

УДК 656.13:004.9

Т. В. БОЛВАНОВСЬКА<sup>1\*</sup>, Є. Б. ДЕМЧЕНКО<sup>2\*</sup>, І. Я. СКОВРОН<sup>3\*</sup>, В. В. МАЛАШКІН<sup>4\*</sup>,  
А. С. ДОРОШ<sup>5\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Транспортні вузли», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 12, ел. пошта: t.v.bolvanovska@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-6462-8524

<sup>2\*</sup>Каф. «Транспортні вузли», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 799 16 75, ел. пошта: e.b.demchenko@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-1411-6744

<sup>3\*</sup>Каф. «Транспортні вузли», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (095) 230 50 34, ел. пошта: i.y.skovron@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-0697-2698

<sup>4\*</sup>Каф. «Транспортні вузли», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (068) 409 61 85, ел. пошта: v.v.malashkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-5650-1571

<sup>5\*</sup>Каф. «Транспортні вузли», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 927 84 62, ел. пошта: a.s.dorosh@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-5393-0004

## ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В МЕЖАХ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ МІСТА

**Мета.** Сталий розвиток міст нерозривно пов'язаний з вирішенням комплексу логістичних задач з організації міських перевезень вантажів. Одною з таких задач є побудова маршрутів перевезення за критерієм мінімізації як логістичних витрат, так і негативного впливу вантажного транспорту. У зв'язку з цим метою даного дослідження є аналіз математичних методів маршрутизації вантажного транспорту та інформаційних систем, необхідних для ефективної реалізації вказаних методів при організації міських перевезень. **Методи.** Під час дослідження використані евристичні методи для пошуку оптимальних маршрутів перевезення за критерієм мінімальної відстані, методи аналізу та експертної оцінки для вивчення основного функціоналу та сфер застосування інформаційних систем в сфері міських вантажних автомобільних перевезень. **Результати.** В роботі виконано аналіз основних математичних методів маршрутизації вантажного автотранспорту та особливостей їх застосування для організації перевезення товарів по транспортній мережі міста. Зокрема, розглянуті розширення класичної задачі маршрутизації для умов двошарової системи розподілення, а також обмежень часових параметрів доставки. Застосування вказаних методів можливе за умови використання сучасних інформаційних систем збору даних про параметри дорожнього руху та моніторингу роботи автотранспорту, що дозволить в оперативних умовах коригувати маршрути руху та розподіляти замовлення між транспортними засобами. В роботі виконано аналіз можливості застосування *Google Maps with API* з метою побудови матриці відстаней для задачі *TSP*, а також використання бібліотек *SciPy* та *NetworkX* мови програмування *Python* та надбудови «Пошук рішення» пакету *MS Excel* для пошуку оптимального маршруту перевезення. Крім того, проведено аналіз функціоналу комплексних систем управління транспортом (*TMS*), представлених на ринку України. **Наукова новизна.** Отримані результати аналізу функціоналу та сфер використання сучасних інформаційних систем з організації міських автомобільних перевезень вантажів дозволяють виконати наукове та економічне обґрунтування вибору програмних продуктів для вирішення оперативних логістичних задач та підвищення ефективності міської логістики. **Практична значимість.** Представлені результати досліджень можуть бути використані для організації та оптимізації процесу перевезень вантажів автомобільним транспортом в межах транспортної системи міст.

*Ключові слова:* міська логістика, маршрут доставки, задача комівояжера, інформаційна система

### Вступ

Динамічний розвиток міст, що спостерігається в останні десятиріччя, нерозривно пов'язаний з вирішенням ряду логістичних задач з організації міських перевезень пасажирів і вантажів. Наукові методи вирішення вказаних задач виділено в окремий розділ логістики – міську логістику (*City Logistics*), що спрямована на консолідовану координацію та підвищення ефективності управління матеріальними,

інформаційними та фінансовими потоками, яке базується на приведенні у відповідність параметрів вказаних потоків з потребами різних учасників економічної системи міста та його виробничим потенціалом задля створення умов сталого розвитку громади та регіону [1].

Одною з прикладних задач міської логістики є побудова маршрутів перевезення, які б з одного боку дозволили скоротити логістичні витрати підприємств, а з іншого – зменшити

негативний вплив вантажного транспорту в умовах міста як в частині недопущення перевантажень вулично-дорожньої мережі та пов'язаних з цим заторів, так і зменшення шкідливих викидів від автомобілів та шумового забруднення житлових кварталів. Ефективне вирішення вказаної задачі неможливе без застосування сучасних інформаційних технологій планування та моніторингу роботи вантажного автотранспорту, що зумовлює актуальність даного дослідження.

### Постановка завдання дослідження

Завданням даної роботи є аналіз математичних методів формалізації та вирішення задачі побудови ефективних маршрутів розвезення вантажів автомобільним транспортом по території міста, а також дослідження функціоналу сучасних інформаційних систем маршрутизації і моніторингу міського вантажного автотранспорту та розробка рекомендацій щодо умов їх використання.

### Мета дослідження

Метою дослідження є підвищення ефективності автомобільних перевезень вантажів по території міста за рахунок використання сучасних інформаційних технологій планування та моніторингу роботи транспорту.

### Математичні методи маршрутизації міських вантажних перевезень

Характерною особливістю міської логістики є наявність великої кількості пунктів відправлення і призначення вантажів, ефективне обслуговування яких може бути організовано із застосуванням методології маршрутизації транспорту (*Vehicle Routing Problem – VRP*), адаптованої для умов і обмежень функціонування транспортної та складської системи населеного пункту.

В загальному випадку визначення порядку відвідування пунктів кільцевого маршруту було сформульовано Карлом Менгером як математична задача про комівояжера (*Traveling Salesman Problem – TSP*) у 1930 р. Науковці та дослідники запропонували багато варіантів алгоритмів розв'язання *TSP*, але вони є досить громіздкими через велику кількість точок, що має відвідати комівояжер [2]. Найбільш поширеними є метод гілок та меж (*Branch and Bound*) та метод Літла. Обидва методи базуються на поданні маршруту у вигляді графу з великою кількістю вершин (точок відвідування комівояжера), які з'єднані ребрами (прямі маршрути між точками відвідування) [3]. До інших ефективних методів

розв'язання цієї задачі також відносять: повний лексичний перебір, метод генетичних алгоритмів, метод включення найближчого міста, метод найдешевшого включення, метод найближчого сусіда, метод мінімального кістяка дерева, алгоритм мурашиної колонії [4]. Автори статті [5] доводять ефективність методу гілок та меж при визначенні маршруту розвезення, але вказують на достатньо велику тривалість виконання розрахунків, що призводить до виникнення компромісу між швидкістю розрахунків та їх точністю. Для пошуку найкоротших відстаней матриці доцільно використовувати метод Флойда [3] або метод Дейкстри [6]. Загальні швидкі алгоритми для пошуку коротких шляхів наведені авторами [7], алгоритми, що рекомендовані при розв'язанні задач переміщення вантажів наведені в [8]. При цьому слід зазначити, що в умовах розвиненої транспортної системи міста наявна велика кількість комбінацій сегментів вулично-дорожньої мережі, що утворюють масив альтернативних трас перевезення між початковим і кінцевим пунктами маршруту. Оцінка параметрів вказаних трас в сучасних умовах здійснюється за допомогою геоінформаційних систем.

В якості класичного критерію оптимізації *TSP* прийнята мінімальна відстань маршруту доставки [9]

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $c_{ij}$  – матриця відстаней між точками маршруту  $i, j = \overline{1, n}$ ,  $n$  – кількість точок маршруту.

Обов'язковими обмеженнями є одноразове відвідання кожної точки

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n x_{ij} &= 1 \quad (i = \overline{1, n}) \\ \sum_{i=1}^n x_{ij} &= 1 \quad (j = \overline{1, n}), \end{aligned} \quad (2)$$

та циклічність маршруту

$$u_i - u_j + n \cdot x_{ij} \leq n - 1; \quad i, j = \overline{1, n}; \quad j \neq i, \quad (3)$$

де  $u_i$  – номер кроку відвідування  $i$ -ї точки.

Для кожного конкретного перевезення початкові і кінцеві пункти маршруту визначаються безпосередньо користувачами міської логістичної системи – як різноманітними підприємствами та організаціями, так і окремими фізичними особами. При цьому обидва пункти (відправлення і призначення) можуть

розташовуватися як всередині міста (внутрішні міські перевезення), так і один з вказаних пунктів може розміщуватися поза містом (зовнішні вхідні або вихідні перевезення).

Зовнішні перевезення вантажів виконуються, як правило, з використанням автомобілів великої вантажопідйомності та габаритних розмірів, рух яких в умовах міської мережі є ускладненим. У зв'язку з цим широко застосованою практикою є спорудження в передмістях розподільчих центрів, що виконують обробку вхідних вантажопотоків та формування дрібних партій

товарів для подальшої їх доставки міським малотоннажним транспортом [10], що відповідає класичній постановці *VRP*.

Сучасні схеми міських перевезень передбачають використання невеликих проміжних складів (*satellite*) для короткочасного зберігання обмежених партій вантажів або прямого перевантаження з одного транспортного засобу (ТЗ) в інший. В якості таких проміжних складів можуть виступати парковки, виділені зони підприємств автосервісу та ін. Така система отримала назву двошелонної [11] (див. рис. 1).

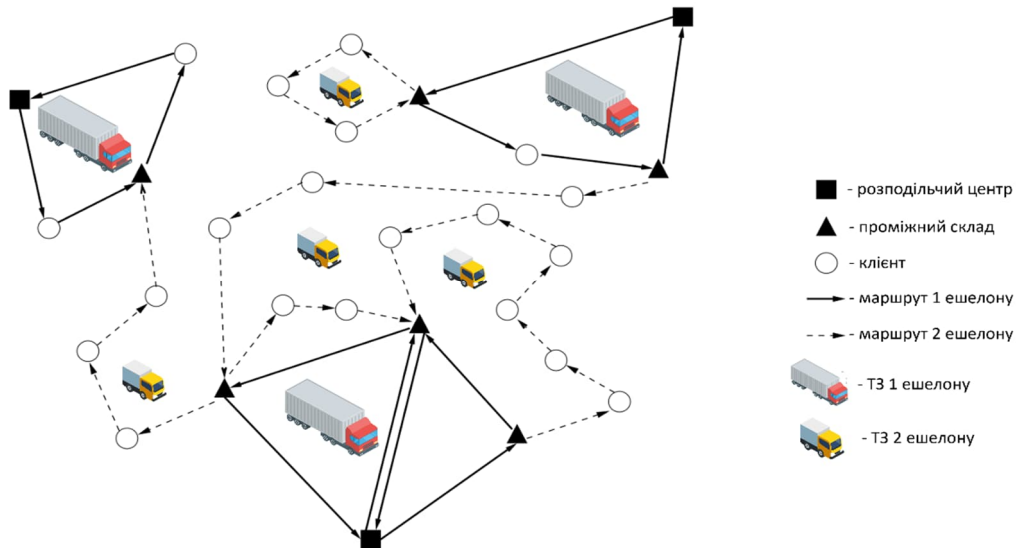


Рис. 1. Двошелонна система розподілу (побудовано за матеріалами [12])

В роботі [13] виконані дослідження з оптимізації розташування проміжних складів та запропоновано відповідне розширення задачі маршрутизації (*Two-Echelon Vehicle Routing Problem – 2E-VRP*). Слід зауважити, що ефективне функціонування даної системи практично неможливе без застосування інформаційних систем моніторингу роботи транспорту, що необхідні для координації роботи ТЗ різних ешелонів.

При організації міської логістики важливими є також часові параметри, такі як: потрібний час доставки вантажу до клієнта, затримки на маршруті внаслідок заторів або аварій, визначені періоди доби та тижня, в які дозволяється рух вантажного транспорту.

Тривалість поїздки між пунктами маршруту та виконання навантажувально-розвантажувальних операцій є випадковою величиною, параметри якої безперервно змінюються. Загальноприйнятим підходом при плануванні перевезень є дискретизація швидкості руху за часовими інтервалами доби [14, 15]. При цьому потрібно зазначити, що через динамічну зміну тривалості поїздки принцип *First In First Out (FIFO)* відносно послідовних ТЗ, що пересуваються по одній

і тій самій дузі маршруту, часто не виконується. Дійсно, дуги являють собою найкоротші шляхи по вуличній мережі, але через зміну дорожньої ситуації послідовні ТЗ, що переміщуються по одній і тій самій дузі, в реальності можуть пересуватися різними вулицями. В результаті, ТЗ, що виїжджає другим за чергою з початкового пункту, може прийти раніше першого автомобіля в кінцевий пункт. Відповідно до цього, характерне для класичної постановки *VRP* прагнення якнайшвидше відправитися з пункту маршруту для міських умов не завжди є оптимальною стратегією. Проблема оптимального часу старту для кожного ТЗ досліджена в роботі [16]. Для динамічної зміни маршруту ТЗ у відповідності з поточною дорожньою ситуацією можуть бути використані розглянуті вище евристичні методи.

При цьому слід зазначити, що врахування часового виміру вихідних даних задачі маршрутизації потребує використання сучасних інформаційних систем моніторингу дорожнього руху, які б у режимі реального часу дозволяли оцінити швидкість транспортного потоку на окремих ділянках вуличної мережі та на основі цього

прогнозувати тривалість пересування окремих ТЗ між пунктами маршруту.

### Інформаційні технології маршрутизації міського вантажного автотранспорту

Вихідними даними для розв'язання задачі *TSP* є відстані між пунктами маршруту, що, як правило, представляються у вигляді матриці. При цьому процес визначення найкоротших відстаней між вузловими точками маршрутів є достатньо трудомістким та вимагає проведення аналізу великого масиву топографічних даних реальної вуличної мережі міста. Для автоматизованого створення матриці відстаней може бути застосований сервіс *Google Maps with API* [17], що вимагає від користувача лише введення адрес пунктів маршруту (див. рис. 2).

```
# Ініціалізація клієнта Google Maps
gmaps = googlemaps.Client(key=api_key)

# Запрос у пользователя ввода адресов
print("Введите адреса (введите 'готово', чтобы завершить ввод):")
addresses = []
while True:
    address = input("Адрес: ")
    if address.lower() == 'готово':
        break
    addresses.append(address)

# Создание DataFrame для хранения данных
df = pd.DataFrame(index=addresses, columns=addresses)

# Заполнение DataFrame расстояниями
for i, origin in enumerate(addresses):
    for j, destination in enumerate(addresses):
        try:
            # Запрос к Directions API для расчета расстояния между адресами i и j
            result = gmaps.distance_matrix(origin, destination, modes="driving")
            # Извлечение расстояния из результата
            distance = result["rows"][0][0]["elements"][0]["distance"]["text"]
            df.at[origin, destination] = distance
        except Exception as e:
            print(f"Ошибка при обработке запроса {i+1} -> {j+1}: {e}")
            # Задание максимально большого значения или бесконечности в случае ошибки
            df.at[origin, destination] = float('inf') # Используя float('inf') для бесконечности

# Установка бесконечности на пересечении адресов
df = df.replace('1 м', float('inf'))

# Сохранение DataFrame в файл Excel
df.to_excel('distance_matrix.xlsx')

# Открытие файла Excel
openpyxl.Application().visible = True
wb = openpyxl.load_workbook('distance_matrix.xlsx')
```

Рис. 2. Скрипт *Google Maps with API* для побудови матриці відстаней

В результаті роботи скрипту отримані відстані зберігаються в файлі *Excel*. В якості ілюстрації в роботі представлена матриця відстаней для 9 пунктів, розташованих в м. Кам'янське Дніпропетровської області (див. табл. 1).

Таблиця 1

#### Матриця відстаней між точками маршруту

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	inf	6,0	1,4	4,5	5,8	5,0	6,0	9,1	8,3	5,2
1	5,9	inf	5,4	7,7	4,2	8,1	0,7	12,3	12,6	8,4
2	2,0	5,3	inf	3,7	5,0	4,2	5,3	8,4	8,6	4,5
3	5,0	7,9	4,5	inf	7,6	0,5	7,8	6,3	5,0	0,8
4	5,8	4,2	5,4	7,7	inf	8,2	4,2	12,3	13,3	8,4
5	4,8	7,6	4,3	0,7	7,3	inf	7,6	5,1	5,6	1,4
6	6,5	0,7	6,0	8,3	4,1	8,8	inf	12,9	13,2	9,0
7	8,1	12,5	9,2	5,4	12,2	5,6	12,5	inf	5,2	4,4
8	6,3	12,3	7,7	5,2	12,2	5,4	12,3	5,3	inf	5,0
9	5,7	8,6	5,2	1,0	8,3	1,2	8,5	4,4	4,7	inf

На основі отриманої матриці виконується пошук оптимального порядку об'їзду пунктів маршруту за критерієм мінімальної відстані. Найбільш точним та водночас трудомістким методом вирішення *TSP* вважається метод гілок та

меж. Для наведеної в табл. 1 матриці відстаней з використанням даного методу отримано маршрут 0→2→4→6→1→3→5→9→7→8→0 довжиною 36,8 км.

При відносно невеликій кількості пунктів маршруту для вирішення *TSP* може бути використана надбудова «Пошук рішення» пакету *MS Excel*, яка для умов наведеного прикладу за допомогою еволюційного пошуку дозволила отримати еквівалентний до методу гілок та меж маршрут довжиною 36,8 км. Однак зі збільшенням розмірності матриці точність отриманого за допомогою *MS Excel* рішення значно погіршується.

Для вирішення вказаної проблеми можуть бути застосовані різноманітні альтернативні інструменти, одними з яких є бібліотеки *SciPy* та *NetworkX* мови програмування *Python*.

Бібліотека *SciPy* використовується для дослідження функцій, інтегрування, статистичного аналізу та роботи з матрицями. Для наведеної матриці відстаней за допомогою *SciPy* було виконано пошук оптимального маршруту; отриманий розв'язок у вигляді таблиці *Excel* наведено на рис. 3.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	0	inf	6,0 km	1,4 km	4,5 km	5,8 km	5,0 km	6,0 km	9,1 km	8,3 km	5,2 km
3	1	5,9 km	inf	5,4 km	7,7 km	4,2 km	8,1 km	0,7 km	12,3 km	12,6 km	8,4 km
4	2	2,0 km	5,3 km	inf	3,7 km	5,0 km	4,2 km	5,3 km	8,4 km	8,6 km	4,5 km
5	3	5,0 km	7,9 km	4,5 km	inf	7,6 km	0,5 km	7,8 km	6,3 km	5,0 km	0,8 km
6	4	5,8 km	4,2 km	5,4 km	7,7 km	inf	8,2 km	4,2 km	12,3 km	13,3 km	8,4 km
7	5	4,8 km	7,6 km	4,3 km	0,7 km	7,3 km	inf	7,6 km	5,1 km	5,6 km	1,4 km
8	6	6,5 km	0,7 km	6,0 km	8,3 km	4,1 km	8,8 km	inf	12,9 km	13,2 km	9,0 km
9	7	8,1 km	12,5 km	9,2 km	5,4 km	12,2 km	5,6 km	12,5 km	inf	5,2 km	4,4 km
10	8	6,3 km	12,3 km	7,7 km	5,2 km	12,2 km	5,4 km	12,3 km	5,3 km	inf	5,0 km
11	9	5,7 km	8,6 km	5,2 km	1,0 km	8,3 km	1,2 km	8,5 km	4,4 km	4,7 km	inf
12											
13	Optimal TSP Order: 0 9 1 3 4 8 5 2 6 0										
14	Total Distance: 69,4										

Рис. 3. Результати розрахунку маршруту за допомогою бібліотеки *SciPy*

Як видно з рисунку, отриманий в *Scipy* маршрут 0→9→1→3→4→8→7→5→2→6→0 має довжину 69,4 км.

Бібліотека *NetworkX* призначена для роботи з графами та іншими мережевими структурами, що більшою мірою відповідає специфіці *TSP*. В результаті використання даної бібліотеки отримано маршрут 0→2→5→3→9→8→7→4→6→1→0 довжиною 40,1 км, тобто на 29,3 км коротше, ніж у розв'язку за допомогою *SciPy*. Вказані бібліотеки можуть застосовуватися для швидкого оціночного порівняння стратегій маршрутизації в оперативних умовах управління міськими вантажними перевезеннями між великою кількістю пунктів.

Для ефективного управління парком міського вантажного автотранспорту можливості, що надає картографічний сервіс *Google Maps* [18] (без надбудов), в більшості випадків виявляються недостатніми. Зокрема вказаний сервіс не дозволяє оперативно коригувати маршрути та

відстежувати в режимі реального часу роботу всіх задіяних в перевезеннях ТЗ [19].

Сучасним рішенням для міської логістики є комплексна інформаційна система управління транспортом (*Transport Management System – TMS*), яка дозволяє виконувати планування роботи транспорту та його розподіл між замовленнями, відстежувати роботу всіх ТЗ парку в режимі реального часу, керувати декількома перевізниками, розраховувати вартість та тривалість доставки.

На ринку вантажних автоперевезень України *TMS* представлені широким спектром програмних продуктів та сервісів. Так, *ABM Rinkai TMS* [20] – рішення для великого і середнього бізнесу, що дозволяє будувати ефективні за критерієм мінімізації транспортних витрат маршрути доставки з врахуванням обмежень на часові вікна та вагогабаритні параметри.

Крім того, сервіс дозволяє виконувати комплексний аналіз ключових параметрів роботи автопарку. Програма має *Web-інтерфейс* для роботи логістів (рис. 4) та застосунок на платформі *Android* для водіїв (рис. 5).

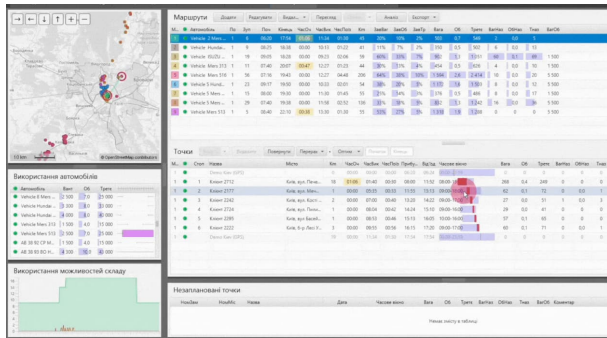


Рис. 4. *Web-інтерфейс ABM Rinkai TMS*

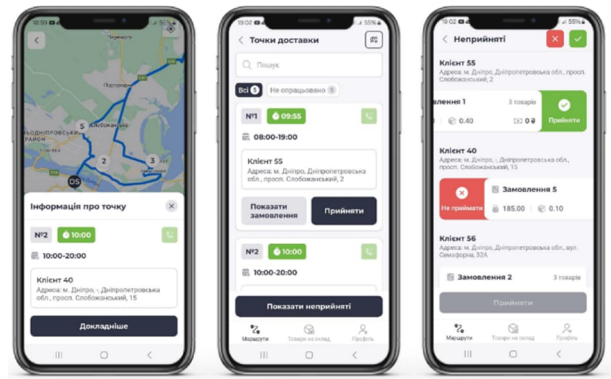


Рис. 5. *Android- застосунок ABM Rinkai TMS*

Одним з найрозповсюдженіших *TMS* в сегменті інтернет-магазинів є сервіс *ANT-Logistics* [21] (див. рис. 6), який окрім всіх базових функцій організації перевезень та моніторингу роботи транспорту дозволяє за допомогою *API* реалізувати обмін логістичними даними між *ERP* та *CRM* системами, сервісами *SMS* розсилок та *GPS* моніторингу.

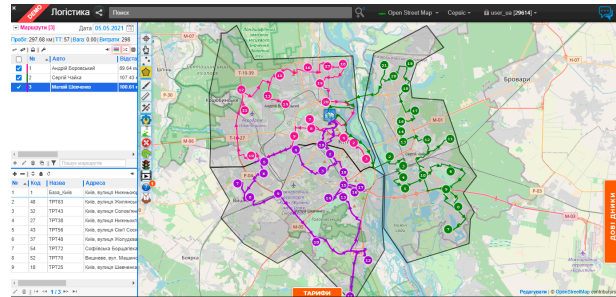


Рис. 6. *Web-інтерфейс ANT-Logistics*

На підставі даних [22] в табл. 2 виконано порівняльний аналіз функціоналу основних *TMS*, представлених на ринку України.

Таблиця 2

### Порівняння функціоналу *TMS*

Доступні функції	Програмний продукт				
	<i>ABM Rinkai TMS</i>	<i>Tocan TMS</i>	<i>ANT-Logistics</i>	<i>TMS Planarry</i>	<i>TMS MapXPlus</i>
Планування маршруту з врахуванням: ● – всіх обмежень ○ – декількох обмежень	●	○	○	○	○
Відображення картографії: ● – з можливістю редагування ○ – без можливості редагування	●	○	○	○	○
Моделювання: ● – з модулем аналітики ○ – без модуля аналітики	●	○			
Мобільний застосунок для водіїв: ● – з модулем підписання е-ТТН ○ – без підписання е-ТТН	●	○	○	○	
Тип розгортання системи: ● – хмара та <i>On-Premises</i> ○ – хмара; ○ – <i>On-Premises</i>	○	●	○	○	○

Як видно з табл. 2, представлені на ринку України *TMS* дозволяють реалізувати базові функції з побудови та візуалізації маршрутів міських вантажних перевезень та контролю роботи автотранспорту на них.

### Висновки

Маршрутизація міських автомобільних перевезень вантажів є важливою науково-прикладною проблемою сталого розвитку громад та територій. Ефективне вирішення вказаної проблеми засноване на використанні широкого набору математичних методів та евристичних алгоритмів в поєднанні з сучасними інформаційними системами картографії, збору даних про дорожній рух та моніторингу роботи транспорту. Такий підхід отримав свою реалізацію в спеціалізованих сервісах – *TMS* програмах, що дозволяють комплексно керувати транспортом при здійсненні перевезень в межах міст.

### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Operations research for planning and managing city logistics systems / Teodor Gabriel Crainic et al. *Handbook on City Logistics and Urban Freight*. 2023. Chapter 10. P. 190–223. URL: <https://doi.org/10.4337/9781800370173.00019> (date of access: 16.02.2025).
2. The Traveling Salesman Problem Solution for Delivery and Service Businesses URL: <https://optimoroute.com/travelling-salesman-problem/> (date of access: 20.02.2025)
3. Козар Л., Романович Є., Афанасов Г. Методи транспортної логістики : навч. посіб. Харків : УкрДАЗТ, 2015. 174 с.
4. Time dependent vehicle routing problem with a multi ant colony system / A. V. Donati et al. *European Journal of Operational Research*. 2008. Vol. 185, no. 3. P. 1174–1191. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.06.047> (date of access: 16.02.2025).
5. Підвищення ефективності доставки збірних вантажів автомобільним транспортом / І. Я. Скворон та ін. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2020. № 20. С. 36–44. URL: <https://doi.org/10.15802/tstt2020/217400> (дата звернення: 17.02.2025).
6. Знаходження найкоротшого шляху в орієнтованому графі за алгоритмом Дейкстри URL: <https://www.mathros.net.ua/znahodzhennja-najkoro-tshogo-shljahu-v-orijentovanomu-grafi-za-algorytmom-dejkstry.html> (дата звернення: 15.02.2025).
7. Moffat Alistair Fast algorithms for shortest paths. University of Canterbury, 1985. 178 p.
8. Solution Strategy for One-to-One Pickup and Delivery Problem Using the Cyclic Transfer Approach / R. Dupas et al. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*. 2018. P. 164110. URL: <https://doi.org/10.4108/eai.13-7-2018.164110> (date of access: 15.02.2025).
9. Задача комівояжера. Математична постановка задачі URL: [komivojazhera-matematychna-postanovka-zadachi.html \(дата звернення: 14.02.2025\)](https://www.mathros.net.ua/zadacha-</a></li></ol></div><div data-bbox=)

10. Reducing Social and Environmental Impacts of Urban Freight Transport: A Review of Some Major Cities / M. Browne et al. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2012. Vol. 39. P. 19–33. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.088> (date of access: 16.02.2025).
11. Crainic T. G. City Logistics. State-of-the-Art Decision-Making Tools in the Information-Intensive Age. 2008. P. 181–212. URL: <https://doi.org/10.1287/educ.1080.0047> (date of access: 16.02.2025).
12. Vehicle routing problems for city logistics / D. Cattaruzza et al. *EURO Journal on Transportation and Logistics*. 2015. Vol. 6, no. 1. P. 51–79. URL: <https://doi.org/10.1007/s13676-014-0074-0> (date of access: 16.02.2025).
13. Two-Echelon Vehicle Routing Problem: A satellite location analysis / T. G. Crainic et al. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2010. Vol. 2, no. 3. P. 5944–5955. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.04.009> (date of access: 16.02.2025).
14. Fleischmann B., Gietz M., Gnuzmann S. Time-Varying Travel Times in Vehicle Routing. *Transportation Science*. 2004. Vol. 38, no. 2. P. 160–173. URL: <https://doi.org/10.1287/trsc.1030.0062> (date of access: 16.02.2025).
15. Ichoua S., Gendreau M., Potvin J.-Y. Vehicle dispatching with time-dependent travel times. *European Journal of Operational Research*. 2003. Vol. 144, no. 2. P. 379–396. URL: [https://doi.org/10.1016/s0377-2217\(02\)00147-9](https://doi.org/10.1016/s0377-2217(02)00147-9) (date of access: 16.02.2025).
16. Hashimoto H., Yagiura M., Ibaraki T. An iterated local search algorithm for the time-dependent vehicle routing problem with time windows. *Discrete Optimization*. 2008. Vol. 5, no. 2. P. 434–456. URL: <https://doi.org/10.1016/j.disopt.2007.05.004> (date of access: 16.02.2025).
17. Google Maps Platform APIs by Platform URL: Google Maps Platform APIs by Platform | Google for Developers (дата звернення: 20.02.2025).
18. Картографічний сервіс URL: <https://www.google.com.ua/maps/> (дата звернення: 14.02.2025).
19. Using Google Maps Route Planner for Multiple Stops URL: <https://optimoroute.com/google-maps-route-planner-multiple-stops/#10-stops> (дата звернення: 14.02.2025).
20. TMS система управління транспортом – ABM Rinkai. *ABM Cloud*. URL: <https://abmcloud.com/uk/abm-soft/abm-tms/> (дата звернення: 16.02.2025).
21. Хмарна система управління транспортом – ANT-Logistics. URL: <https://ant-logistics.com/uk/main.html> (дата звернення: 16.02.2025).
22. Топ 5 найкращих програм для доставки останньої милі URL: <https://trademaster.ua/logistic/313814> (дата звернення: 20.02.2025).

Надійшла до редколегії 26.12.2024.

Прийнята до друку 12.03.2025.

## USE OF INFORMATION TECHNOLOGIES FOR OPTIMIZING ROAD TRANSPORTATION WITHIN THE CITY TRANSPORT SYSTEM

**Purpose.** The sustainable development of cities is closely linked to solving a complex set of logistical challenges related to the organization of city freight transportation. One such challenge is the development of transportation routes based on the criteria of minimizing both logistics costs and the negative impact of freight transport. In this regard, the purpose of this study is to analyze mathematical methods for freight transport routing and the information systems required for their effective implementation in city transportation management. **Methods.** The research employs heuristic methods to determine optimal transportation routes based on the minimum distance criterion, as well as methods of analysis and expert evaluation to examine the key functionalities and application areas of information systems in city freight transportation. **Results.** The study analyzes the main mathematical methods used for routing freight transport and their application in organizing goods transportation within a city road network. In particular, it explores extensions of the classical vehicle routing problem (VRP) for two-echelon distribution systems and time constraint considerations. The application of these methods is feasible with the use of modern information systems for collecting traffic data and monitoring vehicle performance, enabling real-time route adjustments and order distribution among transport vehicles. The study also assesses the potential use of Google Maps with API for constructing a distance matrix for the traveling salesman problem (TSP), as well as the implementation of Python libraries SciPy and NetworkX, and the MS Excel Solver add-in for optimizing transportation routes. Additionally, an analysis of the functionalities of integrated transportation management systems (TMS) available in the Ukrainian market has been conducted. **Scientific novelty.** The results of the analysis of functionalities and application areas of modern information systems for city freight transportation provide a scientific and economic rationale for selecting software solutions to address real-time logistics challenges and enhance city logistics efficiency. **Practical significance.** The research findings can be used to organize and optimize freight transportation by road within city transport systems.

*Keywords:* city logistics, delivery route, traveling salesman problem, information system