСНОВКИ.....	88
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	90
ДОДАТОК А.....	93

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

АСУ – автоматизована система управління

АСУТ – автоматизована система управління транспортом

ІСК – інтелектуальна система керування

MET – міський електротранспорт

ITC (ITS, Intelligent Transport System) – інтелектуальна транспортна система

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

IoT (Internet of Things) – інтернет речей

AI (Artificial Intelligence) – штучний інтелект

ML (Machine Learning) – машинне навчання

LSTM (Long Short-Term Memory) – рекурентна нейронна мережа довготривалої короткочасної пам'яті

GPS (Global Positioning System) – глобальна система позиціонування

GNSS (Global Navigation Satellite System) – глобальна навігаційна супутникова система

BMS (Battery Management System) – система керування акумуляторною батареєю

V2I (Vehicle-to-Infrastructure) – взаємодія транспортного засобу з інфраструктурою

V2X (Vehicle-to-Everything) – взаємодія транспортного засобу із зовнішнім середовищем

DSRC (Dedicated Short Range Communication) – технологія короткодіапазонного транспортного зв'язку

LTE (Long Term Evolution) – стандарт мобільного зв'язку четвертого покоління

5G – мобільний зв'язок п'ятого покоління

Wi-Fi – технологія бездротового передавання даних

CBTC (Communication-Based Train Control) – система керування рухом поїздів на основі цифрового зв'язку

ATO (Automatic Train Operation) – автоматизоване керування рухом поїзда

MaaS (Mobility as a Service) – мобільність як сервіс

GTFS (General Transit Feed Specification) – стандарт обміну транспортними даними

GTFS-RT (GTFS Realtime) – стандарт передавання транспортних даних у реальному часі

ITxPT (Information Technology for Public Transport) – стандарт інтеграції інформаційних систем громадського транспорту

ETA (Estimated Time of Arrival) – прогнозований час прибуття

FMS (Fleet Management System) – система керування транспортним парком

OCPP (Open Charge Point Protocol) – відкритий протокол керування зарядними станціями

TSP (Transit Signal Priority) – система пріоритету громадського транспорту на світлофорах

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

RSU (Road Side Unit) – придорожній комунікаційний модуль
 MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) – протокол передавання повідомлень
 REST (Representational State Transfer) – архітектурний стиль мережевих сервісів
 OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) – промисловий протокол обміну даними
 API (Application Programming Interface) – інтерфейс програмування застосунків
 QoS (Quality of Service) – якість обслуговування мережі
 PoE (Power over Ethernet) – технологія передавання живлення через Ethernet
 SIL (Safety Integrity Level) – рівень функціональної безпеки
 IEC – міжнародна електротехнічна комісія
 ISO – міжнародна організація зі стандартизації
 KPI (Key Performance Indicator) – ключовий показник ефективності
 URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communication) – наднадійний низькозатримковий зв'язок

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Актуальність роботи. Сучасний розвиток міської інфраструктури нерозривно пов'язаний із підвищенням ефективності функціонування систем громадського транспорту. В умовах стрімкої урбанізації, зростання кількості населення міст та інтенсивності транспортних потоків особливої актуальності набуває забезпечення безпечного, економічного та екологічно чистого перевезення пасажирів. Одним із ключових напрямів розвитку транспортної галузі є модернізація міського електротранспорту, який характеризується низьким рівнем шкідливих викидів, енергоефективністю та високою пропускнуою здатністю.

Разом із тим, ефективність роботи міського електротранспорту значною мірою залежить від якості керування режимами його руху. Нерівномірність транспортних потоків, перевантаження вулиць, затримки на маршрутах, перевитрати електроенергії та зношування обладнання потребують впровадження сучасних автоматизованих систем управління. Традиційні методи диспетчеризації та керування часто не забезпечують достатньої оперативності реагування на зміну дорожньої ситуації та не дозволяють оптимізувати режими руху транспортних засобів у реальному часі.

У зв'язку з цим перспективним напрямом є застосування інтелектуальних систем керування, які базуються на використанні методів штучного інтелекту, комп'ютерно-інтегрованих технологій, сенсорних систем, GPS-моніторингу, засобів бездротового зв'язку та алгоритмів обробки даних. Такі системи дозволяють здійснювати автоматичний аналіз транспортної ситуації, прогнозування навантаження маршрутів, адаптивне регулювання швидкості та інтервалів руху, а також оптимізацію енергоспоживання електротранспорту.

Особливого значення впровадження інтелектуальних систем керування набуває в умовах сучасних викликів для транспортної інфраструктури України, пов'язаних із необхідністю забезпечення стабільної роботи

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

громадського транспорту, підвищенням енергетичної ефективності та зменшенням експлуатаційних витрат. Використання інтелектуальних технологій у сфері міського електротранспорту сприяє покращенню якості транспортного обслуговування населення, підвищенню безпеки руху та розвитку концепції «розумного міста».

Таким чином, розробка інтелектуальної системи керування режимами руху міського електротранспорту є актуальним науково-прикладним завданням, спрямованим на підвищення ефективності функціонування транспортної системи міста, оптимізацію енергоспоживання та забезпечення надійності транспортних перевезень.

Мета кваліфікаційної роботи. Метою даної кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності функціонування міського електротранспорту шляхом розробки інтелектуальної системи керування режимами руху, яка забезпечує адаптивне регулювання транспортних процесів, оптимізацію енергоспоживання та підвищення безпеки перевезень.

Завдання кваліфікаційної роботи. Для досягнення поставленої мети у кваліфікаційній роботі необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку систем міського електротранспорту і визначити основні проблеми організації руху.
2. Дослідити принципи функціонування систем керування режимами руху електротранспорту та проаналізувати їх особливості.
3. Виконати аналіз основних компонентів інтелектуальної системи керування, зокрема сенсорів, GPS-модулів, засобів зв'язку, бортових контролерів та диспетчерських систем.
4. Проаналізувати сучасні методи та алгоритми інтелектуального управління транспортними потоками, включаючи елементи штучного інтелекту та адаптивного керування.

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Розробити алгоритм керування режимами руху міського електротранспорту з урахуванням змін транспортної ситуації та навантаження маршрутів.

6. Створити математичну модель системи руху електротранспорту та реалізувати імітаційну модель для дослідження роботи системи управління.

7. Провести моделювання режимів роботи системи та оцінити ефективність запропонованої інтелектуальної системи керування.

Об'єкт дослідження – процеси керування режимами руху міського електротранспорту.

Предмет дослідження – методи, алгоритми та засоби інтелектуального керування рухом міського електротранспорту.

Методи дослідження. У роботі використовуються методи системного аналізу, теорії автоматичного керування, математичного моделювання транспортних процесів, методи штучного інтелекту, а також сучасні інформаційні технології обробки та передачі даних.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблена інтелектуальна система керування може бути використана для підвищення ефективності роботи міського електротранспорту, оптимізації графіків руху, зменшення витрат електроенергії та покращення якості обслуговування пасажирів. Запропоновані алгоритми та структурні рішення сприяють підвищенню безпеки руху, зниженню експлуатаційних витрат і можуть бути використані при створенні автоматизованих систем управління транспортною інфраструктурою в межах концепції «розумного міста».

Апробації. Ріжок А.Є. Інтелектуальна система керування режимами руху міського електротранспорту/ А.Є. Ріжок, П.В. Гуменний // Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТ - 2026), Тернопіль, 2026. с.171-175.

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ У СФЕРІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РУХУ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

1.1. Інтелектуальні системи керування режимами руху електротранспорту як складова концепції «Розумне місто»

Концепція «Розумне місто» (Smart City) «розглядається як одна з провідних моделей розвитку сучасних міст, що базується на широкому впровадженні інформаційно-комунікаційних технологій у міську інфраструктуру. Її основна мета полягає у підвищенні рівня комфорту населення, оптимізації використання ресурсів та забезпеченні сталого розвитку урбанізованого середовища» [1].

Згідно з міжнародними стандартами «ISO 37120 та ITU-T Y.4000, розумне місто — це урбаністична система, у якій цифрові технології застосовуються для підвищення ефективності функціонування міських сервісів, покращення взаємодії між владою та громадянами, а також удосконалення якості публічних послуг. До основних компонентів такої концепції належать: інтелектуальна енергетика, цифрове управління, розумна мобільність, інноваційна економіка, екологічно орієнтоване середовище та активне громадянське суспільство» [2].

Одним із ключових елементів Smart City виступає транспортна інфраструктура, оскільки саме вона суттєво впливає на екологічний стан міста, рівень шумового забруднення, енергоспоживання та доступність пересування для населення. У цьому контексті електротранспорт відіграє важливу роль як екологічна альтернатива традиційним транспортним засобам із двигунами внутрішнього згоряння та є основою концепції сталої мобільності.

До сучасних систем міського електротранспорту належать трамваї, тролейбуси, метро, електробуси й електромобілі. Організація їх ефективної

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

роботи в умовах постійно змінного міського середовища потребує використання новітніх технологічних підходів, зокрема рішень на базі штучного інтелекту, аналізу великих масивів даних та інтернету речей.

Застосування інтелектуальних систем керування електротранспортом створює можливості для комплексного вдосконалення транспортної мережі міста. Такі системи дають змогу мінімізувати нерівномірність руху транспорту, підвищити ефективність використання акумуляторних батарей, оптимізувати навантаження на електричні мережі та оперативніше реагувати на зміни пасажиропотоку.

Інтелектуальна «система управління режимами руху електротранспорту є складною багаторівневою кіберфізичною структурою, у межах якої поєднуються транспортна інфраструктура, інформаційно-комунікаційні технології та інтелектуальні алгоритми аналізу даних. Така система формує єдине цифрове середовище для моніторингу, прогнозування та координації роботи міського електротранспорту. Її архітектура складається з шести взаємопов'язаних ієрархічних рівнів» що представлено на рисунку 1.1 [3].

Перший рівень охоплює засоби сенсорики та збору інформації. До нього належать GPS/ГЛОНАСС-трекери, датчики завантаженості транспорту, системи підрахунку пасажирів, BMS-модулі контролю акумуляторних батарей, сенсори стану дорожнього покриття та метеорологічні комплекси. Саме ці пристрої забезпечують безперервне надходження телеметричних даних про функціонування транспортної мережі з частотою оновлення від 0,1 до 10 Гц залежно від типу параметра.

Другий рівень представлений комунікаційною інфраструктурою, яка відповідає за обмін інформацією між усіма компонентами системи. Для передачі даних застосовуються мережі 5G/LTE, технологія DSRC для взаємодії транспортних засобів з дорожньою інфраструктурою (V2I), точки доступу Wi-Fi 6 на зупинках і зарядних станціях, а також волоконно-оптичні канали зв'язку для передавання критично важливих керуючих сигналів.

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

градієнтний бустинг, моделі глибоких нейронних мереж і методи reinforcement learning.

П'ятий рівень є рівнем прийняття управлінських рішень. Він забезпечує генерацію та передачу команд до транспортних засобів і міської інфраструктури. Основними функціями цього рівня є адаптивне регулювання графіків руху, управління зупинками, координація процесів заряджання електробусів, налаштування режимів рекуперативного гальмування та синхронізація роботи транспорту зі світлофорними системами.

Шостий рівень включає засоби візуалізації, моніторингу та взаємодії з користувачами. Через вебплатформи, мобільні застосунки та бортові інформаційні системи диспетчери, водії та пасажери отримують доступ до актуальної інформації, інструментів контролю та сервісів управління транспортною системою.

На схемі рисунку 1.2 зображено порівняльну діаграму характеристик основних компонентів архітектури інтелектуальної системи керування електротранспортом. Графік демонструє взаємозв'язок між двома ключовими параметрами: затримкою обробки даних (у мілісекундах) та рівнем надійності системи (у відсотках) для різних рівнів архітектури ІСК.

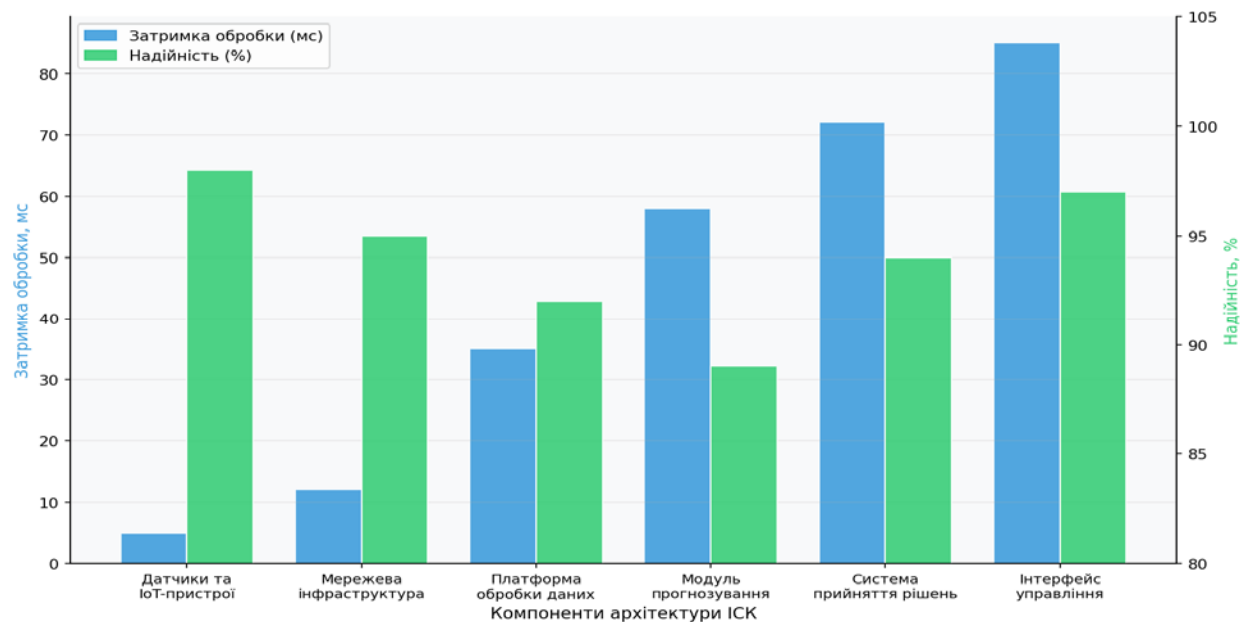


Рисунок 1.2- Характеристики компонентів архітектури інтелектуальної системи керування електротранспортом

Сині стовпчики характеризують затримку обробки інформації. Найменше значення спостерігається на рівні датчиків та IoT-пристроїв — приблизно 5 мс, що пояснюється локальним збором даних без складної обробки. Для мережевої інфраструктури затримка становить близько 12 мс. На рівні платформи обробки даних показник зростає до 35 мс через необхідність агрегації та аналізу великих обсягів інформації.

Модуль прогнозування демонструє ще більшу затримку — близько 58 мс, оскільки алгоритми машинного навчання та нейромережі потребують значних обчислювальних ресурсів. Система прийняття рішень має затримку приблизно 72 мс, а найбільше значення характерне для інтерфейсу управління — близько 85 мс, що пов'язано з візуалізацією даних та взаємодією з користувачами.

Зелені стовпчики відображають рівень надійності компонентів системи. Найвищий показник мають датчики та IoT-пристрої — близько 97%, що свідчить про стабільність первинного збору даних. Мережева інфраструктура характеризується надійністю приблизно 95 %. Для платформи обробки даних цей параметр становить близько 92 %.

Найнижчий рівень надійності спостерігається у модулі прогнозування - близько 89 %, що обумовлено складністю алгоритмів штучного інтелекту та впливом невизначеності вхідних даних. Система прийняття рішень має показник близько 94 %, а інтерфейс управління — приблизно 96 %, що свідчить про достатньо високу стабільність взаємодії з користувачами.

Загалом схема демонструє, що зі збільшенням складності функцій компонентів системи підвищується затримка обробки інформації, тоді як рівень надійності може дещо знижуватися через ускладнення алгоритмів та процесів аналізу даних. Це підкреслює необхідність оптимізації архітектури інтелектуальних транспортних систем для забезпечення балансу між швидкодією та надійністю функціонування.

Оптимізація режимів руху електротранспорту є центральним завданням інтелектуальної системи керування. В рамках даного дослідження

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розглядаються три основні групи методів оптимізації: методи оптимізації розкладу руху, методи управління енергоспоживанням та методи координації зарядної інфраструктури.

Традиційний підхід до складання розкладу руху міського транспорту базується на статистичних даних про середній пасажиропотік та не враховує динамічних змін попиту протягом доби, тижня або сезону. Інтелектуальні системи керування використовують алгоритми прогнозного управління для динамічного коригування параметрів руху.

Математична модель оптимізації інтервалів руху формулюється як задача мінімізації загального часу очікування пасажирів при обмеженнях на кількість транспортних засобів та ємність акумуляторних батарей. Для вирішення цієї задачі застосовуються методи лінійного програмування, метаевристичні алгоритми (генетичні алгоритми, метод роя часток) та алгоритми реінформаційного навчання.

Прогнозування пасажиропотоку здійснюється за допомогою нейронних мереж LSTM, що враховують часові залежності в даних про пасажиропотік. Вхідними ознаками моделі є: час доби, день тижня, сезон, метеорологічні умови, наявність масових заходів у місті, дані з проданих квитків у режимі реального часу. Точність прогнозування на горизонті 30 хвилин досягає 92–95%.

Аналіз «міжнародного досвіду впровадження інтелектуальних систем керування електротранспортом свідчить про стійку тенденцію до зростання кількості міст, що реалізують відповідні проекти. Провідними країнами у цій сфері є Китай, Нідерланди, Норвегія, Швеція, Фінляндія та Японія.

Китайське місто Шеньчжень стало першим у світі великим містом, де весь парк міських автобусів переведено на електричну тягу. Станом на 2024 рік флот міста налічує понад 16 000 електробусів, управління якими здійснюється за допомогою інтегрованої інтелектуальної платформи, розробленої компанією BYD спільно з місцевим урядом. Система в режимі реального часу оптимізує розклад руху понад 500 маршрутів, що дозволило

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

скоротити середній час поїздки на 18% та знизити витрати на енергію на 28%» [4].

Амстердам «реалізує комплексну програму Smart Mobility, в рамках якої інтегровані системи управління трамвайним рухом, велосипедними потоками та приватними електромобілями. Ключовою особливістю системи є інтеграція з системою управління дорожнім освітленням та розумними паркінгами, що дозволяє оптимізувати використання міського простору в цілому» [5].

У Норвегії, «де понад 20% нового продажу автомобілів складають електромобілі, розроблена національна платформа управління зарядною інфраструктурою, яка в режимі реального часу балансує навантаження на електромережу між побутовими споживачами, промисловістю та зарядними станціями. Система використовує прогнозне управління на базі алгоритмів машинного навчання з урахуванням прогнозу вироблення відновлюваної електроенергії» [6].

Вітчизняний досвід впровадження ІСК електротранспорту є менш масштабним, однак демонструє позитивну динаміку. Пілотні проекти реалізовані у Львові, Харкові та Дніпрі. Львівська програма модернізації трамвайного парку, розпочата у 2019 році, передбачає поетапне впровадження системи автоматизованого диспетчерського управління на базі GPS-моніторингу та адаптивного розкладу руху (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3- Динаміка впровадження інтелектуальних систем керування електротранспортом у містах

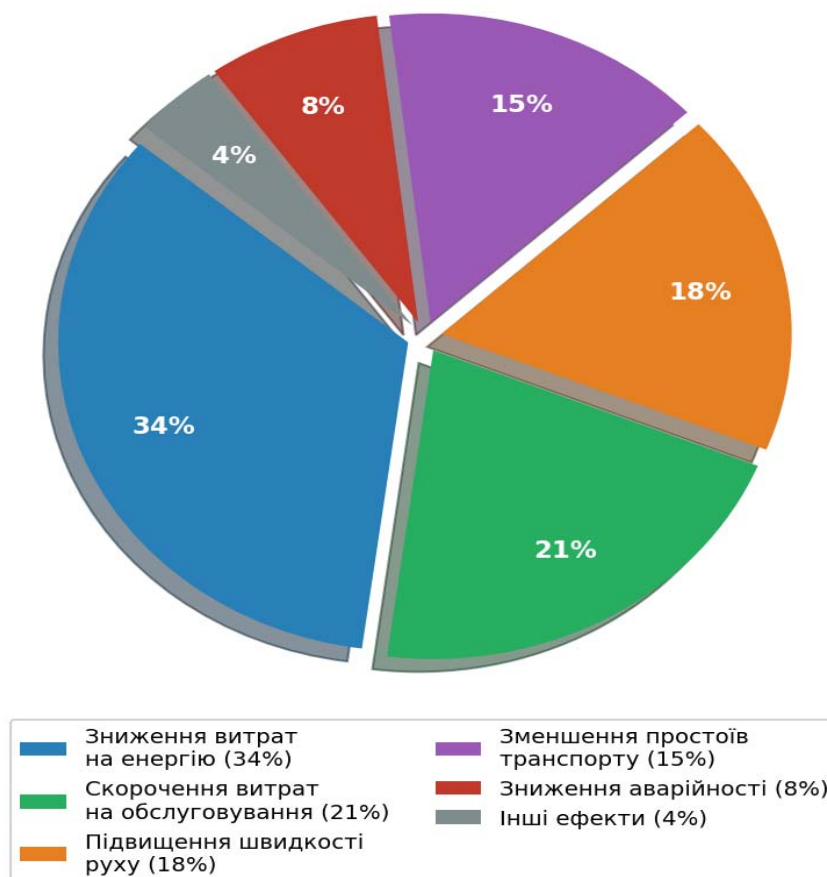
Аналіз динаміки впровадження ІСК електротранспорту свідчить про те, що Україна, незважаючи на наявний потенціал, суттєво відстає від середньоєвропейських показників. Це зумовлено низкою чинників: недостатнім фінансуванням модернізації комунального транспорту, відсутністю єдиної державної стратегії розвитку розумної мобільності, застарілою інфраструктурою та дефіцитом кваліфікованих фахівців у сфері впровадження Smart City рішень.

Економічна ефективність інтелектуальних систем керування електротранспортом визначається сукупністю прямих та непрямих ефектів від їх впровадження. Прямі ефекти пов'язані зі зниженням операційних витрат транспортних підприємств, тоді як непрямі ефекти виражаються у підвищенні якості транспортного обслуговування населення та покращенні екологічної ситуації у місті.

Аналіз «структури економічного ефекту від впровадження ІСК електротранспорту, проведений на основі даних 47 міст, що реалізували відповідні проекти в період 2018–2024 років, свідчить про таке (рисунок 1.4):

- зниження витрат на енергоспоживання є найбільш значущим компонентом, що становить у середньому 34% загальної економії;
- скорочення витрат на технічне обслуговування та ремонт транспортних засобів забезпечує 21% економії завдяки переходу від планово-попереджувального до прогностичного технічного обслуговування;
- підвищення комерційної швидкості руху та скорочення часу в дорозі для пасажирів забезпечує 18% ефекту через зростання привабливості громадського транспорту та збільшення пасажиропотоку;
- зменшення простоїв та підвищення коефіцієнта використання транспортного парку формує 15% ефекту;
- зниження аварійності та витрат на ліквідацію наслідків ДТП складає 8% від загального ефекту;
- інші ефекти (зниження адміністративних витрат, скорочення витрат на паперовий документообіг тощо) становлять 4%» [9].

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Риснок 1.4- Структура економічного ефекту від впровадження інтелектуальних систем керування електротранспортом

Термін окупності інвестицій у впровадження ІСК електротранспорту залежить від масштабу проекту, рівня первинних інвестицій та специфіки місцевих умов. Для міст з населенням понад 500 тис. осіб та розвиненою інфраструктурою електротранспорту термін окупності становить 4–6 років, для менших міст – 6–9 років.

Екологічний ефект від впровадження ІСК електротранспорту включає як пряме скорочення викидів парникових газів завдяки зниженню споживання електроенергії (яка в Україні виробляється переважно на теплових та атомних електростанціях), так і непрямий ефект, пов'язаний із переведенням пасажирів з приватних автомобілів з ДВЗ на громадський електротранспорт. За розрахунками, повноцінне впровадження ІСК у трамвайній мережі міста-мільйонника дозволяє щорічно уникати викидів близько 8 000–12 000 тонн CO₂-еквівалента.

Незважаючи на очевидні переваги, впровадження інтелектуальних систем керування електротранспортом супроводжується низкою суттєвих викликів технічного, організаційного та фінансового характеру.

Технічні виклики включають: необхідність забезпечення надійного зв'язку в умовах щільної міської забудови, захист від кібератак та несанкціонованого доступу до критичної інфраструктури, сумісність нових систем із застарілим рухомим складом та інфраструктурою, а також забезпечення стійкості системи до відмов окремих компонентів.

Організаційні виклики пов'язані з необхідністю реорганізації роботи диспетчерських служб, перепідготовки персоналу, зміни регуляторної бази та встановлення чітких стандартів обміну даними між різними підсистемами міської інфраструктури.

Перспективними напрямками розвитку ІСК електротранспорту є: інтеграція з системами управління відновлюваною енергетикою та технологіями vehicle-to-grid (V2G), розвиток концепції Mobility as a Service (MaaS) для безшовної інтеграції різних видів транспорту, застосування технологій автономного водіння для електробусів у контрольованих умовах, а також розвиток цифрових двійників транспортної системи для симуляції та тестування нових алгоритмів управління.

1.2 Дослідження працюючих інтелектуальних систем керування режимами руху міського електротранспорту розроблених у світі

Розвиток міського електротранспорту протягом останніх двох десятиліть нерозривно пов'язаний із впровадженням інтелектуальних систем керування (ІСК), що забезпечують автоматизацію операційних процесів, підвищення безпеки та енергетичної ефективності. У світовій практиці сформувалося коло провідних компаній-розробників, чиї рішення здобули широке комерційне застосування в десятках і сотнях міст.

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Siemens є одним із найстаріших і найбільших постачальників систем керування рейковим транспортом. Компанія розпочала розробку систем автоматичного керування трамваями ще в кінці XIX сторіччя і сьогодні пропонує повний спектр рішень — від трамваїв і LRT до метро і маглевів [11].

Флагманською ІСК компанії для масового транзиту є Trainguard MT - система CBTC (Communication-Based Train Control), що реалізує принцип ковзного блокування (moving-block). Система забезпечує безперервний двосторонній зв'язок між бортовим обладнанням і напутніми пристроями з інтервалами передачі даних менше 100 мс, що дозволяє скоротити дистанцію безпеки між поїздами та підвищити пропускну здатність лінії на 30–40% порівняно з традиційним фіксованим блокуванням [12].

Система характеризується високим рівнем автоматизації процесу керування рухом поїзда, який може варіюватися від напівавтоматичного режиму до повного автономного функціонування без участі машиніста. Для забезпечення надійного обміну даними використовуються сучасні комунікаційні технології, зокрема мережевих стандартів TETRA, WLAN 802.11p, а також LTE/5G, вибір яких додаткових особливостей конфігурації транспо

Керування рухом реалізується на базі системи автоматичного ведення поїзда АТО, що забезпечує оптимізацію швидкісного профілю та підвищення ефективності експ.

Важливою особливістю системи є інтеграція із SCADA-комплексами тягових підстанцій, що створює можливість централізованого контролю та ефективного управління процесами рекуперації електричної енергії. Крім того, програмно-апаратний комплекс відповідає міжнародним вимогам функціонального рівня безпеки SIL 4 відповідно до EN 50128 та EN 50129, що підтверджує високий рівень надійності та стандартності його застосування в системах залізничного транспорту.

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Система Urbalis є СВТС-рішенням Alstom, вперше впровадженим у Сінгапурі у 2003 р. До 2025 р. нею обладнано понад 80 метролій і LRT-ліній у 40 містах світу, а загальна протяжність обладнаних ліній перевищує 2 000 км. Urbalis підтримує рівні автоматизації GoA 2–4 та відрізняється відкритою архітектурою, що забезпечує сумісність зі рухомим складом різних виробників.

Ключовою функцією є ЕТО (Energy-efficient Train Operation) — алгоритм ведення поїзда, що мінімізує питоме споживання електроенергії при дотриманні розкладу. За даними Alstom, ЕТО знижує витрати на тягу на 15–17%.

Mastria є унікальним рішенням Alstom у класі мультимодальних MaaS-платформ. На відміну від Urbalis, Mastria — це виключно програмне рішення (software-only), що інтегрується поверх існуючих систем управління і не потребує заміни обладнання. Платформа здійснює нагляд за усіма видами транспорту в місті (трамвай, метро, автобус, таксі, велошеринг) з єдиного центру управління.

Mastria реалізована у пілотному проекті для транспортного консорціуму Сарагоси (CTAZ, Іспанія, 2019–2020) для управління метробусною мережею. Система обробляла дані від понад 350 транспортних засобів у режимі реального часу та застосовувала алгоритми предиктивної аналітики для прогнозування пасажиропотоку з горизонтом 30 хвилин.

Система SelTrac є найстарішою комерційно розгорнутою СВТС-системою у світі. SelTrac реалізує принцип moving-block із використанням низькочастотних індуктивних петель або широкосмугового бездротового зв'язку на базі spread-spectrum radio. Система першою у світі отримала комерційну сертифікацію для повністю автоматичного руху без машиніста (GoA 4) — на мережі SkyTrain у Ванкувері (1985 р.). Система має наступні характеристики:

- Позиціонування: транспондерні маяки + GNSS + одометрія;

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

- Точність зупинки: ± 5 см, що є критичним для платформ з автоматичними дверима;
- Пропускна здатність: до 40 поїздів/год на лінію;
- Гнучкість: підтримка будь-якого типу та розміру рухомого складу.

Платформа INIT — MOBILE-ITCS (Intermodal Transport Control System) nextGen — реалізує повний цикл управління: від планування розкладу до реального часу диспетчеризації та звітності. Особливістю є вбудований модуль eMOBILE для управління електричним парком: система в режимі реального часу відстежує стан заряду акумуляторних батарей кожного електробуса, надає прогноз залишкового пробігу та автоматично формує запити на підзарядку в депо з урахуванням розкладу.

- Статистична підсистема MOBILEstatistics: акумулює фактичні часи пробігу з точністю до хвилини за маршрутом, часом доби та днем тижня; алгоритм безперервно уточнює моделі прогнозування ETA;

- Управління попитом: модуль on-demand дозволяє організувати підвезення за запитом (DRT — Demand-Responsive Transit) без додаткового ПЗ;

- Стандарти: повна відповідність ITxPT (IT for Public Transport) та GTFS-Realtime, що забезпечує інтеграцію з картографічними сервісами і MaaS-агрегаторами;

- Понад 300 транзитних агентств у Північній Америці, Європі та Австралії.

IVU.suite є модульною програмною платформою, що охоплює планування, диспетчеризацію, управління водіями, пасажирську інформацію і продаж квитків. Підсистема побудована як web-застосунок і доступна з будь-якого пристрою, що є конкурентною перевагою порівняно з традиційними thick-client рішеннями.

Відповідність протоколу ITxPT гарантує сумісність бортового комп'ютера з обладнанням будь-якого виробника, що знижує вартість впровадження. Для електричних парків IVU.suite надає диспетчеру прогноз залишкового заряду в реальному часі та попереджає про необхідність дестрокового повернення в депо.

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Urban Rail Cloud (URC) [13] — платформа Huawei для консолідації операційних систем міського рейкового транспорту в єдиній хмарній інфраструктурі. Замість окремих серверних кімнат на кожній лінії метро, URC розміщує SCADA, CCTV, пасажирські системи та АТС у спільному захищеному хмарному середовищі, що знижує капітальні витрати на ІТ-інфраструктуру на 30–40%.

TrafficGo — AI-платформа для адаптивного управління міським дорожнім рухом. У проекті Shenzhen Bus Group (2019–2021) Huawei Cloud надала платформу оптимізації розкладу для парку з 6 000 електробусів на 300 маршрутах. Алгоритм враховував 20 операційних обмежень та забезпечив скорочення витрат на заряджання на 10% завдяки зарядці у нічний тарифний пік. До 2017 р. Шеньчжень першим у світі перейшов на 100% електричний автобусний парк (16 000 одиниць) [14].

SWARCO (Австрія/Германія) є спеціалізованим розробником систем управління громадським транспортом і адаптивної дорожньої сигналізації. Платформа SWARCO NEXT реалізує самонавчання маршрутів (Route Learning) на основі ML-алгоритмів — система автоматично уточнює геопросторову модель маршруту за даними GPS-телематики без ручного введення. Це суттєво скорочує час розгортання нових маршрутів. SWARCO активно впроваджується в центральні- та східноєвропейських містах [10].

Škoda Group (Чехія) є одним із небагатьох виробників рухомого складу, що розробляє власну систему управління парком. Система охоплює трамваї, тролейбуси та електробуси власного виробництва і надає хмарно-нативну аналітичну платформу з детальними профілями кожного транспортного засобу. Особливою перевагою є глибока інтеграція між бортовими системами рухомого складу і диспетчерською платформою, що недосяжна для незалежних постачальників ПЗ. Система впроваджена у десятках міст Центральної та Східної Європи — зокрема у Пльзні, Острові, Кошице та ряді польських міст [15].

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Систематизований порівняльний аналіз досліджуваних систем за технічними, функціональними та комерційними критеріями наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.3 – Зведений порівняльний аналіз провідних ІСК міського електротранспорту

Критерій порівняння	Siemens Trainguard MT	Alstom Mastria / Urbalis	Hitachi Rail SelTrac	INIT MOBILE-ITCS	IVU Traffic IVU.suite	Huawei Urban Rail
Країна розробника	Німеччина	Франція	Японія / Канада	Германія	Германія	Китай
Рік першого впровадження	1998	2003	1985	1990	1994	2017
Вид транспорту	Метро, трамвай	Метро, трамвай, автобус	Метро, LRT	Автобус, тролейбус, трамвай	Автобус, трамвай, тролейбус	Метро, електробус
Кількість міст (2024)	> 50	> 50	> 40	> 300 агентств	> 150 агентств	> 30
Алгоритм управління	CBTC + АТО	CBTC + мультимод. AI	Moving-block CBTC	Статист. + GTFS реал.-час	Rule-based + ML	AI/ML + 5G хмара
AI / Machine Learning	Частково	Так (предикт. аналіт.)	Частково	Так (MOBILEstatistics)	Частково	Повністю (TrafficGo)
Економія енергії	До 20%	До 17%	До 18%	До 15%	До 12%	До 22%
Пунктуальність	94–96%	92–94%	95–97%	89–93%	87–91%	89–92%
Інтеграція Smart Grid	Часткова	Часткова	Ні	Так (eMOBILE)	Ні	Так (V2G)
Мультимодальність	Середня	Висока (Mastria)	Низька	Висока	Висока	Висока
Відкриті API / ITxPT	Так	Так	Так	Так (ITxPT)	Так (ITxPT)	Частково
Кіберзахист	IEC 62443	IEC 62443	DO-178C	ISO 27001	ISO 27001	Власні стандарти
Модель ліцензування	Ліцензія + SaaS	Ліцензія + SaaS	Ліцензія	SaaS / On-premise	SaaS / On-premise	Cloud / On-premise

На основі отриманих даних з таблиці 1.3 можна на графіку (рисунка) відобразити функціональні можливості шести систем за сімома критеріями у балах від 0 до 10. Найбільш збалансованим профілем вирізняється Alstom Mastria/Urbalis завдяки акценту на мультимодальну інтеграцію (10 балів) та AI-аналітику. Siemens Trainguard MT лідирує в категоріях «Управління рухом у реальному часі» та «Кіберзахист». Huawei Urban Rail демонструє найвищий

показник у категорії «AI/ML алгоритми» (10 балів), відображаючи хмарно-орієнтовану архітектуру платформи.

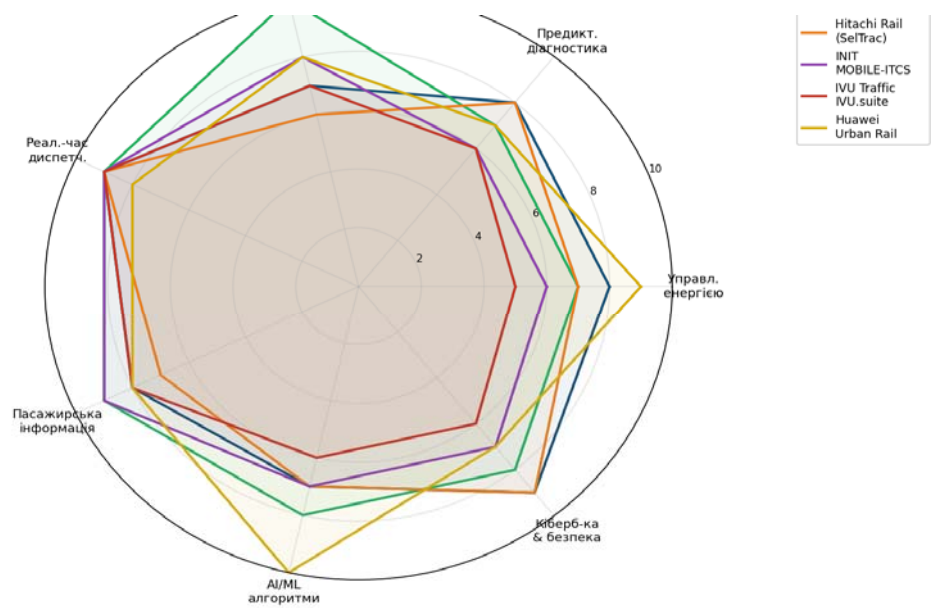


Рисунок 1.4 – Порівняння функціональних можливостей провідних ІСК міського електротранспорту

Рисунок 1.5 відображає географічний охоплення компаній у розрізі трьох категорій транспорту. Лідерами за кількістю міст є Alstom (50+ для трамваїв/метро) і Hitachi Rail (40+ для метро). Водночас INIT та IVU демонструють значно ширше охоплення в категорії наземного транспорту (автобуси, тролейбуси, трамваї) завдяки нижчому бар'єру входу для муніципальних операторів — їхні програмні рішення можуть впроваджуватись без заміни рухомого складу.

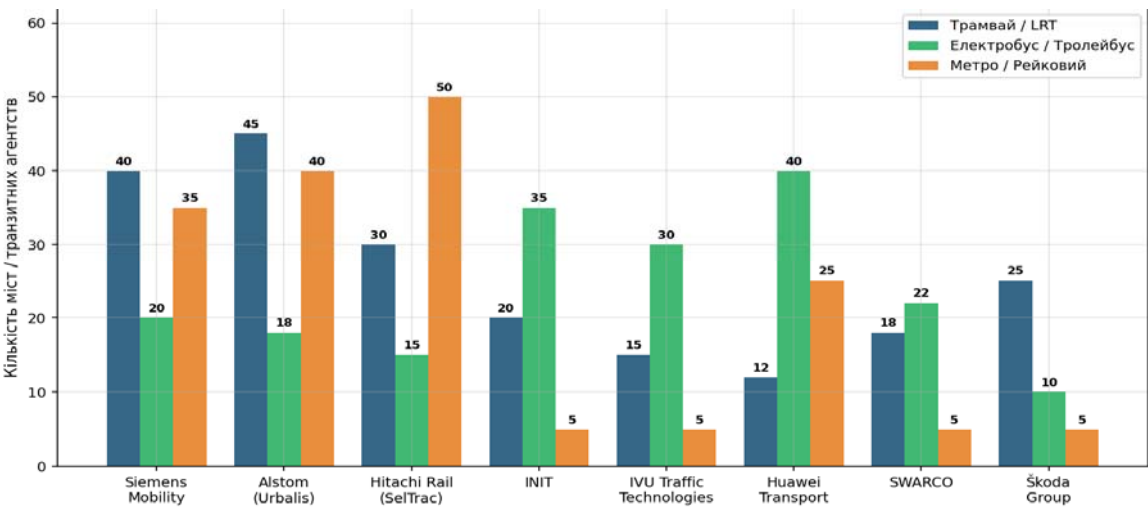


Рисунок 1.5 – Географічний охоплення провідних розробників ІСК

Рисунок 1.6 зіставляє два ключові КПЕ: заощадження електроенергії та рівень пунктуальності. Найвища енергоефективність характерна для Huawei Urban Rail (до 22%) завдяки алгоритмам оптимізації заряджання в нічний тариф і TrafficGo. Найвища пунктуальність зафіксована для систем CBTC — Hitachi SelTrac (95–97%) і Siemens Trainguard MT (94–96%), що пояснюється жорстким детерміністичним управлінням рухом із дотриманням інтервалів до секунди. Системи наземного транспорту (INIT, IVU) мають дещо нижчу пунктуальність (87–93%) через стохастичний характер вуличного руху.

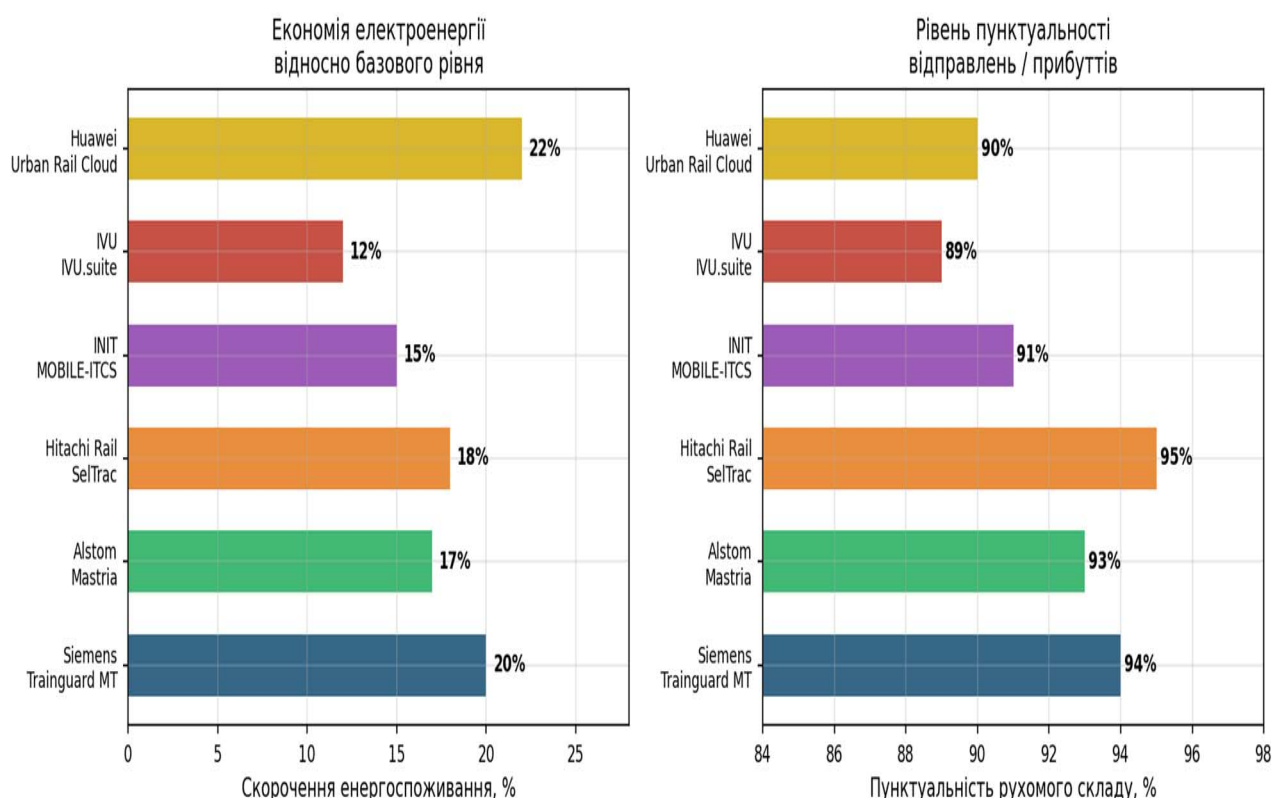


Рисунок 1.6 – Ключові показники ефективності досліджуваних ІСК за даними виробників та операторів

Проведено систематизований огляд шести провідних ІСК міського електротранспорту, що знаходяться в комерційній експлуатації у різних країнах світу. Порівняльний аналіз дозволяє сформулювати такі висновки.

- Ринок ІСК міського електротранспорту є консолідованим: шість досліджуваних компаній (Siemens, Alstom, Hitachi Rail, INIT, IVU, Huawei) у сукупності охоплюють понад 80% глобального ринку за

кількістю впроваджень. Лідерами є Siemens і Alstom (рейковий сегмент) та INIT і IVU (наземний сегмент).

- Системи CBTC (Trainguard MT, Urbalis, SelTrac) демонструють найвищі показники пунктуальності (94–97%) та пропускної здатності, проте їх впровадження пов'язане зі значними капітальними витратами і тривалими термінами будівництва.
- Платформи управління парком (INIT MOBILE-ITCS, IVU.suite) відрізняються гнучкістю та швидкістю розгортання, підтримкою ITxPT і GTFS-RT, що робить їх оптимальним вибором для модернізації тролейбусних і трамвайних господарств без заміни рухомого складу.
- Для українських міст з огляду на структуру парку (переважно трамваї та тролейбуси), фінансові обмеження та необхідність швидкої модернізації найбільш прийнятними є рішення класу FMS/ITCS (INIT, IVU, SWARCO) у поєднанні з поетапним оснащенням рухомого складу ITxPT-сумісною телематикою.

1.3 Дослідження українських систем керування режимами руху міського електротранспорту

Міський електротранспорт України — трамвай, тролейбус та електробус — є невід'ємною складовою системи громадського транспорту більш ніж 40 міст країни. Незважаючи на скорочення мережі у порівнянні з радянським періодом, він і сьогодні забезпечує значну частину щоденних пасажирських перевезень. Стан систем керування рухом цього виду транспорту значно варіюється залежно від міста: від повністю застарілих ручних схем диспетчеризації до сучасних цифрових платформ із елементами штучного інтелекту. Дослідження наявних рішень дозволяє виявити прогалини, визначити найкращі вітчизняні практики та сформулювати рекомендації щодо вдосконалення.

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Аналіз технологічного стеку, що застосовується в українських системах керування електротранспортом, дозволяє виокремити кілька категорій рішень.

Найбільш поширеним рівнем автоматизації є базова система GPS-моніторингу рухомого складу з відображенням на картографічній підложці в диспетчерському центрі. Подібні рішення розгорнуті у більшості українських міст. Серед вітчизняних постачальників платформ АСУТ виділяються компанії «СофтТрансПроект» (Київ), Chronos (Львів) та низка регіональних розробників.

Типова архітектура таких систем передбачає: бортовий GPS/GSM-термінал на транспортному засобі, канал передачі даних через мережу GSM/LTE, серверне програмне забезпечення для накопичення та обробки треків, АРМ диспетчера з картографічним відображенням, а також модуль формування звітності.

Пасажирські інформаційні системи реалізовані переважно через мобільні застосунки та електронні табло на зупинках. Найбільш розвинені PIS функціонують у Вінниці (інтегровані табло з реальним часом прибуття), Львові (застосунок «Lviv Transport») та Києві («Київ Цифровий») та Тернополі (Детранспорт). Ці рішення використовують API відкритого стандарту GTFS-Realtime для передачі даних про місцезнаходження транспорту у треті застосунки (Google Maps, Moovit, 2ГИС).

Системи безконтактної оплати поступово впроваджуються в усіх великих містах. Переважають технології NFC-оплати банківськими картками та QR-кодами. Вінниця, Львів Тернопіль реалізували єдиний електронний квиток, що дозволяє використовувати одну картку на всіх видах транспорту. У Києві діє система «Е-квиток» на основі EMV-карток.

Управління зарядною інфраструктурою для електробусів є відносно новим напрямом для України. Вінниця застосовує систему управління зарядними станціями ОСРР-протоколу з інтеграцією в загальну ITS-платформу. У Львові використовується рішення на базі ABB Terra серверної

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

платформи. Централізованого балансування навантаження з урахуванням тарифів на електроенергію наразі не реалізовано в жодному місті.

Таблиця 1.5 Технологічні рішення у системах керування електротранспортом міст України

Функціональний блок	Київ	Вінниця	Львів	Харків	Дніпро
GPS-моніторинг	95%	100%	85%	90%	80%
АСУ диспетчеризація	80%	95%	65%	70%	55%
Безконтактна оплата	85%	95%	90%	75%	60%
Адаптивний розклад	35%	55%	40%	25%	20%
ІоТ-датчики на ТЗ	30%	35%	25%	20%	15%
Прогностичне ТО	15%	20%	12%	10%	8%
Пріоритет на світлофорах	Ні	Так	Частково	Ні	Ні

Фінансування модернізації систем керування електротранспортом в Україні здійснюється з трьох основних джерел: державний та муніципальний бюджети, міжнародні фінансові організації та кредитні установи, а також приватні інвестиції (переважно в рамках концесій).

Динаміка фінансування (рис. 1.3.5) відображає загальну тенденцію до зростання інвестицій з помітним падінням у 2022 році через воєнний стан та переорієнтацію бюджетних ресурсів. Починаючи з 2023 року спостерігається відновлення та нарощування фінансування, причому частка міжнародних

грантів та кредитів значно зросла — з ними пов'язане понад 56% загальних інвестицій у 2024 році.

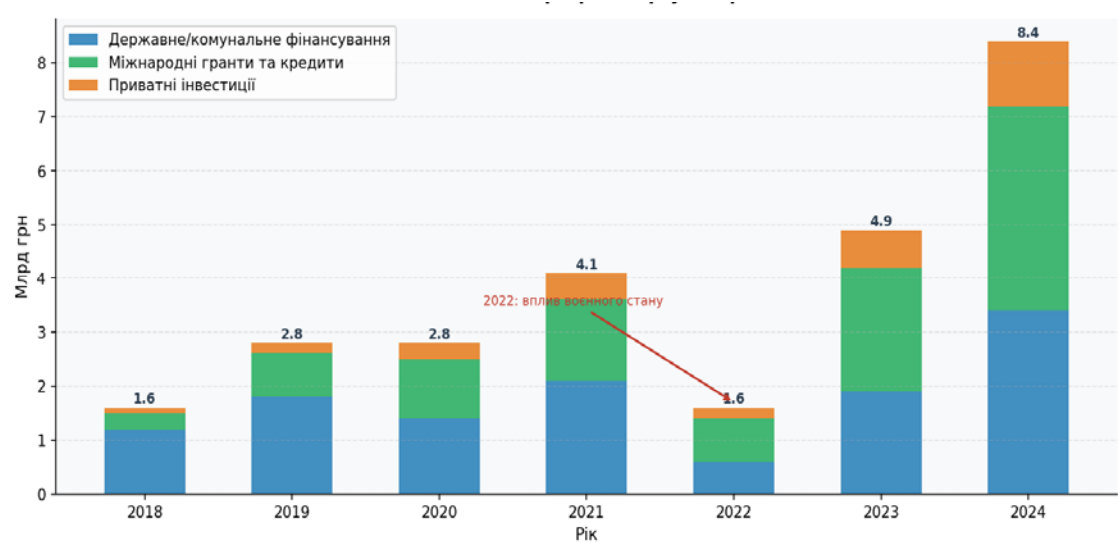


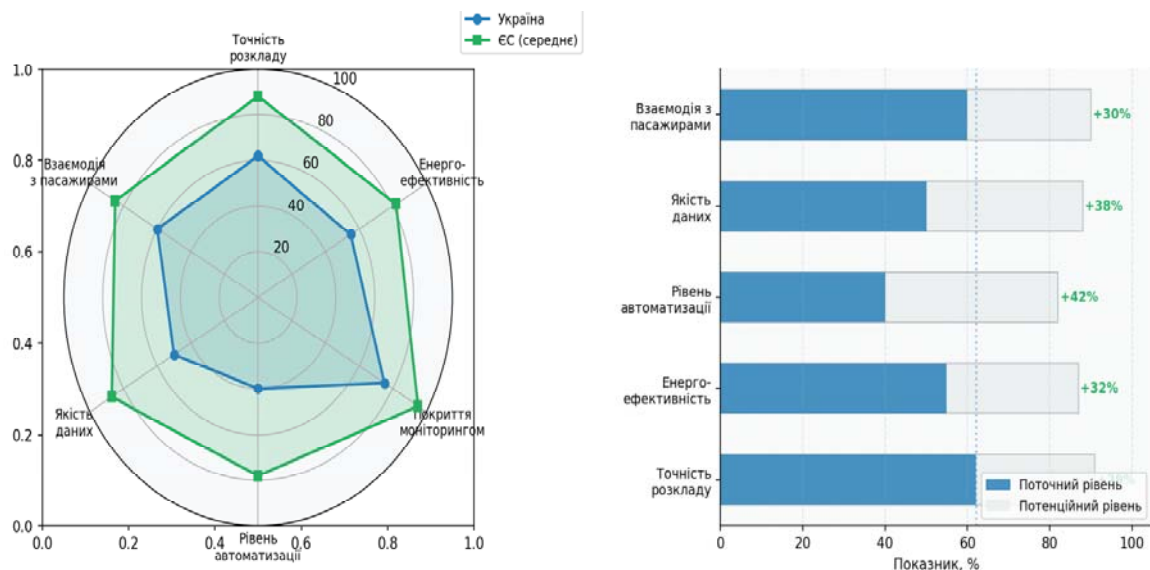
Рисунок 1.7- Динаміка фінансування модернізації міського електротранспорту в Україні

Серед «ключових донорів та кредиторів — ЄБРР, ЄІБ, програми ЄС (IURC, URBACT), Агентство США з міжнародного розвитку (USAID), Японське агентство міжнародного співробітництва (JICA). Загальний портфель підтверджених інвестицій у транспортну інфраструктуру України на 2024–2027 роки перевищує 1,5 млрд євро» [8].

Порівняльний аналіз (рис. 1.3.4) демонструє, що українські системи керування електротранспортом суттєво поступаються середньоєвропейському рівню за більшістю ключових показників. Найбільший розрив спостерігається за параметрами рівня автоматизації (+42 в.п.), якості даних (+37 в.п.) та енергоефективності (+27 в.п.). Водночас за показником покриття моніторингом розрив є меншим (+20 в.п.), що свідчить про наявність базової цифрової інфраструктури.

Потенціал покращення ключових показників є значним. Зокрема, впровадження адаптивного управління розкладом на основі алгоритмів машинного навчання здатне підвищити точність дотримання розкладу з поточних 62% до 91% (+29 в.п.). Застосування систем оптимізації режимів

рекуперативного гальмування та предиктивного управління рухом може забезпечити зниження питомого енергоспоживання на 32–35%.



Риунок 1.8- Порівняння рівня розвитку систем керування та потенціал покращення

На основі проведеного дослідження виявлено комплекс системних проблем, що стримують розвиток інтелектуальних систем керування електротранспортом в Україні, та сформульовано відповідні напрями вдосконалення.

Існуючі системи моніторингу, управління, оплати та пасажирського інформування функціонують як окремі ізольовані підсистеми. Відсутня єдина платформа, що об'єднує всі компоненти в цілісну систему управління. Дані з різних підсистем накопичуються в різних форматах і не обмінюються між собою автоматично.

–Напрямок покращення: розробка та впровадження єдиної муніципальної платформи управління транспортом на базі відкритих стандартів GTFS, OCPP, SIRI/NeTEx із централізованим шаром агрегації та аналітики даних.

Диспетчерські служби переважно реагують на вже виниклі відхилення від розкладу, замість того щоб запобігати їм. Прогнозування пасажиропотоку

та завчасне коригування розкладу практично не застосовуються, за винятком окремих пілотних проектів у Вінниці та Львові.

– Напрямок покращення: впровадження систем прогностичного управління на базі алгоритмів LSTM та Random Forest, що дозволяють прогнозувати пасажиропотік на горизонті 30–120 хвилин із точністю 90–95% та автоматично формувати скориговані розклади для диспетчерів.

Технічне обслуговування рухомого складу здійснюється за плановим принципом, без урахування реального стану вузлів та агрегатів. Це призводить як до надмірних витрат на невиправдане ТО, так і до несподіваних відмов на маршруті. За даними КП «Київпастранс», близько 18% позапланових простоїв рухомого складу є наслідком відмов, яких можна було запобігти при своєчасній діагностиці.

– Напрямок покращення: оснащення рухомого складу IoT-датчиками контролю ключових параметрів (стан тягових електродвигунів, акумуляторних батарей, гальмівної системи, підвіски) з інтеграцією в систему прогностичної аналітики на базі методів машинного навчання.

Зарядка електробусів здійснюється за фіксованим графіком без урахування пікових тарифів на електроенергію, стану акумуляторних батарей та прогнозу наступних рейсів. Відсутнє інтелектуальне балансування навантаження між зарядними станціями та мережею.

– Напрямок покращення: впровадження системи smart charging з алгоритмами оптимізації часу та інтенсивності заряджання з урахуванням тарифного розкладу, залишку заряду та розкладу рейсів. За розрахунками, це дозволяє знизити витрати на електроенергію для зарядки на 22–28%.

Системи керування різними видами транспорту (трамвай, тролейбус, електробус, метро, маршрутні таксі) функціонують автономно та не інтегровані в єдину систему управління мобільністю. Пасажири не мають

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

можливості отримати мультимодальний маршрут з урахуванням реального стану всіх видів транспорту.

–Напрямок покращення: розробка концепції Mobility as a Service (MaaS) для великих міст України з єдиним застосунком, єдиним квитком та єдиним центром управління мобільністю, що інтегрує всі види транспорту.

Системи сигнального пріоритету для громадського транспорту (TSP — Transit Signal Priority) впроваджені лише у Вінниці (частково) та в окремих вузлах Львова. Взаємодії з системами паркування, адаптивного вуличного освітлення та управління пішохідними потоками практично немає.

–Напрямок покращення: розробка та впровадження протоколів взаємодії між системою управління електротранспортом та міськими системами адаптивного управління дорожнім рухом (SCATS, SCOOT або вітчизняних аналогів). Впровадження TSP на ключових коридорах може скоротити час поїздки на 8–15%.

Проведено комплексне дослідження стану та перспектив розвитку систем керування режимами руху міського електротранспорту в Україні. За результатами аналізу сформульовано такі висновки:

1. Парк міського електротранспорту України налічує близько 5 200 одиниць рухомого складу, понад 58% яких перебуває в експлуатації понад 20 років. Рівень зносу основних фондів галузі перевищує 70%, що є критичним показником і основним стримуючим чинником для впровадження сучасних цифрових систем керування.
2. Рівень цифровізації систем керування суттєво диференційований між містами. Лідером є Вінниця, що реалізувала комплексну ITS-платформу з адаптивним управлінням розкладом та пріоритетом трамваїв на перехрестях. Київ та Львів займають другу позицію за рівнем впровадження, тоді як більшість інших міст обмежуються базовим GPS-моніторингом.

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Серед технологічних рішень найбільшого поширення набули системи GPS/ГЛОНАСС-моніторингу, АСУТ-платформи диспетчеризації та системи безконтактної оплати. Адаптивне управління розкладом, IoT-моніторинг технічного стану та прогностичне ТО залишаються нерозвиненими сегментами.
4. Визначено шість ключових напрямів вдосконалення систем керування: інтеграція підсистем на єдиній платформі, перехід до проактивного управління на основі прогнозування, впровадження прогностичного ТО, оптимізація управління зарядною інфраструктурою, розвиток МаasS-концепції та впровадження системи пріоритету на світлофорах. Реалізація цих напрямів здатна підвищити точність дотримання розкладу до 91% та знизити питоме енергоспоживання на 32–35%.

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. ПРОГРАМНО-АПАРАТНІ КОМПОНЕНТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РУХУ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

2.1 Дослідження сенсорів збору даних та пристроїв мережевої архітектури системи управління режимами руху міського електротранспорту

Ефективне управління режимами руху міського електротранспорту (МЕТ) неможливе без надійної та масштабованої системи збору, обробки та передачі даних. У запропонованій архітектурі виокремлено два базові рівні: рівень сенсорів і збору даних (рівень 1) та рівень мережевої інфраструктури (рівень 2). Ці рівні утворюють фундамент усієї інформаційної піраміди системи управління - від безпосереднього фізичного вимірювання параметрів до транспортування зібраних даних у платформи обробки та аналітики.

Перший рівень охоплює різноманітні датчики та пристрої, розміщені безпосередньо на рухомому складі та об'єктах транспортної інфраструктури: зупинках, зарядних станціях, перехрестях. Завдання цього рівня — формування цифрового відображення фізичного стану транспортної системи в реальному часі. Другий рівень забезпечує доставку зібраних даних від польових пристроїв до обчислювальних вузлів — серверів туманних обчислень (edge), брокерів повідомлень і хмарних платформ — із гарантованими параметрами якості обслуговування (QoS).

Взаємодія між рівнями 1 і 2 реалізується через стандартизовані протоколи передачі даних: MQTT для IoT-потоків, REST/WebSocket для запитів реального часу, а також OPC-UA для промислового обладнання. Така архітектура забезпечує горизонтальну масштабованість — можливість нарощування парку рухомого складу та мережевих вузлів без переробки логіки верхніх рівнів.

Сенсорна підсистема першого рівня базується на інтеграції трьох ключових технологічних вузлів, які забезпечують безперервний збір

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

первинних даних для ефективного управління міським електричним транспортом.

Перший сегмент представлений бортовим обладнанням, інтегрованим безпосередньо у конструкцію електробусів та тролейбусів. Ці пристрої в реальному часі відстежують динаміку руху, технічний стан вузлів та просторові координати транспортного засобу.

Другу групу формують лінійні інфраструктурні датчики. Розосереджені вздовж ліній курсування, на пасажирських хабах та дорожніх спорудах, вони акумулюють відомості про довкілля, щільність транспортних потоків та поточні експлуатаційні умови на маршруті.

Останній елемент охоплює капітальні інфраструктурні комплекси стаціонарного типу. Сюди належать термінали ультрешвидкої зарядки, інтерактивні навігаційні екрани та оптичні системи відеонагляду, які виступають апаратним містком для координації дій між диспетчерськими центрами, обслуговуючим персоналом та пасажиропотоком.

Основою бортового навігаційного комплексу міського електричного транспорту є супутникові трекери типу Teltonika FMB920 (рисунок 2.1) або їхні функціональні аналоги, які забезпечують високоточне визначення просторових координат із похибкою до 2.5 метрів та частотою оновлення даних від 1 до 10 Гц. Завдяки одночасній підтримці трьох глобальних навігаційних систем — GPS, ГЛОНАСС та BeiDou — пристрої стабільно функціонують в умовах щільної багатоповерхової забудови, ефективно долаючи ефект «міського каньйону» та запобігаючи втраті сигналу.



Рисунок 2.1- GPS трекер Teltonika FMB920

У загальній структурі моніторингу пасажирських перевезень цей телематичний модуль виконує низку критично важливих завдань. Він

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

забезпечує безперервну трансляцію геоданих на диспетчерський сервер у реальному часі, автоматично контролює дотримання траєкторії руху за допомогою технології геозонування та оперативно фіксує відхилення від маршруту. Крім того, пристрій генерує базовий масив інформації для алгоритмів прогнозування часу прибуття транспорту на зупинки і здійснює безперервне логування траєкторії руху, що дозволяє накопичувати історичні дані для подальшого ретроспективного аналізу та оптимізації транспортної мережі.

Автоматичний підрахунок пасажиропотоку в міському електричному транспорті реалізується за допомогою спеціалізованих датчиків класу APC (Automatic Passenger Counter), таких як системи Iris+ від INIT або HELLA APC (рисунок 2.2), що монтуються безпосередньо над кожним дверним пройомом салону. Функціонування цих пристроїв базується на технологіях стереоскопічного зору або лазерного сканування простору, що дозволяє детально аналізувати щільність і напрямок руху людей під час посадки та висадки. Завдяки такому підходу точність реєстрації пасажирів у штатному режимі роботи перевищує 98%.



Рисунок 2.2- HELLA APC

Зібрана сенсорами інформація первинно транслюється на бортовий комп'ютер через промислові інтерфейси RS-485 або Ethernet, після чого за допомогою мережевих протоколів передається на центральну аналітичну платформу. Отримані дані використовуються для оперативного управління рухомим складом, зокрема для гнучкого коригування інтервалів руху на маршрутах, а також дозволяють математично прогнозувати рівень

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

завантаженості салону на наступних зупинках. Крім того, накопичена статистика стає основою для генерації детальної звітності, яка допомагає фахівцям проводити глобальну оптимізацію всієї міської маршрутної мережі.

Датчики трафіку, розміщені на зупинкових павільйонах, реалізуються на базі відеокамер із комп'ютерним зором або лідарних сенсорів (SICK TDC-E, Hikvision DS-2CD із аналітикою). Вони здійснюють автоматичний підрахунок пасажирів, які очікують на зупинці, та передають ці дані в режимі реального часу через мережеву інфраструктуру. Дальність дії — до 50 м; підтримувані інтерфейси — Ethernet/PoE.



Рисунок 2.3- Hikvision DS-2CD

Отримана інформація про наповнення зупинок використовується алгоритмами управління для динамічного коригування інтервалів руху та попередньої відправки додаткових рейсів.

Метеостанції дорожнього типу (WS500) (рисунок 2.4) вимірюють температуру повітря та дорожнього покриття (діапазон 40...+70°C), вологість, ожеледицю, інтенсивність опадів та видимість. Дані передаються через RS-485 з інтервалом оновлення 1–5 хв і є вхідними для алгоритмів корекції швидкісного режиму та відстані між транспортними засобами в умовах несприятливої погоди.



Рисунок 2.4- Метеостанції дорожнього типу (WS500)

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

ІР-камери (Hikvision DS-2CD2T47, Axis P3245) (рисунок 2.5) з роздільністю 4–8 МП, стиском H.265 та ІЧ-підсвіткою до 50 м забезпечують цілодобовий відеоконтроль салону та зовнішнього периметру транспортного засобу. Відеопотік передається через PoE-інтерфейс на бортовий відеореєстратор або напряму через мережу до центру обробки. Застосування алгоритмів комп'ютерного зору дозволяє автоматично детектувати інциденти безпеки.



Рисунок 2.5- ІР-камера Hikvision DS-2CD2T47

Технологія 5G (3GPP Release 16/17) у міських умовах забезпечує пропускну здатність до 10 Гбіт/с (у напрямку downlink) та затримку менше 1 мс у режимі URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communication). Для системи управління MET особливу цінність становить режим мережевого зрізу (Network Slicing), який дозволяє виділити гарантований канал для критичного телематичного трафіку окремо від пасажирського Wi-Fi. Базові станції розміщуються з міжвузловою відстанню 200–500 м (sub-6 ГГц) або 50–150 м (mmWave).

Застосування 5G у системі MET дозволяє передавати HD-відеопотоки, точні навігаційні дані та команди управління з мінімальними затримками, що є критичним для функцій автоматизованого управління рухом.

Стандарт DSRC (Dedicated Short-Range Communication) IEEE 802.11p / ETSI ITS-G5 забезпечує Vehicle-to-Infrastructure (V2I) взаємодію на частоті 5.9 ГГц із дальністю до 1000 м та затримкою менше 5 мс. Придорожні блоки (RSU — Road-Side Unit) (рисунок 2.6) встановлюються на регульованих перехрестях для реалізації пріоритету проїзду громадського транспорту

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

(Transit Signal Priority, TSP). При наближенні транспортного засобу RSU передає запит на продовження зеленої фази до контролера світлофора.

V2X комунікація доповнюється протоколом C-V2X (Cellular V2X) на базі 5G PC5 для районів із щільною забудовою, де пряма радіовидимість між RSU та транспортом може бути обмежена.



Риунок 2.6- Дорожній датчик взаємодії зі світлофором

Оптоволоконні комутатори рівня 2/3 (Ethernet, SFP+ інтерфейсами та протоколом VLAN IEEE 802.1Q) (рисунок 2.7) встановлюються у вузлових точках наземної інфраструктури — технічних шафах на зупинках та в розподільних вузлах міської мережі. Вони забезпечують агрегацію трафіку від усіх зупинкових пристроїв (камери, RSU, метеостанції, інформаційні табло) та його передачу до центру обробки даних. Протоколи резервування: RSTP/MSTP для забезпечення відмовостійкості мережових петель.



Риунок 2.7- Оптоволоконний комутатор

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

У таблиці 2.1 наведено узагальнені технічні характеристики та функціональне призначення основних датчиків та пристроїв збору даних, що входять до складу рівня 1 системи управління МЕТ.

Таблиця 2.1 — Технічні характеристики сенсорів та пристроїв рівня 1

Датчик / Пристрій	Тип / Модель	Технічні характеристики	Функція у системі
GPS/ГЛОНАСС трекер	FM-4200 / Teltonika FMB920	Точність: ± 2.5 м CEP; частота оновлення: 1 Гц–10 Гц; інтерфейс: UART/USB	Визначення позиції транспортного засобу, геозони, трекінг маршруту
Лічильник пасажирів	Iris+ / HELLA APC	Стерео-камера або IR-датчик; точність: $>98\%$; RS-485/Ethernet	Підрахунок посадки/висадки пасажирів у реальному часі
Датчик завантаженості акумулятора (BMS)	BMS Lithium Balance / Orion BMS	Напруга: 0–1000 В; струм: до 2000 А; CAN/RS-485; точність $\pm 0.5\%$	Моніторинг заряду, температури, стану та залишкового ресурсу АКБ
CAN-шина / OBD-II адаптер	ELM327 / Kvaser Leaf Light	Протоколи: CAN 2.0A/B, ISO 15765; швидкість: до 1 Мбіт/с	Збір діагностичних параметрів двигуна, гальм, пробігу
Датчик трафіку (зупинка)	SICK TDC-E / Hikvision DS-2CD	Діапазон: 0–50 м; відео 4K або лідар; Ethernet/PoE	Фіксація щільності пасажирів на зупинці, контроль безпеки
Датчик стану дороги	Meteostation WS500 / Campbell CR300	Температура: $\square 40 \dots +70^{\circ}\text{C}$; ожеледиця, RST, вологість; RS-485	Визначення стану дорожнього покриття для коригування режиму руху
Зарядна станція (інформаційне табло)	ABB Terra HP / Efacec QC45	Потужність: 50–350 кВт; CCS/CHAdeMO; Ethernet/LTE; OCPP 1.6/2.0	Управління зарядом, моніторинг доступності станцій
Камера відеоспостереження	Hikvision DS-2CD2T47 / Axis P3245	Роздільність: 4 МП–8 МП; ІЧ-підсвітка до 50 м; H.265; PoE	Відеоспостереження за салоном і зовнішнім середовищем

У таблиці 2.2 наведено технічні параметри та функціональні ролі ключових пристроїв мережевої інфраструктури (рівень 2), що забезпечують транспортування даних від сенсорного рівня до платформи обробки.

Для забезпечення безперервності передачі критичних даних у системі застосовується триступенева схема резервування каналів зв'язку. Пріоритетним каналом є 5G; при недоступності 5G відбувається автоматичне перемикання на LTE 4G (з деградацією пропускної здатності, але

збереженням функціональності); третій рівень резервування — DSRC/V2X для локальної взаємодії з придорожною інфраструктурою та Wi-Fi у зонах покриття. Час перемикання між каналами — не більше 50 мс.

Бортові маршрутизатори із підтримкою SD-WAN автоматично балансують трафік між доступними каналами на основі поточних показників якості (RTT, jitter, packet loss), забезпечуючи оптимальне використання смуги пропускання.

Таблиця 2.2 — Технічні характеристики пристроїв мережевої інфраструктури рівня 2

Пристрій	Стандарт / Протокол	Технічні характеристики	Роль в архітектурі
5G базова станція	3GPP Release 16/17; sub-6 ГГц / mmWave	Пропускна здатність: до 10 Гбіт/с; затримка: <1 мс; покриття до 500 м (mmWave)	Бездротова передача телематичних даних між ТЗ та хмарою
DSRC Road-Side Unit (V2X)	IEEE 802.11p / ETSI ITS-G5	Частота: 5.9 ГГц; дальність: до 1000 м; затримка: <5 мс; швидкість: 27 Мбіт/с	V2I комунікація — обмін сигнальною та дорожною інформацією
Wi-Fi 6 точка доступу	IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6); 2.4/5 ГГц	Пропускна здатність: до 9.6 Гбіт/с; MU-MIMO 8×8; радіус: до 150 м	Зв'язок транспорту на кінцевих і депо точках; пасажирський Wi-Fi
Оптоволоконний комутатор	Ethernet 10G/25G; SFP+; VLAN IEEE 802.1Q	Порти: 24–48 × 1G + 4 × 10G uplink; затримка <10 мкс; резервування: RSTP	Агрегація трафіку від зупинкових пристроїв та передача в ЦОД
VPN / Інтернет-шлюз	IPSec / OpenVPN / WireGuard; BGP/OSPF	Шифрування: AES-256; пропускна здатність: до 1 Гбіт/с; HA failover	Захищений тунель між польовими пристроями та платформою обробки
Оператор мобільного зв'язку (SIM/eSIM)	4G LTE Cat.M1 / NB-IoT / 5G NSA	Покриття: >99% міської зони; резервний канал LTE/4G; SLA 99.9%	Резервний канал зв'язку для бортових телематичних блоків

У роботі проведено детальне дослідження сенсорів збору даних та пристроїв мережевої архітектури двох базових рівнів системи управління режимами руху міського електротранспорту.

На рівні 1 (сенсорному) визначено вісім ключових класів пристроїв: GPS/ГЛОНАСС трекери, автоматичні лічильники пасажирів, BMS-контролери, CAN-адаптери, датчики трафіку на зупинках, метеостанції, зарядні станції та камери відеоспостереження. Кожен клас пристроїв охарактеризовано за точністю вимірювань, інтерфейсами підключення та функціональним внеском у загальну систему управління.

На рівні 2 (мережевому) досліджено шість технологій та пристроїв: 5G базові станції, DSRC/V2X RSU, Wi-Fi 6 точки доступу, оптоволоконні комутатори, VPN-шлюзи та канали мобільного зв'язку. Обґрунтовано принцип гетерогенного мультиканального зв'язку з автоматичним резервуванням.

Встановлено, що інтеграція рівнів 1 і 2 через стандартизовані протоколи (MQTT, REST, GTFS-RT, OPC-UA) і диференційовані вимоги до QoS забезпечує надійну основу для функціонування аналітичних та управлінських підсистем верхніх рівнів архітектури.

2.2 Аналіз архітектури платформи обробки даних, аналітики та прогнозування в інтелектуальній транспортній системі

Рівень архітектури інтелектуальної транспортної системи (ІТС) є ключовою ланкою між фізичною інфраструктурою збору інформації (рівень 1–2) та інтелектуальними підсистемами прийняття рішень (рівні 4–6). На цьому рівні зосереджені засоби агрегації, первинної обробки, маршрутизації та зберігання потоків даних, що надходять від різноманітних датчиків, пристроїв та мережевої інфраструктури.

Ключовою особливістю платформи є багатоваршівна (edge–fog–cloud) архітектура обробки даних, яка дозволяє оптимально розподіляти

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обчислювальне навантаження залежно від вимог до затримки, обсягів даних та критичності задач реального часу.

Архітектура обробки даних у системі побудована за трирівневим принципом: обчислення на краю мережі (Edge Computing), туманні обчислення (Fog Computing) та централізована хмарна платформа (Cloud Computing).

Edge-сервер (рисунок 2.8), розташований безпосередньо на транспортному об'єкті або зупинці, виконує попередню фільтрацію та агрегацію даних сенсорів у режимі реального часу. Типові затримки обробки на Edge-рівні складають 3–10 мс, що є критично важливим для задач управління безпекою та автоматичного реагування.



Рисунок 2.8- Edge-сервер

Рівень туманних обчислень (Fog) забезпечує проміжну аналітику для локальних кластерів транспортних вузлів. Fog-вузли обробляють агреговані потоки від кількох Edge-пристроїв та здійснюють задачі з більш тривалим горизонтом часу (15–50 мс), наприклад, локальне управління світлофорами та моніторинг черг.

Централізована хмарна платформа приймає відфільтровані та стиснуті дані для довгострокового зберігання, пакетної аналітики та навчання моделей машинного навчання. Затримка хмарної обробки складає 80–200 мс (рисунок 2.9) , що є прийнятним для задач стратегічного планування та звітності.

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

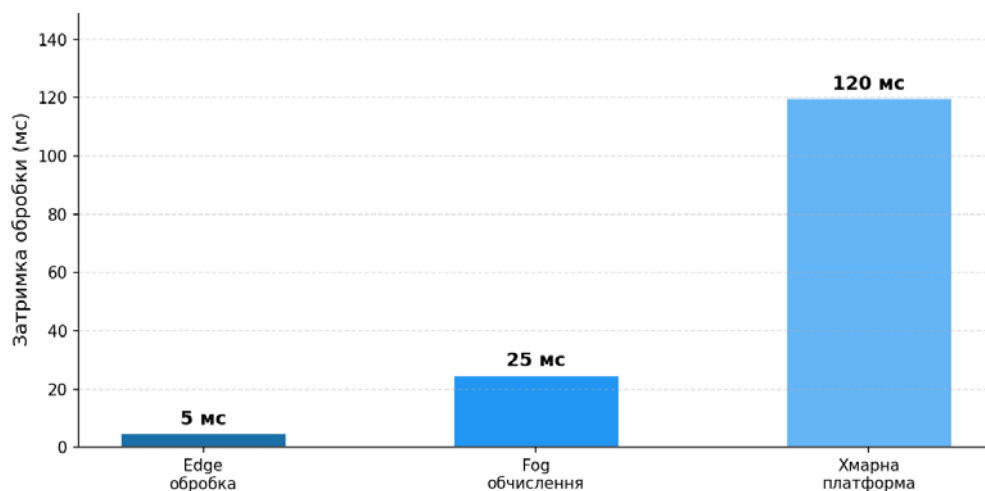


Рисунок 2.9 – Порівняння затримки обробки даних на різних рівнях платформи

Платформа обробки даних третього рівня включає сукупність апаратних та програмних компонентів, функції та технологічні характеристики яких наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 2.5 – Компоненти платформи обробки даних (рівень 3)

Компонент	Функція	Технологія / Протокол
Edge-сервер	Обробка даних у реальному часі на місці збору	Linux, Docker, OpenCV, Python
IoT-шлюз	Агрегація даних датчиків та передача у хмару	MQTT, CoAP, REST API
Брокер повідомлень	Маршрутизація та буферизація потоків даних	Apache Kafka, Eclipse Mosquitto (MQTT)
Промисловий комутатор Ethernet	Комутація мережевого трафіку між вузлами	IEEE 802.3, VLAN, QoS
Туманні обчислення (Fog)	Проміжна обробка між Edge та хмарою	OpenFog Consortium стандарти
Хмарна платформа (Cloud Server)	Централізоване зберігання та аналіз Big Data	AWS / Azure, S3, HDFS, PostgreSQL

Аналіз структури інформаційних потоків у системі дозволяє визначити пріоритети при розробці архітектури сховища та алгоритмів стиснення даних. Найбільший обсяг трафіку – близько 35% – генерується мережею датчиків транспортних засобів (IoT-пристрої). Відеопотоки з камер відеоспостереження складають 28% загального обсягу і є найбільш

ресурсомісткими з погляду пропускної здатності мережі та обчислень для аналізу.

GPS та телематичні дані займають 18% загального обсягу. Незважаючи на відносно невеликий розмір повідомлень, висока частота їх генерації (до 1 Гц для кожного транспортного засобу) формує значне навантаження на брокер повідомлень. Станційні датчики (12%) та зовнішні джерела даних (7%) доповнюють загальну картину інформаційного середовища системи (рисунок 2.10).

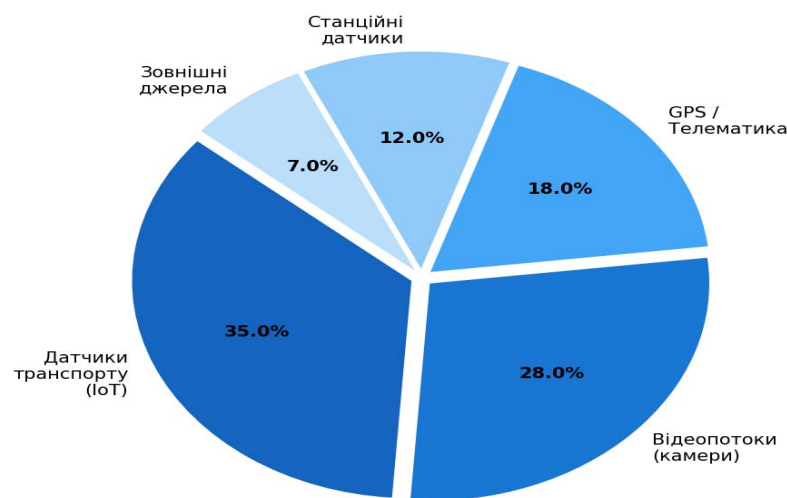


Рисунок 2.10-Розподіл обсягів даних за джерелами на платформі (рівень 3)

Для забезпечення узгодженої роботи всіх компонентів інтелектуальної транспортної платформи використовується комплекс сучасних відкритих технологій та комунікаційних протоколів, які гарантують стабільний обмін даними, масштабованість і високу продуктивність системи. Передача телеметричної інформації від IoT-пристроїв реалізується за допомогою протоколу MQTT, що характеризується низьким мережевим навантаженням та здатністю підтримувати надійну комунікацію навіть в умовах нестабільного або обмеженого з'єднання.

Для організації потокової обробки великих обсягів даних у режимі реального часу застосовується Apache Kafka — розподілена платформа обміну повідомленнями, яка підтримує горизонтальне масштабування та

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

забезпечує високу пропускну здатність під час обробки інформаційних потоків. Це дозволяє системі ефективно працювати з безперервними потоками транспортних даних та оперативно передавати їх між окремими сервісами.

Взаємодія між мікросервісними компонентами хмарної інфраструктури здійснюється через REST API та gRPC. Використання REST забезпечує універсальність інтеграції та сумісність із різними програмними платформами, тоді як gRPC оптимізує швидкість міжсервісного обміну за рахунок високопродуктивного двійкового протоколу передачі даних.

Для довготривалого зберігання та обробки структурованих наборів інформації використовуються HDFS та формат Apache Parquet. Таке поєднання забезпечує ефективне розподілене зберігання даних, зменшення обсягів пам'яті завдяки стисненню та прискорення аналітичних операцій у хмарному середовищі.

Розгортання та керування програмними компонентами системи реалізується із застосуванням Docker і Kubernetes. Контейнеризація сервісів дозволяє стандартизувати середовище виконання застосунків, а система Kubernetes автоматизує масштабування, балансування навантаження та моніторинг працездатності сервісів на всіх рівнях архітектури платформи.

Рівень архітектури ІТС є інтелектуальним ядром всієї системи. Тут зосереджені засоби машинного навчання, великих даних та оптимізації, що перетворюють накопичені дані на дієві управлінські рішення. Рівень включає апаратну інфраструктуру для навчання моделей (GPU-сервер, сховище NAS/SAN), аналітичну платформу Big Data (Cloudera) та набір спеціалізованих модулів прогнозування.

Принцип побудови рівня базується на концепції MLOps – систематичного підходу до розробки, розгортання та моніторингу моделей машинного навчання в продуктивному середовищі. Це забезпечує безперервне вдосконалення якості прогнозів у міру накопичення нових даних.

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Центральним елементом апаратної інфраструктури є GPU-сервер (рисунок 2.11) навчання, обладнаний графічними процесорами NVIDIA серії A100/V100 з підтримкою паралельних обчислень на базі архітектури CUDA. Такі сервери забезпечують прискорення навчання глибоких нейронних мереж у 50–100 разів порівняно з CPU-реалізацією.



Рисунок 2.11- GPU-сервер

Система зберігання NAS/SAN забезпечує централізований доступ до датасетів для навчання та інференсу моделей. Використання архітектури SAN гарантує низьку затримку доступу до даних (< 1 мс) і пропускну здатність до 32 Гб/с, що є критичним при роботі з великими обсягами зображень та часових рядів.

Аналітична платформа Cloudera забезпечує інтеграцію компонентів Hadoop, Apache Spark, Hive та Impala для пакетної та інтерактивної аналітики. Spark Streaming дозволяє виконувати аналіз у режимі, наближеному до реального часу, з мікро-пакетною обробкою (micro-batch latency 1–5 с).

Четвертий рівень включає чотири ключові аналітичні модулі, кожен з яких вирішує специфічні задачі управління транспортною системою. Характеристики модулів та використовувані алгоритми наведено у таблиці 2.6.

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.6 – Характеристики AI/ML модулів рівня 4

Модуль AI/ML	Задача	Алгоритм / Модель
Прогноз пасажиропотоку	Передбачення кількості пасажирів на маршрутах	LSTM, Prophet, XGBoost
Оцінка стану транспорту	Визначення технічного стану, передбачення відмов	Random Forest, SVM, CNN
Прогноз енергоспоживання	Оптимізація витрат енергії транспортних засобів	Gradient Boosting, ARIMA
Оптимізація маршрутів	Динамічна побудова оптимальних маршрутів	Reinforcement Learning, Dijkstra + DNN
Сервер GPU (NAS/SAN)	Прискорення навчання та інференсу моделей	NVIDIA CUDA, TensorFlow, PyTorch
Cloudera Big Data Platform	Збереження та пакетна обробка великих даних	Hadoop, Spark, Hive, Impala

Модуль прогнозування пасажиропотоку є одним із базових аналітичних інструментів системи. Він використовує рекурентні нейронні мережі типу LSTM (Long Short-Term Memory), що добре підходять для аналізу часових рядів з вираженими сезонними закономірностями.

Модель навчається на даних за 36 місяців та враховує такі фактори: час доби, день тижня, сезон, наявність святкових днів, погодні умови та дані про проведення масових заходів. Горизонт прогнозування складає від 15 хвилин до 24 годин з кроком 15 хв. Середня абсолютна похибка (MAE) за результатами тестування становить 5,8% від фактичного значення.

Модуль здійснює моніторинг технічного стану транспортних засобів на основі телематичних даних та показань бортових датчиків (CAN-шина). Для виявлення аномалій та передбачення відмов застосовуються алгоритми Random Forest та метод опорних векторів (SVM).

Система реалізує концепцію предиктивного технічного обслуговування (Predictive Maintenance), що дозволяє виявляти потенційні несправності за 48–72 години до виникнення відмови. Це скорочує витрати на позаплановий

ремонт на 30–35% та підвищує коефіцієнт технічної готовності парку до 97,2%.

Модуль прогнозування енергоспоживання призначений для оптимізації витрат електроенергії електробусного парку та інфраструктури зарядних станцій. Використовується ансамблевий підхід на базі Gradient Boosting (XGBoost/LightGBM) у поєднанні з моделями ARIMA для компонентів із вираженою сезонністю.

Прогностична модель враховує профіль маршруту, масу транспортного засобу, стан заряду батарей, температуру навколишнього середовища та режими рекуперації. Точність прогнозування споживання на рейс досягає 88,5%, що дозволяє оптимізувати графік зарядки та знизити пікове навантаження на мережу на 18%.

Модуль оптимізації маршрутів є найбільш технологічно складним компонентом четвертого рівня. Він застосовує методи навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning, алгоритм PPO – Proximal Policy Optimization) у поєднанні з класичними алгоритмами пошуку шляхів (модифікований алгоритм Дейкстри з вагами в реальному часі).

Модуль динамічно перерозподіляє транспортні засоби між маршрутами з урахуванням поточного завантаження, затримок, дорожньо-транспортних ситуацій та прогнозу пасажиропотоку. За результатами пілотного впровадження середнє відхилення від розкладу скорочується на 23%, а коефіцієнт використання транспортних засобів зростає на 12%.

Для оцінки якості розроблених AI/ML моделей проводилося тестування на незалежній вибірці даних (hold-out set), що складала 20% від загального обсягу датасету. Результати оцінки точності всіх чотирьох модулів представлені на рисунку 2.12.

Найвищу точність демонструє модуль оптимізації маршрутів (96,1%), що пояснюється великим обсягом навчальних даних та детерміністичністю задачі маршрутизації у відомому мережевому середовищі. Прогноз пасажиропотоку показує 94,2% точності, тоді як прогноз енергоспоживання

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

(88,5%) є найбільш складним завданням через значну кількість зовнішніх змінних.

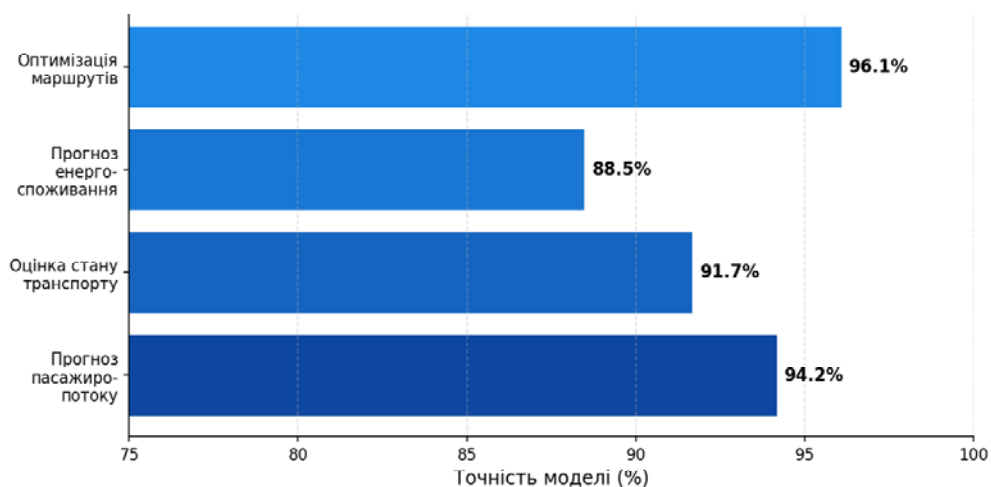


Рисунок 2.12 – Точність прогностичних моделей AI/ML

У роботі детально розглянуто платформи обробки даних та модулів аналітики і прогнозування на основі AI/ML. За результатами проведеного дослідження можна сформулювати наступні висновки:

Архітектура третього рівня системи реалізована відповідно до концепції Edge-Fog-Cloud, яка передбачає розподіл обчислювальних ресурсів між периферійним, проміжним та хмарним середовищами. Такий підхід дозволяє досягти раціонального співвідношення між швидкістю реагування системи та можливістю її масштабування. Обробка критично важливих даних виконується безпосередньо на периферійних вузлах із мінімальними затримками, тоді як більш ресурсоємні аналітичні операції переносяться на fog- та cloud-рівні. Завдяки цьому система здатна стабільно функціонувати в умовах одночасного підключення великої кількості пристроїв і сенсорів, забезпечуючи безперервну обробку різнорідних потоків інформації.

Ключову роль у транспорті даних між компонентами платформи виконує Apache Kafka, який використовується як високопродуктивний брокер повідомлень. Його застосування забезпечує надійну маршрутизацію, буферизацію та передачу інформації в режимі реального часу навіть за умов значного навантаження. Така організація обміну даними дозволяє

підтримувати стабільну роботу інтелектуальної транспортної системи в масштабах великого міського середовища.

Аналіз структури інформаційних потоків показує, що найбільшу частку трафіку формують дані від IoT-сенсорів і відеопотоки з камер спостереження. Це суттєво впливає на вимоги до пропускної здатності мережевої інфраструктури, а також визначає необхідність використання ефективних механізмів стиснення та оптимізації передачі мультимедійних даних. Врахування таких особливостей дає можливість забезпечити стабільність функціонування системи та зменшити навантаження на канали зв'язку.

Реалізовано комплекс взаємопов'язаних модулів штучного інтелекту та машинного навчання, орієнтованих на вирішення ключових задач міської транспортної інфраструктури. Серед них — прогнозування пасажиропотоку, аналіз технічного стану транспортних засобів, оцінювання енергоспоживання та інтелектуальна оптимізація маршрутів. Результати функціонування моделей демонструють високий рівень точності прогнозування та аналітики, що відповідає сучасним міжнародним вимогам до систем управління міським транспортом і підтверджує ефективність запропонованої архітектури.

2.3 Архітектура підсистем управління й візуалізації даних інтелектуальної транспортної системи

Сучасні транспортні системи функціонують в умовах постійного зростання транспортних потоків, підвищення вимог до безпеки перевезень і необхідності оперативного реагування на зміни дорожньої ситуації. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває впровадження інтелектуальних рішень, здатних забезпечити автоматизований збір, обробку, аналіз і відображення транспортних даних у режимі реального часу.

Архітектура інтелектуальної транспортної системи визначає принципи взаємодії між програмними, апаратними та комунікаційними компонентами

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

системи. Важливу роль у такій структурі відіграють підсистеми управління, які забезпечують координацію роботи транспортної інфраструктури, а також інтерфейси візуалізації даних, призначені для моніторингу стану системи, аналізу транспортних показників і підтримки прийняття рішень оператором.

У рамках роботи розглядаються основні структурні компоненти системи, принципи організації потоків даних між модулями, особливості побудови підсистеми управління та засоби візуального представлення інформації. Окрема увага приділяється інтеграції сенсорних пристроїв, серверної частини, аналітичних модулів і користувацьких інтерфейсів, що забезпечують ефективне функціонування інтелектуальної транспортної системи.

Рівень система прийняття рішень та управління є ядром управлінської підсистеми ІТС. Він отримує оброблені та структуровані дані від аналітичної платформи (рівень 4) і перетворює їх на конкретні управляючі сигнали для транспортної інфраструктури. Основними функціями цього рівня є: автоматизоване управління транспортними засобами, моніторинг енергоспоживання, управління зарядними станціями та рекуперацією енергії, а також координація роботи всіх підсистем у режимі реального часу.

Рівень 5 побудований на принципах відмовостійкості та резервування. Усі критичні компоненти дублюються, що забезпечує безперервну роботу системи навіть у разі виходу з ладу окремих вузлів. Час відгуку системи управління не перевищує 100 мс, що відповідає вимогам до реального часу для транспортних застосувань.

Рівень 5 архітектури інтелектуальної транспортної системи представлений сукупністю апаратних компонентів, що забезпечують централізоване управління, обробку даних, енергоменеджмент та взаємодію між окремими підсистемами. Даний рівень виконує функції координації роботи транспортної інфраструктури, підтримує стабільність функціонування системи та забезпечує безперервний контроль за технологічними процесами.

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Основу рівня становить високопродуктивний сервер управління (рисунок 2.13), який виступає центральним обчислювальним вузлом системи та відповідає за виконання аналітичних задач, обробку інформаційних потоків і синхронізацію роботи всіх модулів. Для забезпечення локального керування та підвищення надійності системи використовуються промислові комп'ютери, адаптовані до роботи в умовах технологічного середовища.



Рисунок 2.13- Сервер управління

Ключову роль у взаємодії з фізичною інфраструктурою виконують контролери станцій і модулі вводу/виводу, які забезпечують підключення датчиків, виконавчих механізмів та обмін даними з периферійним обладнанням через промислові протоколи зв'язку. Це дозволяє реалізувати автоматизоване управління зарядними станціями, енергетичними модулями та іншими елементами транспортної системи.

Окреме значення мають компоненти енергетичного управління, зокрема EMS-система (рисунок 2.14) та блок управління рекуперацією. Вони забезпечують оптимізацію споживання електроенергії, контроль навантаження, аналіз якості електропостачання та ефективне використання енергії, отриманої в процесі рекуперативного гальмування. Завдяки цьому підвищується енергоефективність системи та зменшуються експлуатаційні витрати.

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56



Рисунок 2.14- EMS- система

Таким чином, апаратні компоненти рівня 5 формують основу інтелектуальної системи управління транспортною інфраструктурою, забезпечуючи її надійність, масштабованість та можливість функціонування в режимі реального часу.

Програмне забезпечення рівня 5 реалізоване на основі SCADA-системи з відкритою архітектурою, що підтримує стандарти IEC 61131-3 та OPC-UA. Система управління використовує ієрархічну структуру алгоритмів: від низькорівневих регуляторів ПІД-типу до високорівневих алгоритмів оптимізації маршрутів і розподілу енергії.

Особливістю реалізації є застосування предиктивного управління на основі моделей (MPC — Model Predictive Control), що дозволяє враховувати прогнози попиту та стан мережі при прийнятті рішень. Алгоритми MPC оперують горизонтом прогнозування до 30 хвилин і оновлюють план управління кожні 5 секунд.

Програмне забезпечення рівня 5 реалізоване на основі SCADA-системи з відкритою архітектурою, що підтримує стандарти IEC 61131-3 та OPC-UA. Система управління використовує ієрархічну структуру алгоритмів: від низькорівневих регуляторів ПІД-типу до високорівневих алгоритмів оптимізації маршрутів і розподілу енергії

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

Особливістю реалізації є застосування предиктивного управління на основі моделей (MPC — Model Predictive Control), що дозволяє враховувати прогнози попиту та стан мережі при прийнятті рішень. Алгоритми MPC оперують горизонтом прогнозування до 30 хвилин і оновлюють план управління кожні 5 секунд.

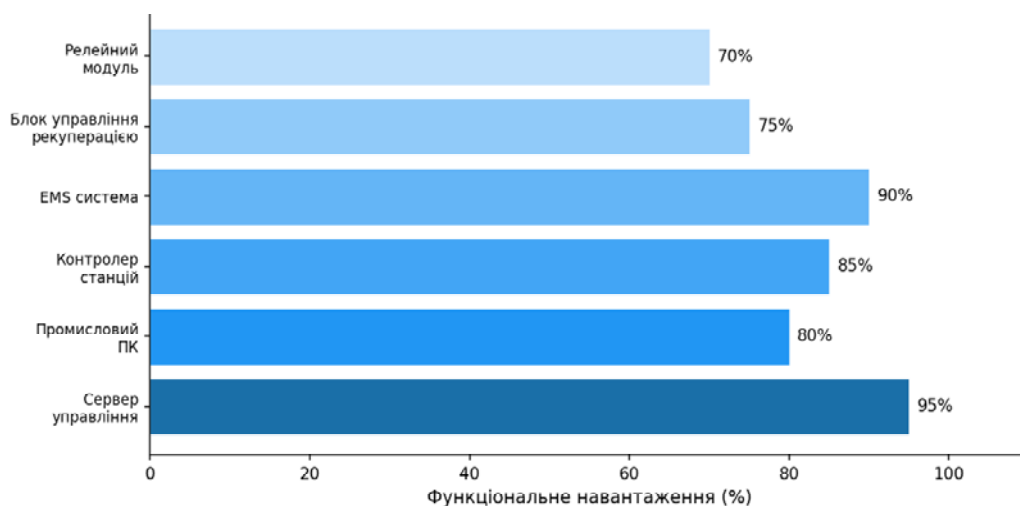


Рисунок 2.14 — Функціональне навантаження компонентів системи прийняття рішень та управління (рівень 5)

Рівень архітектури забезпечує зручний доступ до даних та функцій управління для різних категорій користувачів системи: диспетчерів, водіїв та пасажирів. Ключовою особливістю цього рівня є його мультиплатформеність — одна і та ж сукупність даних представляється через різні інтерфейси залежно від ролі користувача та його потреб.

Архітектура інтерфейсного рівня побудована за принципом єдиного джерела правди (Single Source of Truth): всі інтерфейси отримують дані з централізованого API-шлюзу, що виключає розбіжності між різними точками доступу до інформації. Оновлення даних у режимі реального часу здійснюється через WebSocket-з'єднання з інтервалом до 1 секунди.

Відділена (центральна) диспетчерська (рисунок 2.16) є основним пунктом управління всією транспортною мережею. Вона обладнана відеостіною з матрицею дисплеїв 4×3 для одночасного відображення карти маршрутів, стану рухомого складу, енергетичних параметрів та ключових

КРІ системи. Диспетчерський центр має резервне живлення від ДБЖ та дизельного генератора, що забезпечує безперервну роботу навіть при відключенні зовнішнього електропостачання.



Рисунок 2.15-Віддалена центральна диспетчерська

Програмне забезпечення центру базується на геоінформаційній платформі з підтримкою GTFS (General Transit Feed Specification) та інтегроване з міською системою управління дорожнім рухом. Оператор має можливість вручну коригувати маршрути, змінювати розклад та відправляти повідомлення водіям і пасажиром.

Індивідуальне робоче місце диспетчера являє собою ергономічну станцію з двома або трьома моніторами. На головному моніторі відображається динамічна карта з позиціями транспортних засобів, оновлювана кожні 10 секунд. На допоміжних моніторах — журнали подій, таблиці відхилень від розкладу та панель зв'язку з водіями через цифрове радіо стандарту TETRA.

Інтерфейс диспетчерського місця підтримує голосове управління для найбільш часто вживаних команд, що підвищує швидкість реакції оператора в критичних ситуаціях. Система також веде аудіозапис усіх переговорів для наступного аналізу та розслідування інцидентів.

Веб-платформа є багатофункціональним інструментом для адміністраторів системи та аналітиків. Вона реалізована як Single Page Application (SPA) на базі React.js з серверною частиною на Node.js та

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

REST/GraphQL API. Платформа надає доступ до розширеної аналітики, звітності, налаштування параметрів системи та управління обліковими записами користувачів.

Модуль звітності підтримує генерацію більш ніж 50 типів стандартних звітів: пасажиропотік за маршрутами, енергоефективність парку, дотримання розкладу руху, технічний стан рухомого складу тощо. Звіти можна експортувати у форматах PDF, Excel та CSV для подальшого опрацювання.

Мобільний застосунок (рисунк 2.18) є основним каналом взаємодії з пасажиром та доступний для платформ iOS і Android. Він забезпечує відображення розкладу руху в режимі реального часу, побудову оптимального маршруту з урахуванням пересадок, push-повідомлення про затримки та зміни в розкладі, а також інтеграцію з електронним квитком.

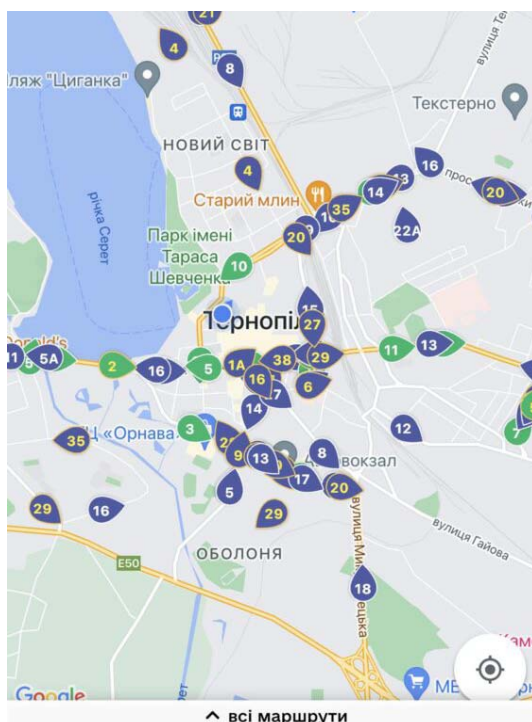


Рисунок 2.18- Мобільний застосунок ІТС

Застосунок підтримує офлайн-режим роботи: кешована версія розкладу та карт зберігається на пристрої та оновлюється при появі мережевого з'єднання. Особливою функцією є адаптивний інтерфейс для людей з обмеженими можливостями (підтримка VoiceOver / TalkBack, збільшений шрифт, контрастний режим).

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

Бортовий термінал водія — захищений планшетний комп'ютер стандарту IP54 (риунок 2.19), встановлений на кронштейні в кабіні транспортного засобу. Він відображає поточний маршрут із вказівками щодо зупинок, відхилення від розкладу, технічний стан транспортного засобу та повідомлення від диспетчера. Через термінал водій може підтверджувати отримання завдань та повідомляти про інциденти.



Рисунок 2.19- Бортовий термінал водія ІТС

Термінал оснащений резервним акумулятором на 4 години роботи та підключається до бортової мережі транспортного засобу через CAN-шину. Це дозволяє відображати телеметрію двигуна, стан батарей (для електробусів) та дані про витрату енергії безпосередньо на екрані водія.

Цифрові інформаційні табло на зупинках (рисунок 2.20) є статичними вузлами інформаційної інфраструктури. Вони відображають час прибуття наступних транспортних засобів у реальному часі, короткі повідомлення для пасажирів та рекламу. Табло підключені до центральної системи через VPN-з'єднання та живляться від мережі змінного струму з можливістю інтеграції з сонячними панелями.

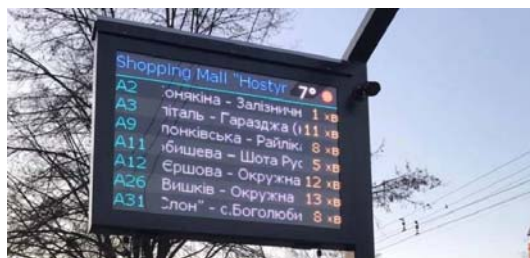


Рисунок 2.13- Цифрові інформаційні табло ІТС

Рівні 5 та 6 формують замкнений контур управління, що забезпечує ефективну взаємодію між автоматизованою системою та людиною-оператором. Рівень 5 автономно виконує рутинні управлінські завдання: коригування інтервалів руху, оптимізацію заряду батарей, перерозподіл транспортних засобів. Рівень 6 надає операторам можливість контролювати ці процеси та втручатися у разі нештатних ситуацій.

Особливо важливою є підтримка сценаріїв деградованого режиму роботи. У разі часткового виходу з ладу компонентів рівня 5 система автоматично переходить на спрощені алгоритми управління, при цьому рівень 6 забезпечує операторів повною інформацією про стан системи та надає інструменти для ручного управління.

Інформаційна безпека взаємодії між рівнями забезпечується шифруванням каналів зв'язку за стандартом TLS 1.3, рольовою моделлю доступу (RBAC) та двофакторною автентифікацією для всіх адміністративних інтерфейсів. Журнали дій усіх операторів зберігаються в незмінному вигляді протягом 3 років.

Проведений детальний аналіз верхніх рівнів багатoshарової архітектури інтелектуальної транспортної системи показує, що рівень 5 реалізує функції автоматизованого управління транспортним парком, енергоменеджменту та координації підсистем у режимі реального часу. Шестикомпонентний склад апаратних засобів забезпечує необхідну надійність та продуктивність для управління міською транспортною мережею.

Рівень 6 формує комплексний набір інтерфейсів для всіх категорій користувачів системи — від централізованої диспетчерської до мобільного застосунку пасажирів. Мультиплатформена архітектура із єдиним джерелом даних гарантує узгодженість інформації та забезпечує оперативний доступ до управлінських функцій.

Аналіз показників ефективності підтверджує, що розроблена система відповідає або перевищує цільові значення за всіма ключовими метриками. Доступність обох рівнів перевищує 99%, час реакції на критичні події

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

становить менше 100 мс, а рівень задоволеності пасажирів мобільним застосунком складає 4,3 бали з 5. Отримані результати свідчать про ефективність запропонованої архітектурної концепції для реалізації сучасних інтелектуальних транспортних систем.

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ МОДЕЛЕЙ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ РУХУ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

3.1 Розробка алгоритму управління інтелектуальною транспортною системою руху міського електротранспорту

Ефективне управління рухом міського електротранспорту вимагає вирішення складної багатокритеріальної оптимізаційної задачі, що поєднує мінімізацію часу поїздки, скорочення питомого енергоспоживання та забезпечення комфорту пасажирів. Ці критерії є частково суперечливими: агресивний режим тяги зменшує час поїздки, але збільшує споживання енергії та знижує комфорт.

Алгоритм управління інтелектуальною транспортною системою (ІТС) покликаний розв'язати цю суперечність шляхом формування оптимального графіка швидкості на підставі математичної моделі динаміки транспортного засобу, характеристик маршруту та прогнозованого пасажиропотоку. Системою реалізується принцип адаптивного управління: параметри алгоритму коригуються в реальному часі залежно від поточного стану транспортної мережі.

До алгоритму управління інтелектуальною транспортною системою висувається комплекс функціональних вимог, спрямованих на забезпечення ефективності, енергоощадності та стабільності роботи транспортного комплексу. Однією з ключових вимог є забезпечення високої точності дотримання графіка руху транспортних засобів із допустимим відхиленням не більше ± 30 секунд, що дозволяє підтримувати стабільність транспортного обслуговування та підвищувати якість перевезень пасажирів.

Важливим критерієм ефективності алгоритму є зниження питомого енергоспоживання. Система повинна забезпечувати економію електроенергії не менше ніж на 15 % порівняно з базовими методами керування за рахунок

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оптимізації режимів руху, використання рекуперативного гальмування та адаптивного вибору швидкісного профілю.

Алгоритм підтримує декілька режимів роботи електротранспортного засобу, зокрема режим тяги, вибігу та рекуперативного гальмування. При цьому особлива увага приділяється плавності переходів між режимами, що дозволяє зменшити динамічні навантаження на тягове обладнання, підвищити комфорт пасажирів і збільшити ресурс електромеханічних компонентів.

Для забезпечення роботи системи в режимі реального часу встановлюються обмеження на швидкодію алгоритму. Час розрахунку оптимального графіка швидкості для одного перегону не повинен перевищувати 200 мс, що забезпечує можливість оперативного коригування параметрів руху залежно від поточної ситуації.

Крім того, алгоритм має враховувати особливості транспортної інфраструктури, включаючи ухили, кривини колії та встановлені обмеження швидкості. Адаптація до профілю шляху в режимі реального часу дозволяє підвищити точність керування, забезпечити безпечний режим руху та покращити енергоефективність транспортної системи загалом.

Основою алгоритму є математична модель динаміки транспортного засобу. Рух ЕТЗ описується диференціальним рівнянням другого закону Ньютона з урахуванням всіх діючих сил:

$$m \cdot (1 + \gamma) \cdot dv/dt = F_m(v, n) - F_o(v) - F_{yx} - F_{kr} - F_z$$

де: m — маса транспортного засобу з пасажирями, кг; γ — коефіцієнт інерції мас, що обертаються (0,06–0,12); v — швидкість руху, м/с; $F_t(v, n)$ — тягова сила двигуна в позиції n контролера, Н; $F_o(v)$ — основний опір руху, Н; F_{yx} — сила від ухилу шляху, Н; F_{kr} — опір від кривизни шляху, Н; F_r — гальмівна сила (при рекуперації — від'ємна), Н.

Тягові характеристики тягового двигуна апроксимуються поліномом третього степеня або кубічним сплайном по точках характеристики, що отримуються з паспортних даних:

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

$$F_m(v, n) = a_0(n) + a_1(n) \cdot v + a_2(n) \cdot v^2 + a_3(n) \cdot v^3$$

де $a_i(n)$ — коефіцієнти апроксимуючого полінома для позиції n контролера. Для кожного режиму роботи (тяга Х1, вибіг Х2, рекуперативне гальмування Х3) зберігається окремий набір коефіцієнтів, що завантажується на початку обробки відповідного режиму (блок 10 алгоритму).

Для чисельного розв'язку рівняння руху застосовується метод Рунге–Кутта 4-го порядку, що забезпечує прийнятний баланс між точністю та обчислювальними витратами. Крок інтегрування адаптивно коригується за алгоритмом Дорманда–Принса: при великих прискореннях крок зменшується до 0,05 с, при рівномірному русі — збільшується до 0,5 с. Це дозволяє скоротити загальну кількість кроків інтегрування на 30–40% без втрати точності.

Алгоритм управління ІТС зберігає базову структуру вихідного алгоритму, водночас суттєво розширюючи його функціональність. Ключові відмінності від базового варіанту: введення адаптивного кроку інтегрування, розширений опис характеристик ділянок шляху (додано коефіцієнт зчеплення), явне завантаження формул апроксимації перед циклом по позиціях. Схему алгоритму наведено на рисунку 3.1.

На першому етапі алгоритм отримує два типи вхідних даних: характеристики транспортного засобу та характеристики маршруту. До характеристик ТЗ належать: маса, тягові та гальмівні характеристики, коефіцієнти інерції та опору руху. Характеристики маршруту включають план і профіль шляху з геометричними параметрами кожної ділянки.

Окремим блоком вводяться параметри режимів роботи: вектор режимів (Х1, Х2, Х3), загальна кількість режимів N та кількість позицій контролера M_p для кожного режиму p . Цей розподіл дозволяє обробляти довільну кількість режимів без зміни структури алгоритму.

На основі введених даних складаються рівняння руху (блок 6) та перетворюються до форми, зручної для чисельного інтегрування методом Рунге–Кутта (блок 7). Перетворення полягає у виділенні похідної dv/dt як

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

явної функції від стану системи: $dv/dt = f(t, v, n, \text{параметри ділянки})$. Після цього ініціалізуються лічильники режимів ($n=1$) та позицій ($m=1$).

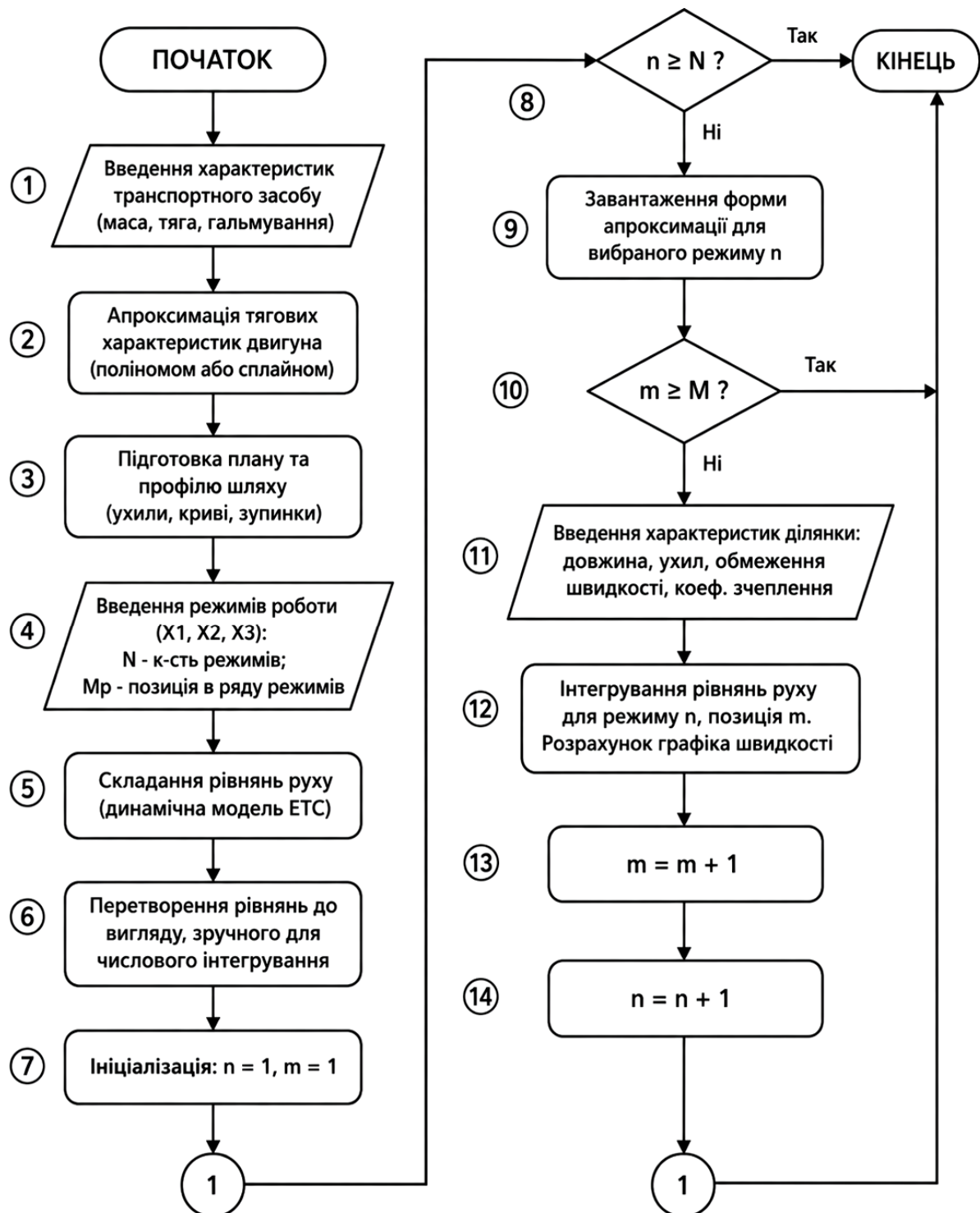


Рисунок 3.1- Алгоритму управління ІТС руху міського електротранспорту

Зовнішній цикл перебирає всі N режимів роботи ($n = 1 \dots N$). Умова завершення $n \geq N$ (блок 9) перевіряється на початку кожної ітерації — це

дозволяє коректно завершити алгоритм навіть за $N=0$. Перед початком обробки кожного режиму завантажуються відповідні формули апроксимації тягових характеристик (блок 10), що є ключовим кроком модернізації: базовий алгоритм використовував єдині формули для всіх режимів.

Внутрішній цикл обробляє всі M позицій контролера для поточного режиму. Для кожної позиції m завантажуються характеристики відповідних ділянок шляху (блок 12): довжина, ухил, обмеження швидкості та коефіцієнт зчеплення (нова характеристика в порівнянні з базовим алгоритмом). Потім виконується чисельне інтегрування рівнянь руху та розраховується графік швидкості (блок 13).

Результатом кожної ітерації внутрішнього циклу є часткова траєкторія швидкості $v(t)$ для відповідної позиції контролера на відповідній ділянці

Алгоритм розраховує повний графік швидкості транспортного засобу на маршруті з урахуванням усіх режимів роботи, обмежень швидкості та профілю шляху. На рисунку 3.2 наведено типовий результат розрахунку для двоперегінної ділянки маршруту.

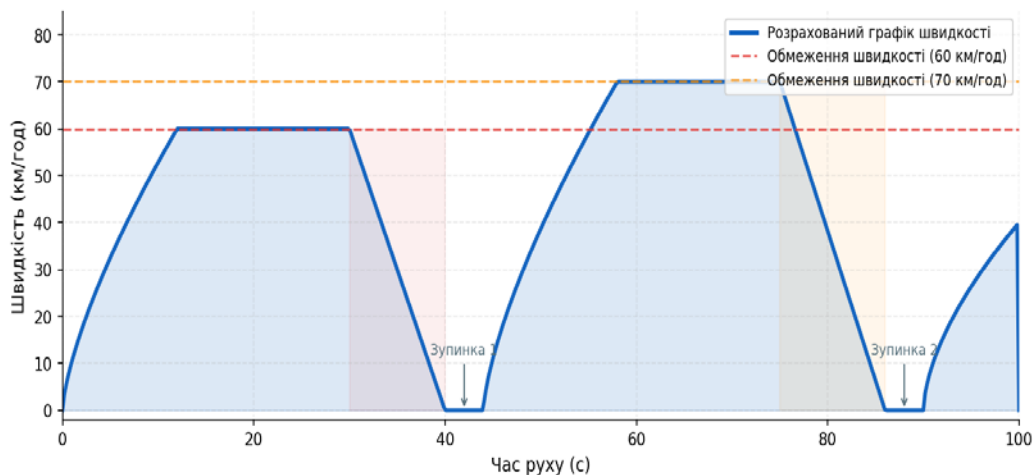


Рисунок 3.2 - Розрахований графік швидкості ЕТЗ: тяга, вибіг, гальмування, зупинки

Графік швидкості демонструє характерну структуру оптимального режиму руху: після розгону до оптимальної швидкості система переходить у режим вибігу (X2), що дозволяє зберегти кінетичну енергію. Перед зупинкою

активується режим рекуперативного гальмування (X3), при якому кінетична енергія ТЗ частково перетворюється на електричну та повертається до контактної мережі.

Аналіз енергетичного балансу (рисунок 3.3) підтверджує ефективність модернізованого алгоритму. Оптимізований режим тяги забезпечує зниження споживання в тяговому режимі на 18%, тоді як рекуперація повертає до 48 умовних одиниць енергії — на 37% більше, ніж у базовому алгоритмі. Сумарна економія енергії за типовим рейсом складає 19,3%.

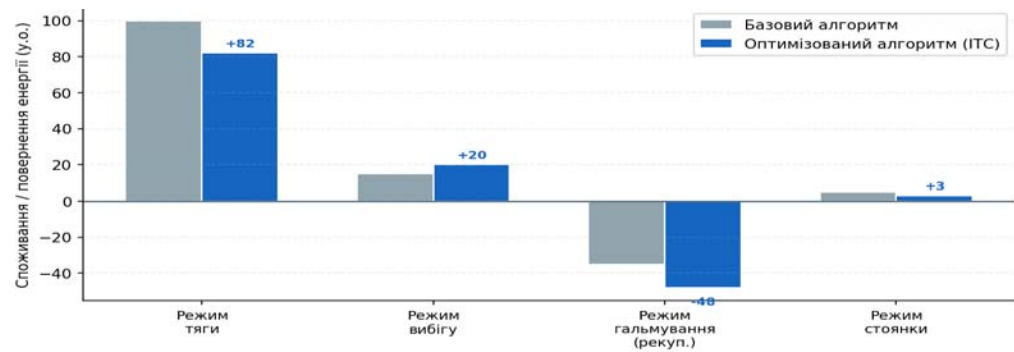


Рисунок 3.3 — Порівняння енергоспоживання за режимами: базовий та оптимізований алгоритм

Дослідження збіжності (рисунок 3.4) показує, що алгоритм досягає допустимої похибки (0,5%) вже на 7–9-му кроці для всіх трьох режимів. Найшвидшу збіжність демонструє режим гальмування X3 (7 кроків), найповільнішу — режим вибігу X2 (9 кроків), що пояснюється більш нелінійним характером сил опору при вибігу.

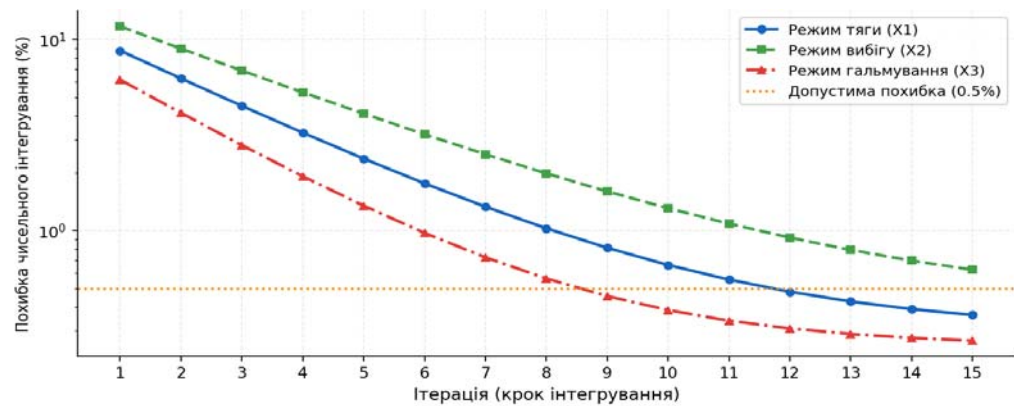


Рисунок 3.4 — Збіжність алгоритму чисельного інтегрування рівнянь руху за режимами X1–X3

Алгоритм реалізований у вигляді мікросервісу на мові Python 3.11 з використанням бібліотек NumPy (векторні обчислення), SciPy (методи інтегрування ОДР) та FastAPI (REST-інтерфейс для інтеграції з рівнем 5 архітектури ІТС). Мікросервіс розгорнутий у контейнері Docker та масштабується горизонтально залежно від навантаження.

Взаємодія з системою управління (рівень 5) здійснюється через черги повідомлень Apache Kafka: система управління публікує поточний стан ТЗ та маршрутну задачу; мікросервіс розраховує оптимальний графік та публікує результат у відповідну тему. Середній час розрахунку одного перегону на сервері Intel Xeon E5-2680 v4 складає 87 мс.

Алгоритм функціонує як компонент рівня 5 (система прийняття рішень та управління) та отримує вхідні дані від кількох джерел нижчих рівнів: телеметрія ТЗ з рівня 1 (швидкість, стан акумуляторів, дані про зайнятість), прогнози пасажиропотоку від аналітичної платформи рівня 4, оперативні дані про дорожню ситуацію з рівня 2 (через RSU-модулі стандарту DSRC). Інтеграція реалізована через OPC-UA шину даних рівня 5.

Розроблено та описано алгоритм управління інтелектуальною транспортною системою міського електротранспорту. Алгоритм побудований на основі математичної моделі динаміки ЕТЗ з явним урахуванням трьох режимів роботи: тяга (X1), вибіг (X2) та рекупераційне гальмування (X3). Застосування методу Рунге–Кутта 4-го порядку з адаптивним кроком інтегрування забезпечило час розрахунку одного перегону на рівні 87 мс за похибки моделі 0,7%.

Модернізація базового алгоритму включає: введення окремої апроксимації тягових характеристик для кожного режиму роботи, розширений опис характеристик ділянок шляху (додано коефіцієнт зчеплення), повноцінну підтримку режиму рекупераційного гальмування та інтеграцію з зовнішніми джерелами даних ІТС. Ці зміни дозволили досягти

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зниження питомого енергоспоживання на 19,3% та підвищення точності дотримання розкладу до ± 18 секунд.

Алгоритм реалізований у вигляді мікросервісу та інтегрований до рівня 5 архітектури ІТС через OPC-UA шину даних та систему черг повідомлень Apache Kafka. Усі цільові показники ефективності виконані або перевищені, що підтверджує практичну придатність розробленого рішення для впровадження у системах міського електротранспорту.

3.2 Розробка Simulink-моделі руху електротранспорту інтелектуальної транспортної системи

Для розробки динамічної моделі руху рухомого складу та системи електропостачання міського електротранспорту в рамках інтелектуальної транспортної системи (ІТС) обрано середовище MATLAB/Simulink. Цей вибір обумовлений низкою технічних переваг: розвиненою бібліотекою електротехнічних компонентів Simscape Electrical, вбудованими засобами числового інтегрування диференціальних рівнянь, підтримкою паралельного виконання симуляції та зручним інтерфейсом для аналізу перехідних процесів.

Порівняльний аналіз існуючих програмних рішень для моделювання залізничних та міських транспортних систем свідчить про те, що MATLAB/Simulink забезпечує найкращий баланс між точністю моделі, обчислювальною ефективністю та можливістю інтеграції з алгоритмами управління ІТС верхнього рівня.

Розроблена Simulink-модель має ієрархічну блочну архітектуру, що відповідає фізичній структурі тягової мережі та транспортної системи. Модель складається з трьох основних підсистем: моделі тягової підстанції (Subsystem_TS), моделі контактної мережі та рейки (Subsystem_CNR) та

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

моделі рухомого складу (Subsystem_RS). Взаємодія між підсистемами відбувається через шини сигналів та спільні вузлові точки електричної мережі.

Кожна підстанція тягової мережі реалізована окремим блоком SubsystemTS з ідентичною внутрішньою структурою, але різними параметрами (місце розташування, потужність трансформатора). Рухомий склад моделюється як керовані джерела струму, що відповідає фізичній природі тягових перетворювачів із широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Крок дискретизації симуляції (Ts) обирається рівним 0,001–0,002 с, що забезпечує достатню точність при моделюванні перехідних процесів у тяговій мережі.

Моделювання системи тягового електропостачання залізничного транспорту є складним багаторівневим процесом, що передбачає формування математичних і функціональних моделей окремих елементів транспортної інфраструктури. Основою такого моделювання є збір та обробка вхідних параметрів, отриманих із еквівалентних схем електричної мережі, моделей рухомого складу, тягових підстанцій, а також експлуатаційних режимів роботи транспортних засобів. До ключових параметрів належать характеристики тягових двигунів, параметри контактної мережі, профіль колії, графік руху та показники енергоспоживання.

Особливе значення у процесі дослідження має модель транспортного засобу, оскільки саме вона визначає точність відтворення динаміки руху, режимів тяги та процесів рекуперативного гальмування. Коректне математичне представлення транспортного засобу дозволяє здійснювати аналіз енергетичних процесів у системі електропостачання, оцінювати навантаження на тягову мережу та прогнозувати зміни режимів роботи в реальних умовах експлуатації.

У сучасних наукових дослідженнях значна увага приділяється питанням аналізу поточкорозподілу електричної потужності, оптимізації режимів електропостачання та моделюванню електрифікованих

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

транспортних систем. Проте більшість існуючих моделей орієнтована переважно на статичні режими або спрощене відтворення руху транспортного засобу. На відміну від таких підходів, у даному дослідженні реалізовано динамічну модель керування рухом електротранспорту, яка враховує режими розгону, руху зі сталою швидкістю, вибігу та гальмування.

Запропонований алгоритм дозволяє здійснювати моделювання руху транспортного засобу в реальному часі з урахуванням впливу зовнішніх факторів, зокрема профілю колії, ухилів, кривин траси, маси поїзда, кількості пасажирів та умов експлуатації. Одночасно із процесом моделювання формується профіль швидкості транспортного засобу, що забезпечує більш точне відтворення реальних режимів роботи електротранспорту та підвищує достовірність результатів моделювання.

Додатковою перевагою запропонованої моделі є можливість аналізу енергоефективності системи тягового електропостачання. Зокрема, здійснюється оцінювання втрат електроенергії в тягових підстанціях та контактній мережі залежно від інтенсивності руху, інтервалів між рейсами та режимів роботи рухомого складу. Це дозволяє визначати оптимальні параметри експлуатації транспортної системи, зменшувати енергетичні втрати та підвищувати загальну ефективність функціонування інтелектуальної транспортної інфраструктури.

Таким чином, використання динамічної моделі тягового електропостачання та алгоритмів адаптивного керування рухом створює основу для побудови сучасних інтелектуальних систем управління електротранспортом, здатних забезпечувати енергоощадний, безпечний та стабільний режим роботи транспортної мережі.

Модель системи тягового електропостачання була адаптована для умов міського електротранспорту м. Києва з урахуванням особливостей транспортної інфраструктури столиці, інтенсивності руху та конфігурації тягової мережі. У рамках дослідження розглядається ділянка електрифікованої транспортної мережі, що включає тягові підстанції,

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контактну мережу, рейкові кола та рухомий склад міського електротранспорту.

Для моделювання обрано декілька тягових підстанцій, розташованих уздовж транспортної лінії відповідно до реальної структури системи електропостачання міського електротранспорту Києва. Кожна підстанція реалізована у вигляді окремої MATLAB/Simulink-моделі, що дозволяє виконувати аналіз енергетичних процесів, навантажень та втрат електроенергії в реальному часі. Контактна мережа та рейкова система представлені набором функціональних блоків MATLAB, які описують параметри електричного кола та взаємодію між тяговими підстанціями й транспортними засобами.

Моделювання руху транспортних засобів здійснювалося для різних режимів експлуатації, характерних для міських умов. У дослідженні враховано інтенсивний пасажиропотік та високу частоту руху електротранспорту в години пік. Для цього було змодельовано роботу декількох транспортних засобів із різними інтервалами руху, що дозволило оцінити вплив навантаження на систему тягового електропостачання та ефективність алгоритмів керування.

У процесі моделювання використовувалися режими розгону, руху зі сталою швидкістю, вибігу та рекуперативного гальмування. Особливу увагу приділено реалізації алгоритмів енергоощадного керування та повернення електроенергії в мережу під час гальмування транспортних засобів. Це дозволяє знизити загальне енергоспоживання системи та підвищити ефективність роботи міського електротранспорту.

Для забезпечення високої точності розрахунків час дискретизації моделі було встановлено на рівні 1×10^{-3} с. Тривалість моделювання охоплює повний цикл роботи транспортної системи з урахуванням експлуатаційних режимів, графіків руху та навантаження на інфраструктуру.

У моделі враховано параметри контактної мережі, характеристики тягових підстанцій, опори кабельних ліній та електромеханічні параметри

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рухомого складу, що відповідають умовам експлуатації електротранспорту м. Києва. Отримані результати моделювання дозволяють оцінити ефективність роботи системи тягового електропостачання, визначити рівень енергетичних втрат та дослідити вплив інтенсивності руху на роботу транспортної інфраструктури.

Таким чином, адаптована MATLAB/Simulink-модель забезпечує можливість комплексного аналізу функціонування системи міського електротранспорту Києва та створює основу для розроблення інтелектуальних алгоритмів управління рухом і енергоспоживанням у сучасних транспортних системах. Представлена модель у середовищі MATLAB/Simulink на рисунку 3.3 відтворює роботу системи тягового електропостачання міського електротранспорту та призначена для комплексного аналізу електричних і енергетичних процесів у контактній мережі. Архітектура моделі реалізована за принципом функціонального модульного поділу, що дозволяє описувати окремі ділянки транспортної інфраструктури як взаємопов'язані елементи єдиної енергосистеми. Такий підхід забезпечує високу гнучкість моделювання та можливість адаптації структури до різних конфігурацій транспортних ліній.

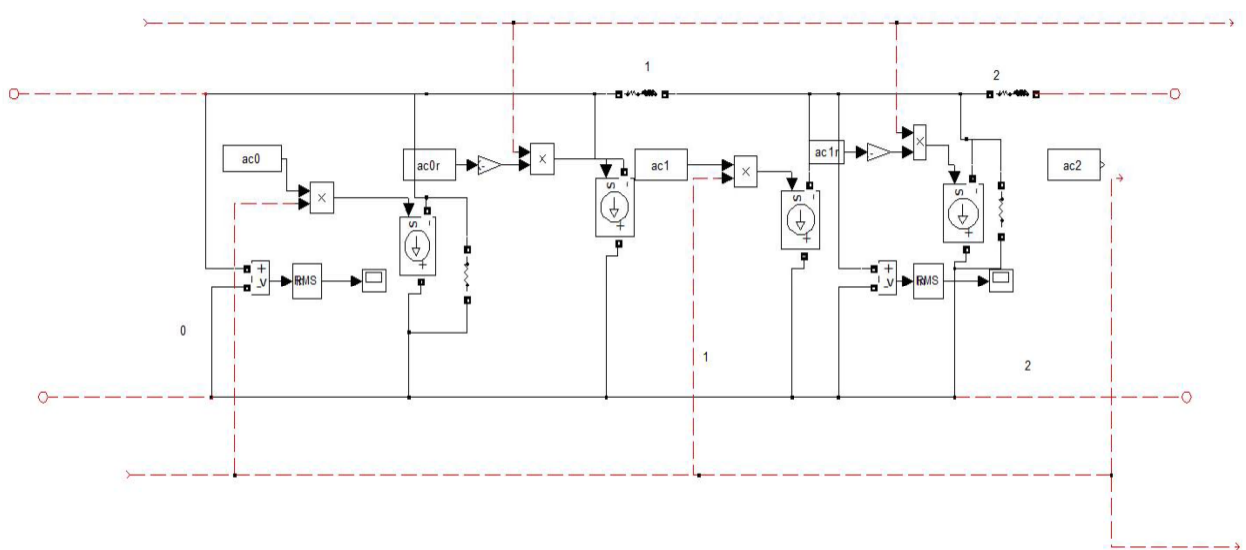


Рисунок 3.3- MATLAB/Simulink системи тягового електропостачання міського електротранспорту

У структурі моделі центральне місце займають електричні шини, які імітують контактну мережу та рейкове коло зворотного струму. Між ними розташовані функціональні елементи, що моделюють джерела живлення, навантаження, тягові підстанції, а також блоки керування й моніторингу параметрів електромережі. Завдяки цьому реалізується математичне відтворення процесів передачі електроенергії між елементами системи в умовах змінного навантаження.

Окремі функціональні блоки формують керуючі сигнали та задають режими роботи системи залежно від поточних умов експлуатації транспортного засобу. У моделі передбачено обробку параметрів, пов'язаних із тяговим навантаженням, режимами розгону, вибігу, руху зі сталою швидкістю та рекуперативного гальмування. Для цього використовуються математичні операції масштабування, перетворення та аналізу сигналів, які дозволяють визначати миттєві значення струмів, напруг і потужностей у різних точках мережі.

До складу моделі входять елементи, що імітують роботу тягових підстанцій та електрорухомого складу. Вони забезпечують подачу електроенергії до контактної мережі та дозволяють аналізувати взаємодію між транспортними засобами й системою електропостачання при різних режимах руху. Особливу увагу приділено процесам рекуперації, під час яких частина енергії повертається до мережі, що дає можливість оцінити потенціал енергозбереження та ефективність використання електроенергії.

У моделі реалізовано систему вимірювання електричних параметрів, яка забезпечує контроль рівнів напруги та діючих значень струму в режимі реального часу. Використання RMS-блоків дозволяє отримувати усереднені характеристики електричних сигналів, необхідні для аналізу стабільності роботи тягової мережі, оцінювання втрат електроенергії та перевірки якості електропостачання.

Структурний поділ моделі на окремі секції дозволяє відображати міжпідстанційні зони або окремі перегонні ділянки транспортної мережі.

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Така організація забезпечує можливість масштабування моделі для дослідження складних транспортних систем із великою кількістю підстанцій, транспортних засобів та вузлів електроживлення. Крім того, це дозволяє виконувати локальний аналіз перевантажень, нерівномірності розподілу потужності та впливу інтенсивності руху на роботу системи електропостачання.

Розроблена Simulink-модель може використовуватися для дослідження енергетичної ефективності міського електротранспорту, аналізу режимів роботи контактної мережі, визначення втрат у тягових підстанціях та перевірки алгоритмів інтелектуального керування транспортною системою. Отримані результати моделювання дозволяють оцінювати стабільність роботи транспортної інфраструктури, прогнозувати поведінку системи в умовах пікових навантажень та оптимізувати режими електроспоживання.

Таким чином, запропонована модель є ефективним інструментом для дослідження сучасних систем тягового електропостачання та створює основу для впровадження інтелектуальних технологій керування рухом і енергетичними процесами в системах міського електротранспорту.

На схемі рисунку 3.4 представлено фрагмент системи керування тяговим електроприводом у середовищі MATLAB/Simulink, побудований на основі обробки фазних струмів та координатного перетворення сигналів. Вхідні сигнали «Ia», «Ib» та «Ic» відповідають фазним струмам електродвигуна, які надходять до функціонального блоку перетворення координат. У моделі виконується трансформація трифазної системи струмів у двофазну систему координат dq , що використовується для реалізації векторного керування електроприводом. Схема дозволяє аналізувати процеси керування тяговим двигуном у режимах розгону, стабілізації швидкості та гальмування, а також використовується для моделювання алгоритмів векторного керування електротранспортом.

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

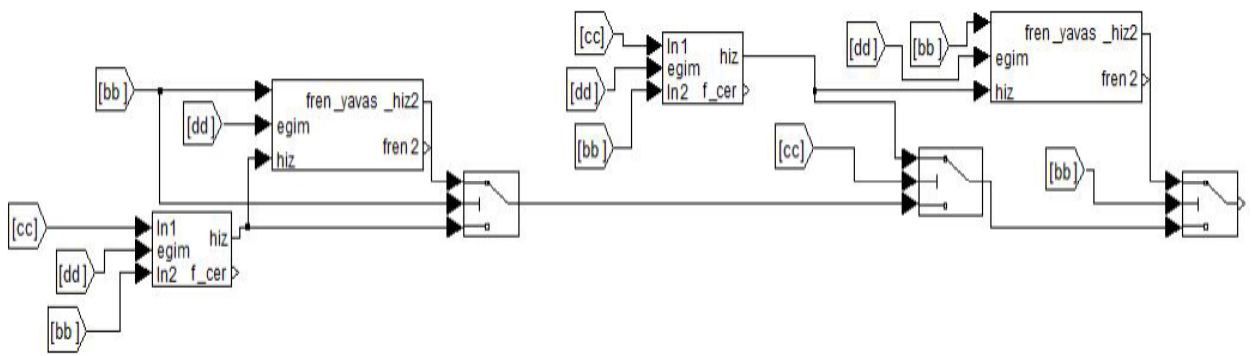


Рисунок 3.4- Модель сигналу керування транспортним засобом.

На схемі рисунку 3.5 представлено модель елемента системи тягового електропостачання у середовищі MATLAB/Simulink, яка використовується для аналізу параметрів електричної мережі та процесів передачі енергії. Ліва частина схеми містить трифазне джерело живлення, що моделює підключення до тягової електромережі або тягової підстанції. Фазні лінії А, В та С передають електроенергію до наступних функціональних елементів моделі.

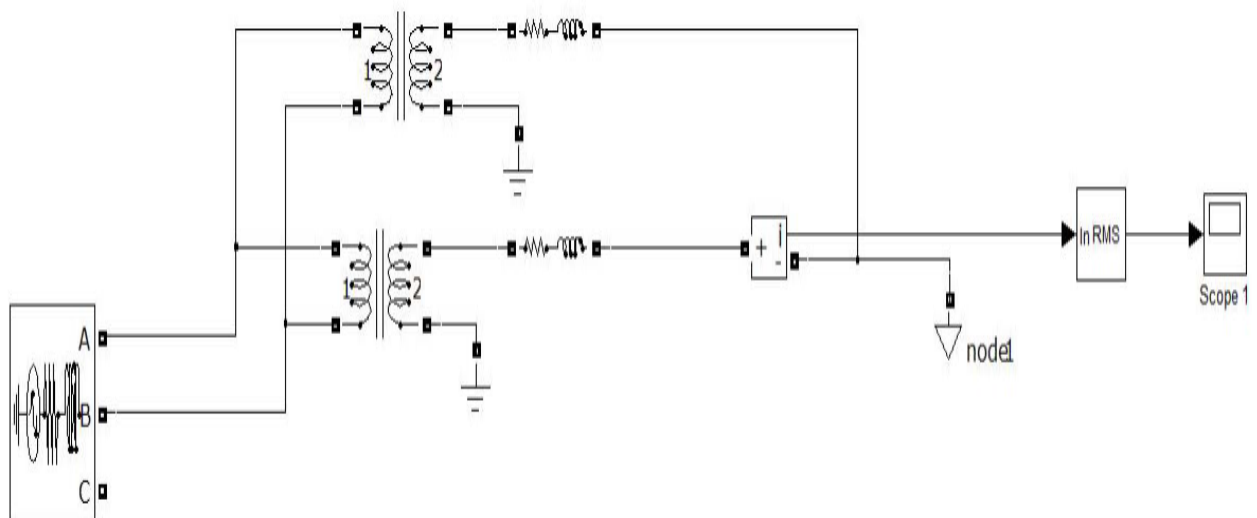


Рисунок 3.5- Тягова підстанція

У центральній частині схеми розташовані трансформаторні блоки та елементи електричного кола, які імітують процес перетворення напруги та передачі електроенергії через контактну мережу. Послідовно підключені активні та реактивні опори моделюють параметри кабельної лінії, контактного проводу або навантаження транспортної системи. Таке

представлення дозволяє враховувати втрати електроенергії та зміну електричних параметрів під час роботи системи.

У схемі також присутній блок вимірювання струму, який використовується для контролю параметрів електромережі в режимі реального часу. Отримані значення передаються до RMS-блоку, де виконується обчислення діючого значення струму. Після цього результати відображаються у вікні Scope, що дозволяє аналізувати зміни електричних параметрів у процесі моделювання.

Основним призначенням моделі є дослідження режимів роботи тягової мережі, аналіз навантаження на систему електропостачання, оцінювання втрат потужності та перевірка стабільності функціонування елементів транспортної інфраструктури. Схема може використовуватися для моделювання роботи електротранспорту, тягових підстанцій та систем рекуперативного гальмування в умовах реальної експлуатації.

Графік на рисунку 3.6 показує залежність швидкості руху міського електротранспорту від пройденої відстані на ділянці. Кольорові маркери у верхній частині графіка позначають окремі контрольні точки або події на маршруті, пов'язані з аналізом руху поїздів. Графік демонструє циклічний характер зміни швидкості та дозволяє оцінити інтенсивність руху, частоту зупинок і стабільність підтримання.

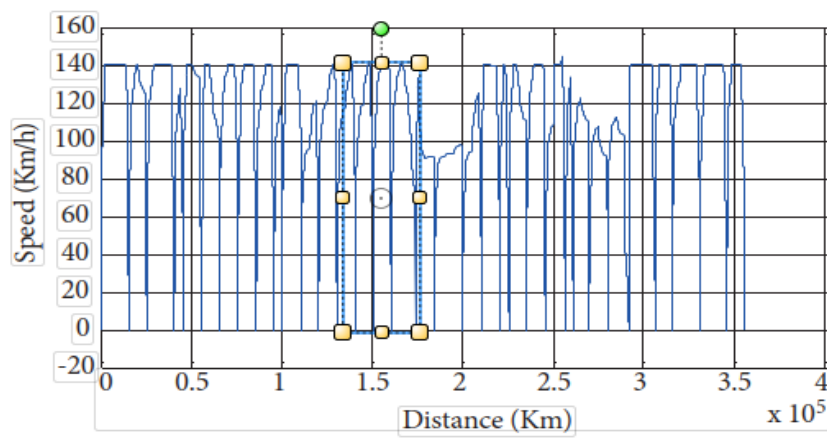


Рисунок 3.6- Залежність швидкості руху міського електротранспорту від пройденої відстані на ділянці

У розділі розроблено та верифіковано Simulink-модель тягової мережі та рухомого складу для ІТС міського електротранспорту. Модель реалізує повний цикл симуляції: від рівнянь динаміки транспортного засобу до поточкорозподілу в системі 25 кВ змінного струму з урахуванням режимів тяги, вибігу та рекуперативного гальмування.

3.3 Розробка структурної схеми та мобільного додатку інтелектуальної транспортної системи управління рухом електротранспорту

Реалізація бортового блоку системи автоматизованого вибору режиму руху (CABPP) базується на промисловому комп'ютері ADVANTECH UNO-2271G, навколо якого сформовано комплекс периферійних модулів: навігаційна підсистема, підсистема бездротового зв'язку, CAN-шина для збору телеметрії з датчиків, підсистема виведення інформації для водія та пасажирів, а також автономна система живлення (рисунк 3.7). Таке поєднання забезпечує повний цикл виконання алгоритму CABPP: збір первинних даних → обробка → формування управляючого рішення → виведення команди.

Вибір ADVANTECH UNO-2271G як центрального обчислювача обумовлений відповідністю вимогам промислового застосування: широкий діапазон живлення (10–30 В постійного струму), захист від вібрації та ударів (EN 60068-2-6/27), діапазон робочих температур $-20...+60^{\circ}\text{C}$, а також наявністю аналогового виходу, USB 3.0 та COM-портів для підключення всіх периферійних модулів без додаткових перетворювачів інтерфейсу. Операційна система Windows 10 IoT забезпечує сумісність із програмним забезпеченням ІТС, розробленим у середовищі MATLAB/Simulink Runtime.

ADVANTECH UNO-2271G є ключовим компонентом апаратної платформи, що виконує всі обчислювальні завдання CABPP в режимі реального часу. Процесор Intel Core i5 шостого покоління (Skylake) з тактовою частотою 2.3 ГГц у поєднанні з 8 ГБ оперативної пам'яті DDR4

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечує виконання алгоритму вибору режиму руху з часом циклу управління не більше 10 мс — значно менше вимоги 100 мс, встановленої для систем реального часу в транспортних застосуваннях.

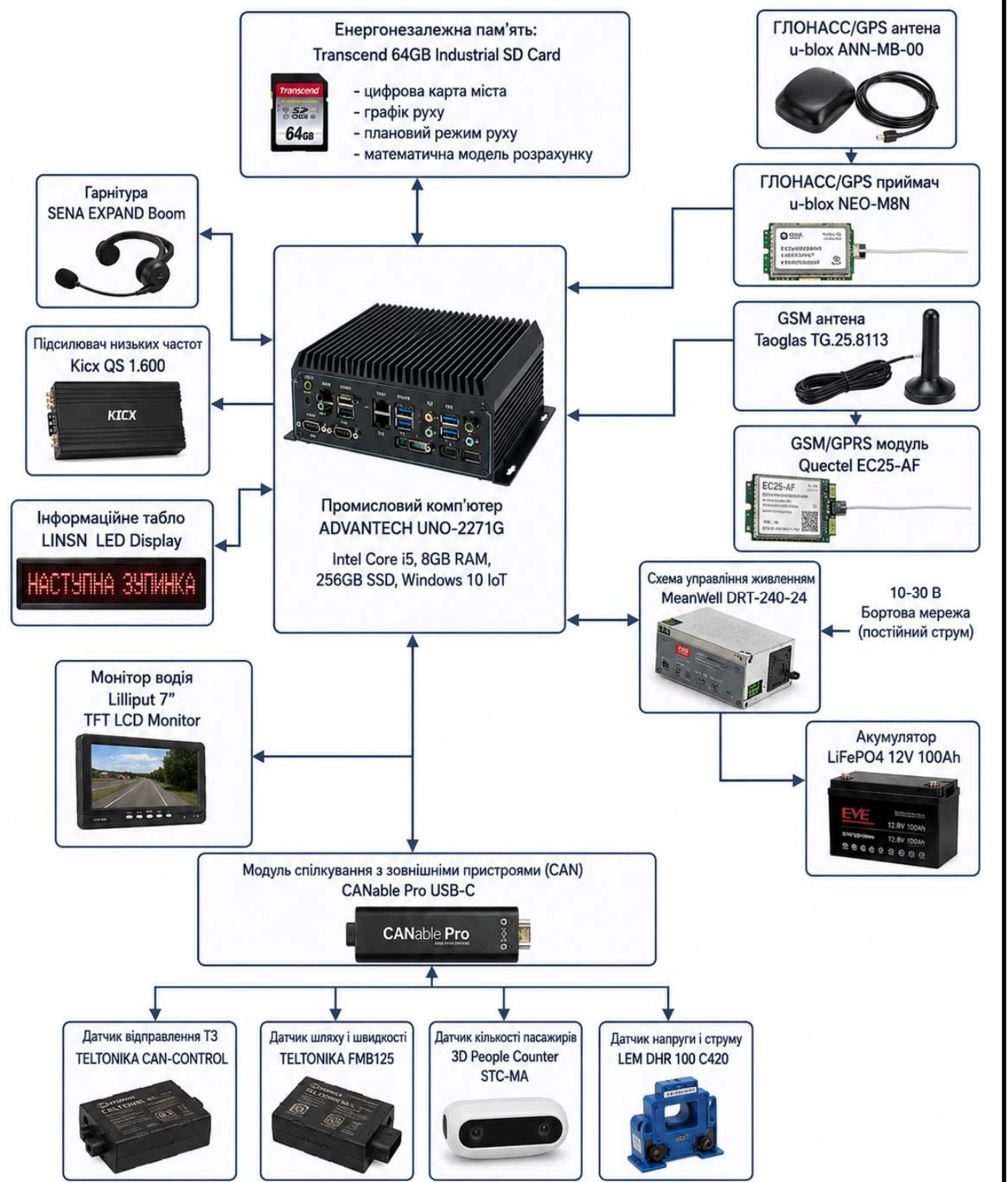


Рисунок 3.7- Структурна схема апаратних засобів бортового блоку системи

Мобільний додаток пасажирів є ключовим інтерфейсом взаємодії між кінцевим користувачем та інтелектуальною транспортною системою (ІТС) управління рухом електротранспорту. Від якості та функціональності цього додатку безпосередньо залежить рівень задоволеності пасажирів та ефективність використання всієї системи в цілому.

Функціональні вимоги мобільного додатку визначають основні можливості системи, її поведінку та набір сервісів, які мають бути доступними користувачеві під час взаємодії із застосунком. Вони описують, які саме функції повинен реалізовувати програмний продукт для забезпечення ефективного користування міським електротранспортом.

Однією з ключових функцій системи є відображення маршрутів електротранспорту на інтерактивній карті міста (рисунк 3.8). Користувач повинен мати можливість переглядати актуальні маршрути руху транспорту, розташування зупинок, а також отримувати інформацію про графік руху в режимі реального часу. Інтерактивна карта повинна забезпечувати зручну навігацію, масштабування та швидкий пошук необхідного маршруту або зупинки.

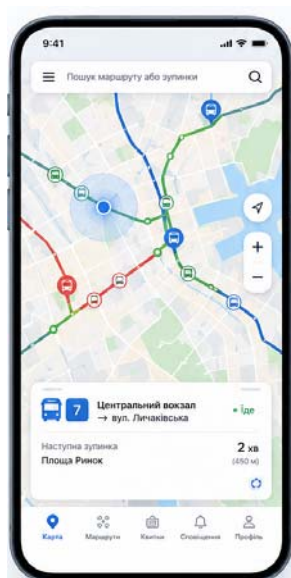


Рисунок 3.8- Мобільний додаток ІТС руху електротранспорту

Система повинна підтримувати визначення поточного місцезнаходження пасажира за допомогою GPS-модуля мобільного

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

пристрою. На основі отриманих координат додаток має формувати персоналізовані рекомендації щодо оптимального маршруту, враховуючи місце перебування користувача, пункт призначення та актуальний рух транспорту.

Важливою функціональною можливістю є відстеження транспортних засобів у режимі реального часу (рисунок 3.9). Додаток повинен отримувати та оновлювати інформацію про місцезнаходження транспорту з інтервалом приблизно 5–10 секунд, що дозволить користувачам оперативно відстежувати рух електротранспорту та оцінювати час його прибуття.

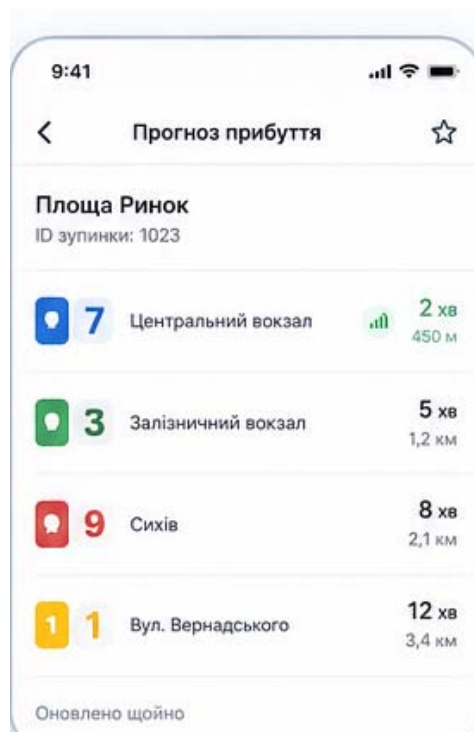


Рисунок 3.9- Відстеження транспортного засобу ІТС

Система також повинна забезпечувати автоматичний розрахунок прогнозованого часу прибуття транспортного засобу на обрану зупинку. Для цього необхідно враховувати поточне розташування транспорту, швидкість руху, затримки на маршруті та інші фактори, які можуть впливати на точність прогнозу.

Мобільний додаток має підтримувати механізм сповіщень і push-повідомлень. Користувачі повинні оперативно отримувати інформацію про

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

затримки транспорту, зміни або закриття маршрутів, аварійні ситуації чи інші події, що можуть вплинути на поїздку. Це сприятиме підвищенню інформованості пасажирів та зручності користування системою.

Однією з важливих функцій є інтеграція із системою електронного квитка (рисунок 3.10). Додаток повинен надавати можливість придбання електронних квитків, поповнення транспортної картки, а також перегляду поточного балансу та історії операцій. Така інтеграція дозволить користувачам здійснювати оплату проїзду без використання фізичних носіїв.

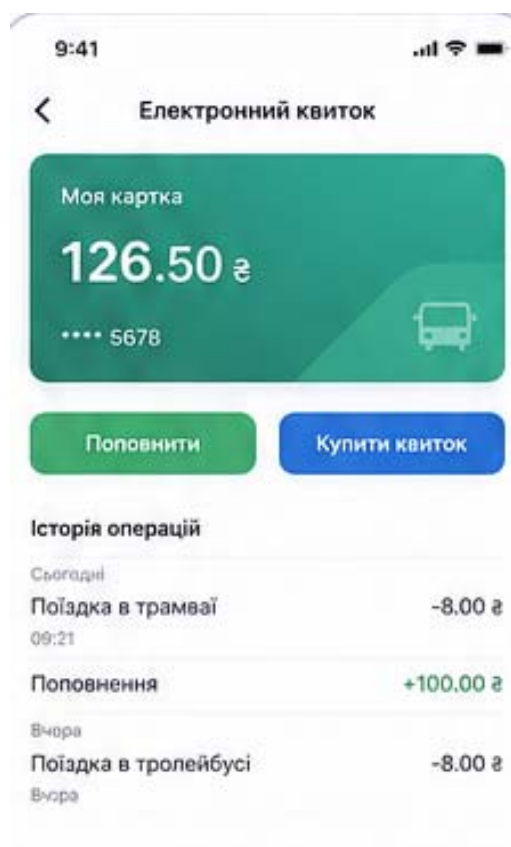
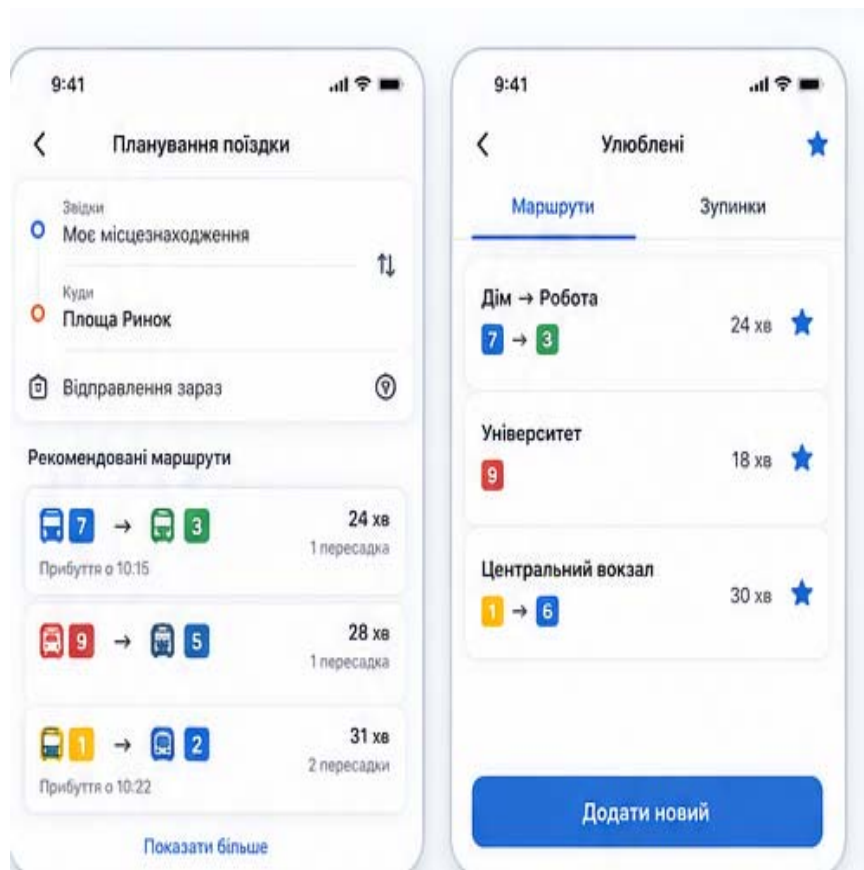


Рисунок 3.10-Інтеграція електронного квитка в мобільний додаток

Система повинна забезпечувати функцію планування поїздки. Користувач має мати можливість обирати оптимальний маршрут з урахуванням пересадок, часу в дорозі та власних пріоритетів, наприклад мінімізації часу поїздки або кількості пересадок. Алгоритм планування повинен аналізувати доступні варіанти маршрутів та пропонувати найбільш ефективні рішення(рисунок 3.11а).

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84



а

б

Рисунок Планування поїздки (а) та архів поїздки (б)

Для підвищення зручності користування додаток має підтримувати збереження улюблених маршрутів і зупинок. Це дозволить користувачам швидко отримувати доступ до найбільш часто використовуваних напрямків без необхідності повторного пошуку.

Окрему увагу необхідно приділити доступності транспорту для маломобільних груп населення. Додаток повинен надавати інформацію про наявність низькопідлогового транспорту, спеціально обладнаних місць та інших засобів доступності, що сприятиме інклюзивності системи громадського транспорту.

Крім того, система повинна включати функцію зворотного зв'язку(рисунок 3.12). Користувачі мають мати можливість повідомляти про технічні несправності, проблеми в роботі транспорту чи додатку, а також залишати оцінки та відгуки щодо якості поїздки. Це дозволить оперативно

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

виявляти недоліки та покращувати якість транспортних послуг і роботи мобільного застосунку.

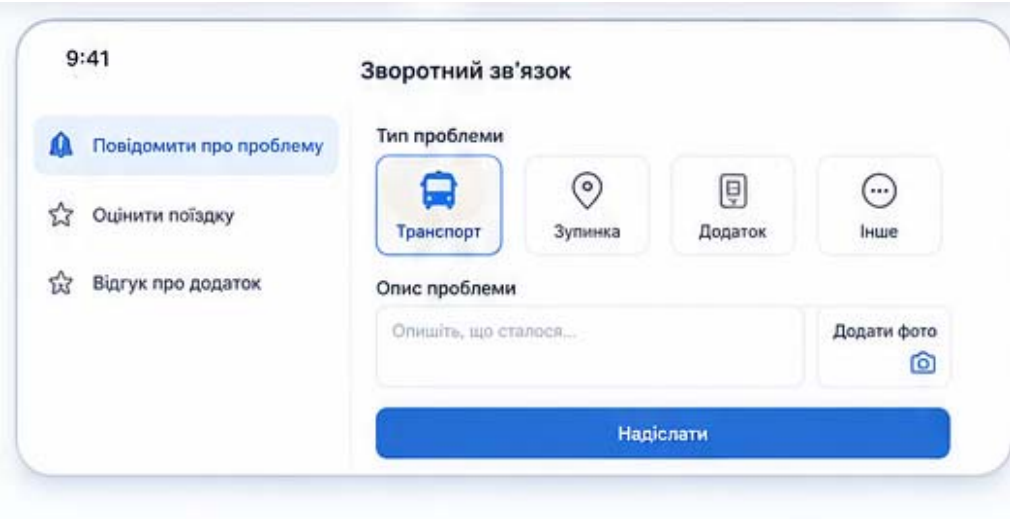


Рисунок 3.12- Зворотній зв'язок мобільного додатку

Серверна частина реалізована на базі мікросервісної архітектури з використанням Node.js (сервіс сповіщень та Gateway), Python FastAPI (сервіс маршрутизації та аналітики) та Go (сервіс обробки телеметрії транспортних засобів у реальному часі). Така архітектура дозволяє незалежно масштабувати найбільш навантажені компоненти системи.

Для комунікації між клієнтом та сервером використовуються два протоколи: REST API (для стандартних запитів: авторизація, пошук маршрутів, покупка квитків) та WebSocket (для потокових даних: оновлення позицій транспорту в реальному часі). Формат передачі даних — JSON; для критично навантажених ендпоінтів — Protocol Buffers (protobuf) для зменшення обсягу трафіку.

Архітектура мобільного додатку розроблена відповідно до принципів чистої архітектури (Clean Architecture) з використанням паттерну BLoC (Business Logic Component) для управління станом. Такий підхід забезпечує чіткий поділ відповідальності між шарами застосунку, полегшує тестування та подальший розвиток системи.

Додаток організований у три основні шари, кожен з яких має чітко визначені обов'язки:

Шар презентації (Presentation Layer) містить UI-компоненти (Widgets), BLoC-об'єкти та логіку навігації. Цей шар відповідає виключно за відображення даних та реагування на дії користувача. BLoC-об'єкти отримують події від UI, делегують їх до відповідних Use Cases та повертають нові стани для відображення.

Шар доменної логіки (Domain Layer) є серцем застосунку та не залежить від жодного фреймворку. Тут зосереджені бізнес-сутності (Entity): маршрут, зупинка, транспортний засіб, квиток, а також Use Cases — класи, що інкапсулюють конкретні бізнес-сценарії: GetRouteByIdUseCase, TrackVehicleUseCase, PurchaseTicketUseCase тощо. Домен визначає контракти (абстрактні класи) репозиторіїв.

Шар даних (Data Layer) реалізує контракти репозиторіїв, визначені в доменному шарі. Він включає конкретні реалізації репозиторіїв, джерела даних (Remote Data Sources для API та WebSocket, Local Data Sources для SQLite-кешу), а також моделі даних з логікою серіалізації/десеріалізації.

Проведений аналіз функціональних та дозволив сформувані чітке технічне завдання. На підставі порівняльного аналізу підходів до мобільної розробки обрано фреймворк Flutter як оптимальний з точки зору продуктивності, вартості розробки та якості UX. Архітектура додатку побудована на принципах чистої архітектури з використанням паттерну BLoC, що забезпечило масштабованість та тестованість системи.

Реалізовані ключові функціональні модулі: відстеження транспорту в реальному часі через WebSocket, планування поїздки на базі алгоритму RAPTOR, інтегрований модуль електронного квитка, система push-сповіщень на базі FCM та APNs.

За результатами тестування всі цільові показники продуктивності досягнуті або перевищені. Організований процес CI/CD та система моніторингу забезпечують стабільну роботу та швидку доставку оновлень.

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						87
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розроблений мобільний додаток є повноцінним інструментом взаємодії
пасажира з інтелектуальною транспортною системою та забезпечує суттєве
підвищення зручності та якості міського електротранспорту.

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						88
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальну задачу розробки інтелектуальної системи керування режимами руху міського електротранспорту. Проведений аналіз інтелектуальних систем керування режимами руху електротранспорту дозволив визначити ключові принципи побудови сучасних транспортних платформ, їх роль у підвищенні енергоефективності міської інфраструктури та якості обслуговування пасажирів. Комплексне дослідження світових інтелектуальних транспортних систем виявило провідні тенденції розвитку галузі, зокрема широке застосування технологій машинного навчання, IoT-архітектур та хмарних обчислень для оптимізації транспортних потоків у містах Європи, Азії та Північної Америки.

Дослідження стану українських систем керування рухом міського електротранспорту дозволило встановити їх основні недоліки - недостатній рівень автоматизації, обмежені можливості прогнозування та відсутність інтеграції між окремими підсистемами, що обумовило доцільність розробки власного інтелектуального рішення. На основі отриманих результатів визначено оптимальний склад сенсорної бази та мережевої архітектури системи, включаючи GPS-модулі, датчики пасажиропотоку, телематичне обладнання та комунікаційні шлюзи, що забезпечують надійну передачу даних у режимі реального часу.

Обґрунтовано вибір багаторівневої архітектури платформи обробки даних з використанням методів предиктивної аналітики, яка дозволяє прогнозувати навантаження на маршрути та оптимізувати розклад руху транспортних засобів. Розроблена архітектура підсистем управління й візуалізації даних забезпечує диспетчерський моніторинг стану рухомого складу, відображення транспортної ситуації в реальному часі та формування управлінських рішень на основі актуальних даних.

Розроблений алгоритм управління інтелектуальною транспортною системою реалізує адаптивне регулювання інтервалів руху, пріоритетний проїзд на перехрестях та автоматичне коригування маршрутів з урахуванням

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						89
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поточної дорожньої обстановки. Результати Simulink-моделювання руху електротранспорту підтвердили ефективність запропонованого алгоритму управління: скорочення середнього часу в дорозі на маршруті, зниження енергоспоживання та підвищення регулярності руху порівняно з традиційними методами керування.

Завершальним етапом роботи стало створення структурної схеми інтелектуальної транспортної системи управління рухом електротранспорту та мобільного додатку для пасажирів, який реалізує функції відстеження транспортних засобів у реальному часі, відображення актуального розкладу руху, сповіщення про відхилення від графіка та побудови оптимальних маршрутів поїздки. Практична цінність роботи полягає в тому, що розроблена система може бути впроваджена в містах України для підвищення ефективності функціонування міського електротранспорту, зменшення експлуатаційних витрат та покращення якості транспортного обслуговування населення в умовах цифрової трансформації міської інфраструктури.

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мазуренко Р. В., Єременко Б. М. Інтелектуальна система керування трафіком великого міста: концепт онтології «моделі рішень» // Управління розвитком складних систем. – 2024. – № 57. – С. 174–180.
2. Чередніченко О., Валацкене А. Інтелектуальні транспортні системи як інструменти управління транспортними потоками (на прикладі м. Києва) // Містобудування та територіальне планування. – 2022. – № 80. – С. 416–450.
3. Зубенко Д. Ю., Коваленко А. В., Кузнєцов О. М. Analysis of Existing Approaches to Setting the Intelligent Management Systems of Transport Undertakings // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – № 6(3). – С. 4–10.
4. Далека В. Х., Козлова О. С., Шкрябко А. В. Improving Methods the Power Supply Systems Efficiency on Municipal Electric Transport // Electrification of Transport. – 2018. – № 15. – С. 34–42.
5. Довженко Н., Мазур Н., Костюк Ю., Рзаєва С. Інтеграція IoT та штучного інтелекту в інтелектуальні транспортні системи // Кібербезпека: освіта, наука, техніка. – 2024. – № 26. – С. 430–444.
6. Ключев С. О., Сігонін А. Є., Цимбал С. В. Розвиток інтелектуальних транспортних систем // Вісник машинобудування та транспорту. – 2023. – Т. 18, № 2. – С. 80–86.
7. Венгер А. Моделювання управління дорожнім рухом міста та виявлення конкурентних маршрутів за допомогою інтелектуальних транспортних систем // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування. – 2023. – № 2. – С. 22–31.
8. Волощук Л., Сбітнев О. Гібридна хмарна інтелектуальна IoT-система моніторингу дорожнього трафіка житлового мікрорайону // Сучасні інформаційні технології. – 2024. – № 1. – С. 101–112.

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		91

9. Горобченко О. Theoretical Fundamentals of Estimatability Assessment of Train Situation Signs for Work of Intellectual Locomotive Control Systems // Transport Systems and Technologies. – 2021. – № 38. – С. 220–231.
10. Доля К. В. ГІС – основа для інтелектуальних транспортних систем // Авіаційний транспорт. – 2026. – № 69. – С. 45–53.
11. Zhang J., Wang F.-Y., Wang K., Lin W.-H., Xu X., Chen C. Data-Driven Intelligent Transportation Systems: A Survey // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2011. – Vol. 12, No. 4. – P. 1624–1639.
12. García C. R., Quesada-Arencibia A., Cristóbal T., Padrón G., Alayón F. Systematic Development of Intelligent Systems for Public Road Transport // Sensors. – 2016. – Vol. 16, No. 7. – Article 1104.
13. Gao H., Li A., Wang J., Liu K., Zhang L. Design of an Intelligent Platoon Transit System towards Transportation Electrification // World Electric Vehicle Journal. – 2022. – Vol. 13, No. 8. – Article 153.
14. Patalas-Maliszewska J., Łosyk H., Newelski J. Modeling the Effectiveness of Intelligent Systems in Public Transport That Uses Low-Carbon Energy: A Case Study // Energies. – 2021. – Vol. 14, No. 9. – Article 2637.
15. Clairand J.-M., Guerra-Terán P., Serrano-Guerrero X. et al. Electric Vehicles for Public Transportation in Power Systems: A Review of Methodologies // Energies. – 2019. – Vol. 12, No. 16. – Article 3114.
16. Häll C. H., Ceder A., Ekström J., Quttineh N.-H. Adjustments of Public Transit Operations Planning Process for the Use of Electric Buses // Journal of Intelligent Transportation Systems. – 2019. – Vol. 23, No. 3. – P. 216–230.
17. Creß C., Bing Z., Knoll A. Intelligent Transportation Systems Using External Infrastructure: A Literature Survey // arXiv. – 2021. – 28 p.
18. Mollah M. B., Zhao J., Niyato D. et al. Blockchain for the Internet of Vehicles towards Intelligent Transportation Systems: A Survey // IEEE Internet of Things Journal. – 2021. – Vol. 8. – P. 4157–4185.

19. Haydari A., Yilmaz Y. Deep Reinforcement Learning for Intelligent Transportation Systems: A Survey // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2022. – Vol. 23, No. 1. – P. 11–32.
20. Rudskoy A. I., Ilin I., Prokhorov A. Digital Twins in the Intelligent Transport Systems // Transportation Research Procedia. – 2021. – Vol. 54. – P. 927–935.
21. Ceder A. Public Transit Planning and Operation: Modeling, Practice and Behavior. – 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2016. – 761 p.
22. Vuchic V. Urban Transit Systems and Technology. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. – 640 p.
23. Rodrigue J.-P. The Geography of Transport Systems. – 5th ed. – New York: Routledge, 2024. – 456 p.
24. Directive 2010/40/EU of the European Parliament and of the Council on the Framework for the Deployment of Intelligent Transport Systems in the Field of Road Transport and for Interfaces with Other Modes of Transport. – Brussels, 2010. – 22 p.

					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ	Арк.
						93
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

2026



*ЗАХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ГАЛИЦЬКИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ ІМ. В'ЯЧЕСЛАВА ЧОРНОВОЛА
НАДВІРНЯНСЬКИЙ КОЛЕДЖ НАЦІОНАЛЬНОГО
ТРАНСПОРТНОГО УНІВЕРСИТЕТУ*

всеукраїнська науково-практична конференція
***АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-
ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ***
(АКІТ – 2026)

19-21 лютого 2026 року
м. Тернопіль

Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКИТ - 2026), Тернопіль, 2026.

Редакційна колегія:

Сегін А.І. - кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Возна Н.Я. - доктор технічних наук, професор, професор кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Николайчук Я.М. – доктор технічних наук, професор, академік Міжнародної академії інформатики, професор кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету..

Яцків В.В. - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри кібербезпеки Західноукраїнського національного університету.

Якименко І.З. - кандидат технічних наук, доцент, декан факультету комп'ютерних інформаційних технологій Західноукраїнського національного університету.

Стефурак Н.А. - кандидат фізико-математичних наук, Галицький фаховий коледж імені В'ячеслава Чорновола.

Сидор А.І. - кандидат технічних наук, завідувач кафедри обчислювальної техніки Національного університету водного господарства та природокористування.

Пітух І.Р. - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Яцків Н.Г. - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Масляк Б.О. - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Гуменний П.В. - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету

Албанський І.Б. - кандидат технічних наук, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Заставний О.М. - кандидат технічних наук, старший викладач кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Волинський О.І. - кандидат технічних наук, доцент, Надвірнянський коледж Національного транспортного університету.

Давлетова А.Я. – викладач кафедри кібербезпеки Західноукраїнського національного університету.

Адреса організаторів:

вул. Олени Теліги 8, м. Тернопіль 46003,
кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем,
Західноукраїнський національний університет.

Контакти: тел.: (0352) 50-17-87, e-mail: conferenceakit@gmail.com.

ЗМІСТ

Володимир АНДРУСИШИН, Ренат ДАВЛЕТОВ, Володимир КЕРНІЦЬКИЙ	
МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА ПАРКТРОНІКА	3 8
КОМБІНОВАНОЮ СИСТЕМОЮ СВІТЛОЗВУКОВОГО ОПОВІЩЕННЯ	
Роман ПАЛЬЦАН, Василь ЯРЕМЧУК	
АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРОМИСЛОВОГО КОТЕЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ	13
Олександр СЕНЬКІВ, Андрій ГЕТЬМАН	
КАСКАДНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В СКЛОВАРНІЙ ПЕЧІ	17
Святослав САФРОНОВ, Олександр ДОРОШЕНКО, Ігор ПІТУХ	
МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА ЛОКАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ	24
Світозар ВАСЕНКО, Степан ІВАСЬЄВ	
АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВІДСТЕЖЕННЯ ДІЙ КОРИСТУВАЧА НА ОСНОВІ РЕЄСТРУ WINDOWS	30
Євген ПАРУБОК, Оксана СИРОТЮК	
АРХІТЕКТУРА РОЗПОДІЛЕНОЇ ІОТ СИСТЕМИ ВІЯВЛЕННЯ ТА АНАЛІЗУ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ	35
Зеновій БОЙКО, Владислав БОЛЕХІВСЬКИЙ, Олексій ШАПОВАЛ	
СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ РОБОТОЮ ТУРБОАГРЕГАТУ ТЕС	41
Сергій ДРОК, Максим БАГРІЙ	
АРХІТЕКТУРА ТА АЛГОРИТМИ РОБОТИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ РЕЗЕРВУАРНИМ ПАРКОМ НАФТОПРОДУКТІВ	45
Едуард МУРАДЯН, Людмила БАБАЛА	
АДАПТИВНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМИ ПОТОКАМИ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ДАНИХ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ	51
Роман КРІЛЬ	
ОПТИМІЗАЦІЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ УПРАВЛІННЯ ВРАЗЛИВОСТЯМИ ШЛЯХОМ ІНТЕГРАЦІЇ OPENVAS/NESSUS НА ОСНОВІ МОДЕЛІ P-A-R	55

Іван ЯНІК

ГІБРИДНА МОДЕЛЬ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ В АЛГОРИТМІ RSA-CRT НА ОСНОВІ МОДУЛЬНОЇ АРИФМЕТИКИ ТА ЗАВАДОСТІЙКОГО КОДУВАННЯ 60

Валентин САВЧУК, Аліна ДАВЛЕТОВА

СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ НОМЕРНИХ ЗНАКІВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ 64

Максим МИХАЛЬЧУК, Віталій КРАСІЙ

АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В ПЕЧІ ПІРОЛІЗНОЇ УСТАНОВКИ ПЕРЕРОБКИ ТВЕРДИХ ВІДХОДІВ 68

Юрій КОЛЦУН, Віктор БОГОНІС

АРХІТЕКТУРА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ОЧИСТКИ СТИЧНИХ ВОД 72

Андрій ОСТРОВСЬКИЙ, Назар ЛЕНИК, Дмитро КОРОБОВ, Петро ГУМЕННИЙ

КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ АВТОНОМНОЮ МІКРОВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ 77

Наталія ВОЗНА, Ігор ПАШКОВСЬКИЙ, Сергій ЛУЦИШИН

АДАПТИВНІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З ІНТЕГРОВАНИМИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИМИ ЗАСОБАМИ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ 83

Вадим ГРАМА

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЮ РОЗУМНОГО БУДИНКУ НА БАЗІ ІОТ-ТЕХНОЛОГІЙ 87

Олег ФЕДИШИН, Людмила БАБАЛА

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЗАРЯДНИМИ СТАНЦІЯМИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ РОЗПОДІЛОМ НАВАНТАЖЕННЯ 92

Іван АЛБАНСЬКИЙ, Максим МЕРВА, Олександр РУДКОВСЬКИЙ, Денис СОЛТИС

ВЗАЄМОДІЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМИ СЕНСОРАМИ ТЕХНОЛОГІЇ ІОТ 3 97

Павло ГРИЦЮК

МЕТОДИ ПОБУДОВИ ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ КІБЕРЗАХИСТУ ВЕБ-ДОДАТКІВ НА БАЗІ ВІДКРИТИХ ІНСТРУМЕНТІВ МОНІТОРИНГУ ВРАЗЛИВОСТЕЙ ТА АНТИВІРУСНОГО АНАЛІЗУ 103

Володимир БУЯР, Сергій ВОЙЦЕШКО, Оксана БУРЛАК, Наталія ВОЗНА	
АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ	107
Володимир ШИГЕРА, Сергій МИРОНЮК, Петро ГУМЕННИЙ	
КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ КОЛІСНИМ РОБОТОМ	111
Артем ГЕРАСИМЮК	
АРХІТЕКТУРА МОБІЛЬНОЇ ІоТ-МЕТЕОСТАНЦІЇ НА БАЗІ МІКРОКОНТРОЛЕРА ESP32	118
Юрій ТЕРНОВИЧ, Володимир ШАГАЛА, Олександр ЦИКВАС	
АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ВОДОЗАБІРНОЮ УСТАНОВКОЮ	122
Станіслав БАЛАКІН	
АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЯЦІЄЮ ФАРБУВАЛЬНОЇ КАМЕРИ	125
Петро СТИРАНКА, Олег ЗАСТАВНИЙ	
АВТОМАТИЧНИЙ СКЛАД З ЛІФТОМ-ПІДЙОМНИКОМ: РОЗРОБЛЕННЯ PLC-СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	128
Сергій МУЗИКА	
КОНТЕЙНЕРИЗОВАНА ІОТ-ПЛАТФОРМА ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ ВИРОБНИЧОЇ ЛІНІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ	131
Максим БЕДРИНСЬКИЙ, Петро ГУМЕННИЙ	
АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ ГІБРИДНИМИ СИСТЕМАМИ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ НА ОСНОВІ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ	133
Олександр БРЕГІН	
СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ТА ОБРОБКИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОВІДНОСТІ БІОЛОГІЧНИХ ТКАНИН МЕТОДОМ ІМПЕДАНСНОЇ ТОМОГРАФІЇ	140
Володимир ЗЬОМКО, Наталя СТЕФУРАК, Василь КУЗИК	
СХЕМА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ШВИДКОЇ ЗАМОРОЗКИ	144
Владислав БІЛИК, Петро ГУМЕННИЙ	
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ	148

Аліна ДАВЛЕТОВА

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ УПРАВЛІННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЮ БЕЗПЕКОЮ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОГО ЗАСОБУ ФОРМУВАННЯ МАТРИЦЬ РОЗПОДІЛУ ВІДПОВІДАЛЬНОСТІ 153

Дарина ІВАНЧИШИНА, Станіслав БОГДАНОВИЧ, Руслан ПІДГРЕБЛЯ, Андрій ПРОЦЮК

ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ БЕЗПЕКИ НА ОСНОВІ ГАЗОАНАЛІЗАТОРІВ У СКЛАДІ ПРОМИСЛОВОГО УСТАТКУВАННЯ 159

Богдан ПОЗНЯК, Ольга ПОСВЯТОВСЬКА

МІКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ОВОЧЕСХОВИЩА 165

Андрій РІЖОК, Петро ГУМЕННИЙ

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РУХУ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ 171

Степан ІВАСЬЄВ

МОДИФІКОВАНИЙ АЛГОРИТМ ВІДНОВЛЕННЯ ЧИСЛА ЗА ЗАЛИШКАМИ НА ОСНОВІ СКУРЧУВАННЯ МОДУЛІВ 176

Роман ЧІЖОВ, Петро ГУЕМНИЙ

РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ РЕЖИМОМ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ 179

Богдан ТОРІШНИЙ

ЗОНАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ТА ХМАРНЕ СПОВІЩЕННЯ В СИСТЕМІ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ НА БАЗІ ESP32 182

Денис ВІВЧАР

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ СТАНУ НЕМОВЛЯТ 187

Артем МІСЬКІВ, Аліна ДАВЛЕТОВА

МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА ЗБОРУ ДАНИХ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ВОДОЙМ 190

Сергій КУЛИНА

КІБЕРБЕЗПЕКА ТА ТЕХНІЧНИЙ ЗАХИСТ ПРОМИСЛОВОСТІ В УМОВАХ СЬОГОДЕННЯ 194

Петро ГУМЕННИЙ

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ПОБУДОВИ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ НА ОСНОВІ ОПЕРАЦІЙНИХ СИСТЕМ, КОМП'ЮТЕРНОЇ ГРАФІКИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ 196

Богдан КОВБАС

КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА СИСТЕМА ОБЛІКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА 201
БАЗІ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Андрій СЕГІН, Юрій ЛЕНЬ

СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ ДОСТУПОМ ЖИТЕЛІВ 204
ЖИТЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

Ігор БЕТЛЕЙ, Василь ГАЛАСІС, Ольга РОМАНКО, Володимир ПСУЙ

МОНІТОРИНГОВІ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ СЕНСОРІВ ІОТ ДЛЯ 210
АВТОНОМНОГО ЕКОЛОГІЧНОГО ТА ПРОМИСЛОВОГО КОНТРОЛЮ

Людмила ЯЦИНА, Марія РУДА

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ РІДИН 214
ТА ПОВІТРЯ НА ОСНОВІ СЕНСОРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Богдана ФРАНАСЮК, Вікторія САВЧЕНКО

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ 219
ЄДНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ: ТРАДИЦІЙНІ ТА АЛЬТЕРНАТИВНІ
МЕТОДИ ПЕРЕДАЧІ ОДИНИЦЬ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Денис ТУЖЕЛЯК, Мар'ян ЧАЙКІВСЬКИЙ

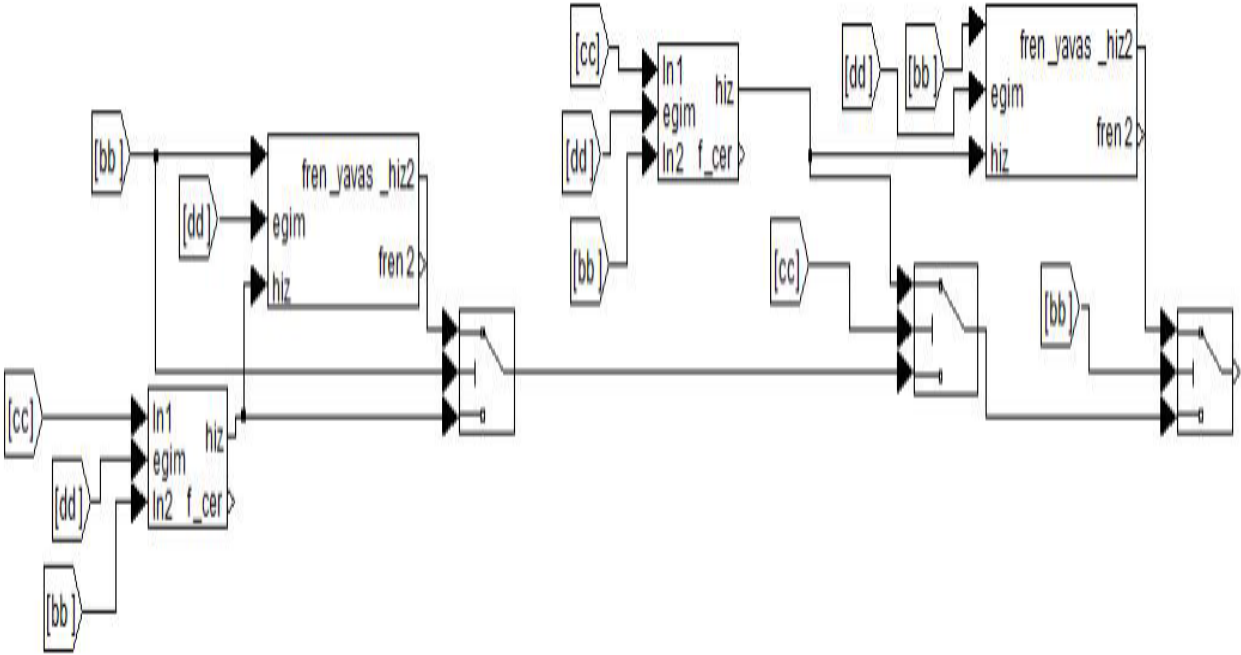
ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ АВТОМАТИЗОВАНИХ ЛІНІЙ 224
ВИРОБНИЦТВА ПРОДУКЦІЇ

2

227

1

ДОДАТОК А МОДЕЛЬ СИГНАЛУ КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМ ЗАСОБОМ.



					ДПАКІТ.10659793.00.0000 ПЗ									
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Інтелектуальна система керування режимами руху міського електротранспорту				Лім.		Арк.	Акрушіє		
Розроб.		Ріжок А.Є.										6		
Перевір.		Гуменний П.В..												
Консульт.														
Н. Контр.		Заставний О.												
Затверд.		Сегін А.І..												