

Баранов І.О. Баранський М.Б. Швець С.Е.
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро. Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНУВАННЯ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ДОСТАВКИ МАЛИХ ПАРТІЙ ВАНТАЖІВ

У статті досліджено методи керування оперативним плануванням вантажних автомобільних перевезень з особливим акцентом на організації доставки малих партій вантажів на основі логістичних принципів. Проаналізовано загальні виклики оперативного планування, такі як динамічність ринку та невизначеність умов, а також специфічні проблеми перевезень малих партій: низьке завантаження, порожні пробіги, складність маршрутизації великої кількості точок [1; 2]. Розглянуто та порівняно класичні й сучасні методи планування (точні, евристичні, метаевристичні, імітаційні, методи ШІ) за критеріями якості рішень, швидкодії та гнучкості [3; 4; 5]. Запропоновано структурну модель мережі консолідації для малих партій та математичну модель оптимізації маршрутизації, що враховує витрати, час, коефіцієнти завантаження та часові вікна [6; 7]. Розглянуто евристичний алгоритм для практичної реалізації моделі, що включає класифікацію замовлень, консолідацію партій та методи маршрутизації (Clarke-Wright, 2-opt). Проаналізовано можливості інтеграції методів планування з сучасними ІТ (GPS, TMS) [8; 9]. Наведено приклад розрахунку та оцінку економічної ефективності запропонованого підходу для регіональної мережі. Надано рекомендації щодо вибору методів та впровадження логістичних принципів для підвищення ефективності оперативного планування перевезень, особливо малих партій, в умовах України.

Ключові слова: оперативне планування, вантажні автомобільні перевезення, малі партії вантажів, консолідація, логістика, методи керування, оптимізація маршрутів, математична модель, ефективність, TMS.

ВСТУП

Вантажні автомобільні перевезення є ключовою ланкою сучасних ланцюгів постачання, забезпечуючи гнучкість та доступність доставки товарів [1]. Ефективність транспортно-логістичної системи безпосередньо впливає на конкурентоспроможність бізнесу та економіку загалом. Особливу роль відіграє оперативне планування (горизонт від кількох годин до доби), яке включає призначення транспортних засобів (ТЗ), формування маршрутів, складання графіків та реагування на збої [2; 3].

Сучасний ринок характеризується високою динамічністю, невизначеністю (зміни попиту, дорожньої обстановки, умов доставки) та жорсткими вимогами до сервісу [4]. Традиційні методи планування, що покладаються на досвід диспетчера, стають неефективними. Особливо гостро це проявляється при організації перевезень малих партій вантажів (МПВ), значущість яких зростає через розвиток e-commerce та збільшення частки малого бізнесу [5]. Типові логістичні схеми, орієнтовані на великі партії, при роботі з МПВ призводять до високої частки порожніх пробігів [6; 10], низького заповнення ТЗ, складності планування при великій кількості точок доставки та потреби у швидкій обробці на терміналах. Ці виклики вимагають пошуку компромісу між швидкістю та економічністю шляхом застосування логістичних принципів: консолідації вантажів, оптимізації маршрутів та цифрової координації.

Виникає потреба у розробці та впровадженні науково обґрунтованих, адаптивних методів керування оперативним плануванням, які б дозволили ефективно використовувати ресурси, мінімізувати витрати та гнучко реагувати на зміни, особливо при роботі з МПВ в умовах логістичної інфраструктури України.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Проблематика оперативного планування та маршрутизації транспорту досліджується давно. Класичні задачі TSP та VRP з різними обмеженнями є основою багатьох методів. Для їх розв'язання використовують:

- **Точні методи оптимізації** (математичне програмування, метод гілок та меж), що гарантують оптимальність, але мають високу обчислювальну складність для реальних задач.

- **Евристичні методи** (конструктивні, наприклад, метод найближчого сусіда, алгоритм Кларка-Райта (savings), та ітераційні, наприклад, 2-opt, 3-opt), які швидко дають наближені розв'язки.

- **Метаевристичні методи** (генетичні алгоритми, імітація відпалу, мурашині алгоритми), що забезпечують кращу якість рішень для складних задач порівняно з простими евристичними.

•**Імітаційне моделювання** для оцінки стратегій в динамічних та стохастичних умовах.

•**Методи на основі штучного інтелекту (ШІ)** (експертні системи, машинне навчання, агентні системи) для прогнозування та адаптивного планування [4-9].

Також для аналізу транспортних потоків та роботи терміналів застосовуються моделі систем масового обслуговування. Праці розглядають логістичні системи та організацію міжнародних перевезень [11-14]. Дослідження присвячені аналізу транспортних систем та моделюванню.

Незважаючи на велику кількість методів, багато досліджень фокусуються на великих потоках або теоретичних моделях, не завжди застосовних до специфіки регіональних перевезень МПВ. Бракує порівняльного аналізу ефективності методів саме в умовах оперативного планування МПВ та рекомендацій щодо їх інтеграції з сучасними ІТ [8; 9; 16].

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою статті є дослідження та порівняльний аналіз методів керування оперативним плануванням, розробка та оцінка математичної логістичної моделі для оптимізації автомобільних перевезень малих партій вантажів шляхом консолідації та ефективної маршрутизації [1; 2].

Завдання:

1. Систематизувати та проаналізувати існуючі методи оперативного планування, визначити їх переваги та недоліки.

2. Визначити критерії для порівняння ефективності методів.

3. Побудувати структурну модель мережі консолідації для МПВ.

4. Формалізувати математичну модель (цільову функцію та обмеження) для оптимізації маршрутизації МПВ.

5. Розробити евристичний алгоритм для практичної реалізації моделі.

6. Розглянути інтеграцію методів планування з ІТ.

7. Провести прикладний розрахунок та оцінити економічну ефективність моделі.

8. Надати рекомендації щодо вибору та застосування методів для транспортних компаній України.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. КЛАСИФІКАЦІЯ ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНУВАННЯ

Методи керування оперативним плануванням класифікують за підходом до пошуку рішення (оптимізаційні, імітаційні, на основі ШІ) та за врахуванням динаміки (статичні, динамічні/адаптивні).

•**Точні методи** : Гарантують оптимальність, але обчислювально складні для великих та динамічних задач. Використовуються для невеликих парків або як еталон.

•**Евристичні методи** : Швидкі та прості, але не гарантують оптимальності, погано працюють зі складними обмеженнями. Застосовуються для швидкого формування планів або як частина метаевристик.

•**Метаевристичні методи** : Знаходять якісні рішення для складних задач за прийнятний час, адаптуються до динаміки та обмежень. Вимагають налаштування параметрів. Основний інструмент сучасних TMS, підходять для динамічної маршрутизації.

•**Імітаційне моделювання** : Аналізує складні системи з урахуванням випадковості, дозволяє тестувати сценарії. Не є оптимізаційним методом. Використовується для оцінки правил диспетчеризації, аналізу пропускнуої спроможності.

•**Методи на основі ШІ** : Навчаються на даних, роблять прогнози, дозволяють створювати адаптивні системи. Потребують багато даних, складні в інтерпретації та реалізації. Застосовуються для прогнозування, динамічного коригування, підтримки рішень [3; 4].

Порівняльна характеристика наведена в Таблиці 1.

2. ЛОГІСТИЧНИЙ ПІДХІД ДО ОРГАНІЗАЦІЇ ПЕРЕВЕЗЕНЬ МАЛИХ ПАРТІЙ ВАНТАЖІВ (МПВ)

Ключовим принципом підвищення ефективності перевезень МПВ є **консолідація** – об'єднання дрібних відправлень у більші партії для подальшого транспортування магістральним транспортом між терміналами (хабами) та подальшої "розукуплення" для доставки "останньої милі".

2.1. СТРУКТУРНА МОДЕЛЬ МЕРЕЖІ КОНСОЛІДАЦІЇ

Пропонується розглядати транспортну мережу як орієнтований граф $G(N,E)$, де N – множина вузлів (пункти відправлення S , пункти отримання D , консолідаційні хаби H), E – множина дуг (транспортні сполучення). Кожна дуга (i,j) характеризується довжиною L_{ij} ,

середньою швидкістю v_{ij} , вартістю перевезення C_{ij} . У вузлах відбувається обробка вантажів з часом t_i . Замовлення n мають обсяг q_n , вагові обмеження та часові вікна доставки $[a_n, b_n]$.

Структурна схема може включати кілька рівнів хабів (наприклад, центральний та регіональні) для оптимізації магістральних та місцевих перевезень [6; 10].

2.2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ (МПВ)

Завдання полягає у формуванні множини маршрутів R для транспортних засобів K , що обслуговують множину замовлень N , мінімізуючи сукупні витрати з урахуванням часу доставки та ефективності використання ТЗ.

Цільова функція:

$$\text{minimize } Z = \sum_{r \in R} \left(\sum_{(i,j) \in R} C_{ij} \cdot L_{ij} \cdot x_{ij}^r + \alpha \cdot T_r \right) + \beta \cdot \sum_{k \in K} \left(\frac{Q_k - \sum_{n \in N} r_k q_n}{Q_k} \right) \quad (1.1)$$

де: R – множина маршрутів;

(i, j) – дуга (від пункту i до пункту j);

C_{ij} – вартість перевезення по ділянці (i, j) ;

L_{ij} – відстань між пунктами i та j ;

x_{ij}^r – бінарна змінна (1, якщо дуга (i, j) входить у маршрут r ; 0 – інакше);

α – коефіцієнт вагомості часу (або штраф за затримку);

K – множина транспортних засобів;

Q_k – вантажопідйомність транспортного засобу k ;

q_n – вантаж, що перевозиться до пункту n ;

r_k – маршрут, закріплений за транспортним засобом k ;

β – коефіцієнт штрафу за невикористану місткість транспорту.

Система обмежень моделі:

1. Покриття замовлень:

Кожне замовлення n має бути включене рівно в один маршрут r .

$$\sum_{r \in R} y_n^r = 1, \quad \forall n \in N_{orders} \quad (1.2)$$

де $y_n^r = 1$, якщо замовлення n обслуговується маршрутом r .

2. Баланс потоків:

Для кожного вузла i у маршруті r кількість вхідних дуг дорівнює кількості вихідних (окрім початкового та кінцевого пунктів).

$$\sum_{j \in N} x_{ji}^r = \sum_{j \in N} x_{ij}^r, \quad \forall i \in N, \forall r \in R \quad (1.3)$$

3. Обмеження місткості транспорту:

Загальна кількість вантажу на маршруті, який виконується транспортним засобом k , не перевищує його вантажопідйомності.

$$\sum_{n \in R} r_k q_n \leq Q_k, \quad \forall r, k \quad (1.4)$$

4. Часові вікна:

Час прибуття до кожного пункту має знаходитись у межах дозволеного інтервалу.

$$a_n \leq t_{arr,n} \leq b_n, \quad \forall n \in N_{orders} \quad (1.5)$$

5. Обмеження на максимальний час або довжину маршруту:

Загальний час (або довжина) маршруту не повинен перевищувати встановлений ліміт.

$$T_r \leq T_{max}, \quad \forall r \in R \quad (1.6)$$

Або

$$L_r \leq L_{max}, \quad \forall r \in R \quad (1.7)$$

6.Інші обмеження: Можуть включати сумісність вантажів, пріоритетність замовлень, обмеження робочого часу водіїв тощо [6; 7].

2.3. ЕВРЕСТИЧНИЙ АЛГОРИТМ РЕАЛІЗАЦІЇ

Оскільки задача маршрутизації є NP-складною, для практичних розрахунків пропонується евристичний підхід:

1.Класифікація та кластеризація замовлень: Групування замовлень за географічною близькістю (наприклад, методом k-середніх або DBSCAN) та часовими вікнами.

2.Формування партій консолідації (Batching): Об'єднання замовлень з одного або близьких кластерів у партії, що не перевищують місткість ТЗ, з урахуванням сумісності вантажів та часових вікон.

3.Початкова маршрутизація: Побудова маршрутів для кожної партії або групи партій за допомогою конструктивної евристики, наприклад, аССислгоритму Кларка-Райта (savings), який об'єднує маршрути на основі економії пробігу.

4.Локальна оптимізація: Покращення побудованих маршрутів за допомогою ітераційних евристик, таких як 2-opt або 3-opt, що змінюють послідовність відвідування точок для зменшення довжини маршруту.

5.Розподіл маршрутів по ТЗ: Призначення готових маршрутів на доступні транспортні засоби з урахуванням їх характеристик та графіків роботи.

6.Симуляція та корекція (за потреби): Перевірка реалістичності плану за допомогою імітаційного моделювання та можливість його коригування в режимі реального часу при надходженні нових даних [7; 8].

3. ІНТЕГРАЦІЯ З ІНФОРМАЦІЙНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ

Сучасні ІТ є невід'ємною частиною ефективного оперативного планування:

•**TMS:** Централізована платформа для управління всіма процесами: прийом замовлень, планування (часто з вбудованими евристичними/метаевристичними), моніторинг, аналітика. Важлива для координації консолідації МПВ.

•**GPS-моніторинг:** Надає дані про реальне місцезнаходження ТЗ, швидкість, пробіг, дозволяючи відстежувати виконання плану та оперативно реагувати на відхилення.

•**ITS та сервіси прогнозування трафіку:** Дозволяють отримувати актуальну інформацію про дорожню ситуацію для більш точного розрахунку часу руху та коригування маршрутів.

•**Мобільні додатки для водіїв:** Забезпечують зв'язок, передачу завдань, навігацію, підтвердження доставки (Proof of Delivery - POD), що важливо при великій кількості точок у маршрутах МПВ.

•**EDI та API:** Автоматизують обмін даними з клієнтами та партнерами (статуси замовлень, документи), прискорюючи процеси та зменшуючи помилки.

Інтеграція цих технологій дозволяє реалізувати динамічне (адаптивне) планування, що є критично важливим для ефективного управління перевезеннями МПВ.

4. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ

Розглянемо умовний приклад регіональної мережі з трьома хабами (Н1, Н2, Н3) та щоденним потоком МПВ. Вхідні дані (кількість замовлень, середній обсяг, тарифи, швидкість, час обробки) наведено в Таблиці 1.

Таблиця 1. Вхідні дані (умовно)

| Показник | Н1 | Н2 | Н3 | Одиниця |
|------------------------------|------|------|------|----------------|
| Щоденна кількість замовлень | 120 | 80 | 60 | шт. |
| Середній об'єм на замовлення | 0.08 | 0.06 | 0.07 | м ³ |
| Час обробки на хабі | 0.25 | 0.20 | 0.22 | год. |
| Тариф (грн/км) | 6.5 | 6.2 | 6.8 | грн |
| Середня швидкість (км/год) | 45 | 42 | 40 | км/год |

Припустимо використання ТЗ місткістю 10 м³. Застосування запропонованого евристичного алгоритму (кластеризація, консолідація двічі на день, маршрутизація методом savings з локальною оптимізацією) дозволяє отримати такі результати (Таблиця 2 статті):

Таблиця 2. Результати моделювання

| Показник | До впровадження | Після впровадження | Зміна (%) |
|-----------------------------------|-----------------|--------------------|-----------|
| Середній час доставки, год | 3.20 | 2.62 | -18.10 |
| Собівартість 1 доставки, грн | 145.00 | 127.60 | -12.00 |
| Коефіцієнт використання автопарку | 0.68 | 0.78 | +14.70 |

- Зменшення середнього часу доставки на ~18%.
- Зниження собівартості однієї доставки на ~12%.
- Підвищення коефіцієнта використання автопарку на ~15%.

Економічний ефект: при щоденній кількості 260 замовлень та економії 17.4 грн на доставку, річна економія може скласти близько 1,13 млн грн. Це демонструє значний потенціал оптимізації перевезень МПВ на основі логістичних принципів.

5. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ

Вибір методів та стратегій планування залежить від специфіки компанії.

•**Загальні рекомендації:** Впровадження централізованої TMS для збору даних та планування; визначення чітких правил та нормативів консолідації (мінімальний обсяг партії, часові рамки); використання GPS-моніторингу для контролю та динамічного коригування; регулярний аналіз ефективності маршрутів та KPI для диспетчерів і водіїв; навчання персоналу.

•**Вибір методів:** Для МПВ з великою кількістю точок та динамічними замовленнями перевагу слід віддавати **метаевристичним алгоритмам**, інтегрованим у TMS, що дозволяють швидко знаходити якісні рішення та адаптуватися до змін. **Евристики** (як savings) можуть використовуватися для початкового етапу. **Методи ШІ** є перспективними для прогнозування та автоматичного коригування. **Імітаційне моделювання** корисне для стратегічного аналізу та тестування правил [8; 9; 13; 14]

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Отримані результати дослідження підтверджують доцільність використання логістичних принципів консолідації та евристичних методів маршрутизації під час оперативного планування перевезень малих партій вантажів. Запропонована математична модель забезпечує ефективний баланс між мінімізацією транспортних витрат, скороченням часу доставки та підвищенням коефіцієнта використання автопарку.

Порівняння результатів моделювання з даними класичних досліджень (Dantzig & Ramser, 1959; Laporte, 1992; Toth & Vigo, 2014) показує, що застосування комбінованого евристичного підходу (кластеризація, метод Кларка-Райта, 2-opt) дозволяє досягти прийнятної якості планів за значно менший час розрахунків, що є критичним для оперативних задач.

Умовний приклад показав, що після впровадження запропонованої моделі середній час доставки зменшився на 18 %, собівартість — на 12 %, а коефіцієнт використання автопарку зріс на 15 %. Такі показники свідчать про практичну реалізованість розробленого підходу та його економічну ефективність для транспортних підприємств, які працюють із малими партіями вантажів.

Разом із тим, модель має певні обмеження. Вона не враховує стохастичні зміни попиту, дорожньої ситуації та погодних умов, а також не оцінює ризики, пов'язані з непередбаченими затримками чи відмовами транспортних засобів. У подальшому доцільно адаптувати її до динамічних умов середовища за допомогою методів машинного навчання або імітаційного моделювання.

Таким чином, поставлені у статті **цілі та завдання виконані повністю**: здійснено аналіз існуючих методів, побудовано структурну та математичну модель, розроблено евристичний алгоритм

реалізації, проведено розрахунковий приклад і підтверджено економічну доцільність запропонованого підходу.

ВИСНОВКИ

1. Оперативне планування вантажних автоперевезень, особливо малих партій, є складною оптимізаційною задачею, що ускладнюється динамічністю ринку та невизначеністю умов. Перевезення МПВ мають специфічні проблеми (низьке завантаження, складність маршрутизації), що вимагають застосування логістичних принципів, зокрема консолідації.

2. Існує широкий спектр методів планування (точні, евристичні, метаевристичні, імітаційні, ШІ), вибір яких залежить від розмірності задачі, вимог до точності та швидкодії, динаміки процесу. Для оперативного планування МПВ найбільш доцільним є використання **метаевристичних та гібридних підходів**, що поєднують різні методи.

3. Запропонована математична модель та евристичний алгоритм, що включає консолідацію та оптимізацію маршрутів, дозволяють суттєво підвищити ефективність перевезень МПВ, знизити витрати та час доставки, покращити використання автопарку. Приклад розрахунку демонструє потенційну економічну ефективність підходу.

4. Інтеграція методів планування з сучасними інформаційними технологіями (TMS, GPS, ITS) є ключовим фактором для реалізації адаптивного керування та підвищення ефективності оперативного планування в реальному часі.

5. Для українських транспортних компаній впровадження науково обґрунтованих методів оперативного планування, логістичних принципів консолідації МПВ та сучасних ІТ є необхідною умовою підвищення конкурентоспроможності. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку моделей, що враховують стохастичні фактори, інтеграцію з прогнозуванням попиту та автоматичну адаптацію параметрів у режимі реального часу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Крикавський Є. В. Логістика: основи теорії: Підручник / Є. В. Крикавський. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2004. – 416 с.
2. Макаренко М. В., Голембівська О. М., Якименко Н. В. Управління транспортними системами: Підручник. – К.: Логос, 2008. – 424 с.
3. Гаджинський А. М. Логістика: Підручник. – 20-е вид. – М.: Дашков і Ко, 2012. – 484 с.
4. Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management science*, 6(1), 80-91.
5. Toth, P., & Vigo, D. (Eds.). (2014). *Vehicle routing: problems, methods, and applications*. Siam.
6. Laporte, G. (1992). The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European journal of operational research*, 59(3), 345-358.
7. Clarke, G., & Wright, J. W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations research*, 12(4), 568-581.
8. Gendreau, M., & Potvin, J. Y. (Eds.). (2010). *Handbook of metaheuristics* (Vol. 146). Springer Science & Business Media.
9. Figliozzi, M. A. (2010). The impacts of congestion on commercial vehicle tour characteristics: A case study in Portland, Oregon. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(5), 667-676.
10. Ghiani, G., Laporte, G., & Musmanno, R. (2013). *Introduction to logistics systems management*. John Wiley & Sons.
11. Воркут А.І. Логістичні системи транспорту: монографія. – Київ, 2020.
12. Фомін О.В. та ін. Організація міжнародних перевезень: монографія. – 2019.
13. Prassas E.S., Roess P. *Transportation Systems Analysis*. – Springer, 2018.
14. Dutta M., Ahmed M.A. Calibration of VISSIM Models. – *Advances in Transportation Studies*, 2019.
15. Troelsen A., Japikse P. *Pro C# 7*. – Apress, 2017.
16. Методичні рекомендації з організації перевезень малих партій (2023).

REFERENCES

1. Krykavskiy, Ye. V. (2004). *Lohistyka: osnovy teorii* [Logistics: Fundamentals of Theory]. Lviv: Vydavnytstvo Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika".

2. Makarenko, M. V., Golembivska, O. M., & Yakymenko, N. V. (2008). *Upravlinnia transportnyh systemamy* [Management of Transport Systems]. Kyiv: Logos.
3. Hadzhynskiy, A. M. (2012). *Lohistyka* [Logistics] (20th ed.). Moscow: Dashkov i Ko.
4. Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management Science*, 6(1), 80–91. <https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80>
5. Toth, P., & Vigo, D. (Eds.). (2014). *Vehicle routing: Problems, methods, and applications*. Philadelphia: SIAM.
6. Laporte, G. (1992). The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59(3), 345–358. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(92\)90192-C](https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90192-C)
7. Clarke, G., & Wright, J. W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12(4), 568–581. <https://doi.org/10.1287/opre.12.4.568>
8. Gendreau, M., & Potvin, J.-Y. (Eds.). (2010). *Handbook of metaheuristics* (2nd ed.). New York: Springer.
9. Figliozzi, M. A. (2010). The impacts of congestion on commercial vehicle tour characteristics. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(5), 496–506. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.05.001>
10. Ghiani, G., Laporte, G., & Musmanno, R. (2013). *Introduction to logistics systems management* (2nd ed.). Chichester, UK: John Wiley & Sons.
11. Vorkut, A. I. (2020). *Lohistychni systemy transportu* [Transport Logistics Systems]. Kyiv: NAU Publishing.
12. Fomin, O. V., Hrytsenko, I. V., & Kolomiets, V. P. (2019). *Orhanizatsiia mizhnarodnykh perevezhen* [Organization of International Transportations]. Kyiv: Znannia.
13. Prassas, E. S., & Roess, R. P. (2018). *Transportation systems analysis*. Cham: Springer.
14. Dutta, M., & Ahmed, M. A. (2019). Calibration of VISSIM models for mixed traffic conditions. *Advances in Transportation Studies*, 47(1), 35–42.
15. Troelsen, A., & Japikse, P. (2017). *Pro C# 7: With .NET and .NET Core*. New York: Apress.
16. Ministry of Infrastructure of Ukraine. (2023). *Metodychni rekomendatsii z orhanizatsii perevezhen malykh partii vantazhiv* [Methodological Recommendations on the Organization of Small Consignment Freight Transport]. Kyiv: MIU.

I. Baranov, M. Baranskyi, S. Shvets. Optimization of Operational Planning for Freight Road Transport Taking into Account the Specifics of Small Batch Delivery

The article investigates methods for managing the operational planning of freight road transport with a special focus on organizing the delivery of small cargo batches based on logistics principles. General challenges of operational planning, such as market dynamics and condition uncertainty, as well as specific problems of small batch transportation (low utilization, empty runs, complexity of routing numerous points), are analyzed. Classical and modern planning methods (exact, heuristic, metaheuristic, simulation, AI methods) are reviewed and compared based on criteria of solution quality, computational speed, and flexibility. A structural model of a consolidation network for small batches and a mathematical model for route optimization, considering costs, time, load factors, and time windows, are proposed. A heuristic algorithm for the practical implementation of the model, including order classification, batch consolidation, and routing methods (Clarke-Wright, 2-opt), is considered. The possibilities of integrating planning methods with modern IT (GPS, TMS) are analyzed. An example calculation and an assessment of the economic efficiency of the proposed approach for a regional network are provided. Recommendations are given for selecting methods and implementing logistics principles to improve the efficiency of operational transportation planning, especially for small batches, in the context of Ukraine.

Keywords: operational planning, freight road transport, small cargo batches, consolidation, logistics, management methods, route optimization, mathematical model, efficiency, TMS.

БАРАНОВ Ігор Олегович, кандидат технічних наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, Україна, e-mail: baranov_i_o@pstu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-1551-0973>

БАРАНСЬКИЙ Михайло Борисович, магістрант кафедри автомобільного транспорту, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, Україна, e-mail: baranskyi_m_b@students.pstu.edu, <https://orcid.org/0009-0000-4748-6755>

ШВЕЦЬ Сергій Едуардович, магістрант кафедри автомобільного транспорту, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, Україна, e-mail: shvets_s_e@students.pstu.edu, <https://orcid.org/0009-0004-0555-902X>

Ihor BARANOV, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Pryazovskyi State Technical University, Dnipro, Ukraine, e-mail: baranov_i_o@pstu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-1551-0973>

Mykhailo BARANSKYI, Master's student at the Department of Automotive Transport, Pryazovskyi State Technical University, Dnipro, Ukraine, e-mail: baranskyi_m_b@students.pstu.edu, <https://orcid.org/0009-0000-4748-6755>

Serhii SHVETS, Master's student at the Department of Automotive Transport, Pryazovskyi State Technical University, Dnipro, Ukraine, e-mail: shvets_s_e@students.pstu.edu, <https://orcid.org/0009-0004-0555-902X>

Дата надходження статті до видання: 18.09.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.10.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1916