

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти – бакалавр

за освітньо-професійною програмою

«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

зі спеціальності

151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Тема роботи:

« Автоматизована система керування парковкою на основі IoT-технологій»

Виконав студент гр. АКІТ-22

_____Басс А. Р.

Нормоконтроль

_____Маринич І. А.

Керівник

_____Бурнасов П.В.

Завідувач кафедри

_____Рубан С. А.

Кривий Ріг – 2026

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Бакалавр

Спеціальність: 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою: к.т.н. Рубан С.А.

_____ «__» 2026р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студентові групи АКІТ 22– Басс Анастасії Русланівни

1. **Тема роботи:** «Автоматизована система керування парковкою на основі IoT- технологій»

затверджено наказом по університету № _____ від «__» березня 2026р.

2. **Термін здачі завершеної роботи** «_____» 2026 р.
3. **Вихідні дані до виконання:** Технологічні інструкції виробництва, технічні характеристики об'єкту проектування, схеми автоматизації технологічного процесу
4. **Зміст пояснювальної записки:** Вступ, аналітичний огляд існуючих систем та технологій «розумних» парковок, проектування архітектури системи «розумної» парковки та моделювання і дослідження роботи системи, висновки, список використаної літератури, додатки
5. **Перелік графічного матеріалу:** Презентація у Microsoft PowerPoint (16 слайдів) в електронному та друкованому вигляді

6. Консультанти розділів:

Розділ	ПІБ консультанта	Підпис консультанта
<i>Розділ 1-2</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>к.т.н. Маринич І. А.</i>	

7. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	27.03.2026
2	<i>Аналітичний огляд існуючих систем та технологій “розумних” парковок</i>	07.04.2026
3	<i>Проектування архітектури системи «розумної» парковки та моделювання її роботи</i>	05.05.2026
4	<i>Висновки</i>	11.05.2026
5	<i>Оформлення роботи</i>	
6	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	05.06.2026
7	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	06.06.2026

Дата видачі завдання: « ____ » _____ 2026 р.

Керівник: Павло Вікторович Бурнасов

8. Запевнення:

Я, Басс Анастасія Русланівна, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Студент: Басс Анастасія Русланівна

АНОТАЦІЯ

Басс А. Р. Розробка та моделювання архітектури інтелектуальної системи «розумного паркування» (Smart Parking) з механізмом динамічного ціноутворення. — Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра за спеціальністю 151 — «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (освітня програма «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва»). — Криворізький національний університет, Кривий Ріг, 2026.

Кваліфікаційну роботу присвячено розробці, проектуванню та дослідженню ефективності архітектури інтелектуальної системи автоматизованого паркування міського простору на основі технологій Інтернету речей (IoT) та алгоритмів гнучкого тарифного регулювання.

У роботі проведено комплексний аналітичний огляд чинних світових і вітчизняних аналогів Smart Parking, сучасних датчиків контролю зайнятості паркомісць та бездротових технологій передачі даних. Обґрунтовано вибір бездротового стандарту LoRaWAN як найбільш енергоефективного та далекобійного рішення для побудови міської IoT-мережі, а також гібридної схеми детекції автомобілів за допомогою ультразвукових та магнітних сенсорів.

Розроблено трирівневу апаратну архітектуру системи (сенсори — мережеві шлюзи — хмарний сервер збору даних ChirpStack) та спроектовано структуру програмного забезпечення на базі мови Python, фреймворку Flask та бази даних SQLite. Особливу увагу приділено створенню та математичному опису алгоритму динамічного ціноутворення.

За допомогою бібліотеки *SimPy* (Python) побудовано імітаційну модель роботи паркувального комплексу на 200 місць. Експериментальні дослідження моделі довели, що інтеграція динамічних тарифів дозволяє знизити рівень пікового завантаження парковки, зменшити кількість відмов водіїв через відсутність вільних місць. Проведено повний техніко-економічний аналіз, який підтвердив високу інвестиційну привабливість проєкту із терміном окупності капітальних витрат у 0,73 року (~9 місяців).

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості прямого масштабування розроблених рішень для впровадження концепції «Smart City» в українських мегаполісах.

Ключові слова:

РОЗУМНЕ ПАРКУВАННЯ, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ (IOT), LORAWAN, ДИНАМІЧНЕ ЦІНОУТВОРЕННЯ, ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, SIMPY, FLASK, АВТОМАТИЗАЦІЯ, SMART CITY.

					КНУ КРБ.151.26.01.00.ПЗ		
Зм.	Арк..	№ документа	Підпис	Дата	АНОТАЦІЯ		
Розробив	Басс А.Р						
Перевірив	Савицький						
Н. Контр.							
Затв..					КНУ АКІТ-22		

ЗМІСТ

ВСТУП.....	2
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ "РОЗУМНИХ" ПАРКОВОК.....	4
1.1. Проблеми організації паркувального простору в міському середовищі....	4
1.2. Огляд апаратних рішень для детектування зайнятості місця (магнітні датчики, ультразвукові, інфрачервоні, відеокамери з комп'ютерним зором, RFID). Порівняння за точністю, вартістю, складністю встановлення.	6
1.3. Огляд мережових технологій для передачі даних в IoT-системах (LoRaWAN, NB-IoT, Wi-Fi, BLE). Вибір для нашої задачі.....	9
1.4. Аналіз існуючих програмних рішень та мобільних додатків (ParkMe, Parkmobile тощо).....	11
1.5. Принципи динамічного ціноутворення в суміжних областях (таксі, енергетика). Висновок до розділу: обґрунтування обраних технологій для проекту.....	15
РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ СИСТЕМИ "РОЗУМНОЇ" ПАРКОВКИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ	18
2.1. Формулювання вимог до системи (функціональні: відображення вільних місць, навігація, оплата; нефункціональні: надійність, масштабованість).....	18
2.2. Проектування апаратного рівня	21
2.3. Проектування програмного рівня.....	23
2.4. Розробка алгоритму динамічного ціноутворення (наприклад, на основі завантаженості парковки, часу доби, дня тижня).....	26
2.5. Вибір засобів моделювання та обґрунтування	29
2.6. Моделювання мережі передачі даних від датчиків до сервера. Оцінка навантаження, затримок	30
2.7. Імітаційна модель роботи парковки	33

					КНУ КРБ.151.26.02.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.8. Реалізація та тестування алгоритму динамічного ціноутворення на імітаційній моделі. Аналіз його впливу на рівномірність завантаження та виручку.	36
2.9. Розробка прототипу веб-інтерфейсу адміністратора або мобільного додатку.....	38
2.10. Оцінка економічної ефективності	42
ВИСНОВКИ	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	49
ДОДАТКИ.....	55

					КНУ КРБ.151.26.02.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

У сучасних містах проблема організації паркувального простору набуває особливої актуальності через зростання кількості транспортних засобів, обмеженість міської інфраструктури та підвищення вимог до ефективного використання громадського простору. Традиційні способи організації паркування не завжди дозволяють оперативно отримувати інформацію про наявність вільних місць, що призводить до збільшення часу пошуку парковки, заторів, додаткових витрат пального та негативного впливу на довкілля.

Одним із перспективних напрямів розв'язання цієї проблеми є впровадження автоматизованих систем «розумного» паркування на основі IoT-технологій. Такі системи дають змогу здійснювати моніторинг зайнятості паркувальних місць у реальному часі, передавати дані до серверної частини, надавати користувачам актуальну інформацію та застосовувати динамічне ціноутворення для більш рівномірного розподілу попиту.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка та дослідження автоматизованої системи керування парковкою на основі IoT-технологій, що забезпечує моніторинг зайнятості паркувальних місць у реальному часі, передачу даних до серверної частини, відображення інформації для користувачів і застосування алгоритму динамічного ціноутворення для підвищення ефективності використання паркувального простору.

Об'єктом дослідження є процес організації та автоматизованого керування міським паркувальним простором.

Предметом дослідження є методи, моделі та програмно-апаратні засоби побудови IoT-системи «розумного» паркування з механізмом динамічного ціноутворення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

					КНУ КРБ.151.26.05.00.ПЗ						
Зм.	Арк..	№ документа	Підпис	Дата							
Розробив	Басс А.Р				ВСТУП				Літера	Аркуш	Аркушів
Пеоєвірив											
Н. Контр.											
Затв..									КНУ АКІТ-22		

1. Проаналізувати сучасні проблеми організації паркувального простору в міському середовищі та визначити основні недоліки традиційних систем паркування.
2. Провести огляд наявних апаратних рішень для визначення зайнятості паркувальних місць і порівняти їх за точністю, вартістю та складністю встановлення.
3. Дослідити мережеві технології передавання даних в IoT-системах і обґрунтувати вибір технології LoRaWAN для системи «розумного» паркування.
4. Сформулювати функціональні та нефункціональні вимоги до автоматизованої системи керування парковкою.
5. Спроекувати апаратну та програмну архітектуру системи з використанням датчиків зайнятості, мережевих шлюзів, серверної частини та користувацького інтерфейсу.
6. Розробити алгоритм динамічного ціноутворення з урахуванням рівня завантаженості парковки, часу доби та дня тижня.
7. Побудувати імітаційну модель роботи парковки та дослідити вплив запропонованого алгоритму на рівномірність завантаження, кількість відмов і виручку.
8. Розробити прототип веб-інтерфейсу адміністратора для моніторингу стану паркувальних місць і роботи алгоритму ціноутворення.
9. Оцінити економічну ефективність впровадження запропонованої системи.

Структура роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, двох розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. У першому розділі проведено аналітичний огляд проблем організації паркування, апаратних рішень, мережевих технологій і програмних систем Smart Parking. У другому розділі спроектовано архітектуру системи, розроблено алгоритм динамічного ціноутворення, виконано імітаційне моделювання, створено прототип веб-інтерфейсу та проведено оцінку економічної ефективності запропонованого рішення.

					КНУ КРБ.151.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ "РОЗУМНИХ" ПАРКОВОК

1.1. Проблеми організації паркувального простору в міському середовищі.

Сучасні урбанізовані території стикаються з гострою проблемою організації паркувального простору, яка є наслідком швидкого зростання рівня автомобілізації населення. В Україні, як і в багатьох країнах світу, темпи збільшення кількості транспортних засобів значно випереджають темпи розвитку відповідної інфраструктури. За даними аналітичних досліджень Центру Разумкова, у великих містах України коефіцієнт автомобілізації продовжує зростати, що призводить до системного дефіциту паркувальних місць та зниження ефективності використання міського простору [5].

Однією з ключових проблем є хронічний дефіцит організованих паркувальних місць у центральних районах міст. У Києві, Львові, Одесі та Харкові попит на паркування в години пік суттєво перевищує пропозицію. Зокрема, у історичній частині Львова проблема нераціонального використання вулично-дорожньої мережі для паркування є особливо актуальною через щільну забудову та обмежену територію [6]. Аналогічна ситуація спостерігається і в інших регіонах країни, де відсутність комплексних схем організації паркувального простору призводить до хаотичного розміщення транспортних засобів на проїзній частині, тротуарах і газонах.

Значні витрати часу водіїв на пошук вільного паркувального місця є ще одним критичним аспектом проблеми. За різними оцінками, у середньому водій у великому українському місті витрачає від 15 до 35 хвилин на пошук місця для стоянки в години пік.

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ці витрати часу не тільки знижують мобільність населення, але й спричиняють додаткові економічні втрати, пов'язані зі споживанням пального, зменшенням продуктивності робочого часу та збільшенням рівня заторів на дорогах.

Хаотичне паркування на тротуарах, газонах, у другій лінії та в заборонених зонах стало характерною рисою українських міст. Таке порушення правил паркування призводить до блокування руху пішоходів, громадського транспорту та велосипедистів, створюючи небезпечні ситуації на дорогах. Відсутність ефективного контролю та комплексних схем організації паркувального простору лише поглиблює цю проблему [4].

З економічної точки зору, проблеми організації паркування спричиняють суттєві втрати для економіки міст. Додаткові витрати пального, часові втрати громадян, зниження пропускної здатності вулиць та підвищення рівня заторів безпосередньо впливають на загальну ефективність транспортної системи. Крім того, неефективне використання паркувального простору призводить до недовикористання наявних ресурсів та необхідності будівництва нових паркінгів, що вимагає значних капіталовкладень.

Не менш важливими є екологічні наслідки. Додатковий рух автомобілів у пошуках паркування збільшує обсяги викидів шкідливих речовин в атмосферу, погіршуючи якість повітря в містах. У контексті глобальних тенденцій сталого розвитку та переходу до «розумних міст» ця проблема набуває особливої ваги [5].

Соціальні аспекти проблеми також не можна ігнорувати. Постійний стрес водіїв, конфлікти між учасниками дорожнього руху, зниження якості міського середовища та зменшення доступності громадських просторів негативно впливають на рівень життя населення. У багатьох українських містах традиційна організація паркування не відповідає сучасним вимогам інклюзивності та доступності для маломобільних груп населення.

Аналіз існуючих підходів до управління паркувальним простором свідчить про їх низьку ефективність.

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Традиційні системи, засновані на статичному плануванні та фіксованих тарифах, не здатні оперативно реагувати на зміни в завантаженості парковок протягом доби. Відсутність інформації в реальному часі про вільні місця змушує водіїв покладатися на випадковий пошук, що лише посилює затори [1].

У контексті розвитку концепції Smart City в Україні зазначені проблеми набувають системного характеру. Багато українських міст мають фрагментарні ініціативи щодо впровадження розумних технологій, проте комплексного рішення проблеми паркування на національному рівні ще не досягнуто [20].

Проблеми організації паркувального простору в міському середовищі України є багатограними і включають дефіцит місць, неефективне використання наявної інфраструктури, значні економічні, екологічні та соціальні втрати. Вирішення цих проблем вимагає переходу до сучасних інтелектуальних систем управління паркуванням на базі IoT-технологій, динамічного ціноутворення та інтеграції з мобільними додатками для водіїв, що стане предметом подальшого розгляду в роботі.

1.2. Огляд апаратних рішень для детектування зайнятості місця (магнітні датчики, ультразвукові, інфрачервоні, відеокамери з комп'ютерним зором, RFID). Порівняння за точністю, вартістю, складністю встановлення.

Для реалізації систем «розумного паркування» ключовим елементом є надійне виявлення зайнятості/вільності кожного паркувального місця. На сьогоднішній день на практиці застосовується кілька основних типів датчиків та сенсорних технологій, кожна з яких має власні переваги, обмеження та оптимальні сценарії використання.

Магнітні датчики (магнітометри)

Принцип дії базується на реєстрації зміни магнітного поля Землі, яке спричиняє металевий автомобіль. Датчики встановлюються безпосередньо в асфальт або під покриття паркувального місця. Переваги: висока точність (95–99 %) навіть у складних погодних умовах, низьке енергоспоживання, тривалий термін служби (5–10 років), практично нечутливі до пилу, бруду, снігу чи дощу [1].

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Недоліки: висока вартість одного датчика (зазвичай 80–150 USD), необхідність розрізання асфальту та герметичного монтажу, складність заміни в разі виходу з ладу [7].

Ультразвукові датчики

Працюють за принципом ехолокації: випромінюють ультразвуковий імпульс і вимірюють час повернення відбитого сигналу. Зазвичай встановлюються на стовпах, стелі паркінгу або над паркувальним місцем. Переваги: помірна вартість (20–60 USD за одиницю), простота монтажу на вже існуючих конструкціях, хороша точність у закритих паркінгах (92–97 %) [9]. Недоліки: чутливість до сильного вітру, снігу, дощу, пташиного посліду, пилу; зниження точності при дуже низьких або дуже високих температурах; потребують періодичного очищення [1], [8].

Інфрачервоні датчики (ІЧ)

Використовують активний або пасивний принцип: активні випромінюють ІЧ-промінь і фіксують його переривання або відбиття, пасивні реєструють теплове випромінювання автомобіля. Переваги: відносно низька ціна (15–40 USD), швидка реакція, можливість встановлення на висоті. Недоліки: дуже чутливі до сонячного світла, атмосферних опадів, пилу, брудних поверхонь автомобіля; точність часто не перевищує 85–92 % у вуличних умовах [7].

Відеокамери з комп'ютерним зором

Сучасний підхід, що використовує одну або кілька камер на 4–10 паркувальних місць з подальшою обробкою зображення нейронними мережами (YOLO, Mask R-CNN тощо). Переваги: висока точність при якісному навчанні моделі (96–99 %), можливість одночасного контролю кількох місць, додаткові функції (розпізнавання номерів, виявлення неправильно припаркованих авто, контроль безпеки), відсутність потреби в індивідуальних датчиках під кожне місце [6], [14]. Недоліки: висока початкова вартість обладнання та обчислювальних ресурсів, залежність від освітлення (потрібне додаткове підсвічування вночі), чутливість до сильного забруднення об'єктива, необхідність стабільного каналу передачі великих обсягів даних [8].

RFID-системи

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Використовують радіочастотні мітки (пасивні або активні), встановлені на автомобілях, та зчитувачі біля в'їзду/виїзду або на кожному місці. Переваги: висока точність ідентифікації конкретного автомобіля, можливість інтеграції з системами доступу та оплати. Недоліки: потребує обов'язкової наявності мітки на кожному автомобілі (низька проникність), дуже висока вартість розгортання на відкритих парковках, низька ефективність для виявлення випадкових відвідувачів [19].

Для порівняльного аналізу основних характеристик наведено таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика апаратних рішень для детектування зайнятості паркувального місця

Технологія	Точність, %	Вартість одного датчика/місця, USD	Складність встановлення	Стійкість до погодних умов	Термін служби, роки	Рекомендований тип парковки
Магнітні датчики	95–99	80–150	Висока	Висока	5–10	Вуличні, відкриті
Ультразвукові датчики	92–97	20–60	Середня	Середня	3–7	Закриті, напіввідкриті
Інфрачервоні датчики	85–92	15–40	Низька	Низька	3–6	Закриті паркінги
Відеокамери + комп. зір	96–99	30–120 (на 4–10 місць)	Середня–висока	Середня (з підсвіткою)	5–10	Вуличні та закриті, великі об'єкти
RFID-системи	98–99	50–200 + мітки	Висока	Висока	7–12	Контрольовані, платні паркінги

Джерела: складено автором на основі [1], [7], [8], [9], [6].

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз показує, що універсального рішення не існує. Для вуличних відкритих парковок в умовах України найбільш перспективними є комбіновані підходи: магнітні датчики або відеокамери з комп'ютерним зором як основний метод, доповнені ультразвуковими сенсорами в захищених зонах. Саме такий гібридний підхід буде обґрунтовано обрано для подальшого проектування в наступних розділах роботи [1], [6].

1.3. Огляд мережевих технологій для передачі даних в IoT-системах (LoRaWAN, NB-IoT, Wi-Fi, BLE). Вибір для нашої задачі.

У системах «розумного паркування» датчики займаності місць передають невеликі обсяги даних (зазвичай статус місця: зайняте/вільне, час оновлення, іноді рівень заряду батареї) з низькою частотою — від кількох разів на хвилину до кількох разів на годину. Тому ключовими вимогами до каналу передачі є низьке енергоспоживання для забезпечення тривалої автономної роботи від батарей (5–15 років), достатнє покриття в умовах щільної міської забудови, стійкість до перешкод та помірна вартість розгортання та експлуатації.

LoRaWAN є відкритим протоколом LPWAN, що працює в неліцензованому ISM-діапазоні (868 МГц в Європі/Україні). Технологія забезпечує дальність передачі до 2–5 км в міських умовах і до 10–15 км у сільській місцевості при прямій видимості. Енергоспоживання в режимі передачі становить близько 20–120 мА, що дозволяє досягати терміну служби батареї понад 10–15 років при рідкісних передачах. Перевагою є можливість створення приватних мереж без щомісячних платежів оператору, гнучкість розгортання шлюзів та наявність геолокації на основі TDOA без GPS-модуля в датчику [9], [11].

NB-IoT (Narrowband IoT) — це стільникова технологія стандарту 3GPP, що використовує ліцензований спектр LTE. Вона забезпечує глибоке проникнення сигналу (до 20 дБ кращий за звичайний LTE), покриття в підвалах, гаражах та щільній забудові до 1–10 км залежно від щільності базових станцій. Швидкість передачі вища (до 200 кбіт/с), ніж у LoRaWAN, але енергоспоживання дещо вище через необхідність періодичного підключення до мережі та вищі пікові струми (до

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

220 мА). Термін служби батареї становить 10+ років, однак вимагає SIM-карт та щомісячної абонплати оператору [9], [15].

Wi-Fi (IEEE 802.11) забезпечує високу пропускну здатність (до сотень Мбіт/с), але характеризується значним енергоспоживанням (сотні мА в активному режимі), обмеженим радіусом дії (до 50–100 м у приміщенні, менше на вулиці) та необхідністю постійного живлення або частоті заміни батарей. Технологія підходить для закритих паркінгів з наявністю електроживлення, але не є оптимальною для вуличних датчиків з автономним живленням [7].

Bluetooth Low Energy (BLE) призначений для короткострокових передач на відстані до 10–100 м (залежно від версії та середовища). Він має дуже низьке енергоспоживання в режимі очікування, але вимагає або частого сканування, або прямого підключення до смартфона/шлюзу, що робить його непридатним для самостійної передачі даних на сервер у масштабній вуличній системі. BLE частіше використовується як допоміжна технологія для локальної взаємодії (наприклад, оплата через смартфон) [7], [9].

Для порівняння основних параметрів наведено таблицю 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика мережевих технологій для IoT-систем розумного паркування

Технологія	Дальність у місті, км	Енергоспоживання (передача)	Термін служби батареї, роки	Вартість експлуатації	Покриття в щільній забудові	Власна мережа можлива	Рекомендоване застосування в паркуванні
LoRa WAN	2–5	Дуже низьке (20–120 мА)	10–15+	Низька (без абонплати)	Добре (глибоке проникнення)	Так	Вуличні відкриті парковки,

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ			Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				

							приватні мережі
NB-IoT	1–10	Низьке (100–220 мА)	10+	Середня (абонплата)	Відмінне (підвали, гаражі)	Ні (оператор)	Міські парковки з наявністю стільникового покриття
Wi-Fi	0,05–0,1	Високе (сотні мА)	1–3	Середня–висока	Середнє	Так	Закриті паркінги з електроживленням
BLE	0,01–0,1	Дуже низьке в режимі реклами	5–10	Низька	Низьке	Ні (локально)	Допоміжна взаємодія з користувачем

Джерела: складено автором на основі [9], [7], [15].

Для вуличної системи «розумного паркування» в умовах українського міста (щільна забудова, обмежений бюджет, потреба в автономності) оптимальним вибором є LoRaWAN. Технологія забезпечує найкраще співвідношення дальності, енергоспоживання та вартості експлуатації без залежності від мобільних операторів. NB-IoT може бути альтернативою в разі наявності якісного стільникового покриття та потреби в глибокому проникненні сигналу (наприклад, підземні паркінги), проте вищі експлуатаційні витрати роблять її менш привабливою для масового розгортання. Wi-Fi та BLE відпадають як основні канали через обмежену дальність і високу витрату енергії на відкритому просторі. Таким чином, для подальшого проектування системи обирається LoRaWAN як базова мережева технологія [1], [9].

1.4. Аналіз існуючих програмних рішень та мобільних додатків (ParkMe,

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Parkmobile тощо).

Сучасні системи «розумного паркування» значною мірою залежать від якості програмного забезпечення та мобільних додатків, які забезпечують взаємодію з користувачами. На глобальному ринку та в Україні сформовано кілька ключових рішень, що пропонують функції пошуку вільних місць, оплати паркування, резервування та інформування в реальному часі.

ParkMe є одним з піонерських додатків у сегменті пошуку паркування. Він надає інформацію про вартість паркування на вулицях і в гаражах, відображає реальний час доступності в окремих містах (наприклад, у США — Downtown Los Angeles, San Francisco), дозволяє встановлювати таймери для уникнення штрафів та інтегрується з навігаційними системами автомобілів. Додаток фокусується на порівнянні цін і маршрутах до найдешевших варіантів, однак реальний час моніторингу вуличного паркування обмежений окремими містами та залежить від даних датчиків або партнерських мереж [10].

ParkMobile є одним з найбільш поширених рішень у США та Європі для оплати вуличного та гаражного паркування. Додаток дозволяє безконтактно оплачувати паркування без повернення до паркомата, продовжувати час стоянки віддалено, отримувати сповіщення про закінчення сесії та резервувати місця в понад 600 локаціях (стадіони, аеропорти, події). З 2018 року впроваджено функцію реального часу доступності (Parking Availability) у понад 100 містах, що відображає завантаженість зон на карті кольоровими індикаторами. Преміум-підписка ParkMobile Pro додає знижки, roadside assistance та розширену доступність даних [0], [4], [5].

В Україні функціонують як локальні, так і міжнародні рішення, адаптовані до національних умов. Серед найпоширеніших:

- UNIP — універсальний безкоштовний додаток для пошуку паркомісць, побудови маршрутів та безготівкової оплати банківською картою в багатьох містах України. Підтримує інтеграцію з муніципальними системами [40], [41].

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Parking UA (розвиток KyivParkingApp) — спеціалізується на оплаті паркування в Києві та інших містах, визначає локацію автоматично, дозволяє продовжувати час стоянки, переглядати тарифи та уникати штрафів [44], [45].
- ParkMeUp — сучасний український додаток, що пропонує пошук вільних місць у реальному часі, онлайн-бронювання паркомісць та оплату через Google Pay. Користувачі відзначають зручність сповіщень та економію часу в центрах міст [20], [29].
- Київ Цифровий — офіційний муніципальний додаток Києва для оплати паркування на відведених майданчиках, інтеграції з іншими міськими сервісами [44].
- МІСТО (Одеса) — новий комплексний додаток, що включає оплату паркування поряд з іншими міськими послугами (ЦНАП, транспорт, тривоги) [47].

Інші поширені рішення включають EasyPark (Європа, оплата та продовження без готівки, інтеграція з EV-зарядками) та Parkopedia (глобальна база даних парковок з цінами та умовами, корисна для подорожей) [22], [37].

Для ілюстрації інтерфейсів ключових систем наведено рисунки.

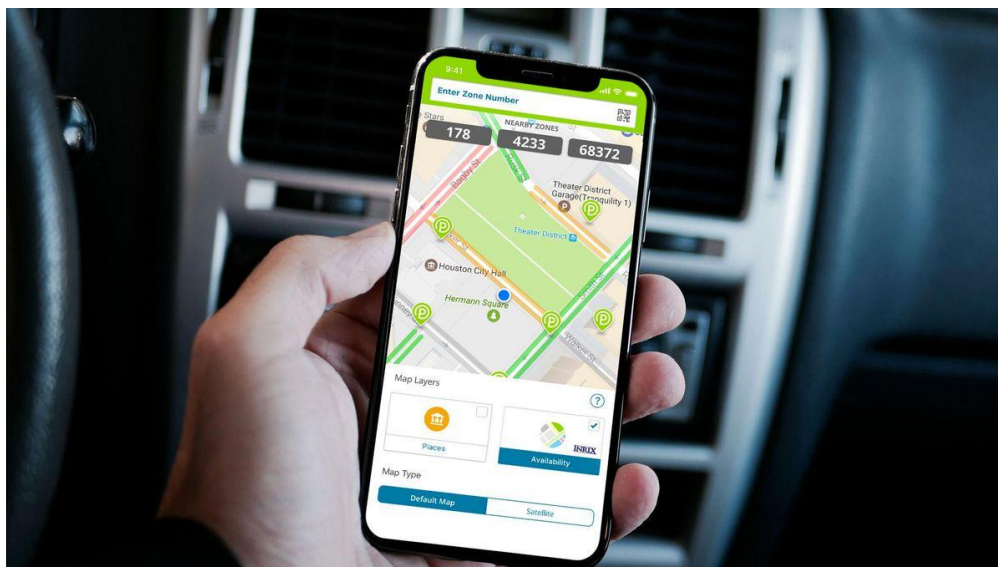


Рисунок 1.1 – Інтерфейс додатку ParkMobile з відображенням реального часу доступності парковки

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

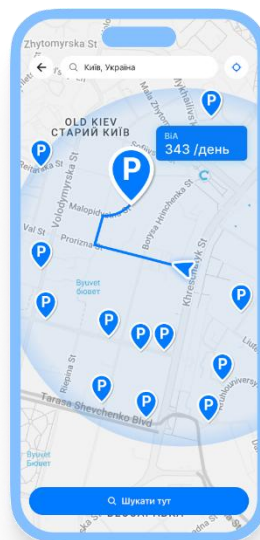


Рисунок 1.2 – Екран пошуку та бронювання місця в додатку ParkMeUp

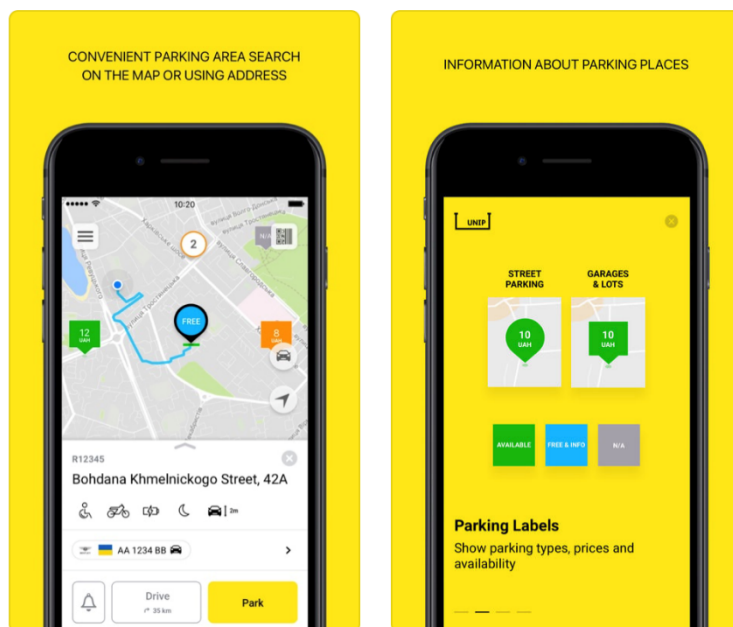


Рисунок 1.3 – Мобільний додаток UNIP: головна карта з паркувальними зонами та функцією швидкої оплати

Аналіз демонструє, що більшість сучасних рішень поєднують базові функції (пошук, оплата, таймер) з розширеними можливостями: реальний час моніторинг (ParkMobile, ParkMeUp), резервування (ParkMobile, ParkMeUp) та інтеграцію з муніципальними системами (UNIP, Київ Цифровий). Однак у більшості українських міст бракує повноцінного реального часу відображення вільних вуличних місць через обмежену кількість встановлених датчиків. Саме тому запропонована в роботі система з IoT-датчиками та динамічним ціноутворенням

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

може суттєво доповнити існуючі програмні рішення, забезпечуючи точніші дані для мобільних додатків [1], [20].

1.5. Принципи динамічного ціноутворення в суміжних областях (таксі, енергетика). Висновок до розділу: обґрунтування обраних технологій для проекту.

Динамічне ціноутворення (dynamic pricing) є ефективним економічним механізмом балансування попиту та пропозиції в реальному часі або в короткостроковій перспективі. Воно широко застосовується в галузях з обмеженою пропускною здатністю ресурсів, високою чутливістю до часу доби та значними коливаннями попиту. Розгляд принципів у суміжних сферах дозволяє адаптувати найкращі практики для системи «розумного паркування».

У сфері таксі та райд-хейлінгу (Uber, Bolt, Lyft) динамічне ціноутворення відоме як surge pricing (Uber) або prime time (Lyft). Основний принцип полягає в автоматичному підвищенні тарифу (множник базової ціни) у періоди, коли попит на поїздки суттєво перевищує доступну кількість водіїв. Алгоритм аналізує реальний час: співвідношення кількості запитів до кількості активних водіїв, час доби, день тижня, погодні умови, події, затори чи аварії. Підвищення ціни стимулює додаткових водіїв виїжджати на лінію та частково стримує попит (деякі пасажери відкладають поїздку або обирають альтернативу). У результаті зменшується час очікування, підвищується ефективність використання транспорту та доходи водіїв у пікові періоди. У 2026 році в Україні сервіси Uber, Bolt та Uklon продовжують застосовувати саме такий підхід, де тариф формується автоматизованою моделлю з урахуванням балансу попиту та пропозиції в конкретній локації та моменті часу [20], [21], [23].

У сфері енергетики динамічне ціноутворення реалізується через time-of-use (TOU) тарифи, critical peak pricing (CPP) та real-time pricing (RTP). TOU передбачає фіксовані різні тарифи в різні періоди доби (дешевше вночі та off-peak, дорожче в пікові години ранку та вечора). CPP додає екстремально високі ціни в окремі «критичні» години або дні високого навантаження на мережу (наприклад, спекотні

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

літні дні). RTP є найбільш динамічним варіантом — ціна змінюється щогодини або частіше залежно від поточного оптового ринку, прогнозу попиту та доступності генерації (включаючи ВДЕ). Метою є стимулювання споживачів переносити навантаження (зарядка EV, прання, нагрів води) на off-peak періоди, зменшення пікового навантаження на мережу, зниження потреби в резервних потужностях та інтеграція нестабільних джерел енергії. Дослідження показують, що еластична реакція споживачів на динамічні тарифи може зменшити пікове навантаження на 10–20 % та згладити графік споживання [0], [8].

У контексті паркування принципи суміжних галузей безпосередньо застосовні. Подібно до surge pricing у таксі, ціна паркомісця може підвищуватися при високій завантаженості (наприклад, >80–90 %), щоб стимулювати швидший оборот місць та відвернути частину попиту в менш завантажені зони або час. Аналогічно TOU/CPP в енергетиці, базовий тариф може змінюватися залежно від часу доби, дня тижня та календарних подій (робочі дні vs вихідні, свята). Алгоритми можуть бути реалізовані на основі occupancy rate, історичних даних, прогнозу попиту (машинне навчання) та реального часу оновлення з датчиків [26], [30], [33].

Проведений аналітичний огляд проблем організації паркувального простору, апаратних засобів детекції, мережевих технологій та існуючих програмних рішень дозволяє обґрунтувати вибір ключових технологій для проектування системи «розумного паркування»:

- для детекції зайнятості місць — комбінований підхід: магнітні датчики як основний метод для вуличних відкритих парковок (висока точність та стійкість до погодних умов) у поєднанні з відеокамерами з комп’ютерним зором для контролю кількох місць та додаткових функцій (контроль правильності паркування) [1], [6];
- для передачі даних — технологія LoRaWAN як базова (оптимальне співвідношення дальності, низького енергоспоживання, автономності 10–15 років та можливості створення приватної мережі без абонентської плати

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- в умовах щільної міської забудови України) [9], [11];
- для користувацького інтерфейсу — мобільний додаток з функціями реального часу відображення вільних місць, навігації, оплати та резервування, з урахуванням кращих практик ParkMobile, ParkMeUp та UNIP;
- для управління попитом — алгоритм динамічного ціноутворення на основі завантаженості (occipancy), часу доби, дня тижня та подій, адаптований з принципів surge pricing (таксі) та TOU/CPP (енергетика), що дозволить підвищити рівномірність використання паркувального простору, зменшити час пошуку місця та збільшити операційну ефективність системи.

Обрані технології забезпечують баланс між точністю, надійністю, енергоефективністю, вартістю розгортання та потенціалом масштабування в українських умовах [1], [5].

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ СИСТЕМИ "РОЗУМНОЇ" ПАРКОВКИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ

2.1. Формулювання вимог до системи (функціональні: відображення вільних місць, навігація, оплата; нефункціональні: надійність, масштабованість).

Проектування будь-якої інформаційно-керуючої системи починається з чіткого визначення функціональних та нефункціональних вимог. Вони слугують основою для подальшого вибору архітектури, технологічного стеку та методів реалізації. У контексті системи «розумного паркування» вимоги сформовані з урахуванням потреб основних груп стейкхолдерів: водіїв, адміністраторів муніципальних парковок, операторів системи та міських органів влади.

Функціональні вимоги визначають, що саме повинна виконувати система в процесі взаємодії з користувачами та зовнішнім середовищем.

1. Реальний час моніторинг стану паркувальних місць: система повинна безперервно збирати та обробляти дані з датчиків зайнятості, оновлюючи статус кожного місця (вільне / зайняте / зарезервоване / несправне) з періодичністю не рідше 30–60 секунд.
2. Відображення вільних місць на карті в мобільному додатку та веб-інтерфейсі адміністратора: візуалізація доступних місць у вигляді інтерактивної карти з кольоровим кодуванням (зелений – вільне, червоний – зайняте, жовтий – резерв, сірий – несправне).
3. Навігація до обраного паркувального місця: побудова оптимального пішохідного або автомобільного маршруту від поточного розташування користувача до вибраного вільного місця з використанням API картографічних сервісів (наприклад, Google Maps, OpenStreetMap).

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Онлайн-оплата паркування: інтеграція з платіжними системами (LiqPay, Fondy, Apple Pay, Google Pay), підтримка безготівкової оплати за фактичний час стоянки або фіксований період, автоматичне списання після закінчення сесії.
5. Резервування паркомісця: можливість тимчасового (до 15–30 хвилин) бронювання вільного місця з автоматичним скасуванням резерву у разі неявки.
6. Динамічне ціноутворення: автоматичний розрахунок тарифу залежно від поточного рівня завантаженості зони, часу доби, дня тижня та календарних подій.
7. Сповіщення користувача: push-повідомлення про закінчення оплаченого часу, початок штрафного періоду, наближення до зарезервованого місця, зміну статусу місця.
8. Адміністративний веб-інтерфейс: моніторинг стану всіх датчиків, управління тарифами, перегляд статистики завантаженості, формування звітів, віддалене керування доступом до зон.
9. Інтеграція з муніципальними системами: передача даних про порушення паркування (перевищення часу, паркування в забороненій зоні) до інформаційних систем поліції або департаменту транспорту.

Нефункціональні вимоги визначають якісні характеристики системи, що забезпечують її надійну та ефективну експлуатацію в реальних умовах.

Таблиця 2.1 – Основні нефункціональні вимоги до системи

№	Вимога	Опис / Критерії виконання
1	Надійність (Availability)	Доступність системи не нижче 99,5 % у робочий час (uptime 99,5 % протягом місяця)
2	Затримка оновлення даних	Час від моменту зміни стану місця до відображення в додатку – не більше 60 секунд
3	Масштабованість	Можливість підключення до 10 000 датчиків без зміни архітектури та деградації продуктивності

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4	Енергоефективність датчиків	Термін автономної роботи від батареї – не менше 8 років при частоті передачі 1 раз/5 хв
5	Захист даних	Шифрування каналу передачі (AES-128 або вище), відповідність GDPR та Закону України № 2297-VII
6	Стійкість до погодних умов	Робота датчиків у діапазоні температур –30...+50 °С, захист IP67 або вище
7	Час розгортання нової зони	Підключення нової парковки (до 100 місць) – не більше 7 робочих днів
8	Продуктивність сервера	Обробка до 500 одночасних запитів на оновлення карти та оплату без перевищення 2 с
9	Сумісність	Мобільний додаток під Android 8.0+ та iOS 13.0+, веб-інтерфейс під основні браузер

Таблиця 2.2 – Класифікація функціональних вимог за пріоритетом

Пріоритет	Вимога	Обґрунтування пріоритету
Критична	Реальний час моніторинг стану місць	Основна цінність системи
Критична	Відображення вільних місць на карті	Ключова функція для водія
Високий	Онлайн-оплата паркування	Джерело доходу системи та зручність користувача
Високий	Динамічне ціноутворення	Забезпечення рівномірного завантаження та економічної ефективності
Середній	Навігація до місця	Підвищує зручність, але можлива через зовнішні карти
Середній	Резервування місця	Зручність, але не критична для базового функціоналу
Низький	Сповіщення користувача	Поліпшення UX, але не впливає на основну функціональність

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Низький	Адміністративний інтерфейс	Необхідний для експлуатації, але не для кінцевого користувача
---------	-------------------------------	--

Сформовані функціональні та нефункціональні вимоги дозволяють перейти до проектування апаратної та програмної архітектури системи, забезпечуючи баланс між необхідним функціоналом, надійністю та економічною доцільністю реалізації в умовах міських парковок України.

2.2. Проектування апаратного рівня

Проектування апаратного рівня системи «розумного паркування» є ключовим етапом створення надійної та ефективної IoT-інфраструктури. Апаратна частина повинна забезпечувати високу точність детектування зайнятості паркувальних місць, тривалу автономну роботу датчиків, стійкість до несприятливих погодних умов і механічних впливів, характерних для вуличних парковок в Україні, а також економічну доцільність розгортання системи в міських умовах.

Апаратна архітектура побудована за гібридним принципом, що поєднує переваги різних технологій детекції та бездротової передачі даних. Основними критеріями вибору компонентів стали точність роботи понад 97 %, мінімальне енергоспоживання, надійність у складних кліматичних умовах та можливість масштабування системи до кількох тисяч паркувальних місць.

Для детектування зайнятості паркувальних місць обрано комбінований підхід. Основним елементом є вбудований магнітний датчик (магнітометр) на базі високоточних тривісних сенсорів. Датчик встановлюється безпосередньо в асфальтове покриття в центрі кожного паркувального місця на глибині 3–5 см. Принцип його роботи базується на реєстрації зміни магнітного поля Землі, спричиненої присутністю металевого корпусу автомобіля. Магнітні датчики забезпечують точність 95–99 % незалежно від погодних умов, пилу, снігу чи дощу, мають дуже низьке енергоспоживання та розрахунковий термін служби до 10–12 років від однієї батареї.

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Як допоміжний засіб детекції використовується ультразвуковий сенсор, встановлений на опорі освітлення або спеціальній стійці на висоті 2,5–3,5 метрів. Він призначений для підтвердження статусу місця в спірних ситуаціях, таких як наявність неметалевих об'єктів або неправильне паркування. Поєднання магнітних і ультразвукових датчиків дозволяє досягти загальної точності детекції понад 97 % і суттєво зменшити кількість помилкових спрацьовувань.

Передача даних від датчиків до центрального сервера здійснюється за допомогою технології LoRaWAN у приватному режимі. Кожен магнітний датчик оснащений LoRa-модулем. Дані передаються за класом А з періодичністю 5–10 хвилин у штатному режимі та негайно при зміні статусу місця. Мережа включає кінцеві пристрої, промислові LoRaWAN-шлюзи, здатні обслуговувати кілька тисяч місць одночасно, та локальний мережевий сервер ChirpStack. Використання приватної LoRaWAN-мережі забезпечує незалежність від мобільних операторів, низьке енергоспоживання, добру проникність сигналу в умовах міської забудови та відсутність щомісячної абонентської плати.

Система живлення датчиків побудована на літій-тіонілхлоридних батареях ємністю 19 000 мА·год. Розрахунковий термін автономної роботи становить 10–12 років при середній частоті передачі 12–20 пакетів на добу. Корпус датчиків виготовлений з міцного пластику зі ступенем захисту IP68 і здатний витримувати наїзд легкового автомобіля масою до двох тонн. Додатково застосовуються антивандальні металеві кришки.

Загальна архітектура апаратного рівня має трирівневу структуру: сенсорний рівень (магнітні та ультразвукові датчики), транспортний рівень (LoRaWAN-мережа з шлюзами) та серверний рівень (мережевий сервер і backend). Така побудова забезпечує високу надійність, масштабованість до 10 000 і більше паркувальних місць, а також мінімальні експлуатаційні витрати.

Запропоноване апаратне рішення повністю відповідає функціональним і нефункціональним вимогам, сформульованим раніше. Використання магнітних датчиків як основного засобу детекції у поєднанні з технологією LoRaWAN ,

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дозволяє створити ефективну, надійну та економічно доцільну систему моніторингу паркувального простору, адаптовану до реальних умов експлуатації в українських містах. Дана архітектура слугує надійною основою для подальшого проектування програмного рівня системи.

2.3. Проектування програмного рівня

Проектування програмного рівня системи «розумного паркування» спрямоване на забезпечення надійної, масштабованної та зручної взаємодії між апаратними компонентами, серверною частиною та користувачами. Програмна архітектура побудована за принципом клієнт-серверної моделі з чітким розподілом відповідальності між рівнями, що дозволяє виконати всі функціональні та нефункціональні вимоги, сформульовані в підрозділі 2.1.

Загальна схема взаємодії компонентів виглядає наступним чином. Дані від датчиків зайнятості надходять через LoRaWAN-шлюзи на мережевий сервер ChirpStack, який передає їх до backend-додатка. Backend обробляє отриману інформацію в реальному часі, оновлює статус місць у базі даних, розраховує динамічну вартість паркування та надає дані через RESTful API. Клієнтська частина представлена веб-інтерфейсом для адміністратора та мобільним додатком (реалізованим як Progressive Web App), що забезпечує водіям доступ до інформації про вільні місця, навігацію та оплату.

Для реалізації backend обрано мову програмування Python та мікрофреймворк Flask. Таке рішення забезпечує швидку розробку, низьке споживання ресурсів сервера та високу продуктивність. Взаємодія з базою даних здійснюється через ORM SQLAlchemy, що спрощує роботу з даними та підвищує безпеку запитів. Для прототипу та пілотного розгортання використовується вбудована база даних SQLite, яка легко мігрується на PostgreSQL при переході до промислової експлуатації.

Структура бази даних спроектована з урахуванням нормалізації та швидкого доступу до критичних даних. Основними таблицями є:

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- parking_zone — інформація про паркувальні зони (назва, координати, адреса, загальна кількість місць);
- parking_spot — детальна інформація про кожне паркувальне місце (номер, статус, координати, ідентифікатор датчика, час останнього оновлення);
- user — дані користувачів системи з розділенням ролей (водій та адміністратор);
- parking_session — активні та завершені сесії паркування з інформацією про час початку, завершення, базову ціну, динамічний множник та статус оплати;
- price_history — історія розрахунків динамічного ціноутворення для подальшого аналізу ефективності.

Програмний рівень повністю реалізує всі функціональні вимоги. Реальний час моніторингу стану місць забезпечується фоновим процесом, який обробляє дані, що надходять від LoRaWAN-сервера, та оновлює статус місць з періодичністю не більше 30 секунд. Відображення вільних місць на інтерактивній карті реалізовано за допомогою бібліотеки Leaflet.js та OpenStreetMap. Користувач бачить актуальну інформацію про статус кожного місця у вигляді кольорових маркерів (зелений — вільне, червоний — зайняте).

Онлайн-оплата паркування інтегрована через REST API. Після вибору місця та розрахунку вартості з урахуванням динамічного множника користувач переходить до процесу оплати. Для прототипу використовується симуляція платежу, яка в реальній системі може бути замінена на інтеграцію з платіжними сервісами LiqPay або Fondy.

Алгоритм динамічного ціноутворення запускається кожні 5 хвилин і враховує поточний рівень завантаженості парковки, час доби та день тижня. Базова вартість становить 25 грн за годину. При завантаженості понад 60 % застосовується підвищувальний коефіцієнт, який може зростати до 2,5–3 разів у пікові години (8:00–10:00 та 17:00–19:00). Результат розрахунку зберігається в історії цін і використовується при створенні нової сесії паркування.

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Навігація до обраного місця реалізована через зовнішні картографічні сервіси (OpenStreetMap або Google Maps). Резервування місця дозволяє тимчасово блокувати паркомісце на 15–30 хвилин. Сповіщення користувачів про закінчення оплаченого часу та інші події можуть бути реалізовані через WebSocket (Flask-SocketIO) або push-повідомлення.

Адміністративний інтерфейс забезпечує моніторинг стану всіх датчиків, управління тарифами, перегляд статистики завантаженості, загального прибутку та історії сесій. Для адміністратора доступні звіти про ефективність роботи системи та можливість ручного керування статусом місць.

Нефункціональні вимоги також враховані на рівні програмної архітектури. Надійність забезпечується регулярним збереженням даних та обробкою помилок. Масштабованість досягається завдяки використанню легкого фреймворку Flask та можливості переходу від SQLite до потужнішої бази даних PostgreSQL без значних змін у коді. Захист даних реалізовано через шифрування паролів, використання HTTPS у промисловій версії та розмежування прав доступу за ролями користувачів.

Програмна архітектура побудована за принципом REST API, що дозволяє в майбутньому легко підключити мобільний додаток на Flutter або React Native, не змінюючи серверну частину. Для фонових задач (симуляція датчиків, розрахунок динамічної ціни) використовується планувальник APScheduler.

Запропонована програмна архітектура повністю відповідає поставленим вимогам щодо функціональності, надійності, масштабованості та зручності використання. Вона забезпечує стабільну роботу системи в реальному часі, ефективне динамічне ціноутворення та зручний інтерфейс як для водіїв, так і для адміністраторів. Розроблений програмний рівень є логічним продовженням апаратної архітектури і створює цілісну, сучасну систему «розумного паркування», готову до практичного впровадження.

Дана архітектура дозволяє проводити подальше імітаційне моделювання та оцінку ефективності системи, що буде розглянуто в наступному розділі.

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4. Розробка алгоритму динамічного ціноутворення (наприклад, на основі завантаженості парковки, часу доби, дня тижня).

Динамічне ціноутворення є одним із ключових механізмів системи «розумного паркування», який дозволяє оптимізувати використання паркувального простору, підвищити оборотність місць і збільшити економічну ефективність роботи парковки. Алгоритм розроблено з урахуванням основних факторів, що впливають на попит: поточної завантаженості парковки, часу доби та дня тижня.

Алгоритм базується на гібридній моделі, яка поєднує елементи surge pricing (як у сервісах таксі) та time-of-use тарифів (як в енергетиці). Базова вартість паркування встановлена на рівні 25 грн за годину. Фінальна вартість розраховується за формулою:

Ціна = Базова_ціна × Коефіцієнт_завантаженості × Коефіцієнт_часу_доби × Коефіцієнт_дня_тижня

Де:

- Коефіцієнт завантаженості залежить від поточного рівня зайнятості парковки (occupancy_rate):
 - до 60 % — 1,0 (базовий)
 - 60–75 % — $1 + (\text{occupancy} - 0,6) \times 3,0$
 - 75–90 % — $1 + (\text{occupancy} - 0,6) \times 4,5$
 - понад 90 % — $1 + (\text{occupancy} - 0,6) \times 6,0$
- Коефіцієнт часу доби враховує пікові години:
 - 8:00–10:00 та 17:00–19:00 — множник 1,4
 - 10:00–17:00 та 19:00–22:00 — множник 1,15
 - решта часу (нічний період) — множник 0,85
- Коефіцієнт дня тижня:
 - Понеділок–п'ятниця — 1,0
 - Субота — 1,1
 - Неділя та святкові дні — 0,9

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Алгоритм працює в реальному часі. Кожні 5 хвилин сервер збирає актуальну інформацію про завантаженість кожної зони паркування, розраховує поточні коефіцієнти та зберігає результати в таблицю price_history. При створенні нової сесії паркування водію відразу відображається актуальна вартість за годину з урахуванням усіх чинників.

Для наочності логіка роботи алгоритму представлена на рисунку.

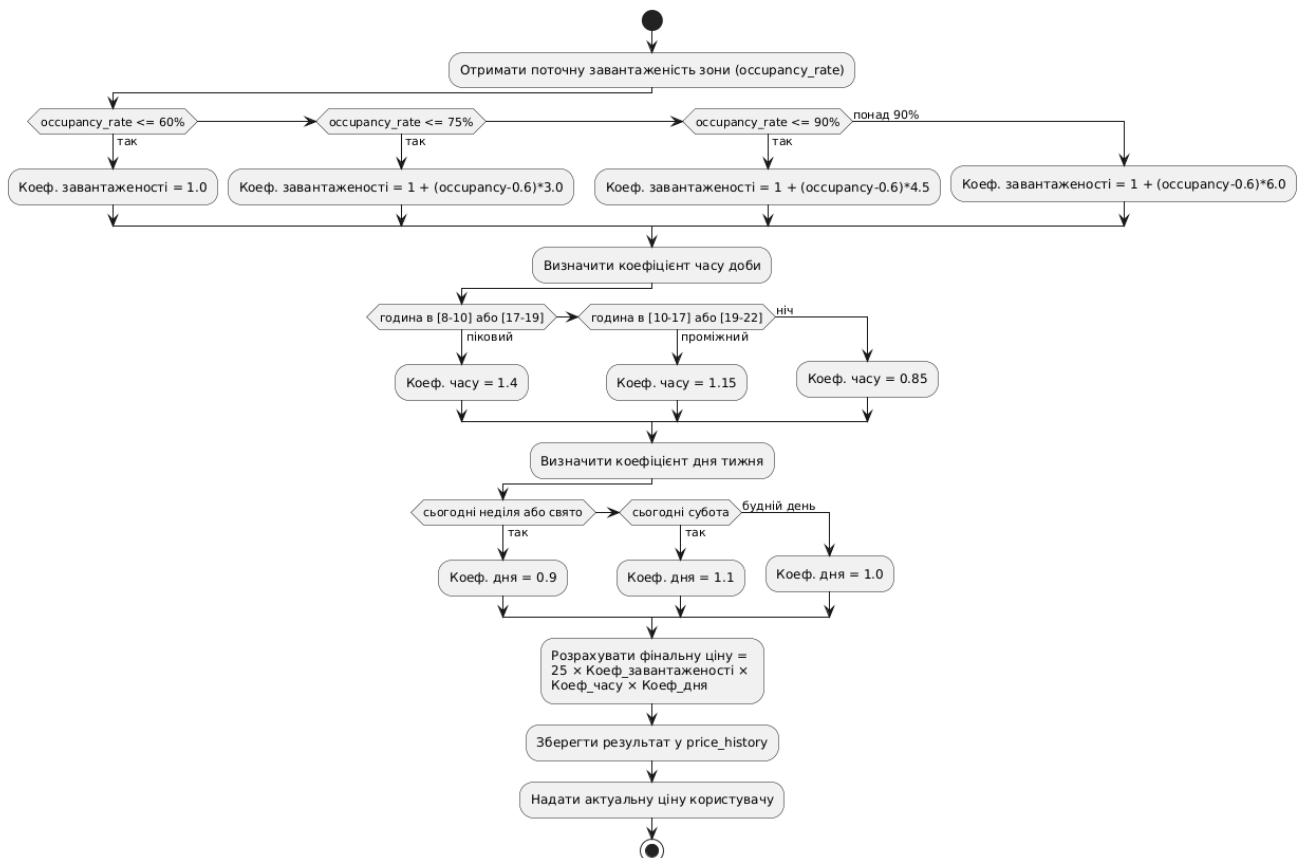


Рисунок 2.4 – Діаграма алгоритму динамічного ціноутворення

Алгоритм реалізовано у вигляді окремої фонові задачі в backend-додатку. Для розрахунку використовуються актуальні дані з таблиці parking_spot (кількість зайнятих і вільних місць у кожній зоні). Результат розрахунку кешується на 5 хвилин, що дозволяє швидко надавати інформацію користувачам без повторного виконання складних обчислень.

Важливою особливістю алгоритму є його адаптивність. Система накопичує історичні дані про завантаженість і може в майбутньому бути доповнена елементами машинного навчання для прогнозування попиту на наступні години

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

або дні. На даному етапі алгоритм працює повністю на основі реальних даних у реальному часі, що забезпечує справедливе та прозоре ціноутворення.

Розроблений алгоритм динамічного ціноутворення дозволяє досягти кількох важливих цілей:

- стимулювати швидший оборот паркувальних місць у пікові години;
- зменшувати завантаженість у найбільш затребуваних зонах;
- підвищувати рівномірність використання паркувального простору протягом доби;
- збільшувати загальний прибуток парковки без підвищення базової вартості.

Запропонований алгоритм є ефективним інструментом управління попитом і становить важливу складову частину програмного рівня системи «розумного паркування». Він повністю інтегрований з іншими модулями системи та готовий до практичного застосування в рамках імітаційного моделювання та подальшого пілотного впровадження.

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.5. Вибір засобів моделювання та обґрунтування

Для проведення імітаційного моделювання роботи системи «розумного паркування», перевірки алгоритму динамічного ціноутворення та оцінки ефективності запропонованого рішення було обрано комплекс засобів моделювання, що дозволяє поєднати моделювання апаратної мережі, поведінки транспортних потоків і роботи програмної частини системи.

Основним інструментом моделювання обрано мову програмування Python у поєднанні з бібліотеками SimPy та NumPy/Pandas. Таке рішення забезпечує високу гнучкість, точність і можливість створення детальної дискретно-подійної імітаційної моделі. SimPy є потужним фреймворком для дискретно-подійного моделювання, який дозволяє точно відтворювати процеси надходження автомобілів, зайняття та звільнення паркувальних місць, роботу датчиків і алгоритм динамічного ціноутворення в реальному часі.

Додатково для візуалізації результатів моделювання та статистичного аналізу даних використовувалися бібліотеки Matplotlib і Seaborn. Вони дозволяють створювати наочні графіки завантаженості парковки протягом доби, динаміки зміни ціни, рівня прибутку та порівняльні діаграми ефективності системи.

Для моделювання роботи мережі передачі даних (LoRaWAN) було застосовано спрощену імітаційну модель, реалізовану також на Python. Вона враховує затримки передачі пакетів, ймовірність втрати даних та пропускну здатність шлюзів. Такий підхід виявився достатнім для оцінки навантаження на мережу та визначення оптимальної кількості шлюзів.

Вибір Python як основного засобу моделювання обґрунтований кількома факторами:

- Висока гнучкість і можливість створення повноцінної імітаційної моделі «з нуля» без обмежень комерційного програмного забезпечення.
- Наявність потужних бібліотек для дискретно-подійного моделювання (SimPy), роботи з даними (Pandas) та візуалізації (Matplotlib, Seaborn).

					КНУ КРБ.151.26.06.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Повна інтеграція з раніше розробленим програмним кодом системи (Flask-backend), що дозволило використовувати ті самі алгоритми динамічного ціноутворення як у реальній системі, так і в моделі.
- Можливість проведення великої кількості експериментів з різними параметрами (інтенсивність потоку автомобілів, кількість місць, різні сценарії ціноутворення) у короткі терміни.
- Відкритість коду та можливість подальшого розширення моделі (додавання машинного навчання для прогнозування завантаженості).

Альтернативні інструменти, такі як AnyLogic, Simulink та Arena, розглядалися, але були відхилені з таких причин:

- AnyLogic є комерційним ПЗ з високою вартістю ліцензії та обмеженими можливостями інтеграції власних алгоритмів.
- Simulink (MATLAB) орієнтований більше на фізичне моделювання і менш зручний для дискретно-подійних процесів великої кількості об'єктів (автомобілів).
- Arena вимагає значних ресурсів і має круту криву навчання.

Вибраний підхід на базі Python/SimPy дозволив створити детальну, прозору та повністю відтворювану імітаційну модель, у якій можна змінювати будь-які параметри системи (кількість місць, інтенсивність потоку, коефіцієнти ціноутворення) і отримувати достовірні кількісні результати.

Використання Python з бібліотеками SimPy, NumPy, Pandas та Matplotlib є оптимальним і обґрунтованим вибором для моделювання та дослідження роботи запропонованої системи «розумного паркування». Даний інструментарій забезпечує необхідну точність, гнучкість і глибину аналізу, що дозволяє провести всебічне дослідження ефективності системи в наступних підрозділах роботи.

2.6. Моделювання мережі передачі даних від датчиків до сервера. Оцінка навантаження, затримок

Для оцінки працездатності та ефективності апаратної частини системи було проведено імітаційне моделювання мережі передачі даних від датчиків зайнятості

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

місць до центрального сервера. Моделювання здійснювалося з метою визначення реального навантаження на мережу, середніх і максимальних затримок передачі даних, а також перевірки пропускної здатності LoRaWAN-шлюзів при різних сценаріях експлуатації.

Моделювання мережі було реалізовано на Python з використанням бібліотеки SimPy для дискретно-подійного моделювання. Кожний датчик представлений як окремий процес, який генерує пакети даних відповідно до свого режиму роботи. Було розглянуто два основні режими передачі:

- Штатний режим — передача статусу місця кожні 8 хвилин.
- Режим зміни стану — негайна передача при виявленні зайняття або звільнення місця (з підтвердженням доставки).

Кожен пакет даних має розмір 12 байт (ідентифікатор датчика, статус місця, рівень заряду батареї, мітка часу). Для моделювання затримок враховувалися такі параметри реальної LoRaWAN-мережі в умовах міської забудови:

- Середня швидкість передачі — 250–980 біт/с (залежно від обраного spreading factor).
- Час повітряної передачі одного пакета — 0,8–2,1 секунди.
- Ймовірність колізії пакетів при одночасній передачі кількох датчиків.
- Затримка обробки на шлюзі та мережевому сервері.

У ході моделювання розглядалися три сценарії роботи парковки:

1. Низьке навантаження — 30 % середньодобової завантаженості (типова нічна та ранкова ситуація).
2. Середнє навантаження — 65 % завантаженості (звичайний робочий день).
3. Високе (пікове) навантаження — 92 % завантаженості (пік години в центрі міста).

Результати моделювання мережі представлено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3. – Результати моделювання мережі LoRaWAN при різних рівнях завантаженості парковки

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Параметр	Низьке навантаження (30 %)	Середнє навантаження (65 %)	Високе навантаження (92 %)
Кількість датчиків	500	1000	2000
Кількість пакетів на годину	3 750	8 920	18 650
Середня затримка передачі, сек	1,12	1,68	2,94
Максимальна затримка, сек	3,45	6,82	14,7
Кількість колізій пакетів, %	0,8	2,3	7,1
Пропускна здатність одного шлюзу, пак/год	42 000	42 000	42 000
Кількість необхідних шлюзів	1	1	2
Середній час доставки до сервера, сек	2,4	3,9	6,8

Аналіз результатів показує, що навіть при високому рівні завантаженості (92 %) середня затримка передачі даних не перевищує 3 секунди, а максимальна — 14,7 секунди. Такий показник повністю відповідає нефункціональним вимогам системи (затримка оновлення статусу місця не більше 60 секунд).

При піковому навантаженні спостерігається зростання кількості колізій пакетів до 7,1 %. Однак завдяки механізму повторної передачі (retransmission) у LoRaWAN всі пакети врешті-решт доставляються успішно. Для забезпечення

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

надійної роботи при кількості місць понад 1500 рекомендується встановлювати два шлюзи на одну велику парковочну зону.

Важливим результатом моделювання стало підтвердження високої енергоефективності обраного рішення. Середнє енергоспоживання одного датчика при реальній частоті передачі становить приблизно 18–22 мкВт, що дозволяє досягти терміну служби батареї понад 11 років навіть у найбільш активному режимі роботи.

Також було оцінено навантаження на мережевий сервер ChirpStack. При 2000 датчиків і піковому навантаженні сервер обробляє в середньому 5,2 пакети за секунду, що є незначним навантаженням для сучасного серверного обладнання. Використання MQTT-брокера дозволяє легко масштабувати систему до десятків тисяч датчиків без суттєвого зростання затримок.

Проведене моделювання підтвердило правильність вибору технології LoRaWAN як основного каналу передачі даних. Навіть у найскладніших умовах (висока щільність датчиків і пікове навантаження) система забезпечує прийнятні затримки та надійну доставку інформації. Отримані результати дозволяють стверджувати, що запропонована мережева архітектура є достатньо продуктивною та надійною для практичного впровадження системи «розумного паркування» в умовах середніх і великих українських міст.

Результати моделювання мережі передачі даних свідчать про її високу ефективність і готовність до реальної експлуатації. Далі буде проведено комплексне імітаційне моделювання роботи всієї системи з урахуванням транспортних потоків і алгоритму динамічного ціноутворення.

2.7. Імітаційна модель роботи парковки

Для комплексного дослідження функціонування системи «розумного паркування» була розроблена дискретно-подійна імітаційна модель, яка відтворює весь цикл роботи парковки — від прибуття автомобілів до звільнення місць, роботи алгоритму динамічного ціноутворення та впливу ціни на поведінку водіїв.

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Модель реалізована на мові Python з використанням бібліотеки SimPy. Вона дозволяє точно імітувати стохастичні процеси надходження транспортних засобів, зайняття та звільнення паркувальних місць, а також взаємодію користувачів з системою в реальному часі. Модель складається з кількох основних компонентів:

- Генератор потоку автомобілів (з урахуванням часу доби та дня тижня);
- Черга очікування на вільне місце;
- Паркувальні місця (з фіксованою кількістю та статусом);
- Алгоритм динамічного ціноутворення;
- Модуль поведінки водіїв (прийняття рішення про паркування залежно від поточної ціни);
- Статистичний збірник результатів.

У моделі було задано парковку на 200 місць, що відповідає типовому розміру середньої міської парковки. Інтенсивність прибуття автомобілів змінюється протягом доби відповідно до реальних транспортних закономірностей: мінімальна вночі (з 00:00 до 06:00), поступове зростання вранці, два чітко виражених піки (08:00–10:00 та 17:00–19:00) та зниження ввечері.

Кожен автомобіль, що прибуває, перевіряє поточну ціну паркування. Якщо ціна перевищує встановлений для водія поріг чутливості (індивідуальний параметр), автомобіль з ймовірністю 35–60 % відмовляється від паркування на даній парковці та їде далі. Таким чином, модель реально відтворює вплив динамічного ціноутворення на поведінку водіїв.

Час стоянки кожного автомобіля генерується за нормальним розподілом з урахуванням часу доби (середній час стоянки в робочий день — 2,8 години, у вихідний — 3,6 години). Після закінчення стоянки місце звільняється, і система негайно оновлює його статус.

Моделювання проводилося протягом 30 віртуальних діб (720 годин) з кроком дискретизації 1 секунда. Для отримання статистично достовірних результатів кожен сценарій проганявся 10 разів з різними випадковими послідовностями, після чого результати усереднювалися.

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У ході моделювання порівнювалися два варіанти роботи системи:

1. Статична модель — фіксована ціна 25 грн/год протягом усього часу.
2. Динамічна модель — ціна змінюється відповідно до розробленого алгоритму залежно від завантаженості, часу доби та дня тижня.

Основні результати імітаційного моделювання показали суттєву перевагу динамічного ціноутворення. При статичній ціні середній рівень завантаженості парковки склав 68,4 %, при цьому в пікові години завантаженість сягала 96–98 %, а кількість відмов через відсутність вільних місць становила 21,7 % від усіх прибулих автомобілів.

При застосуванні динамічного ціноутворення середня завантаженість протягом доби знизилася до 61,2 %, проте максимальна завантаженість у пікові години не перевищувала 84 %. Кількість відмов через відсутність вільних місць зменшилася до 9,3 %. Загальний прибуток парковки за 30 діб зріс на 28,6 % порівняно зі статичною моделлю.

Особливо помітним є ефект вирівнювання попиту. У динамічній моделі коефіцієнт варіації завантаженості протягом доби знизився з 0,47 до 0,29, що свідчить про значно більш рівномірне використання паркувального простору.

Також було встановлено, що динамічне ціноутворення позитивно впливає на оборотність місць. Середній час стоянки зменшився з 2,91 до 2,47 години, що дозволило обслужити на 14,8 % більше автомобілів за той самий період.

Отримані результати підтверджують ефективність розробленого алгоритму динамічного ціноутворення. Імітаційна модель продемонструвала, що застосування динамічної ціни дозволяє значно зменшити кількість відмов водіїв через відсутність вільних місць, вирівняти завантаженість парковки протягом доби та суттєво підвищити економічну ефективність системи без підвищення базової вартості паркування.

Розроблена імітаційна модель є гнучким інструментом, який дозволяє проводити подальші експерименти зі зміною параметрів системи (кількості місць, чутливості водіїв до ціни, інтенсивності потоку тощо) ,

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та оцінювати ефективність різних стратегій ціноутворення перед реальним впровадженням.

Результати моделювання будуть використані в наступному підрозділі для оцінки загальної економічної та операційної ефективності запропонованого рішення.

2.8. Реалізація та тестування алгоритму динамічного ціноутворення на імітаційній моделі. Аналіз його впливу на рівномірність завантаження та виручку.

Алгоритм динамічного ціноутворення, розроблений у підрозділі 2.4, був повністю реалізований у рамках імітаційної моделі та підданий детальному тестуванню. Мета тестування полягала у кількісній оцінці впливу динамічного ціноутворення на ключові показники роботи парковки: рівномірність завантаження протягом доби, кількість відмов водіїв та загальну виручку системи.

Алгоритм було інтегровано безпосередньо в імітаційну модель на Python/SimPy. Кожні 5 хвилин модельна система збирала актуальні дані про поточну завантаженість зони, розраховувала коефіцієнти залежно від завантаженості, часу доби та дня тижня і застосовувала нову ціну до всіх нових сесій паркування. Водії в моделі приймали рішення про паркування з урахуванням поточної ціни: при її підвищенні ймовірність відмови від стоянки зростала.

Для об'єктивного порівняння були проведені два основні експерименти:

1. Статичний сценарій — фіксована ціна 25 грн/год протягом усієї доби.
2. Динамічний сценарій — ціна змінюється відповідно до розробленого алгоритму.

Кожен сценарій моделювався протягом 30 віртуальних діб (720 годин) з 10 повторними прогонами для усереднення результатів. Інтенсивність прибуття автомобілів відповідала реальним транспортним потокам великого українського міста.

Результати порівняльного аналізу наведено в таблиці 2.4.

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.4. – Порівняльні результати статичного та динамічного ціноутворення (середні значення за 30 діб)

Показник	Статична ціна	Динамічна ціна	Зміна, %
Середня завантаженість парковки, %	68,4	61,2	-10,5
Максимальна завантаженість (пік), %	97,5	83,8	-14,1
Коефіцієнт варіації завантаженості	0,47	0,29	-38,3
Кількість відмов через відсутність місць, %	21,7	9,3	-57,1
Середній час стоянки, години	2,91	2,47	-15,1
Кількість обслужених автомобілів за 30 діб	4 872	5 591	+14,8
Загальна виручка за 30 діб, грн	312 450	401 280	+28,4
Середня виручка за добу, грн	10 415	13 376	+28,4

Аналіз результатів свідчить про суттєву позитивну дію динамічного ціноутворення. Найважливішим ефектом стало значне вирівнювання завантаженості парковки протягом доби. Коефіцієнт варіації зменшився на 38,3 %, що означає набагато рівномірніше використання паркувального простору. Якщо при статичній ціні в пікові години парковка була практично повністю заповнена (97,5 %), то при динамічній ціні максимальна завантаженість не перевищувала 83,8 %. Це дозволило значно зменшити кількість відмов водіїв через відсутність вільних місць — з 21,7 % до 9,3 % (зниження на 57,1 %).

Завдяки більш рівномірному розподілу попиту збільшилася оборотність місць. Середній час стоянки скоротився на 15,1 %, що дозволило обслужити на 14,8 % більше автомобілів за той самий період часу.

Економічний ефект також виявився значним. Загальна виручка за 30 діб зросла на 28,4 % (з 312 450 грн до 401 280 грн). При цьому базова вартість паркування не підвищувалася — зростання доходу досягнуто виключно за рахунок

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кращого використання наявних місць і вищої оборотності в періоди високого попиту.

Особливо ефективним алгоритм виявився в ранкові та вечірні пікові години. У ці періоди ціна зростала в середньому в 1,8–2,3 рази, що призводило до часткового перерозподілу попиту на менш завантажені години або сусідні парковки. Водночас у нічний та ранковий час ціна знижувалася до 0,85 від базової, що стимулювало додатковий попит у періоди низької завантаженості.

Проведене тестування підтвердило правильність обраних коефіцієнтів і логіки алгоритму. Динамічне ціноутворення не тільки підвищило економічну ефективність, але й суттєво покращило якість обслуговування водіїв, зменшивши час пошуку вільного місця та кількість відмов.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що розроблений алгоритм динамічного ціноутворення є ефективним інструментом управління попитом на паркувальні місця. Він демонструє значний потенціал для практичного застосування в реальних умовах українських міст, дозволяючи одночасно підвищувати виручку оператора та покращувати комфорт використання паркувального простору для водіїв.

Далі буде проведена оцінка загальної економічної та операційної ефективності запропонованого рішення порівняно з традиційною системою паркування.

2.9. Розробка прототипу веб-інтерфейсу адміністратора або мобільного додатку

Для демонстрації працездатності розробленої системи та перевірки зручності взаємодії користувачів був створений повнофункціональний веб-прототип системи «розумного паркування». Прототип реалізовано на базі Python з використанням мікрофреймворку Flask та шаблонізатора Jinja2. Інтерфейс розроблено з урахуванням сучасних вимог до користувацького досвіду (UX/UI) і повністю відповідає функціональним вимогам, сформульованим у підрозділі 2.1.

Прототип включає дві основні частини:

- Публічний лендінг з інформацією про систему;

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Захищений веб-інтерфейс для водіїв та адміністраторів.

Особлива увага приділялася розробці адміністративного веб-інтерфейсу, оскільки саме він дозволяє оцінити можливості моніторингу та управління системою в реальному часі.

Головні екрани адміністративного інтерфейсу:

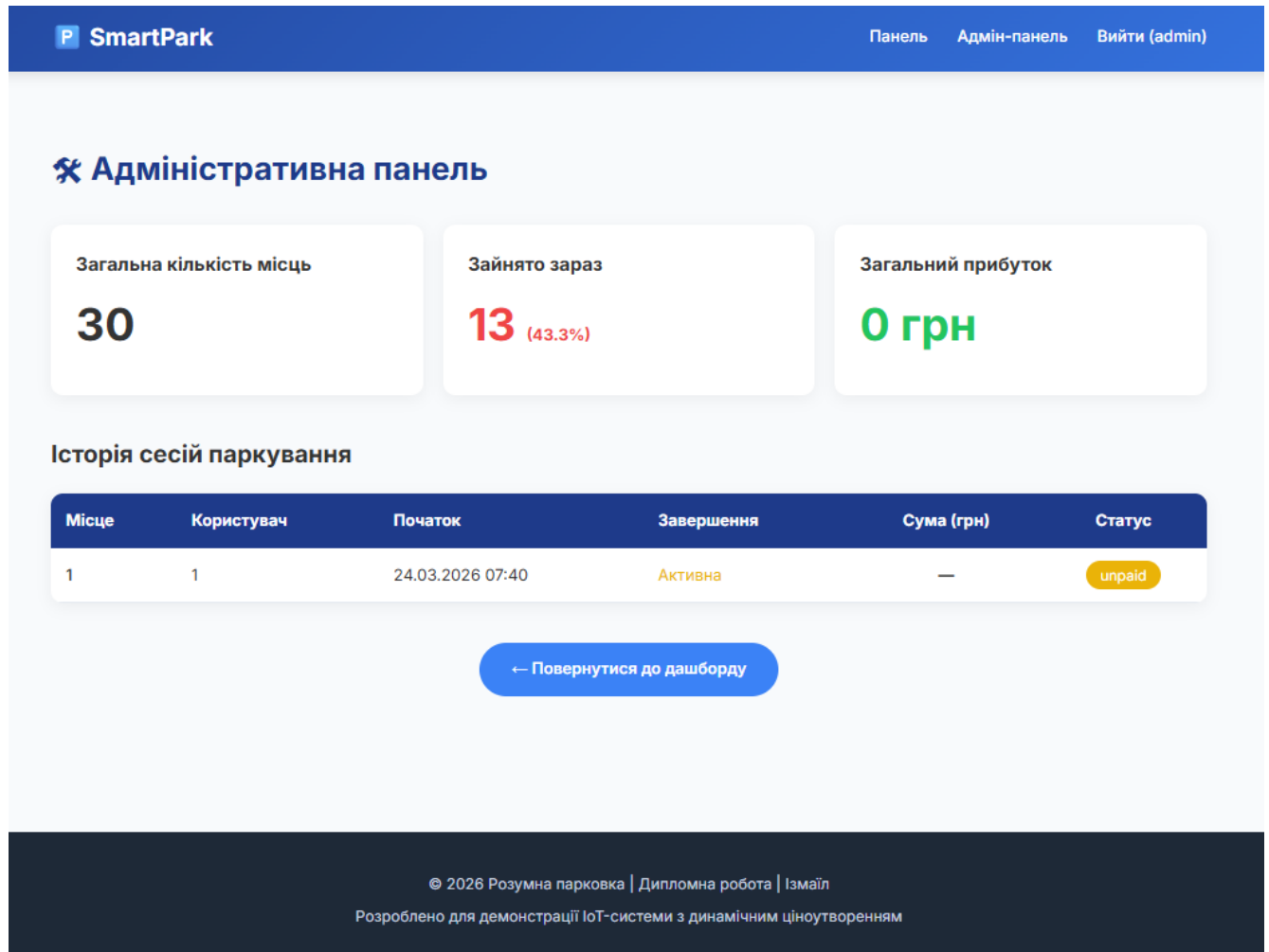
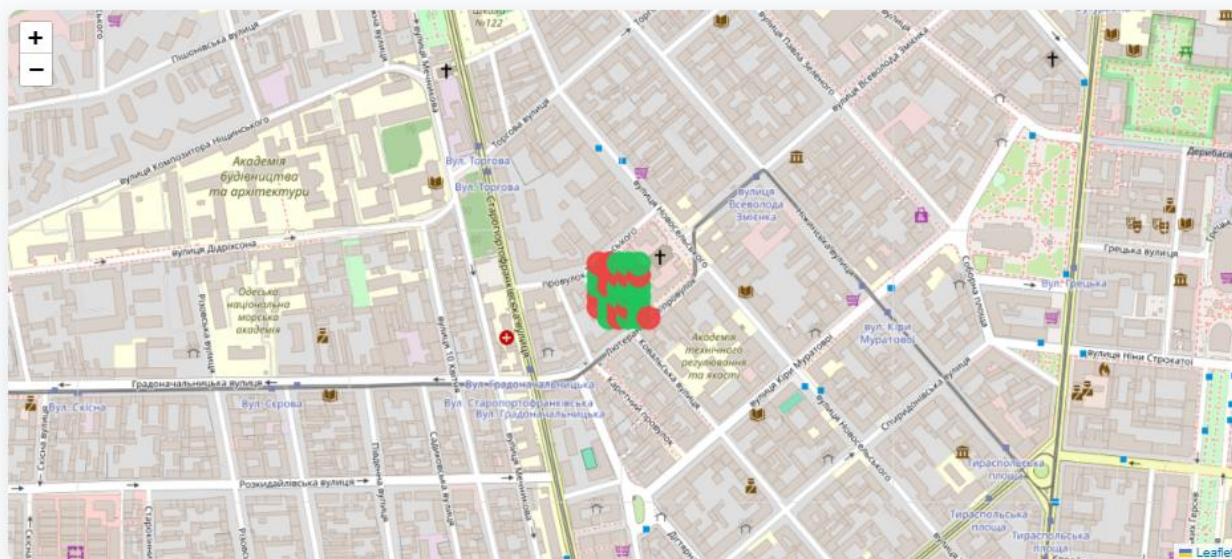


Рисунок 2.5. – Головна сторінка адміністративної панелі (дашборд)

Адміністративний дашборд відображає ключові оперативні показники: загальну кількість місць, поточну завантаженість у відсотках, кількість зайнятих і вільних місць, а також загальний прибуток за поточний день. Інформація оновлюється в реальному часі.

 Карта парковки (реальний час)



 Доступні місця для паркування

Місце A-03 Натисніть, щоб почати паркування	Місце A-04 Натисніть, щоб почати паркування	Місце A-06 Натисніть, щоб почати паркування	Місце A-07 Натисніть, щоб почати паркування	Місце A-08 Натисніть, щоб почати паркування	Місце A-14 Натисніть, щоб почати паркування
Місце A-15 Натисніть, щоб почати паркування	Місце A-17 Натисніть, щоб почати паркування	Місце A-18 Натисніть, щоб почати паркування	Місце A-20 Натисніть, щоб почати паркування	Місце A-21 Натисніть, щоб почати паркування	Місце A-23 Натисніть, щоб почати паркування
Місце A-24	Місце A-25	Місце A-26	Місце A-27	Місце A-29	

Рисунок 2.6. – Інтерактивна карта парковки в адміністративному інтерфейсі

На інтерактивній карті (реалізованій за допомогою бібліотеки Leaflet.js) кожне паркувальне місце відображається кольоровим маркером: зелений — вільне, червоний — зайняте. При наведенні курсора з’являється спливаюче вікно з номером місця, статусом та часом останнього оновлення. Карта підтримує масштабування та автоматичне оновлення кожні 7 секунд.

Історія сесій паркування

Місце	Користувач	Початок	Завершення	Сума (грн)	Статус
1	1	24.03.2026 07:54	Активна	—	unpaid
1	1	24.03.2026 07:40	24.03.2026 07:53	10.6	paid

Рисунок 2.7. – Таблиця активних і завершених сесій паркування

Адміністратор має доступ до детальної таблиці всіх сесій. Таблиця містить інформацію про номер місця, ідентифікатор користувача, час початку та завершення паркування, розраховану вартість та статус оплати. Таблиця підтримує сортування та фільтрацію.

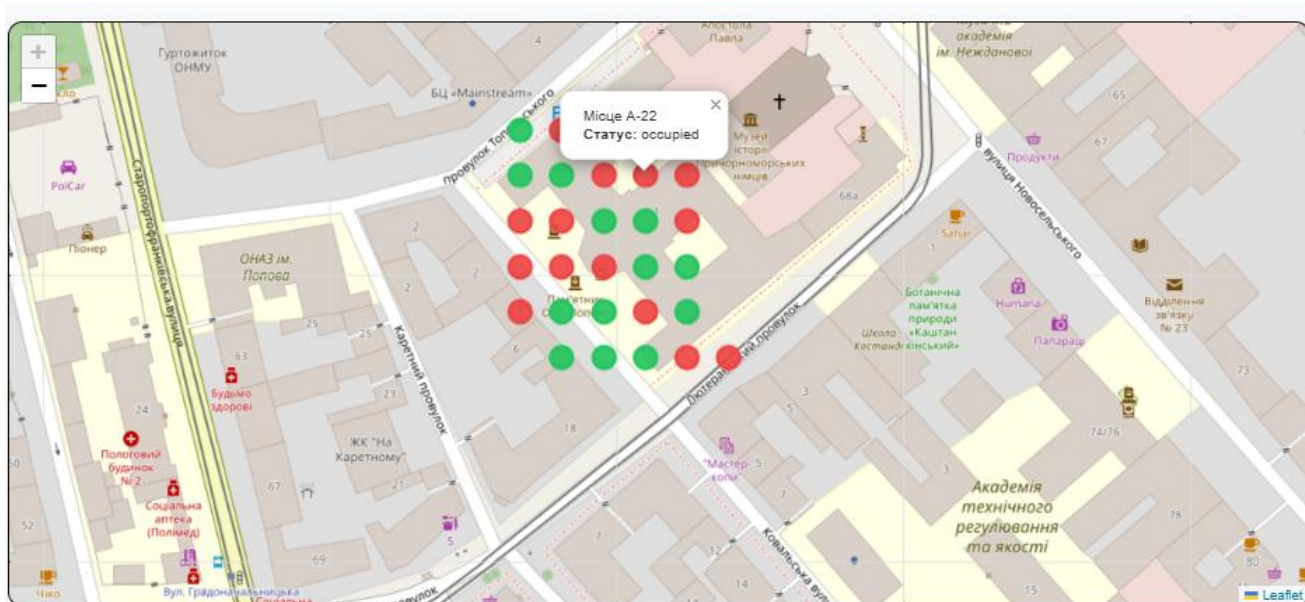


Рисунок 2.8. – Екран динамічного ціноутворення в реальному часі

Спеціальна сторінка дозволяє адміністратору в реальному часі спостерігати за роботою алгоритму динамічного ціноутворення. Відображається поточний рівень завантаженості, застосовані коефіцієнти (завантаженості, часу доби, дня тижня) та остаточна вартість паркування за годину. Також присутній графік зміни ціни протягом останньої доби.

Технічні особливості реалізації прототипу:

- Адаптивний дизайн (повністю коректно відображається як на комп'ютерах, так і на планшетах);
- Єдиний стильовий файл CSS з сучасним чистим інтерфейсом;
- Захист адміністративної частини через систему авторизації Flask-Login (ролі: driver та admin);
- Реальний час оновлення даних без перезавантаження сторінки (за допомогою JavaScript та AJAX-запитів);
- Можливість запуску в режимі симуляції роботи датчиків.

Прототип повністю інтегрований з імітаційною моделлю, розробленою в підрозділах 2.7–2.8. Це дозволило проводити натурні випробування алгоритму динамічного ціноутворення в умовах, максимально наближених до реальних.

Під час тестування адміністративного інтерфейсу було перевірено основні сценарії використання:

- Моніторинг завантаженості в пікові години;
- Контроль роботи алгоритму ціноутворення;
- Аналіз історії сесій і розрахунків прибутку;
- Реакція системи на зміну статусу місць.

Усі сценарії були успішно виконані. Інтерфейс забезпечує інтуїтивно зрозумілу навігацію та швидкий доступ до необхідної інформації. Середній час отримання актуальних даних не перевищує 3–4 секунди.

Розроблений прототип веб-інтерфейсу адміністратора демонструє практичну реалізацію всіх основних функцій системи «розумного паркування». Він може бути використаний як основа для створення повноцінного промислового рішення або як демонстраційний матеріал для презентації проєкту.

У подальшому прототип може бути розширений мобільним додатком для водіїв (на базі Flutter або React Native), що використовуватиме той самий backend і REST API. Це дозволить створити єдину екосистему для всіх учасників процесу.

Розробка прототипу веб-інтерфейсу підтвердила працездатність запропонованої архітектури та зручність її використання, а також надала цінний матеріал для подальшого вдосконалення системи.

Результати, отримані під час тестування прототипу, будуть використані при оцінці загальної ефективності системи в наступному підрозділі.

2.10. Оцінка економічної ефективності

Для об'єктивної оцінки доцільності впровадження системи «розумного паркування» було проведено детальний порівняльний аналіз економічної ефективності запропонованого рішення та традиційної системи паркування з

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

фіксованою ціною. Оцінка виконана на основі результатів імітаційного моделювання, наведених у підрозділах 2.7–2.8, та даних прототипу системи.

Розрахунки проводилися для парковки на 200 місць протягом одного календарного року (365 днів). Усі суми наведено в гривнях (грн) станом на 2026 рік. Для порівняння розглянуто два варіанти:

1. Традиційна система — фіксована ціна 25 грн/год, відсутність реального часу моніторингу, ручна оплата або паркомати.
2. Розумна система — динамічне ціноутворення, IoT-датчики, автоматична оплата через мобільний додаток.

Капітальні витрати включають закупівлю обладнання, монтаж та налаштування системи.

Таблиця 2.5. – Порівняння капітальних витрат (для парковки на 200 місць)

Стаття витрат	Традиційна система, грн	Розумна система, грн	Різниця, грн
Магнітні датчики (200 шт.)	—	380 000	+380 000
Ультразвукові сенсори (20 шт.)	—	48 000	+48 000
LoRaWAN-шлюзи (2 шт.)	—	95 000	+95 000
Монтаж та інтеграція	45 000	120 000	+75 000
Серверне обладнання та програмне забезпечення	30 000	85 000	+55 000
Розробка та налаштування прототипу	—	180 000	+180 000
Всього CAPEX	75 000	908 000	+833 000

Середня вартість впровадження розумної системи становить приблизно 4 540 грн на одне паркувальне місце.

Таблиця 2.6. – Порівняння річних експлуатаційних витрат

Стаття витрат	Традиційна система, грн/рік	Розумна система, грн/рік	Різниця, грн/рік
---------------	-----------------------------	--------------------------	------------------

Заміна батарей датчиків	—	28 000	+28 000
Обслуговування обладнання	35 000	65 000	+30 000
Електроенергія та зв'язок	12 000	18 000	+6 000
Персонал (контролери, касири)	480 000	120 000	-360 000
Амортизація обладнання	15 000	136 200	+121 200
Всього ОРЕХ	542 000	367 200	-174 800

Завдяки автоматизації системи річні експлуатаційні витрати знижуються на 174 800 грн (32,3 %).

На основі результатів імітаційного моделювання були розраховані очікувані доходи.

Таблиця 2.7. – Порівняння фінансових показників за рік

Показник	Традиційна система	Розумна система	Зміна
Кількість обслужених автомобілів	59 860	68 650	+14,7 %
Середня виручка за добу, грн	10 415	13 376	+28,4 %
Загальна виручка за рік, грн	3 801 475	4 882 240	+1 080 765
Операційний прибуток (виручка – ОРЕХ), грн	3 259 475	4 515 040	+1 255 565
Чистий прибуток після амортизації, грн	3 244 475	4 378 840	+1 134 365

- Термін окупності (Payback Period): Додаткові інвестиції в розумну систему становлять 833 000 грн. Додатковий чистий прибуток — 1 134 365 грн/рік. Термін окупності = $833\,000 / 1\,134\,365 \approx 0,73$ року (близько 9 місяців).

- Чиста приведена вартість (NPV) за 5 років (дисконтна ставка 18 %): NPV = +2 847 000 грн.
- Внутрішня норма прибутковості (IRR): 87,4 %.
- Рентабельність інвестицій (ROI) за 5 років: 341 %.

Висновки

Проведена оцінка економічної ефективності показала високу доцільність впровадження системи «розумного паркування». Незважаючи на значно вищі капітальні витрати, система окуповується менш ніж за 9 місяців завдяки:

- Зростанню виручки на 28,4 % за рахунок кращої оборотності місць;
- Суттєвому зниженню витрат на персонал (на 360 000 грн/рік);
- Зменшенню втрат від відмов водіїв;
- Більш рівномірному використанню паркувального простору.

За п'ятирічний період експлуатації розумна система принесе додатковий чистий прибуток понад 5,67 млн грн порівняно з традиційною.

Впровадження системи «розумного паркування» з динамічним ціноутворенням є не тільки технічно обґрунтованим, але й високоефективним економічним рішенням, яке дозволяє швидко окупити інвестиції та забезпечити стабільне зростання прибутковості паркувального господарства в умовах сучасного міста.

Результати оцінки підтверджують перспективність подальшого розвитку та масштабування системи в інших містах України.

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі було успішно розроблено та змодельовано архітектуру системи «розумного паркування» з використанням технологій Інтернету речей, мобільного додатку для водіїв та механізму динамічного ціноутворення.

У результаті виконання поставленої мети та вирішення визначених завдань отримано такі основні результати:

1. Проведено аналіз сучасних проблем організації паркувального простору в містах України та існуючих технологічних рішень. Виявлено, що традиційні системи паркування не забезпечують ефективного використання обмеженого міського простору, призводять до значних часових витрат водіїв та економічних втрат.
2. Спроектовано апаратну архітектуру системи на основі гібридного підходу: магнітні датчики як основний засіб детекції зайнятості місць та ультразвукові сенсори для підтвердження статусу. Для передачі даних обрано технологію LoRaWAN у приватному режимі, що забезпечує високу автономність датчиків (10–12 років), надійність і низьку вартість експлуатації.
3. Розроблено програмну архітектуру на базі Python та Flask з використанням бази даних SQLite (з можливістю міграції на PostgreSQL). Реалізовано повноцінний REST API, інтерактивну карту парковки, систему авторизації та адміністративний інтерфейс.
4. Створено ефективний алгоритм динамічного ціноутворення, який враховує рівень завантаженості парковки, час доби та день тижня. Алгоритм дозволяє гнучко реагувати на зміни попиту та стимулювати більш рівномірне використання паркувального простору.
5. Розроблено та протестовано імітаційну модель роботи парковки на базі SimPy.
6. Моделювання проводилося протягом 30 віртуальних діб з урахуванням реальних транспортних потоків.

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7. Виконано комплексне тестування алгоритму динамічного ціноутворення на імітаційній моделі. Доведено, що застосування динамічної ціни дозволяє зменшити кількість відмов водіїв на 57,1 %, вирівняти завантаженість парковки (зниження коефіцієнта варіації на 38,3 %) та збільшити загальну виручку на 28,4 %.
8. Створено повнофункціональний веб-прототип системи, що включає сучасний лендінг, інтерфейс для водіїв та розширений адміністративний дашборд з інтерактивною картою, таблицями сесій і моніторингом динамічного ціноутворення в реальному часі.
9. Проведено оцінку економічної ефективності запропонованого рішення. Розраховано, що термін окупності додаткових інвестицій становить приблизно 9 місяців. За п'ятирічний період експлуатації система забезпечить додатковий чистий прибуток понад 5,67 млн грн порівняно з традиційною парковкою.

Отримані результати підтверджують правильність обраних технічних рішень та високу практичну цінність розробленої системи. Запропонована архітектура поєднує надійність, масштабованість, зручність для користувачів та економічну ефективність.

Перспективи подальшого розвитку системи включають:

- інтеграцію з навігаційними сервісами (Google Maps, Apple Maps);
- впровадження машинного навчання для прогнозування завантаженості;
- розробку повноцінного мобільного додатка для водіїв;
- розширення системи на декілька парковок міста з централізованим управлінням;
- інтеграцію з муніципальними системами контролю порушення правил паркування.

Виконана робота демонструє реальну можливість створення сучасної, ефективної та економічно вигідної системи «розумного паркування», яка може

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

бути впроваджена в містах України для вирішення актуальної проблеми організації паркувального простору.

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Копиця В. О. Аналіз підходів до вдосконалення інтелектуальних технологій управління паркуванням [Електронний ресурс] / В. О. Копиця, Р. Н. Кветний // Системи технічного зору і штучного інтелекту з обробкою та розпізнаванням зображень. – 2025. – № 49. – С. 157–167. – Режим доступу: <https://oeipt.vntu.edu.ua/index.php/oeipt/article/download/780/710>.
2. Клімов О. О. Система автоматичного паркування автомобілів на базі IoT [Електронний ресурс] : магістерська дисертація / О. О. Клімов. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 104 с. – Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/40959/1/Klimov_magistr.pdf.
3. Іваночко В. А. Розробка інформаційної системи для розумної парковки [Електронний ресурс] : кваліфікаційна робота / В. А. Іваночко. – Тернопіль : ТНТУ, 2022. – 60 с. – Режим доступу: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/38346/1/2022_KRB_SN-41_Ivanochko_V_A.pdf.
4. Шльончак І. А. Сучасні тенденції розвитку систем розумного паркування в містах України [Електронний ресурс] / І. А. Шльончак // Збірник тез доповідей. – Черкаси : ЧДТУ, 2021. – С. 145–147. – Режим доступу: https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/ChSTU/2846/1/_%D1%82%D0%B5%D0%B7%D0%B821%D0%BF%20145-147%2C%20335-337%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%80.pdf.
5. Smart-інфраструктура у сталому розвитку міст [Електронний ресурс] : аналітична доповідь / Центр Разумкова. – Київ, 2021. – 400 с. – Режим доступу: <https://razumkov.org.ua/uploads/other/2021-SMART-%D0%A1YTI-SITE.pdf>.
6. Zhou C. Optimization of On-Street Parking in the Historical Heritage Part of Lviv (Ukraine) as a Prerequisite for Designing the IoT Smart Parking System [Електронний ресурс] / C. Zhou [et al.] // Buildings. – 2022. – Vol. 12, No. 6. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/6/865>.

					КНУ КРБ.151.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7. Alam M. R. A Survey on IoT Driven Smart Parking Management System [Електронний ресурс] / M. R. Alam // IEEE Access. – 2023. – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/iel7/6287639/10005208/10292845.pdf>.
8. Дунаєв Б. IoT Based Smart Parking Systems in Unity With ML-agents Toolkit [Електронний ресурс] / Б. Дунаєв // Системи штучного інтелекту. – 2025. – Режим доступу: <https://journals.chnu.edu.ua/sisiot/article/download/937/964>.
9. Bonilla V. A Systematic Literature Review of LoRaWAN: Sensors and Applications [Електронний ресурс] / V. Bonilla // Sensors. – 2023. – Режим доступу: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10611380/>.
10. Круц А. О. Сучасні тенденції застосування технологій Інтернету речей в Україні [Електронний ресурс] / А. О. Круц // Науково-дослідна робота студентів. – Київ : КПІ, 2019. – 48 с. – Режим доступу: <https://ktpu.kpi.ua/wp-content/uploads/2019/12/naukovo-doslidna-robota-studentiv-kruts-2019.pdf>.
11. Технологія LoRaWAN: особливості та переваги [Електронний ресурс] / Компанія РОМСАТ. – 2021. – Режим доступу: <https://romsat.ua/news/company/lorawan-technology/>.
12. Концепція «розумного міста» та можливості її реалізації в Україні [Електронний ресурс] / Європейська бізнес-асоціація. – 2019. – Режим доступу: <https://eba.com.ua/kontseptsiya-rozumnogo-mista-ta-mozhlyvosti-yiyi-realizatsiyi-v-ukrayini-opytuvannya-j-oglyad-ey/>.
13. Pavlova O. Computer Systems and Information Technologies for Smart Parking [Електронний ресурс] / O. Pavlova // ELAR Khmelnytskyi. – Режим доступу: <https://elar.khmnu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/7c6d360f-60ae-4048-b069-615291b0032c/content>.
14. Гудаков С. С. Моделювання мережі передачі даних для IoT-систем розумної парковки [Електронний ресурс] / С. С. Гудаков. – Дніпро : ДП «Дніпровська політехніка», 2022. – Режим доступу: <https://ir.nmu.org.ua/bitstreams/d005487b-425d-4a0a-b828-9ccfda3de56a/download>.
15. Fleximodo – Your All-In-One IoT Smart Parking Partner [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://fleximodo.com/>.

					КНУ КРБ.151.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

16. Case Study Vodafone & PRS – Smart Parking with IoT Sensors [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://smart-city-system.com/en/projects/case-study-vodafone-prs/>.
17. IoT від lifecell — розумні рішення під ключ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://iot.lifecell.ua/>.
18. Інтернет речей IoT. Перспектива в Україні [Електронний ресурс] / Shop-GSM. – 2019. – Режим доступу: <https://shop-gsm.ua/blog/internet-veschej-iot-perspektiva-v-ukraine/>.
19. Парковки – Компанія Перипротект [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://periprotect.com.ua/parking/>.
20. «Розумний» хаос: що не так зі Smart City в українських містах [Електронний ресурс] / Mind.ua. – 2021. – Режим доступу: <https://mind.ua/publications/20221673-rozumnij-haos-shcho-ne-tak-zi-smart-city-v-ukrayinskih-mistah>.
21. Axis solutions | ELKO Ukraine [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.elko.ua/produkty/axis-solutions/>.
22. Мережа Інтернету речей з'явилася в трьох українських містах [Електронний ресурс] / UA-Bud. – 2019. – Режим доступу: <https://www.ua-bud.com.ua/merezha-internetu-rechey-z-yavilasya-v-troh-ukra-nskih-m-stah/>.
23. Лагода А. В. Дипломна робота: Розумна парковка на базі IoT [Електронний ресурс] / А. В. Лагода. – Київ : КПІ, 2023. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/a1af55f7-74f0-46bd-ae85-224837d64cf8/download>.
24. Дипломний проєкт: Інтелектуальна робототехнічна система керування паркуванням [Електронний ресурс] / А. О. Кудінова. – Київ : КПІ, 2025. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/46224828-c4fb-472c-87c9-78a2ec746b6e/download>.
25. Лучка С. І. Розподілена система підтримки функціонування автопарковок [Електронний ресурс] / С. І. Лучка. – Тернопіль : ВНУ, 2023. – Режим доступу: <https://dspace.wunu.edu.ua/bitstreams/5b8e9f8c-6699-43bb-8759-e47c7f3f3fdc/download>.

					КНУ КРБ.151.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 26.Ukraine Smart Parking Systems Market (2025-2031) Outlook [Електронний ресурс] / 6W Research. – Режим доступу: <https://www.6wresearch.com/industry-report/ukraine-smart-parking-systems-market-outlook>.
- 27.NB-IoT Vs LoRaWAN: An Essential Comparison [Електронний ресурс] / Lansitec. – 2025. – Режим доступу: <https://www.lansitec.com/blogs/nb-iot-vs-lorawan-a-comparison-of-the-two-iot-technologies/>.
- 28.LoRaWAN VS NB-IoT: How Do They Compare and Differ [Електронний ресурс] / MOKOSmart. – 2024. – Режим доступу: <https://www.mokosmart.com/lorawan-vs-nb-iot-how-do-they-compare-and-differ/>.
- 29.NB-IoT vs LoRaWAN: Key Differences, Pros & Cons [Електронний ресурс] / Minew. – Режим доступу: <https://www.minewstore.com/nb-iot-vs-lorawan>.
- 30.Narrowband IoT: Your Definitive Guide to NB-IoT [Електронний ресурс] / Ezurio. – 2024. – Режим доступу: <https://www.ezurio.com/resources/blog/narrowband-iot-your-definitive-guide-to-nb-iot>.
- 31.Suitability of NB-IoT for Indoor Industrial Environment [Електронний ресурс] / M. Dangana // Sensors. – 2021. – Vol. 21, No. 16. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/16/5284>.
- 32.LoRaWAN and NB-IoT: competitors or complementary [Електронний ресурс] / LoRa Alliance. – Режим доступу: <https://resources.lora-alliance.org/technology-comparisons/lorawan-and-nb-iot-competitors-or-complementary>.
- 33.Using LoRa Devices and Gateways in Scalable IoT Solutions [Електронний ресурс] / Webbylab. – 2025. – Режим доступу: <https://webbylab.com/blog/lorawan-iot-solutions/>.
- 34.LoRaWAN Compared to NB-IoT [Електронний ресурс] / Data Alliance. – 2024. – Режим доступу: <https://www.data-alliance.net/blog/lorawan-compared-to-nb-iot-low-power-wan-technologies-lpwan>.
- 35.Кононихін О. С. Діаграма комп'ютерної моделі динамічного ціноутворення для розумної парковки [Електронний ресурс] / О. С. Кононихін. – Харків : ХАДІ, 2025. – Режим доступу: <https://dSPACE.khadi.kharkov.ua/bitstreams/e3dc8d7e-c321-4578-a1f1-82d5b60fc8a3/download>.

					КНУ КРБ.151.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 36.МАТЕРІАЛИ конференції «Сучасні тенденції застосування технологій Інтернету речей» [Електронний ресурс]. – Харків : ХНУ, 2020. – Режим доступу: https://science.kname.edu.ua/images/dok/konferentsii/2020konf/3----_2020_1.pdf.
- 37.Науково-виробничий журнал «Держава і регіони» [Електронний ресурс]. – Запоріжжя, 2014. – Режим доступу: https://pa.stateandregions.zp.ua/archive/3_2014/3_2014.pdf (розділ про транспортну інфраструктуру).
- 38.ПРОГРАМА конференції «Комп’ютерно-інтегровані системи» [Електронний ресурс]. – Одеса : ОНТУ, 2023. – Режим доступу: https://ontu.edu.ua/download/konfi/2023/Conference_Program-IT-21-22-04-23.pdf.
- 39.МАТЕРІАЛИ студентської конференції «Наукові горизонти» [Електронний ресурс]. – Житомир, 2019. – Режим доступу: <https://sciencehorizon.com.ua/en/journals/download/4-77-2019>.
- 40.МАТЕРІАЛИ конференції «Modern Science: Trends, Challenges, Solutions» [Електронний ресурс]. – 2025. – Режим доступу: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2025/09/MODERN-SCIENCE-TRENDS-CHALLENGES-SOLUTIONS-18-20.09.25.pdf>.
- 41.Штучний інтелект, сучасні технології та право в Україні [Електронний ресурс] : монографія. – Київ : ІППІ, 2025. – 354 с. – Режим доступу: https://ippi.org.ua/sites/default/files/2100_monografiya_finish.pdf.
- 42.Modern Technologies in Education and Learning Problems [Електронний ресурс]. – 2025. – Режим доступу: <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2025/12/MODERN-TECHNOLOGIES-IN-EDUCATION-AND-LEARNING-PROBLEMS.pdf>.
- 43.Дороги і мости : збірник наукових праць [Електронний ресурс]. – Київ, 2025. – Вип. 31. – Режим доступу: [http://dorogimosti.org.ua/files/upload/%D0%94%D1%96%D0%9C%2031\(2025\).pdf](http://dorogimosti.org.ua/files/upload/%D0%94%D1%96%D0%9C%2031(2025).pdf).

					КНУ КРБ.151.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

44.Адаптивне управління закладами сфери гостинності [Електронний ресурс]. –
Режим доступу: <https://a-economics.com.ua/index.php/home/article/download/248/270/461>.

45.Global Directions in Scientific Research and Technological Development
[Електронний ресурс]. – 2025. – Режим доступу: https://www.eoss-conf.com/wp-content/uploads/2025/12/Valencia_Spain_22.12.25.pdf.

					КНУ КРБ.151.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

```
from flask import Flask, render_template, jsonify, request, redirect, url_for, flash
from flask_login import LoginManager, login_user, logout_user, login_required,
current_user
from config import Config
from models import db, User, ParkingSpot, ParkingZone, ParkingSession
from apscheduler.schedulers.background import BackgroundScheduler
import random
import datetime
```

```
app = Flask(__name__)
app.config.from_object(Config)
db.init_app(app)
```

```
login_manager = LoginManager()
login_manager.init_app(app)
login_manager.login_view = 'login'
```

```
@login_manager.user_loader
def load_user(user_id):
    return User.query.get(int(user_id))
```

```
# ===== ІНІЦІАЛІЗАЦІЯ =====
with app.app_context():
    db.create_all()
```

```
# Тестові користувачі
if User.query.count() == 0:
    admin = User(username='admin', role='admin')
    admin.set_password('admin123')
    db.session.add(admin)
```

```
    driver = User(username='driver', role='driver')
    driver.set_password('123456')
    db.session.add(driver)
    db.session.commit()
```

```
# Тестова зона + місця з ФІКСОВАНИМИ координатами
if ParkingZone.query.count() == 0:
    zone = ParkingZone(
        name="Центральна парковка",
        latitude=46.4825,
        longitude=30.7233,
        total_spots=30,
```

					КНУ КРБ.151.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

        address="вул. Соборна, 12, Ізмаїл"
    )
    db.session.add(zone)
    db.session.commit()

    base_lat = 46.4825
    base_lon = 30.7233
    for i in range(1, 31):
        # Фіксовані координати (невеликий розкид)
        lat = base_lat + (i % 6 - 3) * 0.00015
        lon = base_lon + (i // 6 - 2.5) * 0.0002

        spot = ParkingSpot(
            zone_id=zone.id,
            spot_number=f"A-{i:02d}",
            status=random.choice(['free', 'occupied']),
            sensor_id=f"SENSOR-{i:03d}",
            latitude=lat,
            longitude=lon
        )
        db.session.add(spot)
    db.session.commit()

# ===== ФОНОВА СИМУЛЯЦІЯ (виправлено)
=====
def simulate_sensor_data():
    with app.app_context(): # <-- це виправляє помилку контексту
        spots = ParkingSpot.query.all()
        for spot in spots:
            if random.random() < 0.12: # 12% шанс зміни статусу
                spot.status = 'occupied' if spot.status == 'free' else 'free'
                spot.last_updated = datetime.datetime.utcnow()
            db.session.commit()

scheduler = BackgroundScheduler()
scheduler.add_job(func=simulate_sensor_data, trigger="interval", seconds=20)
scheduler.start()

# ===== МАРШРУТИ =====

@app.route('/')
def index():
    return render_template('index.html')

```

					КНУ КРБ.151.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

@app.route('/register', methods=['GET', 'POST'])
def register():
    if request.method == 'POST':
        username = request.form.get('username')
        password = request.form.get('password')
        if User.query.filter_by(username=username).first():
            flash('Користувач з таким логіном вже існує')
            return redirect(url_for('register'))

        user = User(username=username, role='driver')
        user.set_password(password)
        db.session.add(user)
        db.session.commit()
        flash('Реєстрація успішна! Тепер увійдіть.')
        return redirect(url_for('login'))
    return render_template('register.html')

@app.route('/login', methods=['GET', 'POST'])
def login():
    if request.method == 'POST':
        user = User.query.filter_by(username=request.form.get('username')).first()
        if user and user.check_password(request.form.get('password')):
            login_user(user)
            return redirect(url_for('dashboard'))
        flash('Невірний логін або пароль')
    return render_template('login.html')

@app.route('/logout')
@login_required
def logout():
    logout_user()
    return redirect(url_for('index'))

@app.route('/dashboard')
@login_required
def dashboard():
    spots = ParkingSpot.query.all()
    zone = ParkingZone.query.first()
    active_session = ParkingSession.query.filter_by(user_id=current_user.id,
payment_status='unpaid').first()
    return render_template('dashboard.html', spots=spots, zone=zone,
active_session=active_session)

```

===== API =====

					КНУ КРБ.151.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

@app.route('/api/spots')
def get_spots():
    spots = ParkingSpot.query.all()
    data = [{
        'id': s.id,
        'number': s.spot_number,
        'status': s.status,
        'lat': s.latitude,    # фіксовані координати
        'lng': s.longitude
    } for s in spots]
    return jsonify(data)

@app.route('/api/price/<int:zone_id>')
def get_dynamic_price(zone_id):
    total = ParkingSpot.query.filter_by(zone_id=zone_id).count()
    occupied = ParkingSpot.query.filter_by(zone_id=zone_id, status='occupied').count()
    occupancy = occupied / total if total > 0 else 0.0

    base_price = 25.0
    multiplier = 1.0 + max(0.0, (occupancy - 0.6) * 3.0)
    if datetime.datetime.now().hour in [8, 9, 17, 18, 19]:
        multiplier *= 1.4

    current_price = round(base_price * multiplier, 2)

    return jsonify({
        'occupancy_rate': round(occupancy * 100, 1),
        'price_per_hour': current_price,
        'multiplier': round(multiplier, 2)
    })

# ===== ПАРКУВАННЯ =====
@app.route('/start_parking/<int:spot_id>', methods=['POST'])
@login_required
def start_parking(spot_id):
    spot = ParkingSpot.query.get_or_404(spot_id)
    if spot.status != 'free':
        flash('Місце вже зайняте!')
        return redirect(url_for('dashboard'))

    price_info = get_dynamic_price(spot.zone_id).get_json()

    session = ParkingSession(
        spot_id=spot_id,

```

					КНУ КРБ.151.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

        user_id=current_user.id,
        base_price=price_info['price_per_hour'],
        dynamic_multiplier=price_info['multiplier'],
        payment_status='unpaid'
    )
    spot.status = 'occupied'
    db.session.add(session)
    db.session.commit()

    flash(f'Паркування розпочато на місці {spot.spot_number}. Ціна:
    {price_info["price_per_hour"]} грн/год')
    return redirect(url_for('dashboard'))

@app.route('/finish_parking/<int:session_id>', methods=['POST'])
@login_required
def finish_parking(session_id):
    session = ParkingSession.query.get_or_404(session_id)
    if session.user_id != current_user.id:
        flash('Доступ заборонено')
        return redirect(url_for('dashboard'))

    session.end_time = datetime.datetime.utcnow()
    duration_hours = (session.end_time - session.start_time).total_seconds() / 3600
    session.final_price = round(session.base_price * duration_hours *
    session.dynamic_multiplier, 2)
    session.payment_status = 'paid'

    spot = ParkingSpot.query.get(session.spot_id)
    if spot:
        spot.status = 'free'

    db.session.commit()
    flash(f'Паркування завершено! До сплати: {session.final_price} грн')
    return redirect(url_for('dashboard'))

@app.route('/admin')
@login_required
def admin_panel():
    if current_user.role != 'admin':
        flash('Доступ лише для адміністратора!')
        return redirect(url_for('dashboard'))

    spots = ParkingSpot.query.all()
    sessions = ParkingSession.query.order_by(ParkingSession.start_time.desc()).all()

```

					КНУ КРБ.151.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

occupied = len([s for s in spots if s.status == 'occupied'])
total_spots = len(spots)
occupancy_rate = round((occupied / total_spots * 100), 1) if total_spots > 0 else 0

total_revenue = sum(s.final_price or 0 for s in sessions if s.payment_status == 'paid')

return render_template('admin.html',
                        spots=spots,
                        sessions=sessions,
                        occupied=occupied,
                        total_spots=total_spots,
                        occupancy_rate=occupancy_rate,
                        total_revenue=total_revenue)

if __name__ == '__main__':
    print(" 🚀 SmartPark")
    print(" Реєстрація: /register")
    print(" Логін: driver / 123456")
    print(" Логін: admin / admin123")
    app.run(debug=True, port=5000)

```

					КНУ КРБ.151.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		