

Штучний інтелект забезпечує можливість врахування широкого спектру факторів впливу, включаючи сезонність, поведінкові характеристики споживачів, зовнішньоекономічні чинники та просторові особливості торговельної мережі. У поєднанні з геоінформаційними технологіями створюється потужна аналітична основа для прийняття ефективних управлінських рішень у сфері планування постачання.

Для торговельних мереж України перспективи застосування ШІ є особливо актуальними в умовах урбанізації, зростання онлайн-торгівлі та потреби в адаптивних логістичних моделях. Водночас для успішного впровадження таких технологій необхідні інвестиції в цифрову інфраструктуру, наявність якісних даних, розвиток компетенцій персоналу та інтеграція з існуючими системами управління постачанням.

У подальших дослідженнях доцільно зосередити увагу на адаптації конкретних ШІ-моделей до особливостей українських логістичних систем, оцінці ефективності їх впровадження на практиці, а також на розробці рекомендацій щодо впровадження таких рішень у торговельних компаніях різного масштабу.

### Література

1. Adapa, S. R. (2024). Optimizing supply chain efficiency through AI-driven demand forecasting: An empirical analysis of retail industries. *Library Progress International*, 44(3), 207–231. <https://doi.org/10.33404/lpi.2024.44.3.207>
2. Liu, C., Cao, J., & Zhang, Y. (2022). Leveraging AI for demand forecasting in supply chain management: A review. *Computers & Industrial Engineering*, 166, 107986. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107986>
3. Srinivasa Rao Adapa. (2024). *Optimizing Supply Chain Efficiency Through Ai-Driven Demand Forecasting: An Empirical Analysis of Retail Industries*. *Library Progress International*, 44(3), 207–231. <https://doi.org/10.33404/lpi.2024.44.3.207>

УДК 656.1

## СУЧАСНІ МЕТОДИ ПЛАНУВАННЯ РОЗВІЗНИХ МАРШРУТІВ ДОСТАВКИ ТОВАРІВ В УМОВАХ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОННОЇ ТОРГІВЛІ

Аспірант Кузьмін А.

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет*

Стрімке зростання обсягів електронної торгівлі в усьому світі кардинально змінює логістичні підходи до організації доставки товарів кінцевим споживачам [1-2]. Міські логістичні системи стикаються з новими викликами, пов'язаними з необхідністю оперативної, надійної та економічно ефективної доставки великої кількості малих замовлень у стислий проміжок часу. Це зумовлює потребу у впровадженні сучасних методів планування розвізних маршрутів, які дозволяють адаптувати логістичну мережу до динаміки попиту, варіативності транспортної ситуації та високих очікувань клієнтів.

В умовах інтенсивного розвитку e-commerce класичні моделі маршрутного планування, засновані на статичних підходах, поступово поступаються місцем більш гнучким, адаптивним та інтелектуальним методам. До таких належать моделі динамічного розвезення (Dynamic Vehicle Routing Problem - DVRP), алгоритми оптимізації з часовими вікнами (VRPTW), а також підходи на основі машинного навчання, евристичних та метаевристичних алгоритмів (генетичні, мурашині,

жадібні тощо). Окремого значення набуває врахування факторів міської мобільності: заторів, обмежень на проїзд, викидів шкідливих речовин, а також необхідності інтеграції з платформами відстеження в реальному часі.

У науковій літературі зростає інтерес до розробки моделей, які поєднують логістичну оптимізацію з інтелектуальними транспортними системами, геоінформаційними технологіями та цифровими сервісами останньої милі. Такі моделі дозволяють не лише мінімізувати логістичні витрати, а й підвищити якість обслуговування клієнтів, що стає критичним чинником конкурентоспроможності для компаній у сфері електронної комерції.

Метою цієї статті є аналіз сучасних методів планування розвізних маршрутів у контексті логістики електронної торгівлі, виявлення їх переваг, обмежень та перспектив застосування в умовах українських міст. У межах дослідження розглядаються як математичні моделі, так і практичні рішення, що дозволяють адаптувати систему доставки до умов зростаючого ринку онлайн-замовлень.

Інтенсивне зростання обсягів електронної торгівлі змінює вимоги до організації логістичних процесів, зокрема до планування маршрутів доставки замовлень. У зв'язку з високою мінливістю попиту, короткими строками виконання доставки та збільшенням кількості точок обслуговування, традиційні підходи до формування маршрутів часто виявляються неефективними. У сучасних умовах актуальним стає впровадження методів, які забезпечують гнучке, динамічне та масштабоване планування з урахуванням реального часу, географічного розташування клієнтів, логістичних обмежень і сервісних вимог.

Основою більшості методів маршрутного планування є класична задача комівояжера (TSP) та її узагальнення - задача маршрутизації транспортних засобів (VRP). У контексті електронної торгівлі найбільш поширеним є використання модифікацій VRP, таких як VRP з часовими вікнами (VRPTW), стохастичний VRP (SVRP), динамічний VRP (DVRP) та VRP з роздільною доставкою і збором (VRP with Pickup and Delivery). Усі ці моделі дозволяють враховувати специфіку електронної торгівлі — необхідність точного дотримання графіка, змінні замовлення та обмежені ресурси транспортної системи.

Ефективне розв'язання зазначених задач неможливе без використання сучасних алгоритмічних методів. У практиці маршрутного планування широко застосовуються евристичні та метаевристичні алгоритми, зокрема алгоритми найближчого сусіда, кластери K-медіоїдів, жадібні алгоритми, генетичні алгоритми, алгоритми рою частинок, мурашині колонії, симульоване відпалу та гібридні методи. Вони дозволяють знайти прийнятні за якістю рішення у прийнятний час, що є критично важливим у режимі реального часу, притаманному сучасній e-commerce логістиці.

Окрему категорію методів становлять динамічні системи планування, які функціонують на основі оперативного збору та обробки даних з GPS-трекерів, мобільних додатків кур'єрів, аналітики попередніх доставок та змін у трафіку. Такі системи інтегруються з геоінформаційними технологіями та дозволяють здійснювати переконфігурацію маршрутів у разі виникнення непередбачуваних подій, таких як затори, відмова клієнта від отримання чи погодні умови. Застосування інтелектуальних транспортних систем у поєднанні з методами машинного навчання відкриває можливості для прогнозування навантаження, підвищення точності планування і скорочення витрат.

У великих компаніях електронної торгівлі, таких як Amazon, Alibaba, DHL, Nova Poshta та Rozetka, активно впроваджуються хмарні логістичні платформи, які

базуються на принципах розподіленої обробки даних та автоматичного балансування маршрутів. Ці системи об'єднують планування доставок, управління транспортом та моніторинг у режимі реального часу в єдину інформаційну інфраструктуру. Однією з важливих складових таких платформ є оптимізація останньої милі, яка має найбільший вплив на вартість і якість обслуговування.

З огляду на зазначене, вибір методу планування розвізних маршрутів повинен залежати від масштабу операцій, типу товару, часових обмежень, географічних умов, характеристик клієнтської бази та рівня цифровізації логістичного процесу. Найбільш ефективним підходом є інтеграція декількох методів з використанням автоматизованих аналітичних систем, що дозволяє досягти високої адаптивності, зниження витрат та підвищення задоволеності клієнтів в умовах конкурентного ринку електронної торгівлі.

Сучасна електронна торгівля висуває нові вимоги до організації логістичних процесів, зокрема в частині забезпечення точності та гнучкості доставки. Однією з ключових умов підвищення ефективності сервісу є дотримання часових обмежень, встановлених замовником. Це зумовлює необхідність застосування методу часових вікон у процесі планування розвізних маршрутів. Даний підхід дозволяє забезпечити прибуття транспортного засобу до точки обслуговування в межах заданого інтервалу часу, що є критичним фактором для формування позитивного клієнтського досвіду в умовах високої конкуренції на ринку e-commerce.

Задача маршрутизації транспортних засобів із часовими вікнами (Vehicle Routing Problem with Time Windows - VRPTW) є складною комбінаторною задачею, у якій необхідно не лише мінімізувати загальну довжину або час маршруту, а й забезпечити прибуття до кожного клієнта у визначеному часовому інтервалі. Основними параметрами цієї задачі є: час прибуття та обслуговування, тривалість допустимого вікна, транспортна ємність, маршрутна доступність та динаміка дорожніх умов. Модель VRPTW широко застосовується у практиці планування доставок для кур'єрських сервісів, онлайн-магазинів, служб швидкої логістики, де дотримання точного часу є частиною договірних зобов'язань.

Для вирішення задач з часовими вікнами використовуються як точні методи (цілочислове програмування, гілки та межі), так і евристичні та метаевристичні алгоритми, серед яких особливо ефективними виявилися генетичні алгоритми, алгоритми рою частинок, табу-пошук та алгоритми мурашиних колон. Оскільки кількість клієнтів і маршрутних комбінацій у міських умовах є великою, практичне застосування VRPTW зазвичай ґрунтується на гібридних підходах з поетапною оптимізацією.

Важливим інструментом у реалізації методу часових вікон є використання геоінформаційних технологій (ГІС), які забезпечують просторову візуалізацію маршруту, точне визначення координат клієнтів, облік транспортної інфраструктури та оперативну актуалізацію дорожньої ситуації. Завдяки інтеграції ГІС із логістичними платформами та системами управління замовленнями можливо автоматично формувати маршрути, що враховують не лише часові обмеження, а й реальні умови трафіку, обмеження на проїзд, закриті ділянки доріг тощо.

ГІС-технології дозволяють також оцінювати ефективність побудованих маршрутів за такими критеріями, як тривалість поїздки, кількість затримок, відповідність часовим вікнам, рівень використання транспортних засобів. Наприклад, платформи ArcGIS, QGIS або HERE дозволяють інтегрувати картографічні дані з логістичними модулями, забезпечуючи підтримку прийняття рішень у реальному часі. Це особливо важливо для організацій, які здійснюють

багатоточкову доставку у великих містах з високим рівнем транспортного навантаження.

Поєднання VRPTW та ГІС-технологій є основою для створення інтелектуальних логістичних систем, які можуть адаптуватися до змін у режимі онлайн. Це дозволяє вчасно реагувати на затори, аварії, відмови клієнтів від отримання замовлення, зміну пріоритетів доставки та інші непередбачувані фактори. Такі системи підвищують гнучкість операційної діяльності та забезпечують стабільну якість обслуговування клієнтів за умов нестабільного попиту та складної міської інфраструктури.

Таким чином, використання методу часових вікон у поєднанні з геоінформаційними технологіями є необхідною умовою ефективного планування розвізних маршрутів у сфері електронної торгівлі. Це забезпечує підвищення точності, скорочення часу доставки, зниження логістичних витрат і зміцнення конкурентних позицій компаній, які працюють у швидкозмінному цифровому середовищі.

Для українських міст особливо актуальними є модифікації задачі маршрутизації з часовими вікнами (VRPTW), які дозволяють забезпечити точність і своєчасність доставки, що стає визначальним чинником для збереження конкурентоспроможності логістичних операторів. Інтеграція таких моделей із платформами електронної комерції, мобільними додатками кур'єрів та сервісами відстеження у реальному часі створює передумови для формування гнучких систем міської логістики, здатних оперативно адаптуватися до змін зовнішнього середовища.

Перспективу також становить впровадження методів оптимізації на основі машинного навчання, які дозволяють автоматично аналізувати історичні дані про доставку, передбачати час прибуття на основі трафіку, формувати прогностичні маршрути з урахуванням поведінки споживачів. У контексті українських міст із характерною нестабільністю дорожньої інфраструктури та сезонними піковими навантаженнями такі підходи забезпечують підвищення точності планування та зниження витрат.

Іншою важливою складовою перспективного розвитку є цифровізація муніципальної логістичної інфраструктури. Створення міських логістичних хабів, виділення спеціальних зон для зупинок кур'єрів, застосування рішень «останньої милі» (зокрема автоматизованих поштоматів, мікроскладів, доставки дронами або на електровелосипедах) дозволяє реалізовувати адаптивні маршрути з мінімальним навантаженням на дорожню мережу. Такі ініціативи потребують підтримки з боку міської влади, включаючи регулювання доступу до окремих районів, цифрову координацію служб доставки та розробку стратегій сталої міської мобільності. Для реалізації зазначених перспектив в Україні важливим є розвиток локального науково-методичного та інженерного потенціалу у сфері транспортної логістики. Це передбачає створення спеціалізованих освітніх програм, підтримку стартапів у галузі «розумної логістики», а також пілотні проєкти на базі великих міст (Київ, Львів, Харків, Дніпро), які можуть стати моделями для масштабування. Не менш важливим є формування відкритої системи обміну транспортною інформацією між приватними операторами та муніципальними структурами, що дозволить реалізувати принципи інтегрованого управління міськими логістичними потоками.

## Література

1. Chocholac J., Sommerauerova D., Svab M., Jiraskova A., Polak M. Logistic technologies for tracking manufactured passenger cars on consolidation areas: Interpretative case study. *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 53. P. 266-273. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.034>
2. Chu X., Wang Y., Lin Y. H., Chew E. P. Offshore consolidation centre for air cargo operations: model and solution methods. *OR Spectrum*. 2024. P. 1-33. <http://doi.org/10.1007/s00291-024-00764-0>

УДК 656.072

### **ОСОБЛИВОСТІ СИНХРОНІЗАЦІЇ РУХУ МІСЬКОГО ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ В УМОВАХ ВПРОВАДЖЕННЯ ВИДІЛЕНИХ СМУГ**

Аспірант Літинський М.

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет*

Сучасні міські агломерації стикаються з численними викликами у сфері організації пасажирських перевезень, серед яких домінують затори, нерегулярність руху транспорту та зниження привабливості громадського транспорту для населення. Одним із ефективних заходів підвищення швидкості, регулярності та надійності руху міського пасажирського транспорту є впровадження виділених смуг для його руху. Проте для досягнення максимального ефекту від використання такого інфраструктурного рішення необхідною умовою є забезпечення належної синхронізації руху транспортних засобів, яка дозволяє мінімізувати затримки, уникнути скупчень та забезпечити зручні пересадки для пасажирів.

Синхронізація руху охоплює як погодження графіків окремих маршрутів, так і координацію з роботою світлофорних об'єктів, що набуває особливого значення в умовах функціонування виділених смуг. Такий підхід вимагає врахування як транспортного попиту, так і характеристик вулично-дорожньої мережі, технологічних особливостей рухомого складу та режимів роботи інфраструктури. Незважаючи на зростаючий інтерес до даної проблематики, питання синхронізації в контексті впровадження виділених смуг недостатньо висвітлене в науковій літературі та практичних дослідженнях [1-3].

Метою даної статті є дослідження особливостей синхронізації руху міського пасажирського транспорту в умовах функціонування виділених смуг, виявлення основних факторів, що впливають на ефективність координації руху, та формування підходів до оптимізації розкладів з урахуванням нових умов експлуатації.

Методи синхронізації руху міського пасажирського транспорту в умовах впровадження виділених смуг повинні враховувати специфіку організації руху в умовах підвищеного пріоритету громадського транспорту. Основна мета синхронізації полягає у забезпеченні безперервного, регулярного та передбачуваного руху транспортних засобів за маршрутами, мінімізації часу очікування на зупинках та стиковках, а також зниженні експлуатаційних витрат і покращенні якості обслуговування пасажирів. У таких умовах особливої актуальності набувають методи, що поєднують розрахунок графіків руху із інтелектуальним управлінням транспортними потоками та адаптивними світлофорними системами.

Одним із базових підходів до синхронізації є використання тактових (інтервальних) графіків, які передбачають чітко визначений інтервал руху