
СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

УДК 004.4

В.О. КОПИЦЯ, Р.Н. КВЕТНИЙ

АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ВДОСКОНАЛЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ УПРАВЛІННЯ ПАРКУВАННЯМ

*Вінницький національний технічний університет,
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна*

Анотація. У сучасних містах інтенсивне зростання автомобілізації призводить до критичного дефіциту паркувальних місць, що спричинює збільшення заторів, зростання викидів шкідливих речовин та зниження якості життя мешканців. У зв'язку з цим виникає потреба в переході від традиційних методів управління паркуванням, які базуються на ручному контролі та статичних даних, до інтелектуальних систем, здатних адаптуватися до динаміки транспортних потоків та попиту в реальному часі. Дане дослідження присвячене аналізу сучасних підходів до вдосконалення технологій управління паркуванням, зокрема рішень на базі Інтернету речей, автоматизованих паркувальних комплексів, методів штучного інтелекту для прогнозування завантаженості та механізмів динамічного ціноутворення. Методологія включає систематизований огляд понад сорока наукових публікацій 2018–2025 рр., порівняльний аналіз техніко-економічних показників різних технологій, SWOT-аналіз і моделювання сценаріїв з урахуванням соціально-екологічних аспектів. Результати дослідження свідчать про те, що впровадження IoT-рішень із сенсорним моніторингом і мобільними застосунками дозволяє скоротити середній час пошуку паркомісця, значно зменшити непотрібні поїздки та відповідні викиди CO₂. Автоматизовані паркувальні системи показують високу щільність розміщення транспортних засобів і знижують експлуатаційні витрати. Використання алгоритмів штучного інтелекту підвищує точність прогнозування завантаженості, а динамічне ціноутворення вирівнює попит у різні години доби та сприяє зменшенню заторів. Практична значущість дослідження полягає в розробці рекомендацій щодо інтеграції зазначених технологій у міську інфраструктуру та створенні дорожньої карти впровадження з урахуванням особливостей українських міст. Запропоновані підходи можуть бути використані органами місцевого самоврядування та інвесторами для оптимізації паркувальних ресурсів, покращення мобільності населення і зниження екологічного навантаження.

Ключові слова: розумне паркування, Інтернет речей, автоматизовані паркувальні комплекси, штучний інтелект, динамічне ціноутворення, міська мобільність, транспортна інфраструктура.

Abstract. Rapid growth in urban motorization has led to a critical shortage of parking spaces, contributing to increased congestion, higher emissions of harmful pollutants, and a decline in residents' quality of life. This study examines contemporary methods for enhancing parking management technology, moving beyond traditional manual control and static data toward intelligent systems capable of adapting to real-time traffic dynamics and demand. The research focuses on solutions based on the Internet of Things, automated parking complexes, artificial-intelligence algorithms for occupancy forecasting, and dynamic pricing mechanisms. Methodology includes a systematic review of over forty scientific publications from 2018 to 2025, comparative analysis of technical and economic performance indicators for various technologies, SWOT analysis, and scenario modeling that incorporates social and environmental considerations. Findings indicate that deploying IoT solutions with sensor-based monitoring and mobile applications significantly reduces the average time spent searching for a parking space and corresponding CO₂ emissions. Automated parking systems deliver high vehicle density and lower operational costs, while artificial-intelligence algorithms improve the accuracy of demand forecasts. Dynamic pricing balances demand across different times of day, helping to alleviate congestion. The practical significance of this work lies in the development of recommendations for integrating these technologies into urban infrastructure and in crafting a roadmap tailored to the specific needs of Ukrainian cities. The proposed approaches can guide local authorities and investors in optimizing parking resources, enhancing urban mobility, and reducing environmental impact.

Keywords: smart parking, Internet of Things, automated parking complexes, artificial intelligence, dynamic pricing, urban mobility, transport infrastructure.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-157-167

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

ВСТУП

Зростання урбанізації та кількості автомобілів у містах зумовлює актуальність проблеми паркування. Дослідження показують, що між 20% і 30% міського трафіку створюється водіями, які кружляють у пошуках паркомісця. Така ситуація призводить до втрати часу, перевитрати пального та підвищення викидів CO₂, як зазначають С. Dowlinh *et al.* (2017). Наприклад, J. J. Barriga *et al.* (2019), у мегаполісі на кшталт Лос-Анджелеса пошук паркування генерує сотні тонн зайвого CO₂ і спалює десятки тисяч літрів бензину щороку. М. А. Mondal *et al.* (2021), у роботі зазначають, що відсутність ефективної системи управління паркуванням змушує водіїв використовувати так званий «сліпий пошук», тобто хаотичне кружляння вулицями допоки не знайдеться вільне місце. Це погіршує затори, збільшує ризик ДТП та забруднення повітря. В цих умовах виникла потреба у впровадженні «розумних» технологій управління паркуванням, які б оптимізували використання наявного паркувального простору та надавали водіям інформацію в реальному часі.

Метою даного дослідження є аналіз сучасних підходів та вибір шляхів вдосконалення технологій управління паркуванням. Об'єктом дослідження виступають інформаційні системи та технології управління парковками, а предметом – підходи до їх удосконалення на основі новітніх методів та засобів. Методи дослідження спираються на огляд літературних джерел, порівняльний аналіз існуючих рішень та узагальнення передового досвіду. У статті розглянуто теоретичні основи технологій управління паркуванням, проаналізовано сучасні наукові підходи (зокрема IoT, автоматизовані парковки, динамічне ціноутворення, штучний інтелект) та окреслено перспективи їх розвитку, особливо з урахуванням можливостей впровадження в Україні.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЙ УПРАВЛІННЯ ПАРКУВАННЯМ

Технологія управління паркуванням охоплює сукупність засобів і методів, спрямованих на ефективну організацію паркувального простору, розподіл паркомісць, контроль за дотриманням правил стоянки та забезпечення зручності для користувачів. Т. Rajabioun *et al.* (2015), зазначають, що, це важлива складова інтелектуальних транспортних систем (ITS), що покликана збалансувати попит і пропозицію паркомісць та зменшити негативні наслідки неправильної парковки (затори, аварійність, забруднення). Паркувальна інфраструктура поділяється на два основні типи: офстріт (позавуличні паркінги, гаражі) та онстріт (паркування на вуличній мережі).

Відповідно, технології управління можуть відрізнятися для цих типів: для офстріт-паркінгів характерні багато рівневі стоянки чи автоматизовані гаражі, тоді як on-street системи зосереджені на керуванні паркуванням уздовж доріг, паркоматах, датчиках зайнятості тощо. Українські фахівці також розглядають класифікацію систем управління парковкою за ступенем автоматизації: розрізняють звичайні (ручні) системи та автоматизовані системи паркування зазначає А. Holinka *et al.* (2020). Основна проблематика полягає в тому, що традиційні підходи до паркування (статичні знаки, ручний контроль, принцип «першим прибув – першим запаркувався») виявилися малоефективними за умов сучасного міста. Автомобілі залишаються припаркованими більшу частину часу свого життєвого циклу – в середньому до 90% часу машина не рухається. Паркувальні площі займають значний простір міста: за деякими оцінками, стоянки можуть поглинати до третини площі в густонаселених районах. Неефективне використання цього простору та хаотична парковка (наприклад, подвійна парковка, стоянка в недозволених місцях) погіршують пропускну здатність доріг і створюють аварійні ситуації. Тому ефективне використання кожного паркувального місця набуває критичного значення у концепції «розумного міста».

Основні компоненти технологій це сучасні системи управління паркуванням, які зазвичай поєднують апаратні та програмні компоненти, зазначають S. Alahmadi *et al.* (2023). До апаратних належать паркувальні датчики (вмонтовані у покриття або встановлені на парковках сенсори, що фіксують наявність автомобіля) – вони в реальному часі передають дані про зайнятість місць на центральний сервер. Широко використовуються паркомати та електронні паркові лічильники, які не лише приймають оплату, а й часто оснащені сенсорами або передавачами для інтеграції в єдину мережу. Для контролю і забезпечення порядку застосовуються технології автоматизованого контролю – зокрема, камери з розпізнаванням номерних знаків, що допомагають виявляти порушення і фіксувати час паркування, зазначають G. Pradhan *et al.* (2025). Інша важлива складова – комунікаційна мережа (бездротові технології Wi-Fi, GSM, LoRaWAN тощо), яка з'єднує датчики, паркомати, контролери та сервери для обміну інформацією. На верхньому рівні архітектури функціонують центральні сервери та

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

хмарні платформи, що збирають і обробляють дані про парковки, а також користувацькі застосунки та веб-інтерфейси, через які водії отримують інформацію про доступні місця, тарифи, можуть резервувати місце або сплатити за парковку дистанційно.

Таким чином, сучасні технології управління паркуванням – це комплекс сенсорів, мереж, програмного забезпечення і алгоритмів, що в сукупності забезпечують інформування, навігацію, контроль та оптимізацію паркування у реальному часі.

СУЧАСНІ НАУКОВІ ПІДХОДИ ДО ТЕХНОЛОГІЙ УПРАВЛІННЯ ПАРКУВАННЯМ

Одним із найпотужніших трендів у цій галузі є впровадження технологій Інтернету речей (IoT). IoT забезпечує повсюдну взаємодію пристроїв – сенсори, контролери, камери та інші «розумні» об'єкти збирають дані про парковки та обмінюються ними через мережу в автоматизованому режимі.

Фактично, IoT-підхід перетворює розрізнені парковки на єдину інформаційну систему міста. Наприклад, датчики на парковках оперативно передають інформацію про вільні місця, що дозволяє будувати системи навігації до вільного паркомісця. Такий перехід від «сліпого» пошуку до інформованого підходу економить час водіїв і зменшує зайві кілометри пробігу в пошуках місця.

Дослідження М. А. Mondal *et al.* (2021) показують, що якщо водії заздалегідь отримують дані про наявні паркомісця, це знижує навантаження на дороги і мінімізує явище «декілька машин переслідують одне місце» в години пік. IoT-рішення для паркування часто включають мобільні додатки, які відображають карту доступних місць у реальному часі та можуть пропонувати резервування місця. Резервування парковок через застосунок дозволяє водію забронювати місце наперед, особливо в зонах підвищеного попиту або під час масових заходів. Ба більше, через ті самі додатки можна здійснити безготівкову оплату, що спрощує процес і для користувача, і для оператора парковки. Урядові та комерційні проєкти «smart parking» дедалі частіше інтегруються з міськими інформаційними системами. Наприклад, Н. Robert C *et al.* (2014), зазначають, що, у Сан-Франциско була розгорнута система SFpark із більш ніж 7000 датчиків, яка збирала дані про заповнюваність паркомісць і передавала їх у відкритому доступі водіям через додатки. Цей проєкт продемонстрував ефективність IoT-підходу: за час його дії середній час пошуку паркування та відповідно «круїзний» трафік скоротився приблизно на 50%. У цілому, IoT-технології створюють основу для розумних парковок, що реагують на зміну попиту динамічно та прозоро. Водночас, перед IoT-системами постають виклики масштабованості та стандартизації.

Масове встановлення тисяч сенсорів потребує значних інвестицій та технічного обслуговування, а передані дані повинні надійно захищатися. Огляди Т. Rajabioun *et al.* (2015), відзначають, що сучасні on-street рішення поки що мають проблеми зі масштабованістю – центральні сервери перевантажуються обчисленнями при обслуговуванні великої кількості пристроїв, – а також із приватністю даних, адже відстеження місць і переміщень може збирати персональну інформацію про водіїв. Отже, напрям подальших досліджень – це розробка більш стійких, масштабованих та безпечних IoT-архітектур для паркування, описує М. Ozkaya *et al.* (2024), зокрема із використанням туманних обчислень (fog computing) і децентралізованих підходів, що знижують навантаження на центральні вузли. Діаграма активності користувача з Smart Parking системами зображена на рисунку 1.

На схемі зображено послідовність дій у рамках типового сценарію пошуку паркувального місця у системі Smart Parking. Користувач запускає мобільний додаток, який отримує інформацію про доступні місця від IoT-сенсорів у режимі реального часу. У разі наявності вільного місця система автоматично прокладає маршрут. Якщо ж місць немає, водієві пропонується альтернатива (інша локація або перехоплюючий паркінг). Після паркування сенсор фіксує зайнятість, дані передаються до центрального сервера, де аналітичні модулі оновлюють прогнози та коригують тарифи відповідно до поточної ситуації.

Другим важливим напрямом є розвиток автоматизованих паркувальних систем (APS, Automated Parking Systems). Під цим розуміється механізована парковка, де автомобілі розміщуються та видаються автоматично за допомогою ліфтових та конвеєрних пристроїв, без участі водія. Такі системи фактично виконують роль роботизованого гаража: водій залишає авто на в'їзді, далі платформа або робот переміщує машину на вільне місце у багаторівневому штабелі. Головна перевага APS – економія простору. За рахунок усунення проїздів, пандусів та проміжків для відчинення дверей, автоматизована парковка може вмістити значно більше авто на тій самій площі, ніж традиційний паркінг. Згідно з галузевими оцінками, впровадження APS дозволяє скоротити площу, необхідну для паркування, на 40–80%. Як наслідок, APS стають привабливими для щільної міської забудови, де земля дорога і дефіцитна

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

(історично тому вони набули поширення в країнах на кшталт Японії, Німеччини, Південної Кореї). Окрім того, відсутність необхідності водіям їздити по паркінгу знижує викиди вуглекислого газу – автоматизовані гаражі є більш екологічними за традиційні.

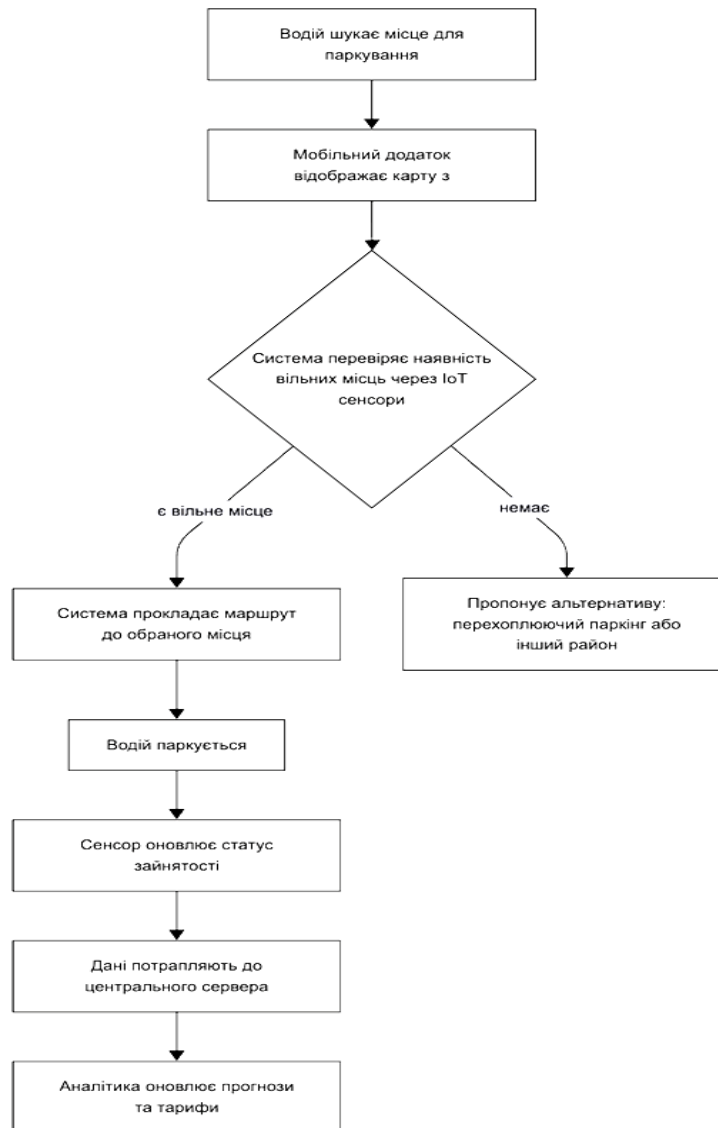


Рисунок 1 – Блок-схема активностей користувача з Smart Parking системами.

Джерело: розроблено автором на основі власних досліджень

Блок-схема архітектури системи управління паркуванням зображена на рисунку 2.

Схема ілюструє функціональну архітектуру інтелектуальної системи управління паркуванням, яка складається з декількох взаємопов'язаних компонентів. На початковому рівні розташовані сенсори (ультразвукові, відеоаналітичні, магнітні, інфрачервоні), які виявляють зайнятість паркомісць у реальному часі. Ці дані надходять до IoT-шлюзів, що здійснюють бездротову передачу інформації за допомогою протоколів LoRaWAN, NB-IoT або LTE Cat-M. Далі інформація передається на центральний сервер або хмарну інфраструктуру (наприклад, AWS IoT, Azure IoT Hub), де здійснюється її обробка.

На цьому етапі задіюються модулі штучного інтелекту та машинного навчання (AI/ML), які прогнозують заповненість, виявляють порушення паркування та формують рекомендації щодо динамічного ціноутворення. Взаємодія з користувачами та іншими зовнішніми системами забезпечується через API-рівень, який інтегрує систему з мобільними застосунками, навігаційними сервісами та платіжними платформами. Користувачі отримують доступ до функцій через мобільний додаток, що дозволяє здійснювати пошук паркомісць, навігацію, оплату та залишення зворотного зв'язку. Паралельно

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

адміністрація міста чи оператор системи має доступ до панелі керування, яка забезпечує моніторинг, аналітику, управління тарифами та інцидентами. Уся історія транзакцій, дій користувачів та подій зберігається в сховищі даних для цілей аудиту, логування та аналітики. Ця архітектура забезпечує масштабованість, модульність і можливість гнучкого налаштування системи під потреби конкретного міста чи оператора.

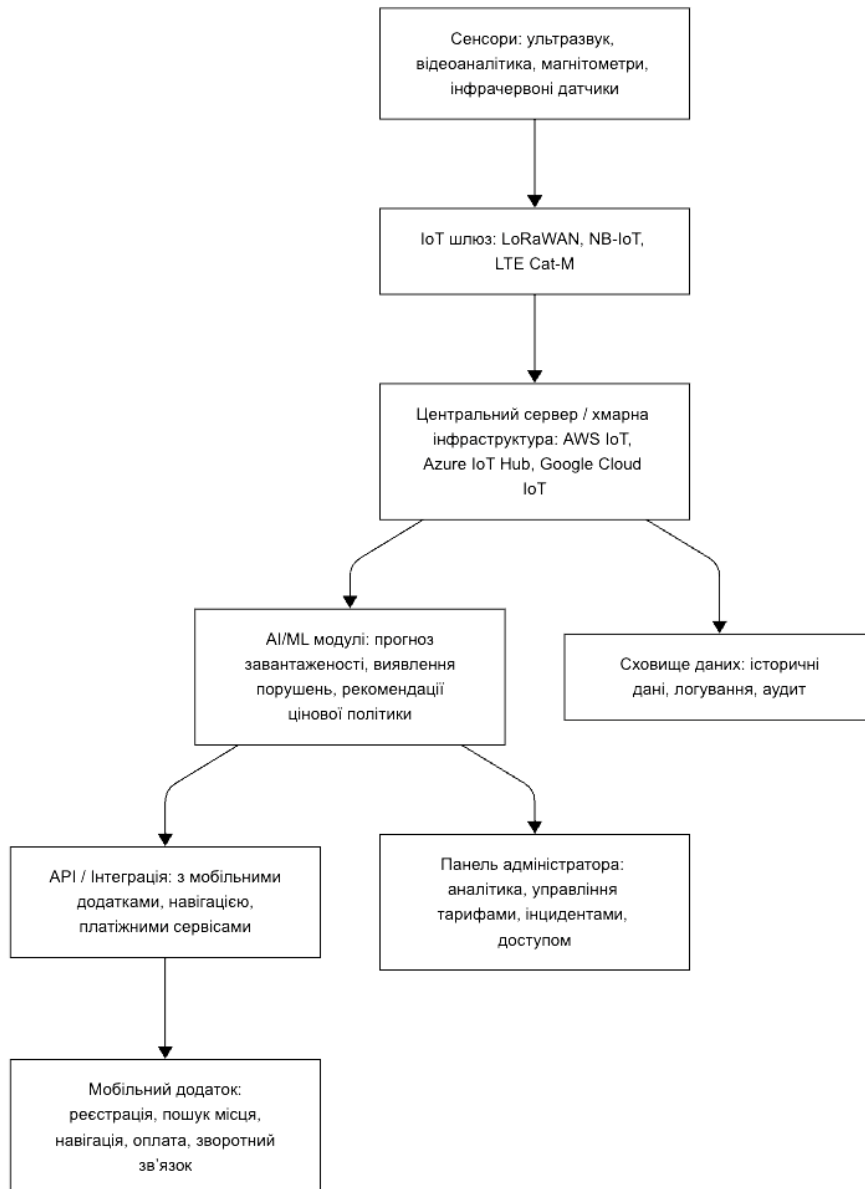


Рисунок 2 – Блок-схема архітектури системи управління паркуванням.

Джерело: розроблено автором на основі власних досліджень

Наукові дослідження автоматизованих парковок торкаються питань надійності та сприйняття користувачами. З одного боку, APS демонструють високу ефективність у збільшенні місткості та можуть підвищити рівень безпеки (усуваючи ризики, пов'язані з маневруванням у тісних гаражах). З іншого боку, певні технічні та психологічні аспекти потребують вирішення. Дослідження функцій автоматичного паркування в автомобілях показало, що повна автоматизація маневру все ще може бути помилковою – навіть сучасні автопілоти інколи паркуються менш точно чи повільніше, ніж досвідчений водій, зазначають E. de Visser *et al.* (2022). В експерименті з Tesla Model X було виявлено, що автоматичний режим успішніше справляється з паралельним паркуванням, ніж з перпендикулярним;

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

втім, учасники доволі довіряли автоматизації, попри її недоліки. Для стаціонарних APS це означає необхідність резервування систем, регулярного технічного обслуговування та зрозумілого інтерфейсу для клієнтів, щоби вони довіряли роботизованому паркуванню. Інше дослідження, присвячене змішаним методам (опитування та експеримент), показало, що водії загалом позитивно сприймають автоматизовані парковки, якщо переконані в їх надійності. Отже, підвищення надійності та швидкості роботи APS – ключ до ширшого впровадження цієї технології.

Одним із сучасних підходів до оптимізації використання паркувальних ресурсів є динамічне ціноутворення. Ця концепція передбачає гнучку зміну тарифів на паркування залежно від поточного попиту, часу доби, локації та інших факторів. Як зазначають дослідники, «динамічне ціноутворення – це метод, що коригує ціну послуги у часі відповідно до попиту та пропозиції задля підвищення доходу» описують М. А. Mondal *et al.* (2021) у роботі.

На практиці це означає, що в години та районах високого попиту вартість паркування підвищується, стимулюючи частину водіїв обирати альтернативи (інший час, інше місце або громадський транспорт), а в періоди низького завантаження ціна знижується, щоби ефективніше заповнювати паркінги. Динамічне тарифування успішно застосовувалося в рамках пілотних проєктів. Найвідоміший з них – SFpark у Сан-Франциско, де тарифи на вуличне паркування переглядалися кожні 6 тижнів на основі цільового показника заповненості 60–80%. Результати були вражаючими: середня заповненість наблизилася до цільового діапазону, а кількість водіїв, що крутилися в пошуках місця, скоротилася приблизно наполовину. Іншими словами, динамічне ціноутворення суттєво зменшило проблему “круїзінгу” за паркомісцем. Наукові роботи Н. Robert C *et al.* (2014), підтверджують ефективність цього підходу. За допомогою ігрового моделювання паркової ситуації (т.зв. serious game) було показано, що водії раціонально реагують на підвищення цін: за вищої вартості ближчих місць вони схильні паркуватися раніше – далі від пункту призначення або на дешевшому парковці – тим самим скорочуючи загальний час пошуку. Така поведінкова зміна і є метою динамічного ціноутворення: за рахунок цінових сигналів вирівняти попит, усунути ситуації, коли кілька авто «полюють» за одним місцем, і зменшити перевантаження в найбільш гарячих точках. Додатковою вигодою є збільшення надходжень для міста або оператора паркінгу – дослідження зазначають, що грамотне динамічне ціноутворення підвищує дохідність паркувальної системи. Структуру витрат на впровадження ключових компонентів системи Smart Parking зображено на рисунку 3.

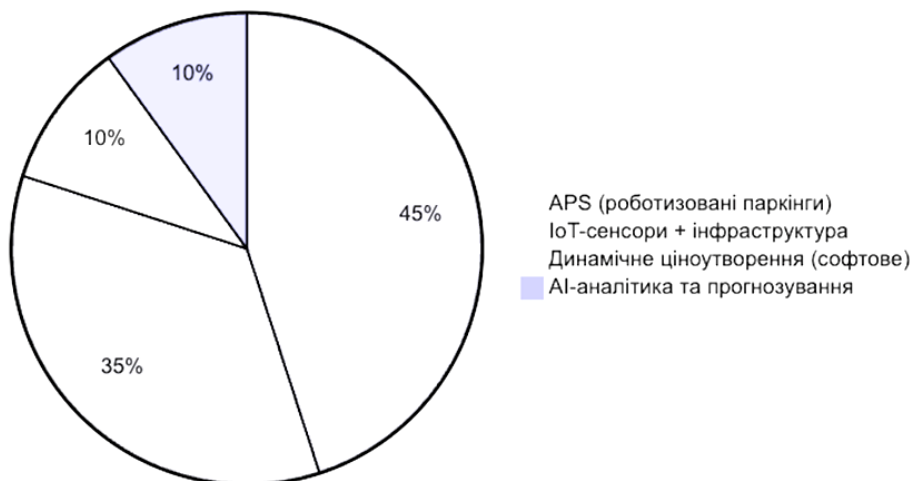


Рисунок 3 – Структура витрат на впровадження ключових компонентів системи Smart Parking.

Джерело: розроблено автором на основі власних досліджень

Найбільшу частку витрат (45%) становлять інвестиції у впровадження автоматизованих паркувальних систем (APS), що включають будівництво або реконструкцію об'єктів, обладнання ліфтовими механізмами та інфраструктурою автоматичного зберігання автомобілів. Другу за величиною статтю становлять витрати на розгортання IoT-інфраструктури (35%), яка охоплює закупівлю сенсорів, шлюзів передачі даних, монтажні роботи та обслуговування мереж. Натомість, впровадження програмних рішень — таких як модулі динамічного ціноутворення (10%) та AI-аналітики (10%) — потребує відносно менше фінансових ресурсів. Це робить їх особливо привабливими для стартових пілотних проєктів, а також у містах з обмеженим бюджетом. Інвестиції в ці програмні компоненти дають

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

змогу досягти помітного ефекту (зменшення заторів, підвищення доходів, інформування користувачів) при відносно невеликих витратах.

Ці кошти можна реінвестувати в транспортну інфраструктуру. Викликом при впровадженні цього підходу є суспільне сприйняття. Водії не завжди позитивно реагують на підвищення цін; тому важлива прозорість та поступовість впровадження. Влада міст, які застосували динамічні тарифи, наголошують на їх перевагах для громади – менше заторів, чистіше повітря, пріоритет мешканцям (через тарифні зони тощо). Для успіху також необхідні сучасні паркувальні лічильники або застосунки, що можуть автоматично застосовувати змінні тарифи і інформувати користувачів. Загалом, динамічне ціноутворення зарекомендувало себе як дієвий інструмент керування попитом: воно доповнює технологічні рішення, впливаючи на поведінку водіїв економічними стимулами.

Сучасні системи генерують великий обсяг даних про паркування – це відкрило простір для застосування методів штучного інтелекту (ШІ) та аналізу даних. Машинне навчання використовується для прогнозування заповненості паркінгів, оптимізації розподілу місць, виявлення порушень тощо. Приміром, у роботі С. Dowlinh *et al.* (2017) описано інтеграцію IoT-датчиків із алгоритмами машинного навчання для прогнозування доступності місць на 15-хвилинні інтервали вперед. Використання моделей регресії з автоматичним підбором параметрів дало змогу досягти точності прогнозу зайнятості паркінгу $R^2 = 0.97$, що істотно покращує інформування водіїв та дозволяє проактивно керувати попитом. Таким чином, ШІ підвищує ефективність паркувальних систем, дозволяючи передбачати пікові навантаження і вживати заходів (динамічне ціноутворення, резервування додаткових місць) до настання перевантаження. Іншим напрямом є застосування комп'ютерного зору та глибинного навчання для моніторингу парковок. На заміну або доповнення точковим датчикам приходять камери, які за допомогою алгоритмів розпізнавання зображень здатні визначати наявність авто на десятках парковочних місць одночасно. У дослідженні G. Pradhan *et al.* (2025) продемонструвало систему з камерою, що охоплює кілька місць: поєднання оптичного розпізнавання номерів та інфрачервоних сенсорів забезпечило 95% точності виявлення авто вдень і ~90% уночі. Автоматизація контролю дозволила зменшити похибку обліку зайнятих місць до <5% (проти ручного контролю) і знизити випадки неправильного нарахування плати на 90%. Як наслідок, оператор парковки підвищив збір платежів на ~20%, а водії отримали більш прозорий і справедливий сервіс. Цей приклад ілюструє, що AI-рішення здатні не лише автоматизувати рутинні задачі, а й значно підвищити точність та економічний ефект управління паркуванням. Останнім часом дослідники також активно вивчають алгоритми оптимального розподілу місць та маршрутів. Використовуються методи теорії ігор, багатоагентні системи, які координують групу автомобілів, спрямовуючи їх на різні парковки для запобігання концентрації на одній. Застосування графових нейронних мереж (GCNN) для аналізу просторово-часових даних паркування показало найкращі результати в короткостроковому прогнозуванні зайнятості серед кількох тестованих моделей. Це свідчить про великий потенціал глибинного навчання враховувати складні кореляції у поведінці водіїв та завантаженості міських районів. В оглядовій роботі 2023 року відзначено перспективність поєднання різних технологій ШІ. Зокрема, у роботі M. A. Shroud *et al* (2023), рекомендується для відкритих парковок (open parking lots, без шлагбаумів) використовувати комп'ютерний зір спільно з згортковими нейромережами (CNN) для детекції вільних місць, а керування паркуванням розглядати як задачу для багатоагентних систем (multi-agent systems), де агенти-автомобілі обмінюються інформацією і спільно ухвалюють рішення. Такі підходи дозволять врахувати різноманітні фактори (погодні умови, поведінку водіїв, випадкові події) та зробити систему більш стійкою. Однак впровадження ШІ в міське паркування також породжує питання приватності (як забезпечити анонімність даних про переміщення авто) та відповідальності (як система діятиме у разі збою алгоритму). Це поле для подальших досліджень, у тому числі в етико-правовій площині.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПІДХОДІВ

Розглянуті підходи до вдосконалення технологій управління паркуванням взаємно доповнюють один одного, проте мають різні акценти. IoT-технології забезпечують основу інфраструктури: вони найефективніші у зборі оперативної інформації та інформуванні користувачів. З їх допомогою зменшується час пошуку місця і відповідно довжина поїздки на 10–30%, а використання паркувального простору покращується (деякі дослідження вказують на підвищення коефіцієнта використання місць з ~60–70% до 85–95% завдяки сенсорним системам. Втім, для повного розкриття потенціалу IoT потрібні великі інвестиції в сенсорні мережі та підтримку їх працездатності, а також вирішення питань безпеки даних. Автоматизовані системи (APS) радикально підходять до проблеми браку місця – вони фізично реорганізують простір, дозволяючи розмішувати більше машин на меншій території. Їхній ефект

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

особливо помітний у щільних центрах міст, де ціна землі дуже висока. У містах, які стикаються з дефіцитом паркомісць, APS можуть стати альтернативою будівництву нових гаражів – адже роботизований паркінг можна вмонтувати під землю або вбудувати в будівлю. Проте недоліком залишається висока вартість впровадження таких систем і складність їх експлуатації. Якщо IoT-рішення можна реалізувати поступово (встановлюючи датчики квартал за кварталом), то APS вимагає великого проекту одразу. Тому нині вони частіше зустрічаються в приватних об'єктах (елітні житлові комплекси, офісні центри) або в містах з дуже щільною забудовою. Надійність APS має вирішальне значення: навіть поодинокі збої, коли автомобіль затримується всередині або виникає поломка ліфта, можуть негативно вплинути на довіру користувачів. Тому виробники впроваджують резервні системи, дистанційний моніторинг стану обладнання тощо.

Динамічне ціноутворення відрізняється тим, що це більше управлінський інструмент, ніж технічний. Воно відносно недороге у впровадженні – потрібне радше програмне забезпечення для моніторингу заповненості та зміни тарифів, ніж фізичні пристрої. Ефективність цього підходу залежить від еластичності попиту: якщо водії готові змінювати свою поведінку через ціни, то виграш очевидний – зникають перенавантажені зони і зменшуються затримки при пошуку місця. Але там, де альтернативи парковці обмежені (наприклад, відсутній громадський транспорт або паркінги в іншому місці), надто високі ціни можуть просто викликати невдоволення без позитивного ефекту. Тому динамічне ціноутворення повинно супроводжуватися розвитком альтернатив: Park-and-Ride, громадського транспорту, перехоплюючих стоянок за межами центру тощо. Важливо й те, що технології IoT та AI фактично є необхідною базою для динамічного ціноутворення – без датчиків та систем прогнозування місту складно визначити оптимальні тарифи та контролювати їх дію в режимі реального часу.

Штучний інтелект та аналіз даних виступають своєрідним «мозком» усієї системи. Вони перетворюють масиви сирих даних на знання для прийняття рішень. У малих містах із нескладною парковою ситуацією, можливо, можна обійтись і без складних алгоритмів – достатньо базової автоматизації. Але у мегаполісах з мільйонами автомобілів AI-алгоритми незамінні для оптимізації: жодна людина не впорається з ручним керуванням потоками в режимі 24/7, тоді як комп'ютерні моделі здатні знаходити оптимальні рішення розподілу місць, передбачати проблеми і навіть автономно регулювати правила (наприклад, тимчасово вводити заборону паркування на певних вулицях при наближенні до перевантаження). Водночас, складні AI-системи потребують ретельного тестування і верифікації, щоб уникнути помилок. Більше того, одним із застережень є питання приватності та етики: дані про переміщення та парковки автомобілів можуть розглядатися як чутливі, тому системи повинні гарантувати анонімність і безпеку інформації. Отже, порівняльний аналіз показує, що найкращий результат досягається при поєднанні підходів: IoT забезпечує дані, AI – їх обробку та прогнози, динамічне ціноутворення – регуляцію попиту, а автоматизовані парковки – максимальне використання простору. Кожна технологія закриває свою ділянку проблеми, і разом вони формують комплексну систему управління паркуванням майбутнього.

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ УПРАВЛІННЯ ПАРКУВАННЯМ

Перспективи розвитку лежать у площині інтеграції різних технологічних рішень в єдину міську екосистему. В майбутньому системи управління паркуванням стануть невід'ємною частиною концепції Smart City, взаємопов'язаною з іншими підсистемами – управлінням рухом, громадським транспортом, інформаційними сервісами для мешканців. Уже зараз спостерігається тенденція до об'єднання окремих додатків і сервісів. Наприклад, навігаційні програми отримують доступ до даних паркувальних API, щоб одразу прокладати маршрут не лише до точки призначення, а й до найближчого вільного паркомісця поблизу. В автомобілях нового покоління з'являються бортові системи, які здатні самостійно шукати інформацію про паркування. Smart vehicle може обмінюватися даними про зайняті місця з іншими авто через V2V (Vehicle-to-Vehicle) або зв'язуватися з міськими сенсорами через V2I/S2V (Sensor-to-Vehicle) комунікації. Це означає, що автомобілі майбутнього будуть проактивно знаходити паркування, мінімізуючи участь людини у цьому процесі. Інтеграція також означає сумісність різних платформ. Нині ринок пропонує багато розрізнених рішень від різних постачальників – від датчиків до програмного забезпечення. Стандартизація протоколів передачі даних (NAP – parking data standard, DATEX II, etc.) дозволить містам уникнути «війни стандартів» і легко масштабувати системи. Крім того, перспективним є підхід Mobility as a Service (MaaS), де паркування розглядається як складова єдиної послуги мобільності. Наприклад, користувач через один застосунок планує подорож: резервує спершу паркомісце на перехоплюючому паркінгу, потім квиток на міську електричку до центру. Такі комплексні рішення стимулюють відмову від поїздок особистим авто у центр міста, що сприяє сталому розвитку. Отже,

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

конвергенція паркувальних технологій з іншими транспортними сервісами – важливий напрям майбутнього. Не менш актуальним є питання масштабування: системи, успішно випробувані в окремих районах чи на окремих стоянках, слід поширити на рівень усього міста. Це потребує не лише технічних зусиль, а й управлінських – розробки відповідних міських політик. Деякі міста світу вводять вимогу, щоб усі нові комерційні паркінги були оснащені стандартним набором сенсорів та підключені до міської інформаційної мережі. Інші стимулюють приватних операторів ділитися даними про заповненість (наприклад, через відкриті дані або партнерські угоди). В майбутньому можлива глобальна мережа паркування: так само як зараз можна в реальному часі бачити ситуацію на дорогах, користувачі зможуть бачити ситуацію з паркуванням в масштабах цілого міста чи регіону.

Для України впровадження сучасних паркувальних технологій є як викликом, так і можливістю. У великих містах – Києві, Харкові, Львові, Одесі – проблема хаотичного паркування стоїть дуже гостро: історичні центри перевантажені автомобілями, бракує парковок, а культура дотримання правил паркування ще формується. Традиційно управління паркуванням в українських містах обмежувалося встановленням паркоматів та роботою інспекторів з евакуаторами. Однак останніми роками з'явилися зрушення. Зокрема, у Києві впроваджено електронну оплату парковки через мобільний застосунок, посилено контроль за несплатою (працює система автофіксації порушень паркування з допомогою камер на інспекторських авто – т.зв. «паркувальні котики») – усе це елементи цифровізації. Наступний крок – перехід до проактивних, «розумних» систем. Вже існують пілотні проекти: в рамках ініціативи Kyiv Smart City тестувалися датчики зайнятості на парковках у центрі міста, IT-компанії розробляють програми навігації до вільних місць. Наприклад, українська IT-компанія SoftServe у 2020 р. повідомила про створення прототипу smart-parking системи з машинним навчанням для прогнозування зайнятості місць. Хоча це поки локальні ініціативи, вони демонструють потенціал вітчизняних фахівців і готовність міської влади до інновацій. Можливості для України включають запозичення найкращих світових практик і їх адаптацію. Міста можуть уникнути «набору власних шишок», скориставшись досвідом міст, що вже впровадили динамічне ціноутворення чи IoT-парковки. Наприклад, Львів може вивчити досвід Сан-Франциско або Барселони у впровадженні датчиків і диференційованих тарифів. Також Україна має конкурентну перевагу – сильний IT-сектор, здатний розробляти програмні рішення локально, що може знизити вартість впровадження. Вартість – один з головних чинників: бюджети українських міст обмежені, і тому необхідно шукати фінансові моделі (ДПП, інвестори, гранти міжнародних проектів), щоб профінансувати обладнання сенсорами хоча б центральних зон міст. Виклики включають і законодавчі аспекти. Потрібно врегулювати питання використання камер і персональних даних (щоб не порушувати право на приватність при відстеженні номерів), визначити процедури динамічного зміни тарифів (нині тарифи затверджуються міськрадою і їх частина зміна ускладнена нормативно). Але поступово законодавство оновлюється: так, прийнято закон про паркування (2017), який дозволив фотофіксацію порушень. Наступні кроки могли б узаконити використання автоматичних систем контролю, визначити статус даних сенсорів як офіційних доказів тощо. З точки зору технічної інфраструктури, українські міста потребують модернізації: не всюди є навіть належне освітлення чи розмітка парковок, тож спершу слід упорядкувати базові речі. Однак це можливість «стрибнути» одразу в нову еру, минаючи застарілі технології. Наприклад, замість встановлення застарілих паркоматів можна одразу інвестувати в сучасні паркомати із сенсорами та онлайн-зв'язком або взагалі зробити ставку на cashless-систему з оплатою лише через смартфон – що в Києві вже частково реалізовано. Перспективно виглядає інтеграція паркувальних сервісів з популярними в Україні навігаційними службами (Google Maps, Waze) – щойно міста почнуть надавати дані про зайнятість, ці сервіси зможуть показувати їх водіям, підвищуючи зручність. Для цього міста повинні відкрити свої дані або об'єднатися з розробниками через API. Нарешті, розвиток технологій управління паркуванням в Україні створює і соціальний ефект. Покращення ситуації з паркуванням означатиме менше стресу для водіїв – а опитування показують, що до 48% водіїв знаходять процес пошуку місця дуже стресовим. Також це підвищить привабливість центрів міст для пішоходів і бізнесу, адже зникне хаос на тротуарах, покращиться екологія. Отже, впровадження розумних парковок можна розглядати як частину більш широкої стратегії сталого розвитку міського транспорту в Україні.

ВИСНОВКИ

Сучасні міста стикаються з серйозними викликами у сфері паркування, які суттєво впливають на трафік, екологію та якість життя мешканців. Аналіз засвідчив, що вирішення цих проблем потребує комплексного підходу, який охоплює інновації в апаратних рішеннях, цифрових платформах і міському управлінні. Технології Інтернету речей забезпечують збір даних у режимі реального часу, дозволяючи

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

оперативно інформувати водіїв та скорочувати час пошуку місця. Автоматизовані паркувальні системи суттєво підвищують місткість об'єктів і рівень безпеки, хоча й потребують значних інвестицій. Динамічне ціноутворення довело свою ефективність як засіб регулювання попиту, сприяючи більш рівномірному використанню простору, зменшенню круїзного трафіку й підвищенню доходів на розвиток інфраструктури. Інтеграція алгоритмів штучного інтелекту дає змогу створити адаптивні системи, що прогнозують завантаженість, оптимізують розподіл паркомісць, виявляють порушення й автоматично регулюють тарифи. Поєднання IoT, AI та динамічного управління формує нову парадигму – сервіс паркування, що діє подібно до бронювання квитків: із гарантією доступності, прозорими умовами та максимальним комфортом для користувача. Для України це не лише технологічне, а й стратегічне питання. Найбільш доцільним напрямом є поетапне впровадження Smart Parking-рішень у центральних районах міст із подальшим масштабуванням. Доцільно створити єдину міську платформу збору та візуалізації даних, інтегровану з навігаційними та платіжними сервісами, й супроводжувати технічне впровадження нормативними змінами та інформаційною підтримкою. Особливу увагу слід приділити залученню приватного сектору через механізми державно-приватного партнерства, відкриті API та стимулювання інновацій.

Впровадження таких підходів дає змогу перетворити паркування з джерела проблем на інструмент формування сталої, зручної й ефективної міської мобільності. Паркувальні системи можуть стати повноцінною частиною транспортної політики — інтегрованою, цифровізованою та орієнтованою на мешканця. Це створює передумови для підвищення конкурентоспроможності міст, зменшення навантаження на довкілля й підвищення загальної якості міського середовища.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Dowling C., Fiez T., Ratliff L., Zhang B. How Much Urban Traffic is Searching for Parking? arXiv:1702.06156, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1702.06156>.
2. Barriga J.J. et al. Smart Parking: A Literature Review from the Technological Perspective. Applied Sciences, 9(21):4569, 2019. doi: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/21/4569>.
3. Mondal M.A. et al. Smart parking management system with dynamic pricing. Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments, 13(1):1–22, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.3233/AIS-210615>.
4. Alahmadi S. et al. Towards Scalable and Privacy-Enhanced On-Street Parking Management: A Roadmap for Future Inquiry. Electronics, 12(19):4160, 2023. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2015.2428705>.
5. Nassar Y.F. et al. Challenges and Opportunities in Smart Parking Sensor Technologies. Int. J. of Electrical Engineering and Sustainability, 1(3):44–59, 2023. doi: https://www.researchgate.net/publication/372412628_Challenges_and_Opportunities_in_Smart_Parking_Sensor_Technologies.
6. Geva S. et al. Getting the prices right: Drivers' cruising choices in a serious parking game. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 163:153–167, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2015.2428705>.
7. Antoska V. et al. Machine Learning Models and Mathematical Approaches for Predictive IoT Smart Parking. Sensors, 25(7):2065, 2025. doi: <http://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1702.06156>.
8. Holinka A. Intelligent car parking management system. Master's thesis – Sumy State University, 2020. doi: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/79551>.
9. Smart Parking System with Dynamic Pricing, Edge-Cloud and IoT (Case Study). – In: Kabashkin I. et al. (Eds.) Reliability and Statistics in Transportation and Communication, RelStat 2020. Springer, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.3233/AIS-210615>.
10. Rajabioun T., Ioannou P. On-Street and Off-Street Parking Availability Prediction Using Multivariate Spatiotemporal Models. IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems, 16(5):2913–2924, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2015.2428705>.
11. Ahmed M. et al. Smart parking systems: Comprehensive review based on various aspects. Results in Engineering, 11:100277, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07050>.

Надійшла до редакції 15.05.25 р.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

КОПИЦЯ ВАДИМ ОЛЕКСАНДРОВИЧ – аспірант кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, **e-mail: vadymkopytsia@gmail.com**

КВЕТНИЙ РОМАН НАУМОВИЧ – д.т.н., професор кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, **e-mail: rkvetny@vntu.edu.ua**

Vadym Kopytsia, Roman Kvyetnyy

ANALYSIS OF APPROACHES TO IMPROVING INTELLIGENT PARKING MANAGEMENT TECHNOLOGIES

Vinnytsia National Technical University,