

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет інтелектуальних систем управління

Кафедра комп'ютерних наук та інформаційних технологій

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
(тип кваліфікаційної роботи)

_____магістра

(освітній ступінь)

на тему «Вирішення проблем маршрутизації транспортних засобів за допомогою Google OR-Tools»

XAI.302.366.25O.122.12003782 ПЗ

Виконав: студент 6 курсу групи № 366
Спеціальність 122 «Комп'ютерні науки»

(код та найменування)

Освітня програма Комп'ютеризація
обробки інформації та управління

_____Яхненко О. В.

(прізвище й ініціали студента)

Керівник: _____доц. каф. 302, к.т.н.

_____Лещенко Ю. О.

(прізвище й ініціали)

Рецензент: _____Чалий С.Ф.

(прізвище й ініціали)

Харків – 2025

**Міністерство освіти і науки України
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»**

Факультет інтелектуальних систем управління
Кафедра комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Галузь знань 12 «Інформаційні технології»
(код та найменування)
Спеціальність 122 «Комп'ютерні науки»
Освітня програма Комп'ютеризація обробки інформації та управління

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Олег ФЕДОРОВИЧ

(підпис) (ім'я та прізвище)
«__» листопада 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Яхненко Олександр Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи Вирішення проблем маршрутизації транспортних засобів за допомогою Google OR-Tools

керівник кваліфікаційної роботи Лещенко Ю.О., к.т.н., доц. каф. 302,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Університету № 1765-уч. від «14» листопада 2025 року

2. Термін подання кваліфікаційної роботи 08.12.2025

3. Вихідні дані до проекту (роботи) бібліотека Google OR-Tools

4. Зміст пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розв'язати) провести аналіз сучасних підходів до вирішення задач маршрутизації транспортних засобів та їхніх різновидів; розглянути алгоритмічні основи оптимізації маршрутів, зокрема методи пошуку з обмеженнями, евристичні та метаевристичні алгоритми, реалізовані в Google OR-Tools; обґрунтувати вибір математичної постановки задачі маршрутизації; реалізувати модель оптимізації маршрутів у Google OR-Tools та протестувати її на типових логістичних сценаріях; розробити імітаційну модель транспортної системи в середовищі AnyLogic, що відтворює процес виконання оптимізованих маршрутів у динамічних умовах; провести серію експериментів для оцінки ефективності розробленої моделі за різних умов навантаження, кількості клієнтів та транспортних засобів

5. Перелік графічного матеріалу вирішення задач маршрутизації транспортних засобів; мета та завдання; класичні транспортні задачі та еволюція проблеми маршрутизації; практичні сфери застосування задач маршрутизації транспортних засобів; математична постановка задачі маршрутизації транспортних засобів та огляд інструментів оптимізації; архітектура OR-Tools; особливості розробленого програмного модуля; реалізація VRPTW; реалізація CVRP; реалізація MDVRP; імітаційна модель; приклади вирішення завдань оптимізації; експерименти VRPTW; експерименти CVRP; експерименти MDVRP; режими оптимізації та симуляції руху транспортних засобів сформованими маршрутами

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада Консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
з основної частини	Лещенко Ю.О. доц. каф. 302		
з спеціального розділу	Лещенко Ю.О. доц. каф. 302		
з економіки та управління	Малєєва Ю. А. доц. каф. 302		

Нормоконтроль _____ Олександр ПРОХОРОВ «__» _____ 20__ р.
(підпис) (імя та прізвище)

7. Дата видачі завдання «_06_» _вересня_ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	АНАЛІЗ ЗАДАЧ МАРШРУТИЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ	06.09 – 20.09	
2	АЛГОРИТМІЧНІ ОСНОВИ ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТІВ В GOOGLE OR-TOOLS	21.09 – 28.09	
3	РОЗРОБКА ОПТИМІЗАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ В GOOGLE OR-TOOLS	29.09 – 20.10	
4	ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ANYLOGIC ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	21.10 – 20.11	
5	ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ	20.11 – 25.11	

Здобувач _____ Олександр ЯХНЕНКО
(підпис) (імя та прізвище)

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Юлія ЛЕЩЕНКО
(підпис) (імя та прізвище)

УДК 004.8

РЕФЕРАТ

Вирішення проблем маршрутизації транспортних засобів за допомогою Google OR-Tools – Яхненко Олександр, кваліфікаційна робота магістра, Харків, Національний аерокосмічний університет «ХАІ», кількість сторінок, враховуючи додатки 84, кількість таблиць 19, кількість рисунків 21, кількість джерел літератури 20.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: маршрутизація транспортних засобів, логістика, оптимізація, маршрути, імітаційне моделювання.

ЦІЛЬ: розробка, моделювання та дослідження методів оптимізації маршрутів транспортних засобів із використанням бібліотеки Google OR-Tools та імітаційного середовища AnyLogic.

ОБ’ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ: процес планування та оптимізації маршрутів транспортних засобів у логістичних системах.

ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ: методи та алгоритми оптимізації маршрутів транспортних засобів, реалізовані у Google OR-Tools, а також їхнє моделювання й оцінювання в середовищі AnyLogic.

ЗАДАЧІ:

1. Провести аналіз сучасних підходів до вирішення задач маршрутизації транспортних засобів та їхніх різновидів.
2. Розглянути алгоритмічні основи оптимізації маршрутів, зокрема методи пошуку з обмеженнями, евристичні та метаевристичні алгоритми.
3. Обґрунтувати вибір математичної постановки задачі маршрутизації.
4. Реалізувати модель оптимізації маршрутів у Google OR-Tools та протестувати її на типових логістичних сценаріях.
5. Розробити імітаційну модель транспортної системи в середовищі AnyLogic, що відтворює процес виконання оптимізованих маршрутів.
6. Провести серію експериментів для оцінки ефективності розробленої моделі за різних умов навантаження, кількості клієнтів та транспортних засобів.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ: методи оптимізації маршрутів транспортних засобів, методи імітаційного моделювання.

ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ: розроблено імітаційну модель у середовищі AnyLogic, що дозволяє проводити вирішення різних завдань оптимізації маршрутів та візуалізувати процес руху транспортних засобів, перевіряти стійкість оптимальних рішень до змін у динамічних умовах. Розроблений підхід може бути використаний у логістичних компаніях для планування маршрутів доставки, управління автопарком та підтримки прийняття рішень у сфері транспортної аналітики.

UDC 004.8

ABSTRACT

Solving vehicle routing problems using Google OR-Tools – Oleksandr Yakhnenko, Master Thesis, Kharkiv, National Aerospace University “KhAI”, amount of pages 84, amount of tables 19, amount of figures 21, amount of literature’s sources 20.

KEYWORDS: vehicle routing problem, logistics, optimization, routes, simulation modeling.

PURPOSE OF RESEARCH: development, modeling, and research of vehicle route optimization methods using the Google OR-Tools library and the AnyLogic simulation environment.

OBJECT OF RESEARCH: the process of planning and optimizing vehicle routes in logistics systems.

SUBJECT OF RESEARCH: methods and algorithms for vehicle route optimization implemented in Google OR-Tools, as well as their modeling and evaluation in the AnyLogic environment.

TASKS:

1. Analyze modern approaches to solving vehicle routing problems and their variations.
2. Consider the algorithmic foundations of route optimization, particularly constraint programming methods, heuristic, and metaheuristic algorithms.
3. Justify the choice of the mathematical formulation of the routing problem.
4. Implement a route optimization model in Google OR-Tools and test it on typical logistics scenarios.
5. Develop a simulation model of the transport system in the AnyLogic environment that reproduces the process of executing optimized routes.
6. Conduct a series of experiments to assess the effectiveness of the developed model under various conditions of load, number of clients, and vehicles.

METHODS OF RESEARCH: vehicle route optimization methods, simulation modeling methods.

RESULTS: a simulation model in the AnyLogic environment has been developed, allowing for the solution of various route optimization tasks, visualization of the vehicle movement process, and verification of the stability of optimal solutions against changes in dynamic conditions. The developed approach can be used in logistics companies for delivery route planning, fleet management, and decision support in the field of transport analytics.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 АНАЛІЗ ЗАДАЧ МАРШРУТИЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ.....	10
1.1 Класичні транспортні задачі та еволюція проблеми маршрутизації	10
1.2 Практичні сфери застосування задач маршрутизації транспортних засобів	12
1.3 Математична постановка задачі маршрутизації транспортних засобів.....	15
1.4 Огляд інструментів оптимізації маршрутів транспортних засобів.....	18
Висновки за розділом.....	20
2 АЛГОРИТМІЧНІ ОСНОВИ ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТІВ В GOOGLE OR-TOOLS.....	22
2.1 Архітектура OR-Tools.....	22
2.2 Підтримувані алгоритми оптимізації в Google OR-Tools.....	24
2.3 Формалізація VRP, VRPTW, CVRP, MDVRP в Google OR-Tools	26
2.3.1 Базова VRP	26
2.3.2 VRPTW (Vehicle Routing Problem with Time Windows).....	26
2.3.3 CVRP (Capacitated VRP).....	27
2.3.4 MDVRP (Multi-Depot VRP).....	27
Висновки за розділом.....	28
3 РОЗРОБКА ОПТИМІЗАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ В GOOGLE OR-TOOLS.....	29
3.1 Архітектура розробленого програмного модуля.....	29
3.2 Реалізація VRPTW	32
3.3 Реалізація CVRP	34
3.4 Реалізація MDVRP	36
3.5 Інтеграція з AnyLogic	38
Висновки за розділом.....	40
4 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ANYLOGIC ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	42
4.1 Структура імітаційної моделі	42
4.2 Приклади вирішення завдань оптимізації.....	45
4.2.1 Розв'язання задачі VRPTW.....	45
4.2.2 Розв'язання задачі CVRP	46
4.2.3 Розв'язання задачі MDVRP	47
4.3 Експериментальні сценарії	48
4.3.1 Експерименти VRPTW	49
4.3.2 Експерименти CVRP.....	53
4.3.3 Експерименти MDVRP	57
Висновки за розділом.....	60
5 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	62

5.1 Мета розділу	62
5.2 Визначення тривалості та розрахунок собівартості виконання проекту (перший варіант)	62
5.3 Визначення тривалості та розрахунок собівартості виконання проекту (другий варіант)	67
5.4 Висновки за розділом	71
ВИСНОВКИ.....	73
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	74
ДОДАТОК А. Графічні матеріали	76

ВСТУП

Актуальність теми дослідження.

У сучасних умовах воєнного стану логістичні системи України перебувають під безпрецедентним навантаженням. Руйнування транспортної інфраструктури, блокування окремих напрямків, необхідність оперативного переміщення вантажів та забезпечення критичних потреб населення і військових створюють складні виклики для планування маршрутів та управління транспортними потоками. Від ефективності логістичних рішень у значній мірі залежить стійкість економіки, безперервність постачання гуманітарних та промислових вантажів, а також функціонування оборонного сектора.

Оптимізація маршрутів доставки набуває особливої ваги в ситуації, коли ресурси обмежені, а оперативність виконання перевезень стає критичним фактором. У цих умовах традиційні підходи до планування маршрутів виявляються недостатньо ефективними, оскільки вони не враховують динамічність середовища, нерівномірність попиту, зміни у доступності доріг та необхідність мінімізувати зайві пробіги транспортних засобів. Тому застосування сучасних оптимізаційних алгоритмів є стратегічно важливим для підвищення ефективності логістичних процесів.

Задачі маршрутизації транспортних засобів (VRP) та їх розширення – VRPTW, CVRP, MDVRP – давно відомі у науковій літературі, але саме їх застосування у поєднанні з методами імітаційного моделювання створює нові можливості для аналізу та прийняття рішень в умовах високої невизначеності. Імітаційне середовище дозволяє не лише отримати оптимальні маршрути, але й оцінити їхню працездатність у реальних географічних, часових та ризикових умовах, а також моделювати поведінку транспортних систем у випадку непередбачуваних змін.

Розробка інтегрованого підходу, що поєднує оптимізаційні моделі на основі Google OR-Tools із геопросторовою симуляцією в AnyLogic, є актуальною науковою та практичною задачею. Такий підхід дозволяє формувати ефективні маршрути з урахуванням обмежень транспортних ресурсів, часових вікон, місткості та багатодепової структури логістичної мережі, а також досліджувати їх вплив на стійкість та ефективність логістичних операцій під час воєнного стану.

Отже, актуальність роботи визначається об'єктивною потребою у впровадженні сучасних оптимізаційних методів для підтримки прийняття рішень у сфері логістики в умовах воєнних ризиків, нестабільності та

обмеженості ресурсів, що робить тему дослідження соціально значущою та практично важливою.

Мета дослідження – розробка, моделювання та дослідження методів оптимізації маршрутів транспортних засобів із використанням бібліотеки Google OR-Tools та імітаційного середовища AnyLogic.

Для досягнення мети необхідно виконати наступні **завдання**:

1. Провести аналіз сучасних підходів до вирішення задач маршрутизації транспортних засобів та їхніх різновидів.
2. Розглянути алгоритмічні основи оптимізації маршрутів, зокрема методи пошуку з обмеженнями, евристичні та метаевристичні алгоритми, реалізовані в Google OR-Tools.
3. Обґрунтувати вибір математичної постановки задачі маршрутизації.
4. Реалізувати модель оптимізації маршрутів у Google OR-Tools та протестувати її на типових логістичних сценаріях.
5. Розробити імітаційну модель транспортної системи в середовищі AnyLogic, що відтворює процес виконання оптимізованих маршрутів у динамічних умовах.
6. Провести серію експериментів для оцінки ефективності розробленої моделі за різних умов навантаження, кількості клієнтів та транспортних засобів.

Об’єкт дослідження – процес планування та оптимізації маршрутів транспортних засобів у логістичних системах.

Предмет дослідження – методи та алгоритми оптимізації маршрутів транспортних засобів, реалізовані у Google OR-Tools, а також їхнє моделювання й оцінювання в середовищі AnyLogic.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблено імітаційну модель у середовищі AnyLogic, що дозволяє проводити вирішення різних завдань оптимізації маршрутів та візуалізувати процес руху транспортних засобів, перевіряти стійкість оптимальних рішень до змін у динамічних умовах. Розроблений підхід може бути використаний у логістичних компаніях для планування маршрутів доставки, управління автопарком та підтримки прийняття рішень у сфері транспортної аналітики.

Структура та обсяг кваліфікаційної роботи магістра. Кваліфікаційна робота магістра складається зі вступу, 5 розділів, висновків, додатків та переліку посилань. Повний обсяг кваліфікаційної роботи магістра становить 84 сторінки, в тому числі: 21 рисунок; 19 таблиць; 1 додаток на 9 сторінках; перелік посилань з 20 найменувань на 2 сторінках.