

Моделі та методи оперативного керування та віддаленого контролю мобільних платформ

Ю. М. Молодожон, В. С. Ситніков, В. А. Водічев
Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. У статті розглянуто організаційні складові моделей оперативного керування та віддаленого контролю мобільних платформ, що застосовуються у сфері надання комунальних послуг і логістичних операцій. Головна увага приділяється побудові систем збору, передавання та аналізу телеметричних даних, що формуються в процесі функціонування контейнерів для твердих побутових відходів, обладнаних сенсорними модулями, а також рухомих об'єктів — зокрема сміттєвозів, оснащених RFID-зчитувачами та GPS-модулями. Показано, що ефективність управління безпосередньо залежить від здатності системи інтегрувати дані з різномірних джерел, своєчасно реагувати на зміну зовнішніх умов і забезпечувати прозорість процесів для органів місцевого самоврядування, операторів і споживачів.

У роботі проаналізовано існуючі підходи до організації збору відходів та логістики маршрутів мобільних платформ, звернено увагу на їх обмеження у динамічному міському середовищі. Запропоновано використання адаптивних моделей оперативного керування, що враховують багатофакторні залежності — від дорожньої ситуації та технічних параметрів транспорту до змін у графіку навантаження. Особливе місце відведено застосуванню математичних моделей типу *Vehicle Routing Problem (VRP)* та її динамічних модифікацій, а також методам агентно-орієнтованого моделювання, що дає змогу описати взаємодію великої кількості об'єктів у системі.

Показано, що впровадження інтелектуальних технологій аналізу даних, включаючи елементи штучного інтелекту, сприяє оптимізації рішень у реальному часі та забезпечує сталий розвиток комунальної сфери. Особливу увагу приділено перспективам інтеграції таких систем у концепцію *Smart City*, що дозволяє досягати синергетичного ефекту завдяки поєднанню транспортної, енергетичної та екологічної інфраструктури міста. Зроблено висновок про необхідність комплексного підходу до організаційних аспектів управління мобільними платформами, що дозволяє підвищити ефективність, екологічну результативність та економічну доцільність сервісних процесів у містах.

Ключові слова: мобільні платформи, оперативне керування, телеметрія, IoT, маршрутизація.

Вступ

Управління мобільними платформами є критично важливою задачею для міської логістики, екологічного моніторингу та цифрової трансформації муніципальних послуг. Ефективне керування сміттєвозами, комунальним транспортом та іншими мобільними об'єктами дозволяє знижувати витрати, покращувати якість послуг і досягати прозорості для споживачів. У цьому контексті особливу роль відіграють сучасні технології — GPS, Інтернет речей (IoT), телеметрія, штучний інтелект та забезпечення системи безпеки [1, 2, 3, 4, 5].

1 Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є створення математичних моделей оперативного керування, що дозво-

ляють адаптувати мобільні платформи до змінних умов експлуатації у міському середовищі, в тому числі інтеграція у *Smart City* [6, 7, 8].

У рамках досягнення поставленої мети дослідження охоплює класифікацію типів мобільних платформ залежно від їх функціонального призначення та умов використання, аналізує технічні та організаційні вимоги до побудови ефективних систем дистанційного моніторингу [10, 11, 12].

Запропоновано трирівневу архітектуру керування, яка враховує взаємодію між сенсорними компонентами, мобільними виконавчими пристроями та центрами обробки даних. Особливу увагу приділено оцінці методів забезпечення інформаційної безпеки та захисту від несанкціонованого втручання. Як результат, сформульовано рекомендації щодо впровадження інтелектуальних алгоритмів керування, що дозволяють досягти гнучкості, надійності та підвищеної

© Молодожон Ю. М., Ситніков В. С.,
Водічев В. А., 2025

Ця стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>)

ефективності систем мобільного обслуговування в умовах сучасного міського простору.

2 Існуючі приклади та моделі

2.1 Опит міста Сурабая (Індонезія)

Вже розглядалося впровадження системи «розумного» управління відходами в місті Сурабая (Індонезія) на основі технологій Інтернету речей (IoT) [13,14]. Описується архітектура рішення з використанням датчиків наповненості контейнерів, GPS/GSM-модулів та програмних інструментів для моніторингу й побудови оптимальних маршрутів. Наведено результати пілотного впровадження, які продемонстрували зниження витрат, часу обслуговування та покращення екологічних показників.

Доповнення полягає у розширенні підходу, запропонованого в статті, шляхом включення адаптивних моделей оперативного керування, що додатково враховують:

- багато параметричні обмеження (дорожня ситуація, завантаження, доступність маршрутів);
- інтеграцію з цифровими муніципальними платформами («розумне місто»);
- використання алгоритмів оптимізації в реальному часі;
- залучення мобільних платформ, оснащених RFID-зчитувачами, для підтвердження збору даних з об'єктів (контейнерів);
- впровадження механізмів віддаленого контролю та зворотного зв'язку.

Таким чином, це розвиває й доповнює розглянуту концепцію, акцентуючи увагу на моделюванні та управлінні процесами в більш складних і динамічних умовах міського середовища [15, 16, 17].

2.2 Практичне застосування та розвиток RFID-технологій у системах управління відходами

Практичне застосування RFID-технологій у сфері управління відходами вже довело свою ефективність у низці міст, зокрема в Індії. Так, у Джамшедпурі та Індіані сміттєвози обладнані RFID-зчитувачами, що зчитують мітки з контейнерів або від кожного домогосподарства під час збору [17, 18]. Подібна система діє і в місті Ранчи, де електричні сміттєвози автоматично фіксують факт обслуговування кожної адреси шляхом сканування унікальної мітки. Це дозволяє створити систему точного підтвердження наданих послуг, підвищити прозорість, а також забезпечити контроль виконання зобов'язань підрядниками.

У межах цього дослідження розглядається подальше вдосконалення таких рішень через поєднання RFID-зчитування з телеметрією мобільних платформ та адаптивним алгоритмічним управлінням маршрутами в реальному часі. На відміну від статичних схем або простого підтвердження вивезення, запропонована модель дозволяє інтегрувати дані зчитування міток, навігаційні координати, дорожню ситуацію та логістичні обмеження для формування динамічно поновлюваного технологічного завдання. Це створює умови для побудови єдиної цифрової системи оперативного контролю, що охоплює як етапи збору даних, так і прийняття управлінських рішень на рівні міської інфраструктури.

2.3 Мобільні платформи в системі інтелектуального управління відходами: від реагування до верифікації

Окреме місце у сучасних дослідженнях займають проекти, спрямовані на створення інтелектуальних систем вивезення відходів у контексті цифрової трансформації міст. Так, у роботі Zhang та ін. [16] розглянуто реалізацію динамічної системи керування вивозом сміття, що ґрунтується на використанні сенсорів переповнення контейнерів, IoT-платформ для збору даних, алгоритмів побудови маршрутів та засобів хмарної обробки. Модель дозволяє в режимі реального часу адаптувати маршрути мобільних одиниць з урахуванням наповненості баків та поточних умов, що в умовах обмежених ресурсів забезпечує скорочення витрат, підвищення ефективності та зменшення впливу на довкілля. Подібні підходи уже використовуються в окремих громадах Китаю, де було продемонстровано зменшення протяжності маршрутів та покращення регулярності обслуговування.

У межах дослідження ця концепція отримує подальший розвиток через включення мобільних платформ із RFID-зчитувачами, які дозволяють автоматично верифікувати факт обслуговування контейнерів (зокрема – їх спорожнення). Це забезпечує не лише точність обліку, але й прозорість процесу виконання послуг. Крім того, у межах запропонованої моделі передбачається застосування адаптивних алгоритмів оперативного управління, здатних змінювати маршрути в реальному часі з урахуванням логістичних обмежень, дорожньої ситуації та пріоритетів обслуговування. Такий підхід дозволяє формувати організаційно-технічну систему нового покоління, що поєднує автоматизований контроль, цифрову диспетчеризацію та гнучке реагування в динамічному міському середовищі.

2.4 Інтеграція RFID-зчитувачів у мобільні платформи як елемент адаптивного управління

Одним із актуальних напрямів цифрової трансформації міського господарства є впровадження інтелектуальних систем управління відходами, заснованих на новітніх інформаційно-комунікаційних технологіях. У цьому контексті суттєвий внесок зроблено у статті Аяю Kumar та Р.К. Mallick (2021) [17], де розглянуто багаторівневу модель «розумного» управління, що включає сенсори наповненості баків, GPS-моніторинг, передачу даних через бездротові мережі (GSM, LoRaWAN), хмарні обчислення та аналітику в режимі реального часу. Основна увага приділена інтеграції технологій збору даних із централізованими платформами управління для підвищення ефективності логістики вивозу відходів та зниження експлуатаційних витрат. Автори демонструють переваги такого підходу в умовах зростаючого навантаження на інфраструктуру міст, акцентуючи на технічних і комунікаційних рішеннях.

У межах подальшого розвитку цієї моделі доцільним є обов'язкове включення в архітектуру системи мобільних платформ, оснащених RFID-зчитувачами. Таке технічне рішення дозволяє забезпечити автоматизовану фіксацію факту обслуговування контрольованих об'єктів (зокрема контейнерів для ТПВ) під час їх фактичного спорожнення. Встановлення RFID-зчитувачів на сміттєвозах дає змогу формувати достовірну подієву аналітику, що включає точні часи та геопозиції кожного зчитування, синхронізовані з даними GPS. Це, у свою чергу, підвищує рівень прозорості сервісного процесу, дозволяє усунути суперечності між надавачами послуг і замовниками, а також відкриває можливості для інтеграції з муніципальними платформами «розумного міста». Таким чином, застосування RFID-технологій у поєднанні з телеметрією рухомих об'єктів слід розглядати як невід'ємний організаційно-технічний компонент адаптивної моделі оперативного керування та віддаленого контролю, здатної функціонувати в умовах динамічного міського середовища та обмежених ресурсів.

3 Методологія дослідження

Методологічною основою дослідження є теорія систем, оптимізаційне моделювання, елементи автоматизованого проектування та управління, принципи побудови IoT-архітектур. Моделі створювались з урахуванням обмежених ресурсів, високої динаміки середовища, та необхіднос-

ті масштабування та практичного застосування у системах Smart City [1,3,5].

4 Структура системи оперативного керування

Система керування має три основні рівні:

- Збір даних: GPS-модулі, RFID, сенсори заповнення, BLE-маячки[5, 7]
- Обробка даних: локальні контролери, edge-computing, аналітика на базі AI[8, 12]. У теперішній час штучний інтелект дедалі активніше застосовується для підтримки рішень у транспортних системах [15].

Прийняття рішень: централізована диспетчеризація, мобільні додатки, формування маршрутів.

API як ключовий елемент архітектури системи[19, 20]

В архітектурі системи керування мобільними платформами API (Application Programming Interface) виступає центральним вузлом комунікації між усіма компонентами системи - цифровою платформою, клієнтськими додатками, панеллю управління та підсистемами Smart City [8, 11, 12, 18].

Функціональне призначення API:

1. Інтерфейс доступу до функціоналу системи

Кожен модуль або зовнішній користувач (диспетчер, комерційний клієнт, муніципалітет) взаємодіє з системою через стандартизовані API-запити. Це дозволяє:

- отримати інформацію про маршрути;
- запитати телеметричні дані (навантаження, спорожнення);
- надіслати команду на оновлення параметрів об'єкта.

2. Забезпечення безпеки та розмежування доступу API дозволяє реалізувати рівні авторизації, завдяки чому:

- кожен користувач має обмежений доступ до своїх об'єктів;
- обмін даними захищений токенами доступу, протоколами HTTPS та іншими механізмами шифрування.

3. Можливість інтеграції з іншими платформами, відкритість API дозволяє підключати зовнішні сервіси [8, 11, 12, 18]:

- міські платформи Smart City (наприклад, геоінформаційні системи);
- системи обліку та оплати;
- екосистеми відеоспостереження та охорони.
- надання інформації споживачам та контролюючим органам.

Вплив на гнучкість системи:

API у цій архітектурі виступає не просто передавачем запитів, а інструментом розширення можливостей:

- додає модульність (можна легко підключити нові компоненти);
- підтримує масштабованість (можна обслуговувати більше користувачів);
- забезпечує простоту підтримки та оновлення (локалізація змін не впливає на всю систему).

Відкритий і закритий API як варіанти реалізації системи

У контексті побудови системи дистанційного керування мобільними платформами важливо враховувати два підходи до реалізації API-відкритий (open API) і закритий (private API). до своїх об'єктів) [3, 5, 6].

Закритий API використовується виключно всередині організації або системи. Цей варіант дозволяє:

- мінімізувати ризики зовнішнього втручання;
- приховати внутрішню структуру запитів;
- зберегти конфіденційність логіки управління, особливо якщо вона має наукову або комерційну цінність.

Це критично важливо у випадках, коли система використовується в критичній інфраструктурі або містить розробки, які підлягають правовому захисту.

Вибір між відкритим і закритим API залежить від моделі взаємодії з користувачами, клієнтами та іншими системами. Якщо необхідна масштабованість і доступність - відкритий API є доцільним. Якщо пріоритетом є контроль, захист і унікальність - краще використовувати закритий.

Комбінований підхід. У багаторівневій архітектурі часто доцільно використовувати обидва варіанти одночасно:

- відкритий API - для зовнішніх взаємодій (мобільні застосунки, публічна звітність);
- закритий API - для адміністрування, внутрішнього управління, діагностики.

Це забезпечує гнучкість, надійність і захист авторських рішень у динамічному цифровому середовищі.

Запропонована архітектура враховує масштабованість для розгортання у містах з різною щільністю інфраструктури, використовуючи edge-обробку, об'єктно-орієнтовану передачу телеметрії та легку інтеграцію через API[20].

Діаграма (Рис.1.) відображає основні компоненти системи: IoT-сенсори, блоки збору та обробки даних, навігаційні підсистеми, модулі штучного інтелекту для прогнозування та оптимізації, а також API-інтерфейси для взаємодії з

Кожен із них має свої переваги, обмеження та області застосування в залежності від вимог до безпеки, інтеграції та контролю.

Відкритий API передбачає надання зовнішнім розробникам або системам доступу до обмеженого набору функцій через задокументований інтерфейс. Такий API може використовуватися для інтеграції із:

- платформами «розумного міста»,
- сервісами електронної звітності,
- мобільними застосунками мешканців або замовників.

При цьому безпека забезпечується через авторизацію, токени доступу, розмежування прав (наприклад, лише на читання, або доступ лише

зовнішніми сервісами. Вона показує, як дані з різних джерел інтегруються у єдину платформу для прийняття управлінських рішень у режимі реального часу.

5 Моделі оперативного керування

У системі керування мобільними платформами реалізовано моделі оперативного реагування та адаптивного перерозподілу завдань, які базуються на комплексному аналізі телеметричних даних, стану навколишнього середовища, навантаження на транспорт та прогнозах динаміки міського середовища. Розроблена модель враховує архітектурні підходи до управління автопарком на основі IoT та AI [6].

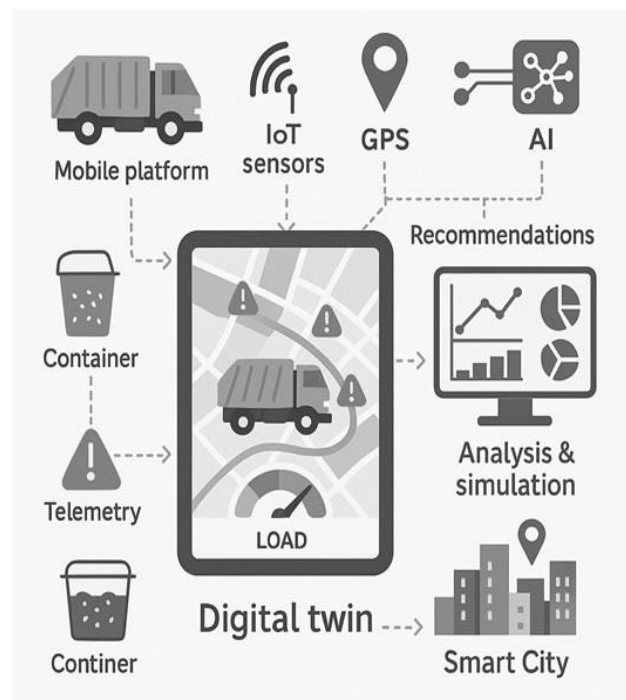


Рис. 1 - Структура взаємодії системи оперативного керування

Сучасні дослідження показують, що підхід на основі прогнозної аналітики та інтеграції даних із цифрових двійників може значно підвищити ефективність оперативного управління мобільними платформами. Також увага акцентується на застосуванні технологій прогнозної аналітики та AI-орієнтованого планування в інфраструктурних системах, що безпосередньо пов'язується із завданнями оптимізації міських логістичних процесів [13; 15].

5.1 Базова модель маршрутизації

На першому рівні управління система формує маршрутний лист для кожної мобільної платформи - це перелік точок обслуговування з визначеною послідовністю, часом прибуття та службовими параметрами.

Такий маршрутний лист складається на основі:

- топології об'єктів (контейнерів або зон);
- типу транспортного засобу,
- критичності завдань (черговість, пріоритети),
- очікуваного навантаження.

Важливо: сформований маршрут не є жорстко фіксованим. У разі зміни умов (затор, аварія, поломка техніки, перевищення допустимого часу обслуговування) система має можливість вносити оперативні зміни до маршрутного листа - повністю або частково, залежно від критичності подій.

Таким чином, базова модель маршрутного планування забезпечує структуровану основу для управління, яка при цьому зберігає гнучкість до змін у режимі реального часу.

5.2 Адаптивна модель із динамічним реагуванням

Центральним компонентом сучасної системи є модель адаптивного управління, що дозволяє змінювати маршрутну стратегію в реальному часі. Вона реалізована за допомогою наступних підходів:

- Оцінка навантаження мобільної платформи (залишок ресурсу, об'єм бункера, технічні обмеження навантаження);
- Прийняття рішень про зміну маршруту у разі виявлення заторів, дорожніх робіт, аварій чи порушень доступу до об'єктів, або передчасного заповнення бункера;
- Пріоритизація об'єктів за категоріями, рівнем заповнення, термінами та графіком обслуговування;
- Формування черг обслуговування з урахуванням географічної близькості, попереднього

досвіду затримок, прогнозованого часу на обслуговування, враховуючи час доби та року.

5.3 Перерозподіл технічних завдань між одиницями транспорту

У разі виникнення недоступності окремої платформи (збій, перевантаження, технічна поломка) система:

- автоматично переадресовує завдання на іншу вільну техніку, що знаходиться в зоні досяжності, та має вільний ресурс;
- аналізує ефективність заміни за критеріями витрат часу, ресурсу, палива;
- пропонує оптимізований план реагування у вигляді нових маршрутів із мінімальним відхиленням від початкового плану, враховуючи інші завдання.

5.4 Моделі прогнозування та оцінювання

Застосовуються моделі:

- часових рядів для прогнозування навантаження і часу обслуговування;
- класифікації подій для визначення імовірності збоїв;
- кластеризації маршрутів для планування робіт за схожими сценаріями.

На основі цих моделей формується система попереднього планування, що дає змогу сформувати графік обслуговування на кілька днів вперед з адаптацією в реальному часі.

5.5 Алгоритмічне ядро підтримки рішень

Моделна частина тісно пов'язана з механізмом прийняття рішень на основі оцінки ситуації, який враховує:

- динамічні умови (пробки, зміни погоди, час доби);
- поточний стан техніки;
- історичні дані про об'єкти обслуговування,
- доступність і завантаження інших платформ.

Це дозволяє генерувати сценарії реагування, що не залежать від жорстко заданих маршрутів і можуть змінюватися залежно від контексту, забезпечуючи гнучкість, швидкість та стійкість до збоїв.

Алгоритмічне перенесення маршрутного завдання ґрунтується на принципах оптимізації маршрутизації в реальному часі [9].

Таким чином, реалізовані моделі оперативного керування формують адаптивну, масштабовану та прогнозовану систему, що відповідає вимогам інтелектуального міського середовища (Smart City) та комерційного сервісного центру [8, 11, 12, 18].

5.6 Математична модель

5.6.1 Вхідні дані (параметри системи):

- N - кількість контейнерів.
- M - кількість спецтранспортних одиниць.
- $(x_i, y_i) \in \mathbb{N}$ - координати контейнерів.
- $f_i(t) \in [0, 1]$ - рівень заповнення контейнера (нормований), отриманий із сенсора.
- $RFID_i(t) \in \{0, 1\}$ - індикатор спорожнення контейнера.
- Q_j - місткість транспортного засобу j .
- d_{ij} - відстань між контейнерами i та j (наприклад, за GPS).
- τ_{ij} - час руху між контейнерами (враховує затори, ремонти, аварії).
- $\sigma_j(t)$ - завантаження транспорту j у момент часу t .

5.6.2 Змінні моделі:

- $x_{ij}^k \in \{0, 1\}$ - чи обслуговується контейнер iii транспортом kkk після контейнера jjj .
- $z_i \in \{0, 1\}$ - чи включений контейнер iii у поточний маршрут.
- T_j - загальний час роботи транспорту j .

5.6.3 Цільова функція. Мінімізація сумарного часу обслуговування контейнерів з урахуванням динамічних факторів:

$$\min F = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \tau_{ij} \cdot x_{ij}^k$$

Або (альтернативно) мінімізація сумарної відстані:

$$\min D = \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M d_{ij} \cdot x_{ijk} x_{ij}^k$$

5.6.4 Обмеження:

1. Обмеження на включення контейнера у маршрут

$$z_i = 1 \text{ if } f_i(t) \geq \theta \text{ (наприклад, поріг 0.8)}$$

2. Кожен контейнер обслуговується один раз або не обслуговується

$$\sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij}^k = z_i, \quad \forall i \in M$$

3. Обмеження місткості транспорту

$$\sum_{i=1}^N f_i(t) \cdot z_i \leq Q_j, \quad \forall j \in M$$

4. Обмеження часу роботи

$$T_j \leq T_{\max}, \quad \forall j \in M$$

5. Урахування динамічних факторів (заторів, ремонтів, аварій)

$$\tau_{ijk} = \frac{d_{ij}}{v_{ij}(t)}$$

де $v_{ij}(t)$ залежить від дорожніх умов.

Графічна модель (Рис.2.) відображає формалізацію завдання: множину мобільних платформ, контейнерів для обслуговування та обмеження (часові, просторові, технічні). Вказано залежність функції вартості від завантаження транспорту, відстані, стану контейнерів та зовнішніх умов (трафік, аварії, погодні фактори). Схема показує, як модель дозволяє адаптивне змінювати маршрути у випадку зміни умов.

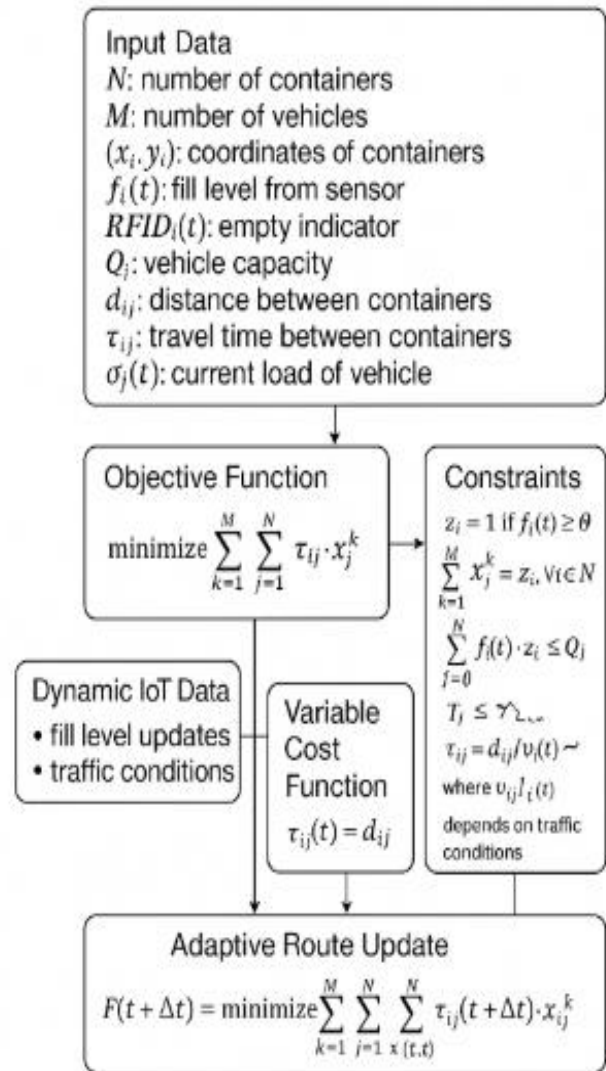


Рис. 2 - Математична модель оперативного керування мобільними платформами на основі IoT-даних

5.6.5 Адаптивне оновлення маршруту. У випадку зміни даних сенсорів (наприклад, заповнення контейнера або аварії на маршруті) модель перебудовується:

$$F(t + \Delta t) = \min_{\{x_{ij}^k\}} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \tau_{ij}(t + \Delta t) \cdot x_{ij}^k$$

5.6.6 Інтерпретація. Ця модель є модифікацією VRP (Vehicle Routing Problem) з динамічними вхідними параметрами з IoT-сенсорів.

На відміну від класичного VRP, тут враховано:

- рівень заповнення контейнерів у реальному часі;
- RFID-фіксацію факту спорожнення;
- технічні сигнали (впливають на доступність транспорту);
- затори та аварії, що змінюють функцію часу.

6 Використані технології, процедури та моделі [10, 13]

У сфері управління міськими відходами штучний інтелект дедалі частіше використовується для оптимізації маршрутів збору та прогнозування завантаженості контейнерів. Наприклад, у [21] наведено практичні приклади застосування глибоких нейронних мереж та машинного навчання для побудови моделей збору відходів у Smart City, що підтверджує ефективність підходу, використаного в даній роботі.

В тому числі у системі керування мобільними платформами реалізовано комплекс сучасних технологій, що забезпечують збір, передачу, обробку та аналітику даних в режимі реального часу. Особливу увагу в реалізації системи приділено безпеці даних, відповідно до стандартів інформаційної безпеки [2].

6.1 Інфраструктура збору даних та телеметрія [5, 8]

Система накопичує багатовимірні телеметричні дані з сенсорів IoT, зокрема:

- геолокаційні дані (GPS/GNSS) [5, 7];
- рівень заповнення контейнерів (ультразвукові сенсори та ін.);
- інформацію про факти спорожнення та маркування (ідентифікація через RFID, BLE, QR);
- IoT / телеметрія - для зчитування стану [1, 3-5];
- технічні сигнали - стан бункера, вібрації, температура, навантаження на вісь;
- часові мітки, тривалість зупинок, відхилення від маршруту.

Ці дані передаються до центрального аналітичного модуля через бездротові шлюзи й зберігаються для подальшої обробки. У разі виявлен-

ня порушень система може автоматично переадресувати завдання іншій одиниці техніки, що підвищує гнучкість і надійність сервісу.

6.2 Аналітична обробка даних та AI-компоненти

Зібрана телеметрія аналізується в рамках багаторівневої системи прийняття рішень. Застосовуються наступні підходи [5, 8]:

- кластеризація (k-Means, DBSCAN) - групування об'єктів за подібними маршрутами або рівнем завантаження [8][10];
- аналіз часових рядів (ARIMA, LSTM) - прогнозування пікових навантажень, затримок, зміни графіків;
- виявлення аномалій (Isolation Forest, Local Outlier Factor) - виявлення технічних збоїв або нештатної поведінки;
- класифікація подій (Decision Tree, SVM) - визначення пріоритету обслуговування контейнерів або маршрутів.

На основі результатів аналітики система здійснює адаптивне формування маршрутного завдання в реальному часі. У процесі ухвалення рішень враховуються такі параметри:

- поточне навантаження кожної одиниці спецтехніки (кількість вже оброблених точок, залишок ресурсу, заповнення бункера);
- інформація про стан дорожньої мережі - виявлення заторів, аварій, ремонтних ділянок, погодних обмежень;
- аналіз часу доби - прогнозована тривалість виконання завдання змінюється залежно від транспортної ситуації в пікові або нічні години;
- історичні дані - час виконання маршруту, середня ефективність обслуговування, типові проблеми за попередні періоди.

На основі вищезгаданих факторів система може автоматично запропонувати альтернативний маршрут, оптимізований за критерієм мінімального часу, витрат або пріоритету об'єктів. Це дозволяє зменшити затримки, знизити навантаження на техніку та підвищити загальну продуктивність. Також вся інформація, що стосується змін та відхилень передаються диспетчеру та використовуються для автоматичної формування звіту про зміни.

Аналітика та моделі прийняття рішень на основі AI

Зібрані IoT-дані формують багаторівневу структуру телеметрії, що включає GPS-координати, рівень заповнення контейнерів, тривалість стоянки, сигнали від технічних сенсорів. Ці дані подаються до аналітичного ядра системи.

Застосування машинного навчання [1, 3, 4, 5] дозволяє:

- класифікувати події та ситуації (наприклад, переповнення, перевищення часу на локації, інформація про виконання технічного завдання);
- прогнозувати навантаження на маршрути (часові ряди);
- виявляти аномальні шаблони поведінки (відхилення від норми);
- групувати маршрути за критеріями ефективності (кластеризація) [8, 10].

На основі цього приймаються рішення щодо динамічного оновлення маршрутів, пріоритетності обслуговування та інформування замовників. Отримані дані також використовуються для побудови цифрового двійника системи, що дозволяє проводити симуляції та перевірку сценаріїв без ризику для реального середовища.

Таким чином, система формує адаптивну й інтелектуальну платформу керування, де рішення приймаються на основі даних у реальному часі, а структура взаємодії побудована на сучасних протоколах безпеки та комбінованих інтерфейсах.

7 Практичне застосування в міському господарстві та Smart City [8, 11, 12, 18]

Система може застосовуватись у:

- Зборі ТПВ: фіксація фактів спорожнення, контроль виконання маршруту.
- Smart City: інтеграція з відкритими платформами, API, взаємодія з населенням.
- Інтерфейси для мешканців: перегляд графіків вивозу, скарги, звіти.
- Інтерфейси для комерційних замовників: індивідуалізацію доступу, звіти та аналітика.
- Аналітика для керівництва: планування ресурсів, фінансове моделювання [8, 12].

Докладніше розберемо кожен із цих елементів.

Одним із ключових напрямків застосування систем оперативного керування мобільними платформами є сфера міського комунального господарства, зокрема - організація вивозу твердих побутових відходів (ТПВ), догляд за інфраструктурою, прибирання вулиць тощо. У контексті цифровізації та впровадження стандартів "розумного міста" (Smart City) такі системи стають складовою частиною єдиної урбаністичної цифрової платформи [8, 11, 12, 18].

Збір та транспортування ТПВ.

Інтелектуальна система дозволяє автоматизувати процес керування вивозом сміття:

- Контейнери оснащуються сенсорами заповнення, які передають телеметричні дані про рівень завантаження в реальному часі.

Мобільні платформи (сміттєвози) обладнуються GPS-модулями, RFID-зчитувачами та/або BLE-маячками, що дає змогу фіксувати факт спорожнення кожного контейнера [5, 7].

- Програмне забезпечення формує динамічні маршрути, які враховують пріоритетність, завантаження, пробки, що зменшує час обслуговування і витрати на паливо.

Такий підхід забезпечує ефективне використання ресурсів, зменшення впливу на довкілля та зниження експлуатаційних витрат.

Інтеграція в інфраструктуру Smart City [8, 11, 12, 18].

Система стає частиною платформи "розумного міста" завдяки інтеграції з:

- Муніципальними дата-центрами - централізоване зберігання та обробка даних про пересування техніки, її стан та витрати.
- Відкритими API - можливість взаємодії з іншими міськими сервісами: енергетикою, водопостачанням, дорожнім господарством.
- Геоінформаційними системами (ГІС) – візуалізація маршрутів, зони обслуговування, аналіз навантаження на райони.

У результаті міські служби отримують інструмент прозорого управління, який дозволяє швидко реагувати на зміни, планувати навантаження, автоматизувати звітність і мінімізувати людський фактор.

Інтерфейси для мешканців

Цифрові сервіси створюють інтерфейс взаємодії з громадянами:

- Графіки вивозу відходів можуть публікуватися в мобільних додатках або на порталах.
- Мешканці можуть надсилати скарги або повідомляти про переповнені контейнери.
- Статистика і дані про виконання робіт доступні в публічному форматі.

Це підвищує рівень довіри до муніципалітету, знижує соціальну напругу та сприяє формуванню екологічної культури.

Обслуговування комерційних замовників

Окрім міських служб, система оперативного керування мобільними платформами орієнтована також на комерційних клієнтів, які укладають договори на вивіз відходів або обслуговування локальних об'єктів. Такі замовники мають специфічні вимоги, які передбачають:

- Індивідуалізацію доступу до інформації: кожен клієнт бачить лише дані щодо своєї групи контейнерів, без доступу до загальноміської інформації.
- Фільтрацію за географією та власністю: на цифровій карті відображаються виключно локації, що належать замовнику.

- Автоматичне формування звітів: системи генерують щоденні або щотижневі звіти щодо кількості спорожень, часу обслуговування, маршрутів та відхилень.

- Нотифікації у реальному часі: замовник отримує повідомлення про факти обслуговування, затримки, або критичні ситуації (наприклад, відсутність доступу до контейнера).

- Гнучка аналітика: комерційні користувачі можуть переглядати агреговані метрики ефективності, що дозволяє їм здійснювати оптимізацію внутрішніх процесів, планувати графіки утилізації або робити перерахунки на основі фактичних послуг.

Таким чином, система створює прозору та контрольовану взаємодію між надавачом послуг і приватним замовником, що підвищує рівень довіри, зменшує кількість конфліктів і забезпечує гнучкість в обліку та плануванні. Особливо це актуально для великих торгових мереж, логістичних центрів, медичних закладів, підприємств харчової промисловості, де важливий не тільки вивіз відходів, а й документальне підтвердження на кожному етапі.

Аналітика та управлінські рішення [8, 12]

Зібрані дані використовуються для аналітики на рівні управління:

- Можливість планування бюджету на основі реального навантаження та витрат.

- Оптимізація використання техніки, прогнозування потреб в техобслуговуванні.

- Формування цифрових звітів для міської ради, аудиторських перевірок або зовнішніх партнерів

Таким чином, система виконує функції стратегічного інструменту для цифрової трансформації міських сервісів.

8 Огляд відмінностей від існуючих моделей

Запропонована модель оперативного керування та віддаленого контролю мобільних платформ відрізняється від традиційних підходів комплексним урахуванням динамічного міського середовища, багатофакторних обмежень та режимів завантаження мобільних об'єктів. На відміну від класичних моделей Vehicle Routing Problem (VRP) та їх динамічних варіантів (DVRP), запропонована модель інтегрує реальні дані з GPS та RFID, а також використовує адаптивні алгоритми оптимізації маршрутів у реальному часі. Вона також передбачає організаційний рівень взаємодії між сенсорними вузлами в контейнерах і мобільними платформами, що

підвищує прозорість та екологічну ефективність сервісних процесів у комунальному секторі.

9 Висновки щодо запропонованої моделі

Запропонована в дослідженні модель оперативного керування мобільними платформами поєднує IoT, GPS, RFID, елементи штучного інтелекту в єдину інтегровану систему, що здатна гнучко реагувати на зміну умов та оптимізувати управління мобільними об'єктами у режимі реального часу.

Наукова новизна моделі полягає у відсутності прямих аналогів, що робить запропоновану архітектуру унікальною в контексті її комплексного підходу до цифрового керування транспортними та сервісними платформами.

Практична цінність системи полягає в її можливості масштабного впровадження у таких секторах, як міське господарство, логістика, екологічний моніторинг, сільське господарство, де необхідні швидкість реагування, гнучкість рішень та прозорість даних.

Розроблена модель дозволяє:

- ефективно управляти маршрутами та подіями в польових умовах;

- оптимізувати маршрути і витрати;

- забезпечити прозорість і контроль виконання виробничого завдання;

- створювати індивідуальні інтерфейси для муніципалітетів, приватних компаній, операторів та громадян-споживачів послуг;

- забезпечувати високий рівень кібербезпеки, автономності та надійності систем зв'язку та телеметрії;

- збирати доказову аналітику для звітності, обліку та аудиту.

- реалізувати екологічні й цифрові ініціативи.

Синергія телеметрії, навігаційних технологій та алгоритмів штучного інтелекту відкриває нові горизонти для цифрової трансформації міської та промислової інфраструктури, роблячи можливим повноцінне впровадження SmartCity-рішень на регіональному та національному рівні [8, 11, 12, 18].

10 Перспективи подальших досліджень

Подальша робота у межах обраної тематики зосереджуватиметься на поглибленому розвитку моделей та методів, які дозволяють підвищити адаптивність, надійність та масштабованість систем дистанційного керування мобільними платформами. Основними напрямками досліджень є наступне.

10.1 Розробка цифрового двійника системи

Цифровий двійник - це математично обґрунтована віртуальна модель реального об'єкта або системи, яка динамічно оновлюється в режимі реального часу на основі вхідних даних. У нашому випадку йдеться про створення цифрового відображення мобільної платформи як технічного об'єкта в контексті міської логістики.

Концепція цифрових двійників є важливою для побудови адаптивних моделей управління мобільними платформами. Згідно з [22], створення цифрових двійників у межах Smart City дозволяє не лише відстежувати технічний стан систем у реальному часі, але й проводити сценарне моделювання, що сприяє підвищенню надійності та гнучкості інфраструктури.

Метою є розробка моделі цифрового двійника, яка дозволить не лише спостерігати за станом платформи та її середовищем експлуатації, а й:

- аналізувати ймовірні ситуації на маршрутах;
- прогнозувати технічні збої або перевантаження;
- верифікувати поведінку об'єкта в умовах змінних вхідних параметрів;
- тестувати варіанти реакції системи в симульованому середовищі.

Цей напрямок дозволить підвищити ефективність обґрунтування управлінських рішень і зменшити витрати на обслуговування.

10.2 Впровадження моделей самонавчання маршрутів

Подальше вдосконалення моделей управління передбачає формалізацію методів адаптації маршрутів на основі накопичених історичних даних. Розробка математичних моделей, які враховують:

- дорожню ситуацію;
- час пік і сезонні зміни;
- обмеження руху (ремонтні роботи, заборони тощо);
- погодні умови.

Такі моделі дозволяють визначати тенденції і формувати адаптивну логіку для маршрутів вивозу або обслуговування без прив'язки до конкретних алгоритмів.

Таким чином, дослідження буде спрямовано на створення умовної «системи правил» або адаптивної структури, яка змінюється відповідно до вхідних факторів і наближається до принципів самонавчання.

10.3. Побудова моделей забезпечення кіберзахисту систем

Важливою складовою запропонованої системи є забезпечення інформаційної безпеки та захисту даних. У статті [23] розглянуто сучасні методи побудови захищених IoT-архітектур, включаючи використання AI-посилених механізмів виявлення вторгнень та керування доступом, що дозволяє мінімізувати ризики кібератак у Smart City.

Так інтегрованість мобільних платформ в інформаційне середовище створює підвищені вимоги до їх захищеності.

У подальших дослідженнях увага зосередиться на створенні моделей виявлення загроз, формалізації критеріїв стійкості та ризику для телеметричних мереж.

Пропонується:

- розробити систему параметрів для оцінки рівня вразливості системи;
- описати граничні умови, за яких порушується безпека обміну даними;
- формалізувати методику оцінювання впливу збоїв чи атак на якість управління.

Таким чином, в основі буде не конкретна криптографія, а модель ризиків і протидії як частина загального підходу до побудови безпечної системи.

10.4 Симуляція взаємодії мобільних платформ в умовах Smart City [8, 11, 12, 18]

Для повноцінного впровадження управлінських рішень необхідна симуляційна модель поведінки всієї транспортної підсистеми міста. У центрі уваги буде побудова симуляційного середовища для віртуального тестування, впроваджених моделей керування у межах складного урбаністичного середовища, Модель повинна охоплювати:

- взаємодію мобільних об'єктів з іншими елементами міської інфраструктури (світлофори, заборонені зони, трафік);
- часові інтервали обслуговування;
- зміни топології маршрутів у залежності від політики міста;
- обмеження, які накладає інфраструктура Smart City [8, 11, 12, 18].

Симуляційне моделювання дозволить прогнозувати та оцінювати ефективність рішень, зменшити кількість польових експериментів і забезпечити системний підхід до планування [24].

Ці чотири напрями є логічним продовженням сформульованих у дисертації задач. Вони

спрямовані на вдосконалення моделей прийняття рішень, підвищення надійності систем та адаптивності до складних умов без розробки алгоритмів або проектних рішень.

References

1. ISO/IEC. ISO/IEC 30141:2022 – Internet of Things (IoT) - Reference Architecture [Електронний ресурс]. – 2-е вид. – Geneva: International Organization for Standardization, 2022. – Режим доступу: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso-iec:30141:ed-2:v1:en>.
2. ISO/IEC. ISO/IEC 27001:2013 – Information security management systems - Requirements [Електронний ресурс]. – Geneva: International Organization for Standardization, 2015. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/54534.html>.
3. Minerva R., Biru A., Rotondi D. Towards a Definition of the Internet of Things [Електронний ресурс]. – IEEE Internet Initiative, 2015. – Режим доступу: https://iot.ieee.org/images/files/pdf/IEEE_IoT_Towards_Definition_Internet_of_Things_Revision1_27MAY15.pdf.
4. Whitmore A., Agarwal A., Xu L. D. The Internet of Things – A survey of topics and trends // Information Systems Frontiers. – 2015. – Vol. 17, № 2. – P. 261–274. doi:10.1007/s10796-014-9489-2. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1007/s10796-014-9489-2>
5. Farahani M., Firouzi F., Lue J. Intelligent Fleet Management Using IoT and AI: A Survey // Sensors. – 2020. – Vol. 20, № 3. – Article 645. doi:10.3390/s20030645. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/s20030645>
6. Potdar P. R., Parikh S. M. IoT and Artificial Intelligence Enabled Framework for Smart Fleet Management [Електронний ресурс] // OPSEARCH. – Springer, 2025. doi:10.1007/s12597-025-00961-7. – Режим доступу: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12597-025-00961-7>.
7. Vidyalakshmi R., Surya M. K., Sabari S., et al. IoT-Enabled Smart Waste Management System with Real-Time GPS Monitoring and User Notification [Електронний ресурс] // IEEE Conference on Trends in Computing and Technology, 2025. – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/11013255>.
8. Shaikh M. S., Ali S. I. Smart Waste Management via Data Analytics, IoT, and AI for Sustainable Urban Solutions [Електронний ресурс] // In: VANETs and Blockchain for Urban Applications. – IGI Global, 2025. – Режим доступу: <https://www.igi-global.com/chapter/smart-waste-management-by-integrating-data-analytics-iot-and-ai-for-sustainable-urban-solutions/377275>.
9. Sutradhar K., Venkatesh R., Subudhi P. AI-Facilitated Fleet Management and Routing Optimization [Електронний ресурс] // In: Computational Learning and IoT in Smart Transport. – Springer, 2025. doi:10.1007/978-3-031-87627-1_8. – Режим доступу: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-87627-1_8.
10. Chaganti K. R., Elicherla S. L. R., Kavitha T. Deep Reinforcement Learning for Energy Efficiency Optimization using Autonomous Waste Management in Smart Cities [Електронний ресурс] // IEEE Conf. on Trends in Computing and Intelligent Systems, 2025. – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10988394>.
11. Zhang Y., et al. Optimization in Smart Cities [Електронний ресурс] // IEEE Communications, 2018. – Режим доступу: <https://www.igi-global.com/chapter/smart-waste-management-by-integrating-data-analytics-iot-and-ai-for-sustainable-urban-solutions/377275>.
12. Sharma S. K., Hans R. From Code to Sustainability: The Impact of Computer Science in Advancing Sustainable Development [Електронний ресурс] // In: Role of Science and Technology for Sustainable Development. – Springer, 2025. doi:10.1007/978-981-97-5177-8_30. – Режим доступу: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-97-5177-8_30.
13. Elasri H. A., Khomssi D., Hassani S. A. Optimizing the Vehicle Routing Problem in Solid Waste Management Using Artificial Intelligence [Електронний ресурс] // In: Artificial Intelligence and Smart Cities. – Springer, 2025. doi:10.1007/978-3-031-90921-4_36. – Режим доступу: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-90921-4_36.
14. Sunarto S., Sulistyarningsih T., Kulsum U. Smart Waste Management in IoT-Based Urban Waste Management in Surabaya City [Електронний ресурс] // BIS-IT Conference, 2024. – Режим доступу: <https://unimma.press/conference/index.php/bistyc/article/download/199/178>.
15. Sutradhar K., Venkatesh R., Subudhi P. Road Transport in the New Era Using Artificial Intelligence: AI-Facilitated Fleet Management and Routing Optimization [Електронний ресурс] // In: Computational Learning and IoT in Smart Transport.
16. Times of India. Tippers in MNAC to have GPS tags [Електронний ресурс]. – 24 March 2024. – Режим доступу:

<https://timesofindia.indiatimes.com/city/ranchi/tippers-in-mnac-to-have-gps-tags/articleshow/121915631.cms>.

17. Open API Initiative. Open API Specification [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу: <https://www.openapis.org>.

18. Abbas F., Nomi K., Jack W. Aluminum Composite Panels (ACPs) in Modern Architecture: Integrating AI and IPD for Safe and Sustainable Urban Infrastructure [Електронний ресурс] // Research Gate, 2025. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/392709347_Aluminum_Composite_Panels_ACPs_in_Modern_Architecture_Integrating_AI_and_IPD_for_Safe_and_Sustainable_Urban_Infrastructure_in_the_United_States.

19. Lynn T., Rosati P., Kennedy J. From Concrete Jungles to Smart Cities and Digital Towns: Deploying Digital Technologies for Environmental Sustainability [Електронний ресурс] // OAPEN, 2024. – Режим доступу:

<https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/93236/1/978-3-031-61749-2.pdf#page=100>.

20. Kumar P., Channi H. K. Planning and building digital twins for smart cities [Електронний ресурс] // Elsevier, 2025. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780443288845000105>.

21. Qian Y., Siau K. L. IoT in Sustainability and IoT in the AI and Metaverse Age [Електронний ресурс] // IEEE Internet of Things Magazine, 2025. – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10980484>.

Models and Methods of Operational Control and Remote Monitoring of Mobile Platforms

Yurii Molodozhon, Valerii Sytnikov, Volodymyr Vodichev
Odesa Polytechnic National University

Abstract. *The article considers the organizational components of models of operational management and remote control of mobile platforms used in the provision of public utilities and logistics operations. The main attention is paid to the construction of systems for collecting, transmitting and analyzing telemetric data generated during the operation of containers for solid waste equipped with sensor modules, as well as mobile objects - in particular, garbage trucks equipped with RFID readers and GPS modules. It is shown that the effectiveness of management directly depends on the ability of the system to integrate data from disparate sources, respond in a timely manner to changes in external conditions and ensure transparency of processes for local governments, operators and consumers.*

The work analyzes existing approaches to organizing waste collection and logistics of mobile platform routes, paying attention to their limitations in a dynamic urban environment. The use of adaptive models of operational management that take into account multifactorial dependencies - from the traffic situation and technical parameters of transport to changes in the load schedule is proposed. A special place is given to the use of mathematical models such as the Vehicle Routing Problem (VRP) and its dynamic modifications, as well as agent-oriented modeling methods, which allow describing the interaction of a large number of objects in the system.

It is shown that the implementation of intelligent data analysis technologies, including elements of artificial intelligence, contributes to the optimization of real-time solutions and ensures the sustainable development of the municipal sector. Particular attention is paid to the prospects for integrating such systems into the Smart City concept, which allows achieving a synergistic effect through the combination of transport, energy and environmental infrastructure of the city. The conclusion is made about the need for a comprehensive approach to the organizational aspects of mobile platform management, which allows increasing the efficiency, environmental effectiveness and economic feasibility of service processes in cities.

Keywords: *mobile platforms, operational control, telemetry, IoT, routing.*

Отримано 13.10.2025



Молодожон Юрій Михайлович, аспірант, Національний університет «Одеська політехніка», Просп. Шевченка, 1, Одеса, Україна.
E-mail: 4852185@stud.op.edu.ua

Yurii Molodozhon, postgraduate student, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odesa, 65044, Ukraine.
E-mail:4852185@stud.op.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1881-9498>



Ситніков Валерій Степанович, д. т. н., професор, завідувач кафедри комп'ютерних систем, Навчально-науковий інститут штучного інтелекту та робототехніки, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E-mail: sitnikov@op.edu.ua

Valerii Sytnikov, Dr. of Technical Science, Professor, Head of the Department of Computer Systems, Institute of Artificial Intelligence and Robotics, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: sitnikov@op.edu.ua

ORCIDID: <https://orcid.org/0000-0003-3229-5096>



Водічев Володимир Анатолійович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри електромеханічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E-mail: vva@eei.opu.ua, тел.: +38 050 234 7722

Volodymyr Vodichev, Dr. of Technical Science, Professor, Professor of the Department of electromechanical engineering, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odesa, 65044, Ukraine.

E-mail: vva@eei.opu.ua; ph.: +38 050 234 7722

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7204-1149>