

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до кваліфікаційної роботи

магістр

(освітній рівень)

на тему: Застосування елементів мурашиної логістики при проектуванні
перевезення однотипних вантажів підприємства ТОВ "ШРЕДЕР"

Виконав: студент 6 курсу, групи МНм-61
спеціальності 275 «Транспортні технології»
(шифр і назва спеціальності)

Студент

(підпис)

Лемега Ю.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Рожко Н.Я.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Плекан У.М.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Зав. каф.

(підпис)

Цьонь О.П.

(прізвище та ініціали)

Факультет інженерії машин, споруд та технологій

Кафедра Автомобілів

Освітній рівень магістр

Напрямок підготовки _____

(шифр і назва)

Спеціальність 275.03 Транспортні технології (на автомобільному транспорті)

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри О.П. Цьонь

«29» листопада 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Лемеги Юрія Андрійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Застосування елементів мурашиної логістики при проектуванні перевезення однотипних вантажів підприємства ТОВ "ШРЕДЕР".

керівник проекту (роботи) д.е.н., проф. Рожко Наталя Ярославівна

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

затверджені наказом по університету від «14» листопада 2025 року №4/7-971

2. Термін подання студентом проекту (роботи) 20 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) _____

Дані економічної діяльності підприємства; технічні та габаритно-вантажні характеристики вантажу.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Теоретичний розділ

Аналітико-дослідницький розділ

Проектно-рекомендаційний розділ

Охорона праці і безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Слайди графічної частини – 10 шт.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Окіпний І.Б., доцент</i>		
<i>Безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>Стручок В.С., ст. викладач</i>		

7. Дата видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент _____
(підпис)

Лемега Юрій Андрійович.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Рожко Наталя Ярославівна

АНОТАЦІЯ	6
ВСТУП	7
1 ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ	
1.1 Аналіз діяльності підприємства та об'єктів виробництва	10
1.2 Опис транспортної проблеми та окреслення шляхів її вирішення	13
1.3 Особливості галузі автомобільних перевезень в період воєнного стану в Україні	17
1.4 Класифікація існуючих методів розв'язання задач маршрутизації транспортних засобів	21
1.5 Аналіз програмних рішень задач маршрутизації транспортних засобів	26
1.6 Висновки та постановка завдання дослідження	31
2 АНАЛІТИКО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	
2.1 Особливості побудови транспортної системи при доставці однотипного вантажу	33
2.2 Алгоритми мурашиної колонії для вирішення задач комбінаторної оптимізації	38
2.3 Аналіз алгоритмів роботи мурашиної логістики	46
2.4 Розробка методу доставки однотипного вантажу різним клієнтам з урахуванням ряду обмежень	49
3 ПРОЕКТНО-РЕКОМЕНДАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ	
3.1 Побудова ефективної транспортної системи доставки світильників, з використанням принципів мурашиної логістики	58

3.2	Заходи із впровадження мурашиної логістики при побудові транспортної системи доставки однотипного вантажу підприємства ТОВ «Шредер»	64
4	ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	
4.1	Охорона праці при здійсненні завантажувально-розвантажувальних робіт світлотехнічних виробів	69
4.2	Дії працівників при виникненні пожеж на підприємствах світлотехнічного комплексу	72
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	76
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	77

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра присвячена дослідженню та розробці ефективних підходів до організації транспортної системи доставки однотипного вантажу, зокрема світлотехнічної продукції підприємства ТОВ «Шредер» (м. Тернопіль), з урахуванням сучасних викликів та низки обмежень, що виникають у процесі міжнародних та внутрішніх перевезень.

У вступній частині окреслено актуальність проблеми маршрутизації транспортних засобів в умовах зростаючого обсягу замовлень, потреби в мінімізації логістичних витрат і підвищення надійності доставки. Визначено мету та завдання дослідження, сформульовано його наукову новизну й практичну значущість.

У першому розділі здійснено аналіз діяльності підприємства та особливостей виробничих процесів, описано основні проблеми організації транспортування світлотехнічної продукції. Значну увагу приділено специфіці галузі автомобільних перевезень у період воєнного стану в Україні, що створює додаткові ризики та обмеження для бізнесу. Наведено класифікацію існуючих методів розв'язання задач маршрутизації транспортних засобів та проведено огляд програмних рішень, що застосовуються у світовій і вітчизняній практиці. Сформульовано постановку дослідницької задачі.

У другому розділі розкрито особливості побудови транспортної системи при доставці однотипного вантажу різним клієнтам, проаналізовано можливості використання алгоритмів мурашиної колонії для вирішення задач комбінаторної оптимізації. Подано порівняльний аналіз ефективності різних модифікацій мурашиної логістики та запропоновано метод доставки світлотехнічної продукції з урахуванням низки обмежень, серед яких — часові вікна, обмеження вантажопідйомності та маршрутні обмеження.

У третьому розділі розроблено проектні рекомендації щодо побудови ефективної транспортної системи доставки світильників із застосуванням принципів мурашиної логістики. Запропоновано заходи із впровадження даного

підходу на підприємстві ТОВ «Шредер», що сприятиме оптимізації витрат, підвищенню рівня сервісу та конкурентоспроможності компанії на внутрішньому й міжнародному ринках.

Четвертий розділ присвячено питанням охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях. Розглянуто правила безпечного виконання завантажувально-розвантажувальних робіт світлотехнічних виробів, а також дії працівників у випадку виникнення пожеж на підприємствах світлотехнічного комплексу.

У загальних висновках підсумовано результати дослідження, обґрунтовано доцільність використання алгоритмів мурашиної логістики для вирішення задач маршрутизації та наведено практичні рекомендації щодо їх застосування у сфері організації перевезень.

Практична цінність роботи полягає у можливості впровадження розробленого методу в логістичну діяльність підприємства ТОВ «Шредер», що дозволить знизити витрати на транспортування та забезпечити більш ефективну взаємодію з клієнтами.

Обсяг кваліфікаційної роботи складає 78 сторінок, містить 8 рисунків, 3 таблиць та 18 джерел у списку використаних посилань.

Ключові слова: логістика; транспортна система; маршрутизація; комбінаторна оптимізація; мурашиний алгоритм; однотипний вантаж; світлотехнічні вироби

ВСТУП

Сучасні умови розвитку транспортних перевезень характеризуються стрімким зростанням обсягів вантажопотоків, що, у свою чергу, зумовлює підвищення актуальності задачі оптимізації маршрутів доставки. Одним із ключових викликів логістики є необхідність мінімізувати витрати на транспортування та забезпечити своєчасне постачання вантажів споживачам відповідно до концепції «just-in-time». Ефективна маршрутизація транспортних засобів набуває особливого значення для підприємств, оскільки безпосередньо впливає на собівартість перевезень, якість обслуговування клієнтів та конкурентоспроможність компанії.

Задача маршрутизації транспортних засобів (Vehicle Routing Problem, VRP) належить до класу NP-важких задач комбінаторної оптимізації, оскільки кількість можливих варіантів рішень зростає експоненційно із збільшенням кількості клієнтів та транспортних одиниць. Точні методи розв'язання цієї задачі (наприклад, методи гілок і меж, динамічного програмування чи цілочислового програмування) демонструють високу точність, проте вимагають значних обчислювальних ресурсів і часу, що робить їх малопридатними для задач великого масштабу. Саме тому основний акцент сучасних досліджень переноситься на евристичні та метаевристичні підходи, які дозволяють отримати близькооптимальні рішення за прийнятний для практики проміжок часу. Серед них особливе місце займають генетичні алгоритми, алгоритми рою частинок, мурашині алгоритми та методи імітації відпалу, які широко застосовуються у транспортній логістиці.

На практиці найбільш поширеними є задачі оптимізації маршрутів доставки вантажу до різних клієнтів, які ускладнюються необхідністю врахування завантаження транспортних засобів. Це призводить до поєднання задачі маршрутизації з задачею пакування вантажу всередині транспортного засобу, причому кожна з них окремо вже належить до NP-важких. У таких умовах компанія має враховувати низку додаткових факторів: різні типи

вантажопідйомності транспортних засобів, форму та габарити вантажу (прямокутні контейнери, циліндричні ємності тощо), наявність одного або кількох складів (депо), з яких починається та завершується кожен маршрут.

Крім того, у реальних умовах доставки вантаж може бути призначений для кількох клієнтів, і при цьому попит окремого клієнта може перевищувати вантажопідйомність одного автомобіля. У такій ситуації необхідно передбачати можливість поділу замовлення між кількома транспортними засобами або виконання багаторазових поїздок. Також важливим є фактор часу доставки: компанія може встановлювати часові вікна, протягом яких вантаж має бути доставлений клієнтам. Це зумовлює необхідність врахування обмежень на зупинки транспортних засобів, графіків завантаження та розвантаження, а також специфічних вимог клієнтів.

Ще одним аспектом є дорожні умови. На маршрути впливають якість дорожнього покриття, обмеження швидкості, наявність платних ділянок та можливі транспортні затори. Це означає, що при побудові оптимальних маршрутів необхідно застосовувати комплексний підхід, який включає моделювання дорожньої мережі, прогнозування транспортних потоків і врахування динамічних факторів. Важливим напрямком розвитку є також інтеграція алгоритмів маршрутизації з інформаційними системами моніторингу руху транспортних засобів у режимі реального часу, що дозволяє оперативно коригувати маршрути у випадку непередбачених обставин.

Таким чином, задача раціональної організації перевезень включає цілу низку взаємопов'язаних підзадач: маршрутизацію транспортних засобів, оптимальне завантаження вантажів, врахування дорожніх та часових обмежень, координацію роботи складів і депо. Головною метою є мінімізація сукупних витрат на транспортування при одночасному підвищенні рівня обслуговування клієнтів. У цьому контексті розвиток метаевристичних алгоритмів та інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень є ключовим напрямом наукових досліджень та практичних впроваджень у сфері сучасної логістики.

1 ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Аналіз діяльності підприємства та об'єктів виробництва

Schröder - світовий лідер у галузі розумних рішень для зовнішнього освітлення та внутрішнього промислового і спортивного освітлення. Компанія, заснована в 1907 році, присутня в понад 70 країнах світу на 5 континентах. В Україні представлена ТОВ Шредер, виробничі потужності знаходяться у м. Тернополі.

ТОВ "Шредер" - це товариство з обмеженою відповідальністю, що займається виробництвом електричного освітлювального обладнання. Компанія зареєстрована за адресою: вулиця Микулинецька, 46-Б, Тернопіль, Тернопільська область, Україна, 46000. Її код ЄДРПОУ 00231024. Основним видом діяльності є виробництво електроосвітлювального обладнання (КВЕД 27.40), а також ремонт і технічне обслуговування електричного устаткування (КВЕД 33.14), будівництво споруд електропостачання та телекомунікацій (КВЕД 42.22), електромонтажні роботи (КВЕД 43.21), оптова торгівля електротоварами та меблями (КВЕД 46.43, 46.47) та діяльність у сфері архітектури (КВЕД 71.11). Фінансовий стан (за даними OpenDataBot станом на 2024–2025 роки)

Статутний капітал: ~337,13 млн грн Опендатабот, Clarity Project.

Виторг 2024: ~2,461 млрд грн Опендатабот.

Чистий прибуток 2024: ~177,8 млн грн Опендатабот.

Активи станом на кінець 2024: ~1,423 млрд грн

Засновником є Акціонерне Товариство "Шредер" (Бельгія).

За даними YouControl, підприємство має 0 одиниць автотранспорту у користуванні.

Згідно з Work.ua — компанія входить в галузь машинобудування, штат — близько 250–1000 співробітників; актуальні вакансії: бухгалтер, ЗЕД-менеджер, працівник складу/водій навантажувача.

На платформі Bau.ua вказано, що ТОВ «Шредер» спеціалізується на виробництві вуличних, паркових, промислових та спеціальних світильників, реалізації систем керування освітленням та виконанні проектів освітлення

Об'єктами дослідження є продукція підприємства серія вуличних світильників ІЗІЛЮМ - серія надійних і компактних вуличних LED світильників, розроблених з акцентом на зручність монтажу та технічного обслуговування. Ґрунтуючись на досвіді роботи компанії Schröder у вуличному та декоративному освітленні міст, світильник ІЗІЛЮМ пропонує найкраще для міської влади, комунальних підприємств, підрядників і жителів міста.

Доступний у різних розмірах та з різною кількістю світлодіодів, ІЗІЛЮМ є добре продуманим, ефективним рішенням для різного роду застосувань в зовнішньому освітленні: від маловисотних установок в парках, житлових кварталах чи велодоріжках до головних доріг і проспектів. Готовий до мережевого підключення світильник пропонує реалістичну платформу для впровадження «розумних міст». Легка оптимізована конструкція ІЗІЛЮМУ мінімізує викиди вуглецю на кожному етапі життєвого циклу продукту. ІЗІЛЮМ - кращий в своєму роді з точки зору дотримання принципів циркулярної економіки.

ІЗІЛЮМ є найкращим в своєму роді з точки зору циркулярної економіки. Про це свідчать результати оцінки для маркування «Circle Light», проведеної за 12-ма суворими критеріями. Окрім фотометричної ефективності, висока оцінка ІЗІЛЮМ обумовлена 6-ма критеріями циркулярної економіки:

- міцна механічна конструкція, що забезпечує високий рівень IP та IK;
- конструкційні матеріали, повністю придатні до вторинної переробки;
- менше 5 операцій для повного розбирання світильника;
- безінструментальний доступ до блоку управління, що спрощує технічне обслуговування;
- універсальне підключення зі стандартним роз'ємом та
- очікуваний термін служби 25 років.

TECEO GEN2 – удосконалена версія світильника, визнаного за еталон багатьма незалежними організаціями. Перше покоління цього успішного світильника дозволило тисячам міст покращити рівень освітлення, заощадити енергію та зменшити свій вплив на екологію. Завдяки широкому діапазону світлового потоку, численним світлорозподілам та можливостям керування світильником, TECEO GEN2 забезпечує ідеальне рішення для різноманітних застосувань: від освітлення велосипедних доріжок, площ і автостоянок до освітлення житлових кварталів, вулиць міст, великих проспектів і автострад. Універсальний вузол кріплення для консольного та вінцевого монтажу дозволяє легко комбінувати світильник зі стандартними опорами, оригінальними кронштейнами і настінним кріпленням.

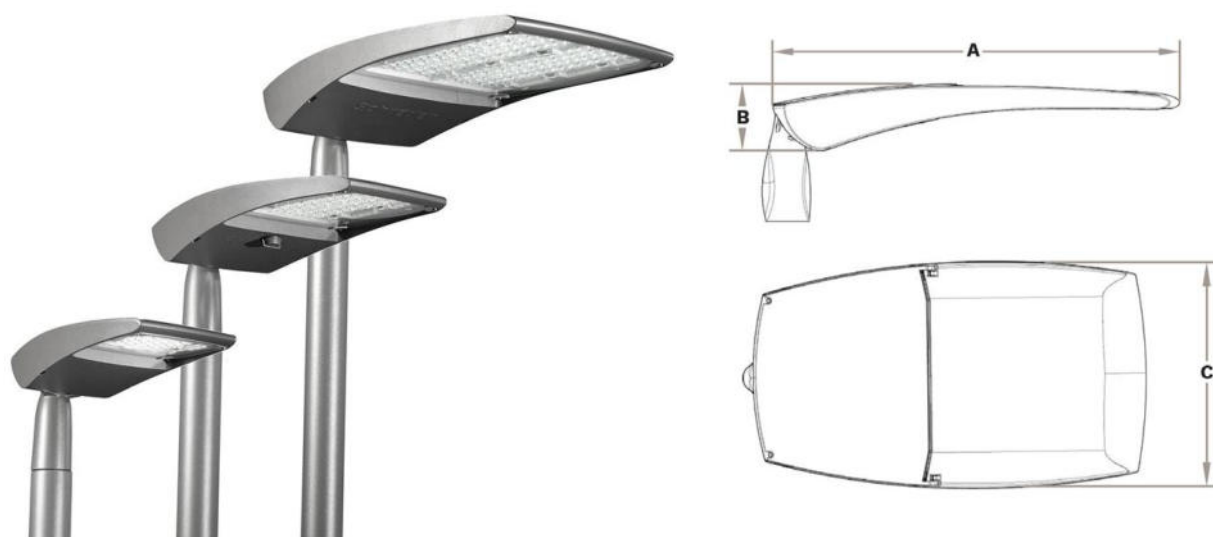


Рисунок 1.1 – Світильник TECEO GEN2

Таблиця 1.1 – Габарити та вага об’єктів дослідження

РОЗМІРИ ТА КРІПЛЕННЯ	
AxBxC (мм inch)	TECEO S : 450x99x252 17.7x3.9x9.9 TECEO GEN2 1 : 580x107x310 22.8x4.2x12.2 TECEO GEN2 2 : 740x118x427 29.1x4.6x16.8
Bara (кг lbs)	TECEO S : 5.1 11.2 TECEO GEN2 1 : 7.9 17.4 TECEO GEN2 2 : 14.2 31.2

Фотоелементи або датчики денного світла вмикають світильник, як тільки рівень природного освітлення стає недостатнім. Для безпеки та комфорту

громадського простору, світильник може програмуватися на включення під час шторму, в похмурий день (на критичних ділянках) або лише вночі.

У місцях з невеликою нічною активністю, рівень освітлення можна зменшити до мінімуму більшу частину часу. Використання пасивних інфрачервоних датчиків (PIR) дозволяє підвищити рівень освітлення у разі виявленні пішоходу чи транспортного засобу. Кожен світильник можна налаштувати індивідуально за кількома параметрами, такими як: мінімальний та максимальний світловий потік, час реагування, тривалість періоду вмикання/вимикання. PIR датчики можуть бути використані в автономній та взаємодіючій мережах освітлення.

1.2 Опис транспортної проблеми та окреслення шляхів її вирішення

У сучасних ринкових умовах у зв'язку із збільшенням обсягу вантажоперевезень зростає роль сфери транспортно-логістичних послуг. Більшість логістичних витрат посідає саме транспортну логістику, до 50%. В умовах сучасної ринкової конкуренції необхідно розвивати та вдосконалювати транспортну галузь, тому посилення ролі сфери транспортно-логістичних послуг є основною тенденцією багатьох розвинутих країн світу.

В Україні ринок логістичних послуг представлений чотирма сегментами. Це вантажоперевезення, складування та дистрибуція, експедиторські послуги та управління ланцюгами поставок.

Велика частка українського ринку логістичних послуг посідає саме транспортну логістику (87,3% від обсягу ринку української логістики). Це з величезної території країни (17,1 млн. км²).

Тому особливо актуальним є завдання оптимізації доставки вантажу різним клієнтам за рахунок мінімізації транспортних витрат шляхом прямування вантажів.

Згідно з транспортною стратегією на період до 2030 р. логістика є найважливішою складовою. Слід зазначити, що у розвинених країн в розвитку

логістики виділяються величезні матеріальні кошти, що дозволяє їх економікам підтримувати конкурентоспроможність високому рівні.

Наприклад, США на логістику припадає приблизно 9,9% ВВП. До початку 2009 року промисловість США витратила 554 млрд. доларів на вантажні перевезення, понад 332 млрд. доларів на складування та утримання запасів, близько 40 млрд. доларів на адміністративні, комунікаційні та управлінські види діяльності, пов'язані з логістикою [1]. Загалом витрати становили 926 млрд. доларів. Іншими словами, вкладення у сферу транспортно-логістичних послуг оцінюються в сотні мільярдів доларів.

Загалом транспортом України перевезено 354,1 млн тонн вантажів — це на 7,8 % більше ніж у 2023-му, але на 43 % менше, ніж у довоєнному 2021-му (621,3 млн тонн). За перше півріччя 2024 року перевезено 178,8 млн т, що на 18,6 % більше, ніж у 2023-му.

Розподіл за видами транспорту (тонни):

Залізничний транспорт – 174,9 млн т (на 17,9 % більше, ніж у 2023).

Автомобільний транспорт – 128,8 млн т (на 1,1 % більше, ніж у 2023).

Водний транспорт – 2,2 млн т (легке зменшення; –0,1 % порівняно із 2023; у 2021-му був удвічі більшим).

Дані щодо трубопровідного та авіаційного транспорту у 2024 році відсутні.

3. Оцінка часток у відсотках

Для оцінки взаємних часток беремо суму перевезених вантажів (174,9 + 128,8 + 2,2 $\approx$ 305,9 млн т) –це приблизний зріз, оскільки інших даних бракує.

Залізниця: $174,9 / 305,9 \approx 57 \%$

Авто: $128,8 / 305,9 \approx 42 \%$

Водний: $2,2 / 305,9 \approx 1 \%$

Ці цифри свідчать, що залізничний транспорт продовжує домінувати в вантажообігу, автомобільний – друга за значимістю ланка, а водний – майже маргінальний (через блокади та інфраструктурні виклики).

З 2021 до 2024 років частка залізниці зросла (з $\approx 51\%$ до $\approx 57\%$), автотранспорт – значно виріс (з $\approx 32\%$ до $\approx 42\%$), а водний – залишився стабільно низьким, хоча тони зменшились у рази.

Фокус на залізниці та автотранспорті: у 2024 році ці два моди обслуговували майже весь вантажообіг ($\approx 99\%$ та $\approx 1\%$ водний).

Подальша модернізація логістики важлива: зростання автотранспорту може створювати навантаження на дороги; водний транспорт – потенціал для розвитку, але потребує відновлення.

Відсутність даних по трубопроводах і авіації: їх вплив на вантажообіг у 2024 році залишається невідомим, і це обмежує повноту аналізу.

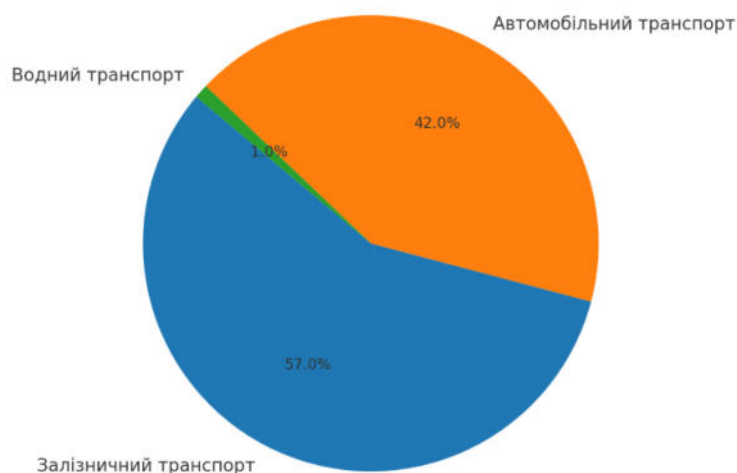


Рисунок 1.1 – Частка різних видів транспорту у вантажообігу в Україні у 2023 році

Варто зазначити, що в даній структурі товарообігу обчислюється з урахуванням внутрішніх та міжнародних перевезень.

З малюнка 1.1 видно, що у 2023 р. більшу частину вантажообігу країни становлять залізничний та трубопровідний транспорт. Повітряний транспорт менш популярний через високу вартість. В даний час, за оцінкою експертів, лише близько 5% українських компаній мають розвинену стратегію в галузі логістики. Тому логістичні витрати в ціні товару в Україні можуть досягати 30%, тоді як у США та Західній Європі ця величина становить лише близько 13% [1].

Також доцільно враховувати вплив економічної кризи та санкцій на стан логістики. Економічна криза, яка почала розвиватися в Україні в 2022 році, значною мірою торкнулася вітчизняного ринку транспортно-логістичних послуг. За даними статистики, обсяг перевезень на автомобільному транспорті впав на 7% до 5 млрд. тонн, водночас на морському транспорті він зріс на 15% до 18,3 млн. тонн. При цьому обсяг навантаження на залізничному, внутрішньому водному, повітряному та трубопровідному транспорті залишився без змін.

У умовах кризи особливо актуальна проблема не виправдано високих транспортних витрат, які, з урахуванням великих відстаней нашої країни, стримують розвиток української економіки. На сьогоднішній день саме логістика є потужним засобом розвитку транспортної галузі в Україні незважаючи на те, що для сучасних ринкових відносин характерне посилення та посилення конкурентної боротьби.

Застосування сучасного логістичного інструментарію, на думку зарубіжних та українських фахівців та експертів, дозволяє знизити загальні економічні витрати в середньому на 15-35%, а транспортні витрати – приблизно на 25%.

Таким чином, транспортна логістика є найважливішою складовою усієї сфери транспортно-логістичних послуг. Саме за рахунок оптимізації транспортної логістики можна підвищити ефективність транспортних перевезень за рахунок скорочення витрат на перевезення товарів та час обслуговування клієнтів. Для досягнень цієї мети в сучасній транспортній логістиці застосовуються автоматизовані системи для комп'ютерної обробки, зберігання та візуалізації вихідних даних (замовлення, параметри ТЗ, дані про клієнтів, склади), а також для вирішення завдань у сфері транспортно-логістичних послуг.

Додатково при вирішенні завдань транспортної логістики враховуються такі аспекти доріг, що використовуються:

1. Обмеження швидкості.
2. Рекомендована швидкість.

3. Вартість доріг – на деяких ділянках може братися плата за проїзд.

4. Поточні дані: - Наявність ремонтних робіт; – Поточні дані щодо проходження ділянки іншими учасниками дорожнього руху.

5. Законодавчі обмеження.

6. Обмеження за вагою.

Резюмуючи сказане вище, слід зазначити, що одним із способів зниження витрат на транспортну логістику є складання раціональних маршрутів доставки вантажу клієнтам з можливістю одночасного обліку раціонального розміщення вантажу всередині транспортних засобів. При цьому

Виникає необхідність оптимізувати стадію складання маршрутів доставки вантажу різним клієнтам.

Висновок: в умовах сучасної жорсткої конкуренції організаціям, які здійснюють транспортні перевезення, необхідно забезпечити стійке становище на ринку за рахунок вирішення широкого спектра завдань оптимізації в областях транспортних перевезень, переміщення та логістики. Одним із таких завдань є завдання доставки вантажу різним клієнтам. Застосування методів, спрямованих на зниження транспортних витрат дозволить зменшити фінансові витрати організації.

Для вирішення завдання доставки однотипного вантажу різним клієнтам необхідно розглянути методи вирішення задач маршрутизації МС з метою виявлення основних обмежень, що належать до поставленого завдання.

1.3 Особливості галузі автомобільних перевезень в період воєнного стану в Україні

Стан галузі автомобільних перевезень в Україні у період з 2022 до середини 2025 року характеризується низкою значних трансформацій, викликаних комплексом внутрішніх та зовнішніх чинників. Починаючи з лютого 2022 року, коли в країні розпочалася повномасштабна війна, транспортна інфраструктура опинилася під надзвичайним тиском. Автомобільні дороги,

особливо у найбільш постраждалих регіонах, зазнали руйнувань через активні бойові дії. Це унеможливило стабільну роботу логістичних ланцюгів, змусило зосередитися на задіянні запасних маршрутів, введенні нового режиму організації руху та відновленні шляхів після мінування. Водночас держава та міжнародні партнери зосередили зусилля на забезпеченні працездатності критично важливої інфраструктури. Надзвичайно важливим стало відновлення ключових магістралей, які використовуються для внутрішнього пересування, а також для експорту продукції та імпорту гуманітарних вантажів. Були розроблені альтернативні маршрути, що обходять активні зони бойових дій, включаючи напрямки через західну Україну, які стали більш завантаженими. Обсяг автомобільних перевезень скоротився, проте переорієнтація на нові шляхи дала можливість підтримувати функціонування торгівлі та логістики. Власники автотранспортних компаній почали активно інвестувати в модернізацію техніки, обладнуючи її системами навігації, бронюванням, а також засобами захисту – у відповідь на нові ризики.

З 2023 року, як тільки змінилася оперативна ситуація на фронті, частина трас, раніше закритих або пошкоджених, поступово відкривалася. У той самий час постало питання захисту інфраструктури: дороги, мости та шляхопроводи, які зазнали руйнувань, потребували масштабних ремонтів, що ускладнювалося складністю логістики та безпековою обстановкою. Найбільше це вплинуло на міжнародні транзитні коридори, що пролягали через східні й південні регіони. У відповідь бізнес та державні органи розробляли стратегії розвитку інфраструктури, зокрема впровадження мобільних ремонтних бригад, застосування інноваційних матеріалів для пришвидшеного відновлення проїзду та оптимізації роботи вантажних терміналів. Інвестувалося у модернізацію логістичних хабів на заході країни, що дозволило значно підвищити їхню пропускну здатність. Нарешті, у другій половині 2023 року інтенсивність автомобільних перевезень дещо збільшилася, хоча досі значно поступалася довоєнному рівню. Разом із тим ускладнений доступ до портів на півдні змусив бізнес активніше використовувати транзит через Польщу, Словаччину,

Угорщину, Румунію. Це сприяло розвитку міжнародної кооперації у сфері логістики, появі нових маршрутових зв'язків, ефективнішому використанню залізнично-автомобільних мультимодальних перевезень.

У 2024 році автомобільні перевезення в Україні все більше адаптувалися до умов воєнного стану. Бізнес і державні структури масштабували практики військово-цивільного співробітництва в транспортній сфері. Слід зазначити, що чимало автотранспортних підприємств були мобілізовані або втратили власні ресурси, а інші навпаки розширили свою діяльність, надаючи послуги з перевезення вантажів для потреб армії, евакуації постраждалих і гуманітарної допомоги. У країні активно залучалися до співпраці зарубіжні партнери, які надавали обладнання, технічну підтримку, залучали нові транспортні підприємства до роботи. Виробництво та постачання запчастин, паливно-мастильних матеріалів, шин, ремкомплектів здійснювалося за координацією з урядом, щоб забезпечити безперервну роботу автоперевізників. Особливо важливим стало впровадження систем цифрового моніторингу руху, які дозволили в реальному часі контролювати переміщення вантажів, уникати блокувань або небезпечних ділянок, вибирати безпечні маршрути. Цифровізація дозволила зменшити втрати, покращити документаційний обіг, оптимізувати маршрути та підвищити ефективність роботи компаній.

У 2025 році, станом на серпень, автомобільна галузь демонструє ознаки стабілізації та поступового повернення до нормального функціонування, хоч і не на довоєнному рівні. Внутрішні перевезення виконуються значною мірою у межах регіонів, а міжнародні маршрутні ланцюги переорієнтовані на західне сполучення. За підтримки держави здійснюється продовження відновлення пошкодженої інфраструктури – дороги, мости, автостради, стабільно функціонують ремонтні пункти. Водночас спостерігається зростання конкуренції у секторі. Українські автоперевізники розширюють мережу партнерств з європейськими та середземноморськими логістичними операторами, активно беручи участь у створенні мультимодальних ланцюгів доставки. Крім того, збільшується частка «зеленої» логістики – транспортних

ініціатив, пов'язаних з використанням більш екологічних моделей автомобілів, оптимізацією маршрутів для зменшення викидів, застосуванням альтернативних видів палива або гібридних систем. Цьому сприяють міжнародні донори, які надають фінансування й технічну допомогу для переходу на більш екологічні технології у транспорті. Автоперевізники також обирають інші форми співпраці, розвиваючи послуги вантажного каршерингу, «мов-ас-і-сервіс» рішення, орієнтовані на миттєві потреби бізнесу, зокрема малих постачальників. Разом із тим залишаються виклики. Інфраструктурна повільність, нестача досвідченого персоналу, висока вартість логістики й паливно-енергетична залежність створюють перешкоди. Крім цього, зміни в законодавстві, митні процедури, періодичні коливання безпеки у прикордонних регіонах провокують додаткові витрати та ускладнення.

У загальному підсумку, еволюція галузі автомобільних перевезень в Україні від 2022 до серпня 2025 року пройшла шлях від крайньої нестабільності під час активних бойових дій, через адаптацію, цифровізацію та часткову перезавантаження логістичних ланцюгів, до поступової стабілізації та європейської інтеграції у сфері вантажних та пасажирських перевезень. Відповідь на складні виклики полягала у швидкій переорієнтації маршрутів, впровадженні технологій, розвитку партнерств, підтримці державних і донорських програм, а також у кроковому переході до більш «зелених» і ефективних рішень. Майбутнє галузі залежить від продовження інвестування у відбудову та модернізацію інфраструктури, удосконалення нормативної бази, підтримки підприємців, адаптації до нових логістичних форматів і трендів – у напрямку мультимодальності, цифровізації та екологізації.

1.4 Класифікація існуючих методів розв'язання задач маршрутизації транспортних засобів

Завдання маршрутизації ТЗ ставляться до класу цілих завдань математичного програмування. Мета завдань маршрутизації полягає у мінімізації транспортних витрат, пройденої відстані чи часу доставки вантажу.

Завдання маршрутизації транспортних засобів (Vehicle Routing Problem, VRP) представляють широкий клас проблем, які часто зустрічаються на практиці.

Прикладами завдань маршрутизації ТЗ є такі завдання: перевезення нафтохімічної продукції маршрутами мінімальної вартості; доставка хліба від хлібозаводу до магазинів; доставка цифрового, серверного обладнання, джерел безперебійного живлення, антен, контролерів, а також супутніх матеріалів на телестанції; пасажирські перевезення; залізничні перевезення та ін.

Вперше завдання маршрутизації транспортних засобів (Vehicle Routing Problem, VRP) було запропоновано в 1959 авторами Dantzig і Ramser в [5]. У цій роботі розглядалося завдання диспетчеризації вантажівок, у якій потрібно знайти оптимальні маршрути доставки продукту парком бензовозів від кінцевої станції магістрального трубопроводу до великої кількості терміналів. Через кілька років, у 1964 році, вперше було запропоновано евристичні методи для вирішення задачі маршрутизації MC авторами Clark та Wright у роботі. У 1981 році автори Lenstra та Rinnooy Kan показали, що ці завдання маршрутизації є NP-важкими.

У задачі маршрутизації ТЗ є парк ТЗ і безліч клієнтів, попит яких необхідно задовольнити. ТЗ мають загальну базу, звану депо (складом), що є початком та кінцем кожного маршруту. Задано матрицю невід'ємних цін або відстаней між клієнтами. Метою завдання VRP є знаходження маршруту для кожного транспортного засобу, такого, щоб усі клієнти були обслужені рівно одним транспортним засобом і щоб загальна вартість маршрутів була мінімальною. На рисунку 1.2 наведено ілюстрацію задачі маршрутизації ТЗ.

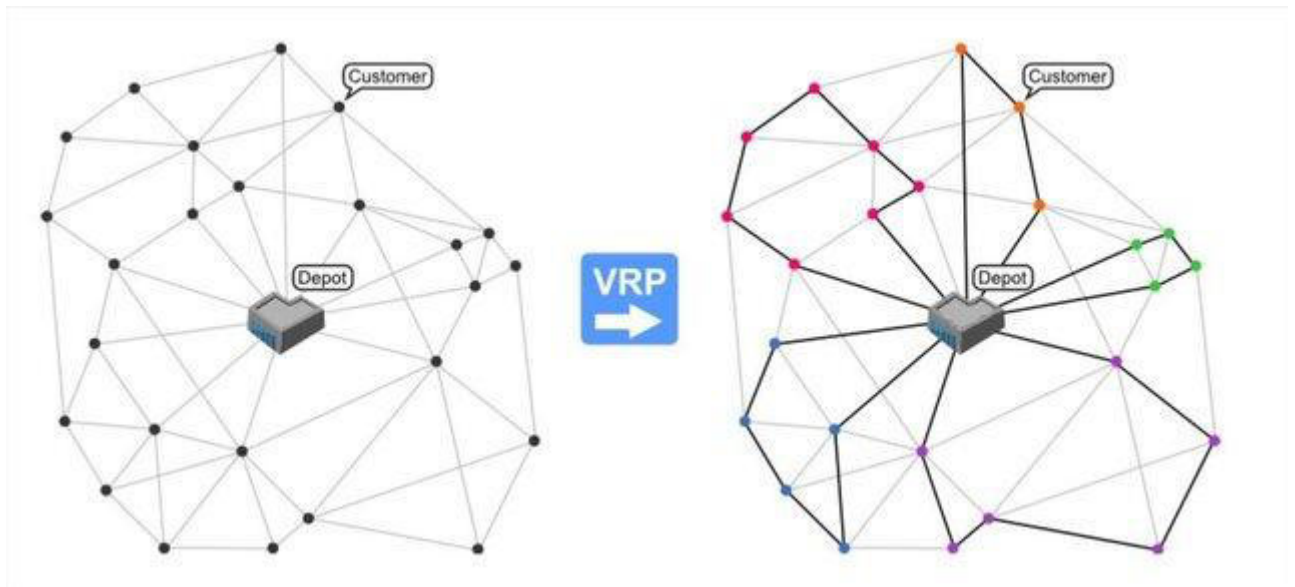


Рисунок 1.2 – Ілюстрація задачі маршрутизації ТЗ

Розглянемо наступну класифікацію моделей завдань VRP, запропоновану в роботі P. Toth та D. Vigo [16].

1. Завдання маршрутизації ТЗ з урахуванням вантажопідйомності (CAP): кожне ТС має обмежену вантажопідйомність. Це завдання вперше було запропоновано Dantzig і Ramser у роботі [5]. Різновидами завдання CVRP є завдання 2L-CVRP, вперше сформульована Iori та ін [11], і 3L-CVRP, запропонована Gendreau та ін [8], в яких крім вантажопідйомності ТЗ враховується розміщення вантажу всередині ТЗ.

У задачі 2L-CVRP – двомірне розміщення, завдання 3L-CVRP – тривимірне розміщення.

2. Завдання маршрутизації МС з тимчасовими вікнами (VRPTW): у кожного клієнта є так зване «тимчасове вікно», в яке він повинен бути обслужений [6].

3. Завдання маршрутизації МС з безліччю депо (Multiple Depot Vehicle Routing Problem, MDVRP): є кілька депо обслуговування клієнтів.

Це завдання вперше було запропоновано Laporte, Nobert і Arpin у роботі [13].

4. Завдання маршрутизації ТЗ з роздільною доставкою (Split Delivery Vehicle Routing Problem, SDVRP): кожен клієнт може бути обслуговується

одночасно кількома ТС. Це завдання вперше було запропоновано Dror і Trudeau у роботі [7].

5. Періодичне завдання маршрутизації ТЗ (Periodic Vehicle Routing Problem, PVRP): заданий період планування у розмірі декількох днів (тимчасовий горизонт), коли клієнти відвідуються з різною частотою, заданою для кожного клієнта. Це завдання вперше було запропоновано Beltrami і Bodin у роботі [3].

6. Завдання маршрутизації МС з негайним поверненням товарів (Vehicle Routing Problem with Pick-up and Delivery, VRPPD): клієнти можуть повертати деякі товари в депо. Це завдання вперше було запропоновано Casco, Golden і Wasil у роботі [4].

7. Завдання маршрутизації МС з поверненням товарів (Vehicle Routing Problem with Backhauls, VRPB): клієнти можуть повертати деякі товари депо, але тільки після того, як весь товар буде доставлений клієнтам [15]. Це завдання вперше було запропоновано Casco, Golden і Wasil у роботі [4] разом із завданням VRPPD.

8. Завдання маршрутизації ТЗ з можливістю дозавантаження (VRP): МС можуть додатково завантажитися на маршруті в проміжних пунктах-складах. Це завдання вперше було запропоновано Bard, Huang і Jaillet у роботі [2].

9. Завдання маршрутизації МС з випадковими даними (Stochastic Vehicle Routing Problem, SVRP): деякі компоненти завдання (кількість та попит клієнтів, відстані між містами та клієнтами) можуть мати випадкову поведінку [9]. Це завдання вперше було запропоновано Dantzig і Ramser у роботі [5].

Пошук розв'язків задачі маршрутизації МС розпочався у 60-ті роки ХХ століття. Нині існує чимало алгоритмів на вирішення завдання маршрутизації МС. Здебільшого це евристичні методи. Як говорилося вище, завдання маршрутизації МС є NP-важким завданням, тому найактуальнішим напрямом дослідження є розробка евристичних алгоритмів. Відомі точні методи вирішення задачі маршрутизації МС, як, наприклад, метод гілок та кордонів, але вони вимагають експоненційного часу обчислень. У задачі комівояжера з числом

вершин, більше 30, вже важко знайти рішення методом гілок і кордонів в силу експоненційного зростання часу обчислень, а в задачі маршрутизації МС безліч варіантів можливих рішень значно більше, ніж у задачі комівояжера з однаковою кількістю вершин. Останнім часом приділяється велика увага до розробки так званих метаверистичних алгоритмів.

Розглянемо наступну класифікацію методів розв'язання задач VRP, запропоновану у роботі Laporte [14]:

1. Точні методи. В основі точних методів лежить ідея організованого перебору допустимих рішень. Точні методи побудови оптимального рішення вимагають експоненційного часу обчислень, не прийнятного практично.

2. Евристичні та наближені методи. Точні методи не дозволяють отримати рішення задачі великої розмірності за поліноміальний час, тому велика увага приділяється розробці наближених та евристичних методів. У цих методах завдання зазвичай розбивається на частини: спочатку ведеться пошук деякого початкового рішення, та був робляться спроби поліпшення початкового рішення [9].

2.1. Конструктивні алгоритми: поступово будують рішення, крок за кроком додаючи до нього новий компонент.

2.2. Двофазні (кластерні) алгоритми: задача вирішується у два етапи: спочатку клієнти групуються в кластери, потім для кожного отриманого кластера вирішується задача маршрутизації.

Можна виділити дві групи двофазних алгоритмів:

1. Алгоритми, які першому кроці виконують кластеризацію, т. е. поділяють безліч клієнтів на кластери кожному за ТЗ, другою кроці виконують пошук вирішення завдання маршрутизації ТЗ кожному кластеру.

2. Алгоритми, які на першому кроці виконують пошук розв'язання задачі маршрутизації ТЗ для всіх клієнтів вихідної множини, на другому кроці – розбиття отриманого маршруту на кластери, призначені для кожного ТЗ.

2.3. Алгоритми покращення: спочатку будується деяке початкове рішення, а потім робляться спроби поліпшення початкового рішення шляхом обміну вершинами (ребрами) всередині кожного маршруту або між маршрутами.

3. Метаевристики. Метаевристика (від грецького «еврика» – «знайти» і «мета» – «вище, більш рівні») – це різновид евристичного алгоритму. Оскільки в літературі немає чіткого визначення цього нового типу

алгоритмів, перерахуємо їх основні властивості. Метаевристики:

- керують процесом пошуку;
- так використовують простори пошуку, щоб знайти оптимальне рішення;
- метаевристики – недетерміновані алгоритми;
- використовують механізми, що дозволяють не застрягати у локальному оптимумі;
- можуть бути описані на абстрактному рівні;
- не є проблемно-орієнтованими.

Прикладами метаевристичних алгоритмів є: алгоритм пошуку із заборонами (Tabu Search, TS); – алгоритм імітації відпалу (Simulated Annealing, SA); – Генетичний алгоритм (Genetic Algorithms, GA); – Еволюційний алгоритм (Evolutionary Computation, EC); – Алгоритм на основі мурашиних колоній (Ant Colony Optimization, ACO); – Алгоритм ітераційного локального пошуку (Iterative Local Search, ILS); – алгоритм пошуку зі змінною околицею (Variable Neighborhood Search, VNS); – ймовірнісний жадібний алгоритм (GRASP); – Алгоритм спрямованого локального пошуку (Guided Local Search, GLS).

Також двома важливими відмітними механізмами метаевристика є інтенсифікація пошуку і диверсифікація пошуку. У механізмі інтенсифікації метаевристика веде пошук рішень у сферах простору пошуку з високоякісними рішеннями. У механізмі диверсифікації метаевристика веде пошук хороших рішень у ще недосліджених областях простору пошуку, наприклад, коли відбувається поліпшення цільової функції.

Слабкою певною мірою стороною метаевристик є наявність великої кількості параметрів у їх описі. Насправді вирішення завдань виникає у підборі

значень цих параметрів, іноді навіть кожного нового набору, внаслідок чого ускладнюється використання евристичних алгоритмів. Сильною стороною метаевристичних алгоритмів є можливість подолання локального оптимуму у процесі пошуку.

1.5 Аналіз програмних рішень задач маршрутизації транспортних засобів

На сьогодні ринок програмного забезпечення, орієнтованого на вирішення завдань маршрутизації транспортних засобів, характеризується високим рівнем розвитку та різноманітністю доступних рішень.

До програмних систем, призначених для побудови маршрутів транспортних засобів, висувається низка ключових вимог. По-перше, оперативність обробки даних: чим швидше користувач отримує результат, тим ефективніше здійснюється управління логістичними процесами. По-друге, універсальність, тобто здатність програмного комплексу застосовуватися для вирішення різних типів задач у сфері маршрутизації. По-третє, точність результатів, оскільки більш коректні обчислення забезпечують підприємству вищі економічні та організаційні переваги. Нарешті, важливим критерієм є стабільність роботи, адже у практичних умовах частіше цінується програмне рішення, яке здатне забезпечувати прийнятний рівень якості для всіх вхідних даних, ніж те, що демонструє відмінні результати для обмеженої кількості випадків, але суттєво погіршує показники для решти.

Комплексність вимог до сучасних систем маршрутизації транспортних засобів не дозволяє реалізувати їх одночасно та в повному обсязі. Тому актуальним завданням постає пошук збалансованого рішення, яке б поєднувало високу швидкість роботи алгоритмів із прийнятною якістю отриманих результатів. У науковій та прикладній літературі основний акцент робиться на продуктивності програмних засобів і точності побудованих маршрутів, тоді як

інші аспекти, наприклад інтеграційні можливості чи стабільність роботи в різних умовах, залишаються менш детально розглянутими.

З метою дослідження було проаналізовано найбільш відомі на ринку системи управління транспортною логістикою, що відповідають базовим вимогам до планування перевезень [10]. Серед них лише обмежене коло програмних рішень, а саме RoutePlanner (ArcGIS, ESRI), IBM ILOG Transportation Analyst (IBM) та Roadnet Transportation Suite (Roadnet Technologies), забезпечують побудову оптимізованих маршрутів руху транспортних засобів. Це свідчить про те, що навіть серед спеціалізованого програмного забезпечення повноцінна підтримка маршрутизації реалізована лише частково.

Функціональна структура зазначених програм має низку спільних рис. До базових можливостей належать ведення обліку заявок на доставку, формування зведеної звітності, автоматичне створення декількох маршрутів одночасно, розподіл замовлень між транспортними одиницями та врахування їхньої вантажопідйомності. Водночас більш детальний аналіз показує, що конкурентні переваги систем полягають у наявності специфічних функцій, які значно підвищують їхню практичну цінність.

Так, RoutePlanner вирізняється широкими можливостями геокодування та навігаційного супроводу, тоді як IBM ILOG Transportation Analyst демонструє високу інтегративність із корпоративними інформаційними середовищами (1C, Excel, MS SQL Server, Oracle, Access). Своєю чергою, Roadnet Transportation Suite пропонує більш гнучке врахування часових вікон, роздільної доставки, багатоскладових логістичних схем, а також можливість оптимізації розміщення вантажу безпосередньо в транспортному засобі.

Крім того, окремі системи підтримують використання додаткової інформації про дорожню інфраструктуру, включаючи дані про затори, якість та вартість дорожнього покриття, наявність об'єктів сервісної інфраструктури (заправки, готелі, заклади харчування). Такий підхід дозволяє формувати

маршрути не лише з урахуванням просторово-часових обмежень, але й із позицій реальних умов експлуатації.

Узагальнюючи результати аналізу, можна стверджувати, що програмні комплекси для маршрутизації транспортних засобів відрізняються не лише набором базових функцій, але й глибиною врахування додаткових факторів, що прямо впливає на ефективність логістичної діяльності підприємств. Вибір конкретного програмного продукту доцільно здійснювати, виходячи не лише з критерію швидкодії чи точності, але й з урахуванням сфери застосування, можливостей інтеграції та вартості програмного забезпечення.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика програмних систем маршрутизації транспортних засобів

Характеристика	RoutePlanner (ArcGIS, ESRI)	IBM ILOG Transportation Analyst (IBM)	Roadnet Transportation Suite (Roadnet Technologies)
Облік заявок на доставку	+	+	+
Формування звітів	+	+	+
Побудова кількох маршрутів	+	+	+
Розподіл замовлень між ТЗ	+	+	+
Врахування вантажопідйомності	+	+	+
Врахування часових вікон	частково	+	+
Геокодування (Європа, Україна)	+	обмежено	+
Інтеграція з корпоративними системами	середня	висока (1C, Excel, Oracle, MS SQL, Access)	середня
Облік кількох депо	+	+	+
Оптимізація розміщення вантажу в ТЗ	—	—	+
Інформація про затори та стан доріг	+	частково	+
Врахування вартості дорожніх шляхів	+	+	+
Наявність сервісної інфраструктури (АЗС, готелі, кафе)	+	—	+

Характеристика	RoutePlanner (ArcGIS, ESRI)	IBM ILOG Transportation Analyst (IBM)	Roadnet Transportation Suite (Roadnet Technologies)
Орієнтація на практичне використання	висока	висока	висока
Особливості	Розвинуті інструменти геокодування та картографії	Потужна інтеграція з корпоративними базами даних	Гнучкість у врахуванні складних логістичних схем

Аналіз програмного забезпечення, представленого на українському ринку ІТ як зарубіжними, так і національними розробниками, засвідчив, що провідні позиції серед систем управління транспортною логістикою займає продукт ArcLogistics від компанії ESRI.

Його ключові конкурентні переваги полягають у широкому спектрі функціональних можливостей, серед яких можна виділити:

- автоматизований облік заявок на перевезення;
- формування звітності різного рівня деталізації;
- гнучкий розподіл одного замовлення між кількома транспортними засобами;
- можливість паралельного проектування кількох маршрутів;
- функцію геокодування, що включає доступ до дорожніх даних по всій Європі, у тому числі й Україні;
- інтеграцію з іншими програмними продуктами ESRI;
- сумісність із корпоративними інформаційними системами підприємства-замовника;
- врахування вантажопідйомності транспортних засобів;
- можливість роботи з кількома складами або депо;
- підтримку часових вікон для планування доставки;
- інструменти для обміну даними із зовнішніми інформаційними системами;
- використання даних про затори, якість і вартість дорожнього покриття, а також про наявність об'єктів дорожньої інфраструктури (АЗС, закладів харчування, готелів) уздовж маршруту.

Оптимізація маршрутів у ArcLogistics здійснюється на основі мінімізації сукупних транспортних витрат. Алгоритм враховує такі фактори, як загальна протяжність маршруту, вартість пробігу на кілометр, фіксовані витрати на робочий день водія та погодинна вартість експлуатації транспортних засобів.

З огляду на наведені характеристики, ArcLogistics справедливо вважається одним із найпотужніших інструментів для управління транспортною логістикою на міжнародному та локальному рівнях. Проте, незважаючи на багатий функціонал і високу якість алгоритмів оптимізації, даний продукт має низку обмежень. До них можна віднести його значну вартість для українських підприємств, орієнтацію на стандарти західних ринків без урахування специфіки національних транспортних умов, а також відсутність глибокої адаптації під індивідуальні задачі, зокрема завдання доставки однотипного вантажу з урахуванням часткових поставок і специфічних логістичних обмежень. Саме ці аспекти формують підґрунтя для розробки вітчизняних програмних рішень, які б краще відповідали локальним економічним і організаційним реаліям.

ArcLogistics не враховує можливість роздільної доставки та раціонального розміщення вантажу під час побудови маршрутів доставки вантажу ТЗ та має високу вартість, що дозволяє його використовувати лише великим компаніям.

Варто підкреслити, що для значної частини підприємств не є доцільним використання повного спектра функціональних можливостей програмного забезпечення, оскільки це передбачає додаткові фінансові витрати, які не завжди виправдані. В умовах сучасних економічних викликів в Україні, спричинених кризовими процесами, санкційними обмеженнями та необхідністю імпортозаміщення, проблема вибору оптимальних програмних рішень постає особливо гостро. За таких обставин вагомого значення набуває підтримка вітчизняних розробників, здатних запропонувати адаптовані під локальні потреби інструменти.

Проведений порівняльний аналіз програмних продуктів зарубіжного та українського походження, які функціонують на вітчизняному ІТ-ринку, продемонстрував відсутність універсального рішення, що враховувало б усі

обмеження, визначені у кваліфікаційній роботі для задач організації доставки однотипного вантажу різним групам клієнтів. Відомі програмні комплекси не забезпечують можливості моделювання часткових поставок та оптимального розташування вантажних одиниць у транспортних засобах при формуванні маршрутів. Саме тому створення спеціалізованого програмного продукту, здатного враховувати зазначені обмеження та особливості логістичних процесів, є актуальним науково-практичним завданням, що має як прикладну, так і інноваційну значущість.

1.6 Висновки та постановка завдання дослідження

У результаті вивчення предметної області, аналізу умов, що виникають під час транспортування вантажів, а також дослідження існуючих методів і алгоритмів вирішення задач маршрутизації транспортних засобів було сформульовано цільове спрямування дослідження.

Головною метою магістерської кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності процесу доставки однотипного вантажу різним споживачам шляхом формування оптимальних та раціонально обґрунтованих маршрутів з урахуванням низки обмежувальних факторів, притаманних реальним умовам функціонування транспортної системи. Досягнення цієї мети сприятиме підвищенню продуктивності логістичних операцій, зменшенню витрат часу та ресурсів, а також покращенню рівня обслуговування клієнтів.

Для реалізації поставленої мети у дослідженні передбачено вирішення таких завдань:

- здійснити ґрунтовний аналіз специфічних умов, що виникають при побудові маршрутів доставки однотипного вантажу автомобільними транспортними засобами різним клієнтам; на основі цього аналізу виділити ключові обмеження та сформулювати формалізовану постановку задачі з урахуванням цих обмежень;

– побудувати аналітичну модель задачі організації доставки однотипного вантажу різним замовникам, яка дозволить математично описати логістичний процес та врахувати основні фактори, що впливають на його ефективність;

– розробити методичні підходи, алгоритмічні процедури та обчислювальні методи для вирішення задачі побудови раціональних маршрутів доставки однотипного вантажу, що враховуватимуть виявлені обмеження та забезпечуватимуть досягнення оптимальних результатів у реальних умовах перевезень.

2. АНАЛІТИКО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Особливості побудови транспортної системи при доставці однотипного вантажу

У даній роботі розглядається проблема, яка є однією з ключових у сучасній логістиці та транспортних системах, – пошук оптимальних маршрутів доставки вантажів, організація розподілу продукції між різними видами транспорту, управління складськими ресурсами та формування ефективної системи контролю запасів. Такі завдання мають міждисциплінарний характер і охоплюють як технічні аспекти функціонування транспортних засобів, так і економічні питання раціонального використання ресурсів підприємства.

У дослідженні [12] запропоновано трирівневу ієрархічну структуру прийняття логістичних рішень, яка забезпечує узгоджену взаємодію всіх підсистем усередині єдиної логістичної мережі. Перший рівень цієї структури – стратегічний – є найбільш складним і трудомістким, оскільки саме тут формуються глобальні напрями діяльності. На стратегічному рівні здійснюється постановка завдань, аналіз внутрішнього потенціалу та зовнішнього ринкового середовища, вибір оптимальної стратегії розвитку, оцінка її альтернатив та формування інструментів контролю реалізації. Саме тут приймаються рішення щодо обсягів замовлень, термінів доставки, визначення ефективності використання власних транспортних і складських ресурсів чи доцільності залучення зовнішніх постачальників послуг (аутсорсингу). Крім того, значна увага приділяється вивченню конкурентного середовища, створенню єдиної інформаційної бази даних про клієнтів, партнерів, товари та послуги, що стає основою для подальшої цифровізації логістичних процесів.

Другий рівень – мережевий – спирається на рішення, прийняті у стратегічній площині. На цьому етапі вирішуються питання розвитку інфраструктури: будівництво або оренда складських комплексів, оптимізація розташування логістичних центрів, формування транспортних коридорів.

Важливим завданням є побудова гнучкої мережі постачання, яка здатна адаптуватися до змін попиту чи зовнішніх умов (наприклад, перебоїв у постачанні, сезонних коливань або транспортних обмежень).

Третій рівень – операційний – зосереджується на практичній реалізації щоденних завдань. До них належать прогнозування попиту з урахуванням сезонності та поведінки споживачів, управління рівнем запасів у режимі реального часу, планування графіків транспортування, організація процесів складування, обробка замовлень і контроль за їх виконанням. На цьому рівні важливим є застосування сучасних інформаційних технологій, таких як системи управління складом (WMS), транспортні управлінські системи (TMS) та інтелектуальні інструменти прогнозування.

Таким чином, трирівнева структура логістичного управління дозволяє інтегрувати стратегічні цілі підприємства із конкретними операційними рішеннями, забезпечуючи безперервність і прозорість усіх бізнес-процесів. У сучасних умовах цифровізації та глобалізації така модель стає основою для побудови стійких і конкурентоспроможних транспортно-логістичних систем, здатних швидко реагувати на зміни ринкової кон'юнктури та ефективно задовольняти потреби клієнтів.

У науковій праці 2005 року Andre Langevin та Diane Riopel [12] було сформовано граф прийняття логістичних рішень (рисунок 2.1), який відображає сукупність завдань операційного рівня та їх взаємну узгодженість. Вершини графа репрезентують конкретні завдання, що підлягають вирішенню на відповідному рівні, тоді як дуги визначають логічні та функціональні зв'язки між цими завданнями.

На стратегічному рівні доцільно розглядати завдання, що визначають довгострокові орієнтири логістичної діяльності підприємства. Зокрема, формується клієнтська служба, яка виступає основним елементом взаємодії із зовнішнім середовищем (вершина 1), окреслюються цілі цієї служби, що відображають стратегічні пріоритети розвитку (вершина 2), а також визначається доцільність використання власних ресурсів чи їх залучення із зовнішніх джерел

(вершина 3). Такий підхід характеризується спрямованістю на створення міцної основи для подальшої побудови логістичної системи.

Мережний рівень передбачає прийняття рішень щодо організації інфраструктури логістичної системи. Він визначається потребою у створенні мережі об'єктів, зокрема складів або логістичних центрів, які забезпечують просторову оптимізацію потокових процесів (вершина 4). Даний рівень характеризується впливом на економічність, гнучкість та швидкість логістичних операцій.

Операційний рівень охоплює завдання, що забезпечують щоденне функціонування логістичної системи та характеризуються високим ступенем деталізації. На цьому етапі доцільним є прогнозування обсягів попиту продукції, що виступає передумовою планування виробничо-збутової діяльності (вершина 8). Управління запасами визначається як комплекс взаємопов'язаних рішень, серед яких: формування стратегії управління запасами (вершина 9), встановлення відносної вагомості окремих категорій запасів (вершина 10), розроблення методів їх регулювання (вершина 11), розрахунок бажаного рівня запасів (вершина 12) та визначення страхового резерву (вершина 13). Таке управління забезпечує стабільність функціонування підприємства та зменшує ризики дефіциту.

Окрім того, у межах операційного рівня доцільно розглядати складання виробничого графіка випуску продукції (вершина 17), що характеризується синхронізацією виробничих та логістичних процесів. Важливим напрямом є управління постачанням і закупівлями, що передбачає визначення виду закупівель (вершина 18), опис закупуваної продукції (вершина 19), складання переліку постачальників і обсягів замовлень (вершина 20), а також контроль якості готової продукції (вершини 21, 22).

Особливе значення має транспортування, яке передбачає визначення транспортних режимів (вершина 23), вибір типів транспортних засобів (вершина 24), конкретних транспортних одиниць (вершина 25), ступеня консолідації вантажу (вершина 26), розташування транспортних депо (вершина 27),

співвідношення між клієнтами та транспортними одиницями (вершина 28), розроблення маршрутів (вершина 29), графіків руху (вершина 30) та планів завантаження (вершина 31). Цей блок завдань характеризується прямим впливом на рівень витрат та якість обслуговування клієнтів.

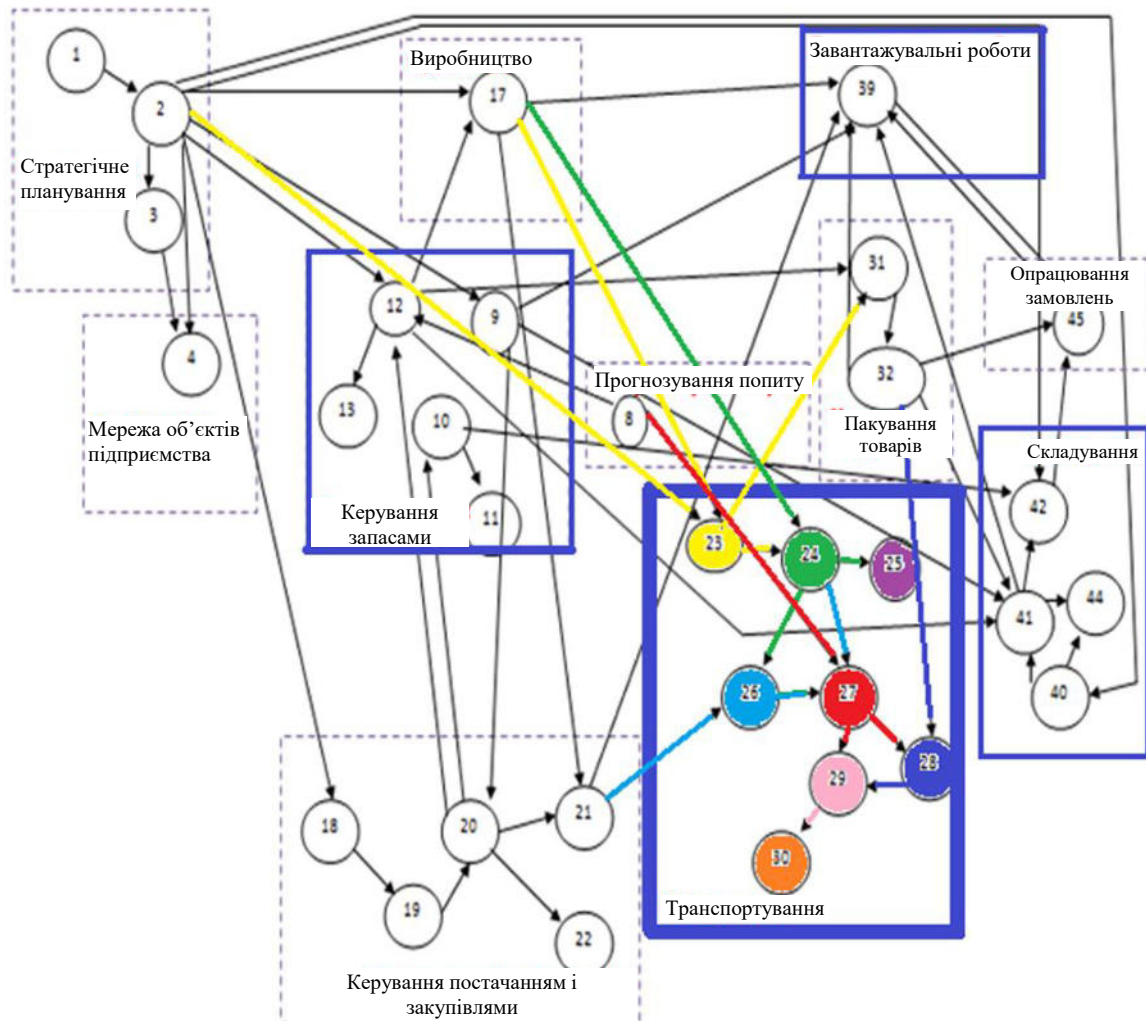
Пакування продукції визначається як важливий елемент забезпечення її збереження. Воно передбачає визначення ступеня необхідного захисту (вершина 32) та вибір відповідної тари, що здійснюється з урахуванням характеристик вантажу (вершини 33, 34, 35, 36, 37, 38). Цей етап забезпечує не лише захист товарів, але й їх привабливість для кінцевого споживача.

Організація вантажно-розвантажувальних робіт доцільно здійснюється через управління спеціалізованими пристроями та механізмами, що сприяє підвищенню ефективності й безпеки виконання операцій (вершина 39).

Складування у логістичній системі характеризується багатофункціональністю: визначаються цілі та завдання складу (вершина 40), здійснюється його планування (вершина 41), приймаються рішення щодо місця розташування запасів (вершина 42), формуються системи захисту і безпеки (вершини 43, 44). Даний процес забезпечує безперервність матеріальних потоків і створює необхідний резерв для стабільної діяльності підприємства.

Завершальним елементом операційного рівня є обробка замовлень, що характеризується інтеграцією результатів усіх попередніх процесів та безпосередньо визначає рівень задоволеності клієнтів (вершина 45). Цей етап є ключовим показником ефективності функціонування логістичної системи загалом.

Таким чином, багаторівнева структура прийняття логістичних рішень доцільно розглядається як комплексна система, що поєднує стратегічні, мережні та операційні аспекти управління. Вона характеризується цілісністю, послідовністю та орієнтацією на забезпечення ефективного руху матеріальних і супутніх інформаційних потоків, що у сукупності формує основу конкурентоспроможності підприємства.



Малюнок 2.1 – Граф ухвалення логістичних рішень

У цій роботі основна увага приділяється завданням операційного планування на транспорті. Одним із ключових завдань транспортування є завдання пошуку оптимальних маршрутів для доставки вантажу клієнтам різними транспортними засобами.

Подібні завдання відомі як завдання маршрутизації ТЗ (Vehicle Routing Problems, VRP), моделі та методи вирішення яких викладені в [16]. Широкий інтерес до завдань маршрутизації МС обумовлений як їх практичною затребуваністю [17], так і великою обчислювальною трудомісткістю. У [18] Lenstra та Rinnoy Kan проаналізували складність завдань VRP і показали, що більшість з них є NP-важкими. З ними тісно пов'язана задача оптимального розміщення вантажу, що перевозиться в ТЗ, яка відноситься до класу завдань упаковки (Bin Packing Problem, BPP), що також є NP-важкою. Як окреме

завдання класу ВРР існує завдання упаковки циліндрів та паралелепіпедів у контейнер. У зв'язку з цим у літературі велика увага приділяється розробці евристичних та метаевристичних алгоритмів, які використовуються при вирішенні практичних завдань, наприклад, у транспортній логістиці, основна мета якої – доставити вантаж клієнтам «точно вчасно».

Таким чином, задача доставки однотипного вантажу різним клієнтам, що розглядається в кваліфікаційній роботі, відноситься до завдань операційного рівня в структурі прийняття логістичних рішень, яка дозволяє об'єднати завдання складання раціональних маршрутів доставки однотипного вантажу різним клієнтам автомобільними ТЗ і розміщення в них вантажу, що доставляється.

2.2 Алгоритми мурашиної колонії для вирішення задач комбінаторної оптимізації

Вперше алгоритми мурашиних колоній були запропоновані Dorigo, Maniezzo та Colormi [47, 50] як інноваційний метод розв'язання складних задач комбінаторної оптимізації, серед яких особливе місце займають задача комівояжера та квадратичне завдання призначення. Виникнення цих алгоритмів пов'язане з дослідженням колективної поведінки мурах у природному середовищі, що відзначається високим рівнем організації та ефективності.

Мурахи є типовими соціальними комахами, життя яких побудоване на кооперації та розподілі функцій усередині колонії. Їхній пошук їжі здійснюється у вигляді децентралізованого процесу, коли окремі особини рухаються у випадкових напрямках, залишаючи за собою феромонні сліди. Ці сліди виконують роль інформаційного маркера: мураха може за ними повернутися до мурашника, а також інші члени колонії орієнтуються на них у пошуку їжі. При цьому діє принцип позитивного зворотного зв'язку — чим більш насиченим є феромонний слід, тим вища ймовірність того, що інші мурахи оберуть саме цей шлях. Додатково, кожна мураха, проходячи тією ж дорогою, посилює слід

власним феромоном, у результаті чого концентрація сигналу зростає, забезпечуючи стабільність та стійкість маршруту.

Застосування цієї природної метафори у штучних алгоритмах дозволило створити новий клас евристичних методів оптимізації. У математичному моделюванні пошук оптимального рішення здійснюється аналогічно до процесу колективної орієнтації мурах: об'єкти чи вершини задачі відповідають можливим станам системи, а «шляхи» між ними — варіантам рішень. Феромон у цьому випадку виступає абстрактним індикатором доцільності вибору конкретного шляху, який підсилюється в процесі багаторазових ітерацій. Завдяки цьому формується механізм самоорганізації, здатний до знаходження оптимальних або близьких до оптимальних рішень у надзвичайно складних задачах, де класичні методи виявляються обчислювально неефективними.

Особливе значення мурашині алгоритми мають у транспортній логістиці, телекомунікаційних мережах та задачах маршрутизації, де вони дозволяють мінімізувати час доставки, зменшити затори або підвищити пропускну здатність мереж. Це обумовлює їхню цінність як універсального підходу до оптимізації у багатокомпонентних системах.

Було здійснено серію експериментів, метою яких було дослідження закономірностей колективної поведінки мурах під час пошуку їжі та формування транспортних маршрутів у природному середовищі. У першому експерименті [50] джерело їжі та колонія мурах розташовувалися по різні боки бінарного мосту, причому обидві його гілки мали однакову довжину. Завданням дослідників було визначити, у якому відсотковому співвідношенні мурахи обиратимуть ту чи іншу гілку. Результати показали, що колонія з часом концентрувалася на використанні лише однієї з гілок. Це відбулося завдяки тому, що ще на початковому етапі експерименту одна з гілок отримала більшу кількість феромонових відміток. Таким чином, навіть за однакових умов довжини маршруту, на вибір колонії вплинув випадковий початковий фактор, який згодом підкріплювався позитивним зворотним зв'язком у вигляді накопичення феромону. Даний результат підтвердив тезу про те, що мурашині

колонії схильні до колективного вибору оптимізованого шляху, проте цей вибір може бути значною мірою зумовлений випадковими початковими умовами.

Другий експеримент мав іншу конфігурацію: гілки мосту відрізнялися за довжиною. За умов подібної швидкості руху мурах виявилось, що коротша гілка накопичувала більше феромону за однаковий проміжок часу, оскільки по ній проходила більша кількість особин. Як наслідок, імовірність вибору саме цього шляху зростала, і колонія поступово схилялася до використання більш короткої траєкторії. Важливо зазначити, що у даному випадку вибір маршруту був уже менш залежним від випадкових початкових факторів і більшою мірою відображав властивості системи оптимізації, де ефективність визначається мінімізацією довжини шляху.

Академічне значення цих експериментів полягає у підтвердженні ключових принципів, на яких ґрунтується методологія алгоритмів мурашиних колоній. Вони показують, що поведінка мурах у природі може бути змодельована як децентралізований процес прийняття рішень, у якому оптимальність досягається завдяки локальним взаємодіям і самоорганізації. Наприклад, у транспортній логістиці або задачах маршрутизації мереж можна використати аналогічний підхід: численні агенти-«мурахи» формують рішення на основі локальних даних і накопичених «феромонових» маркерів, що відображають корисність обраного шляху. Саме ці принципи дозволяють реалізовувати алгоритми ACO (Ant Colony Optimization) для таких завдань, як оптимізація вантажних перевезень, управління потоками в телекомунікаційних мережах, чи навіть планування руху автономних транспортних засобів.

Більш того, наведені експерименти мають важливе значення для розуміння ролі стохастичних факторів у процесах самоорганізації. У випадку однакової довжини шляхів саме випадковий розподіл початкових умов може визначити результат, тоді як за різної довжини переважають об'єктивні характеристики системи. Це дає змогу робити висновки не лише у сфері біології та етології, але й у математиці, інформатиці та логістиці, де пошук оптимального рішення часто

балансує між випадковістю початкових умов та раціональністю вибору, що формується у процесі ітеративного підсилення.

Аналіз результатів проведених досліджень свідчить, що мурахи здійснюють обмін інформацією опосередковано, через фізичну модифікацію навколишнього середовища, а саме – залишення феромонних слідів. Такий спосіб комунікації забезпечує ефективний механізм колективного пошуку найкоротших шляхів у складному просторі. Ефект самопідсилення траєкторій за рахунок феромонів пояснює здатність колонії швидко конвергувати до оптимального рішення навіть без централізованого управління. У першому експерименті, коли обидві гілки моста були однаковими за довжиною, вся колонія з часом обрала лише одну з них. Це свідчить про роль початкової випадковості та кумулятивного ефекту від накладання слідів. У другому експерименті, де довжини гілок відрізнялися, мурахи віддали перевагу коротшому маршруту. Цей результат підтверджує, що їхня поведінка ґрунтується на динаміці посилення феромонних слідів, які швидше накопичуються на короткому шляху, роблячи його більш привабливим для наступних особин.

На основі цього спостереження було сформульовано алгоритм мурашиної колонії, який став класичним підходом до розв’язання задач комбінаторної оптимізації. Його ідея полягає у багаторазовому ітераційному процесі, в якому обмежена кількість штучних агентів – аналогів мурах – поступово будує допустимі рішення. При цьому кожен агент, здійснюючи вибір наступного кроку, враховує як індивідуальні фактори (наприклад, локальні евристики, що відображають корисність поточного вибору), так і глобальні фактори – інтенсивність феромонних слідів, які оновлюються після кожної ітерації.

Формально завдання зводиться до знаходження мінімуму чи максимуму цільової функції, яка відображає оптимальність рішення, наприклад, мінімальну довжину маршруту у задачі комівояжера чи мінімальні витрати у транспортній мережі. На кожному кроці алгоритму відбувається баланс між експлуатацією вже відомих перспективних шляхів (шляхів із сильною концентрацією феромону) та

дослідженням нових варіантів, що забезпечує здатність уникати локальних мінімумів. Важливою особливістю є механізм випаровування феромонів, що моделює природний процес їхнього зникнення і запобігає надмірному домінуванню одного шляху.

Алгоритм мурашиної колонії довів свою ефективність у широкому спектрі прикладних задач: від маршрутизації транспортних потоків і планування логістичних систем до оптимізації ресурсів у телекомунікаційних мережах. Таким чином, прості експерименти з природними мурахами лягли в основу потужного метаевристичного підходу, який сьогодні використовується у багатьох галузях науки та техніки.

Побудова розв'язку в рамках алгоритмів мурашиних колоній починається з формування певного початкового стану, який визначається характером та обмеженнями конкретного завдання. Кожна штучна мураха (агент) у процесі пошуку поступово формує свій маршрут, здійснюючи вибір наступного стану з певною ймовірністю. Ця ймовірність залежить від двох ключових чинників: кількості феромону, що залишили попередні агенти на відповідному переході, та від локальної привабливості переходу, яка визначається евристичною інформацією.

Рівень феромону, що асоціюється з кожним ребром або можливим переходом, є позитивним числом і фактично відображає колективний досвід колонії. Чим частіше певний шлях обирався у попередніх ітераціях, тим більшою є концентрація феромону на ньому, а отже, зростає ймовірність його повторного вибору іншими агентами. Таким чином реалізується механізм позитивного підкріплення, характерний для реальної поведінки біологічних мурах.

Евристична інформація, на відміну від феромонної компоненти, визначається локальними параметрами задачі і формується на основі знань про привабливість можливих переходів. У випадку задачі пошуку найкоротшого шляху евристика може бути обчислена як обернене значення відстані: чим коротший відрізок, тим вища ймовірність його вибору. Для задач комбінаторної

оптимізації іншого типу евристична функція визначається індивідуально залежно від цільової функції та обмежень.

Після завершення кожної ітерації виконується процедура оновлення рівня феромонів. На ребрах, що входили до складу знайдених рішень, інтенсивність феромону зростає, тоді як на інших — поступово випаровується. Такий механізм дозволяє уникнути «застигання» системи у випадкових локальних оптимумах та сприяє постійному дослідженню простору рішень. Крім того, динамічне балансування між випаровуванням та підкріпленням феромону створює механізм самоорганізації, завдяки якому алгоритм здатен знаходити оптимальні або наближено оптимальні рішення навіть у задачах з високою складністю пошукового простору.

У науковій літературі цей підхід розглядається як приклад децентралізованої оптимізації, що базується на принципах колективного інтелекту. Його ефективність підтверджена численними дослідженнями у сферах маршрутизації транспортних потоків, розв'язання задачі комівояжера, планування виробничих процесів та оптимізації розподілу ресурсів. Завдяки здатності враховувати як історичний досвід колонії (через рівень феромону), так і локальні характеристики завдання (через евристику), алгоритм мурашиної колонії вважається однією з найбільш універсальних і гнучких метоевристик сучасної обчислювальної інтелектуальної аналітики.

Ймовірність переходу мурахи k з поточного стану i до стану j визначається формулою:

$$P_{ij}^k(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} [\tau_{il}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{il}(t)]^\beta}, \quad (2.1)$$

де $\tau_{ij}(t)$ – рівень феромону на переході $i \rightarrow j$ у момент часу t ;

$\eta_{ij}(t)$ – евристична інформація, що відображає локальну привабливість переходу;

α – параметр, який визначає вплив феромонної складової;

β – параметр, що регулює вагу евристичної інформації;

N_i^k – множина допустимих переходів для мурахи k із вершини i .

Рівень феромону $\tau_{ij}(t)$ оновлюється після завершення кожної ітерації за правилом:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t), \quad (2.2)$$

де ρ – коефіцієнт випаровування феромону;

$\Delta\tau_{ij}^k(t)$ – кількість феромону, яку залишає мураха k на шляху від точки i до точки j у даній ітерації.

Цей параметр визначається за формулою:

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k(t)}, & \text{якщо мураха } k \text{ пройшла ребро } (i, j), \\ 0, & \text{інакше,} \end{cases} \quad (2.3)$$

де Q – константа інтенсивності феромону;

$L_k(t)$ – довжина маршруту, побудованого мурахою k .

Таким чином, маршрути з меншою довжиною (кращі рішення) отримують більше підкріплення, а значення феромонів на неефективних шляхах поступово зменшуються завдяки випаровуванню. Це створює баланс між експлуатацією вже знайдених перспективних рішень і дослідженням нових можливостей.

Практичним прикладом є задача комівояжера (Traveling Salesman Problem, TSP). Якщо мураха рухається між містами, то евристична інформація η_{ij} може визначатися як $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ – відстань між містами i та j . У випадку логістичних задач маршрутизації транспорту, таких як планування перевезень світильників компанії ТОВ «Шредер», значення η_{ij} може відображати не лише відстань, але й додаткові фактори, наприклад: рівень завантаженості дороги, транспортні обмеження у населених пунктах або середню швидкість руху.

Завдяки такій математичній формалізації мурашині алгоритми здатні адаптивно будувати маршрути, які враховують як глобальні оптимізаційні критерії (мінімізація сумарних витрат чи часу доставки), так і локальні характеристики середовища. Це дозволяє розглядати даний підхід як

універсальний інструмент моделювання транспортних систем, що поєднує елементи ймовірнісного пошуку, самоорганізації та колективного інтелекту.

У сучасних модифікаціях алгоритмів мурашиної колонії важливу роль відіграють додаткові механізми, що підвищують їхню ефективність. Зокрема, одним із ключових елементів є процедура випаровування феромону. Вона забезпечує динамічне оновлення інформації про шляхи, запобігаючи надмірній концентрації феромону на окремих маршрутах і тим самим зменшуючи ризик передчасної конвергенції алгоритму до локальних оптимумів. Завдяки цьому відбувається постійне оновлення інформаційного середовища та підтримується можливість дослідження альтернативних варіантів рішень. Наприклад, у завданнях оптимізації транспортних маршрутів випаровування дозволяє алгоритму враховувати змінність умов, таких як пробки чи часові обмеження.

Ще одним удосконаленням є застосування так званої надпроцедури. Вона виконує роль метаевристики, що може включати локальне вдосконалення вже знайдених рішень, застосування адаптивних стратегій або комбінування отриманих результатів з іншими методами оптимізації. Такий підхід значно розширює можливості алгоритму та дозволяє не лише знаходити наближені розв'язки, а й підвищувати їхню якість у процесі ітерацій. Наприклад, у задачах комівояжера надпроцедура може виконувати функцію локального пошуку, що дозволяє скоротити довжину маршруту навіть після того, як алгоритм вже знайшов загальний оптимізований шлях.

До ключових характеристик алгоритмів мурашиної колонії належать кілька принципових рис. По-перше, позитивний зворотний зв'язок, який полягає в накопиченні феромону на кращих шляхах і забезпечує прискорене формування допустимих рішень. По-друге, розподілене обчислення, що є природним наслідком багатокомпонентної системи агентів, дозволяє уникати застрягання алгоритму в локальних оптимумах та забезпечує паралельність обчислювального процесу. По-третє, використання конструктивної жадібної евристики, що дозволяє будувати початкові допустимі рішення навіть на ранніх етапах пошуку, створюючи підґрунтя для подальшого їхнього вдосконалення.

У практичному застосуванні ці властивості роблять алгоритми мурашиних колоній надзвичайно ефективними для складних комбінаторних задач. Так, у логістиці вони використовуються для оптимізації маршрутів доставки вантажів, у телекомунікаціях – для побудови надійних мережевих маршрутів, а в біоінформатиці – для розв’язання задач вирівнювання послідовностей. Таким чином, поєднання механізму випаровування феромону, надпроцедур та ключових характеристик алгоритму створює гнучку й адаптивну систему, здатну вирішувати задачі високої складності в реальних умовах.

2.3 Аналіз алгоритмів роботи мурашиної логістики

Алгоритми мурашиної логістики є одним із найбільш перспективних напрямів у сфері інтелектуальних транспортних систем та оптимізації управління потоками. Їхня ефективність пояснюється тим, що вони імітують природну поведінку колоній мурах, які здатні колективно знаходити найкоротші та найоптимальніші маршрути для пошуку їжі. Такий біонічний підхід дозволяє адаптувати принципи самоорганізації та децентралізованого прийняття рішень до складних завдань логістики, де існують численні змінні, обмеження та фактори невизначеності.

Першим аспектом аналізу є адаптивність алгоритмів мурашиної логістики. Завдяки механізму випаровування феромону система зберігає баланс між експлуатацією вже знайдених рішень та дослідженням нових альтернатив. Це дозволяє уникати застрягання у локальних оптимумах та забезпечує можливість адаптації до змін у реальному середовищі, наприклад, у випадку затримок на складах, змін попиту чи появи нових клієнтів.

Другим важливим аспектом є розподіленість обчислень. На відміну від класичних методів централізованої оптимізації, мурашині алгоритми ґрунтуються на паралельній роботі численних агентів. Це підвищує масштабованість системи й дає змогу ефективно застосовувати її для великих транспортних мереж, де кількість можливих маршрутів обчислюється

мільйонами. Наприклад, у задачах оптимізації маршрутів доставки для десятків чи сотень клієнтів такий підхід дозволяє формувати ефективні рішення за прийнятний час.

Третім фактором є робастність. Мурашині алгоритми демонструють високу стійкість до зміни умов та випадкових факторів. Навіть якщо один із маршрутів стає недоступним, алгоритм швидко перебудовує траєкторії, зберігаючи загальну ефективність системи. Це робить їх особливо актуальними для міських логістичних систем, де транспортні потоки постійно змінюються через затори, аварії чи ремонтні роботи.

Четвертий аспект стосується інтеграції мурашиної логістики з іншими методами оптимізації. Часто алгоритми колоній поєднують із локальними пошуковими методами, генетичними алгоритмами чи методами машинного навчання. Такий гібридний підхід дозволяє досягати більшої точності й швидкості пошуку рішень. Наприклад, у системах управління складськими запасами мурашині алгоритми можуть працювати у зв'язці з нейронними мережами, прогножуючи попит і водночас оптимізуючи маршрути поставок.

З практичного погляду, алгоритми мурашиної логістики вже використовуються у кількох ключових сферах. У транспортних компаніях вони допомагають мінімізувати витрати на паливо та скорочувати час доставки. У поштових службах їх застосовують для формування оптимальних маршрутів кур'єрів з урахуванням часових вікон доставки. У міських проєктах “розумного міста” мурашина логістика використовується для управління потоками громадського транспорту й навіть для регулювання роботи світлофорів.

Разом із тим, слід відзначити і певні обмеження алгоритмів мурашиної логістики. По-перше, вони потребують значних обчислювальних ресурсів при обробці дуже великих задач, хоча паралельність частково компенсує цю проблему. По-друге, ефективність сильно залежить від правильної настройки параметрів (швидкість випаровування феромону, інтенсивність підсилення сліду тощо). По-третє, у деяких випадках потрібне додаткове застосування метаевристик для досягнення глобально оптимальних рішень.

У підсумку можна зазначити, що алгоритми мурашиної логістики представляють собою гнучкий, адаптивний і потужний інструмент для вирішення складних задач управління транспортом та матеріальними потоками. Їхні ключові переваги — самоорганізація, здатність до адаптації, стійкість до динамічних змін і можливість масштабування. Це робить їх однією з найбільш перспективних технологій для впровадження у майбутніх системах логістики, зокрема у сфері електронної комерції, дистрибуції, міських перевезень і глобальних транспортних мереж.

Алгоритм Ant System (AS)

Алгоритм AS є одним із перших алгоритмів мурашиної колонії [47, 50]. Алгоритм AS застосовувався для вирішення задачі комівояжера та квадратичної задачі про призначення. Критерієм зупинення алгоритму може бути певна кількість ітерацій чи ітерацій без поліпшення рішення.

Проводилася перевірка алгоритму AS порівняння коїться з іншими евристичними. На задачах малої розмірності алгоритм AS дозволив отримати найкращі та близькі за якістю до рішень інших евристик результати. На завдання великої розмірності алгоритм швидко схилювався до деякого субоптимального рішення. Тому було запропоновано інші модифікації алгоритму, наприклад, алгоритм ACO.

Алгоритм Ant Colony Optimization (ACO)

Алгоритм ACO – модифікація алгоритму AS, яка була розроблена для уникнення ефекту стагнації в алгоритмі AS за рахунок процедури випаровування феромону. Випаровування феромону дозволяє забувати рішення, отримані на інших ітераціях, та здійснювати пошук в інших напрямках.

Алгоритм системи колоній мурах (ACS)

Алгоритм ACS був запропонований авторами Доріго та Гамбарделлою в роботі [49] і є ще однією модифікацією алгоритму AS.

Відмінності між алгоритмом ACS та алгоритмом AS:

1) Використовується нове ймовірнісне правило для вибору подальшого напрямку з поточного стану вибирається, яке називається псевдовипадково-пропорційним (pseudo-random-proportional) [12].

2) Значення рівня феромону змінюються лише компонент кращого рішення цієї ітерації, а чи не всім рішень, побудованих мурашками (агентами) на поточної ітерації.

Алгоритм Max-Min ANT System (MMAS)

У 1999 р. Stuzle та Hoos у роботі [124] запропонували ще одну модифікацію алгоритму AS – алгоритм MMAS.

Відмінності алгоритму MMAS від алгоритму AS:

1) Задається при ініціалізації алгоритму початковий рівень феромону дорівнює максимальному значенню феромону, тобто $\tau_{init} = \tau_{max}$.

2) Значення рівня феромону змінюються лише компонент кращого рішення цієї ітерації, а чи не всім рішень, побудованих мурашками (агентами) на поточної ітерації.

3) Для уникнення ефекту стагнації введено два нових параметри для обмеження рівня феромону: максимальний τ_{max} та мінімальний τ_{min} рівень феромону.

2.4 Розробка методу доставки однотипного вантажу різними клієнтами з урахуванням ряду обмежень

Для вирішення завдання доставки однотипного вантажу, яким у нашому випадку є світильники компанії «Шредер» (м. Тернопіль), різними клієнтами з урахуванням ряду обмежень, зокрема оптимізації маршрутів та раціонального розміщення вантажу всередині транспортних засобів, доцільним є застосування комплексу алгоритмічних підходів.

Поєднання класичних методів побудови маршрутів із сучасними евристичними алгоритмами дозволяє досягти балансу між обчислювальною

складністю та практичною ефективністю. Нижче розглянемо основні алгоритми та підходи, які рекомендовано застосовувати в даному контексті.

Метод Кіні–Райфа

Метод Кіні–Райфа належить до групи евристик побудови маршрутів. Його суть полягає у послідовному включенні клієнтів у маршрут з урахуванням географічного розташування та попередньо заданих обмежень. У випадку доставки світильників такий метод дозволяє швидко сформувати базові маршрути з мінімальною відстанню, що особливо важливо для регіональних перевезень усередині України. Перевага методу – простота реалізації та відносна швидкість обчислень, проте він може давати результати, далекі від глобально оптимальних рішень.

Метод найближчого сусіда

Цей алгоритм передбачає, що транспортний засіб на кожному кроці рухається до найближчого клієнта, який ще не був обслугований. У випадку доставки світильників «Шредер» це дозволяє мінімізувати локальні витрати палива та часу, особливо коли клієнти розташовані компактними групами. Перевагою є швидкість формування маршруту, недоліком – ймовірність утворення «замкнених» маршрутів, які збільшують загальний пробіг.

Алгоритм розгортки

Алгоритм розгортки застосовується для формування маршрутів на основі поступового розширення від центральної точки (місця відправлення). У нашому випадку центральним вузлом є виробничі потужності «Шредер» у Тернополі. Цей алгоритм дозволяє ефективно формувати маршрути для доставки на далекі відстані (наприклад, закордонним клієнтам у Польщі, Німеччині чи Румунії), поступово розширюючи сферу охоплення та враховуючи завантаження транспортних засобів.

Алгоритм мурашиної колонії (ACO)

Алгоритм мурашиної колонії відноситься до метоевристичних методів і ґрунтується на принципах колективного пошуку оптимальних шляхів, аналогічно до поведінки мурах у природі. У випадку доставки світильників його

застосування дозволяє врахувати велику кількість можливих маршрутів і поступово «навчати» систему обирати найбільш ефективні. Перевага полягає у здатності наближатися до глобального оптимуму навіть у складних умовах, недолік – висока обчислювальна вартість, що вимагає сучасного програмного забезпечення.

P-ACO (Population-based Ant Colony Optimization)

Модифікація алгоритму мурашиної колонії, яка поєднує його принципи з підходами еволюційних обчислень. Для доставки світильників P-ACO є перспективним, адже дозволяє враховувати велику кількість клієнтів у різних країнах, різноманітні транспортні обмеження (вантажопідйомність, обмеження по часу доставки, митні правила). Його особливість полягає в можливості швидкого пошуку рішень у багатовимірних просторах оптимізації.

Алгоритми пакування (Bin Packing Problem)

Оскільки світильники, як правило, мають різні розміри, вагу та потребують обережного транспортування, важливим є не лише прокладання маршруту, але й визначення способу розміщення товару у кузові вантажівки чи контейнері. Алгоритми пакування дозволяють мінімізувати обсяг невикористаного простору та зменшити ризики пошкодження продукції під час перевезення. Для компанії «Шредер» це критично важливо, оскільки пошкодження світильників призведе до додаткових витрат і втрати репутації.

Обґрунтування застосування комплексного підходу

Застосування лише одного алгоритму для вирішення задачі доставки не дає можливості врахувати всі чинники одночасно. Так, прості методи (Кіні–Райф, найближчий сусід, розгортка) швидко формують маршрути, але не гарантують їхньої оптимальності. У той же час, метаевристики (ACO, P-ACO) здатні знаходити рішення в умовах великої кількості змінних, проте потребують більшого часу для обчислень. Додавання алгоритмів пакування дозволяє вирішити ще одну важливу підзадачу – оптимальне завантаження транспортних засобів.

Таким чином, інтеграція класичних і сучасних алгоритмічних підходів дозволяє сформувати гнучку модель доставки, яка враховує як маршрути перевезення, так і внутрішню організацію вантажу. Це особливо актуально для міжнародних перевезень світильників компанії «Шредер», оскільки забезпечує одночасне зниження логістичних витрат,

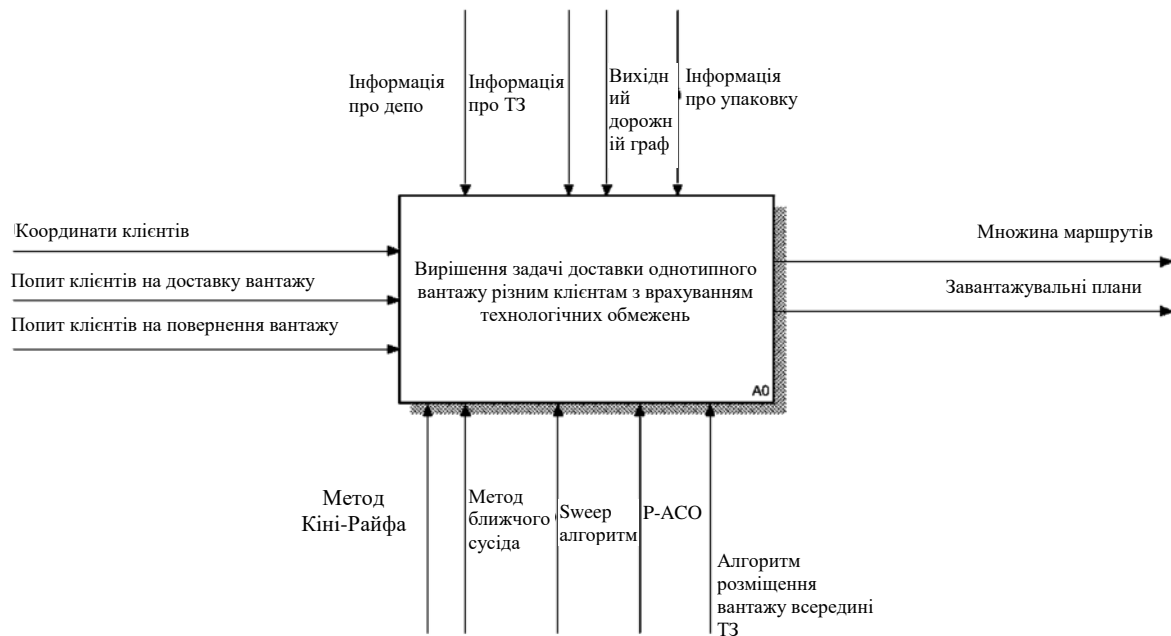


Рисунок 2.2 – Рішення задачі доставки однотипного вантажу різним клієнтам

Дану задачу можна декомпонувати за рішенням наступних підзадач:

- 1) Формування дорожнього графа;
- 2) Розподіл клієнтів по депо;
- 3) Розподіл клієнтів по ТЗ;
- 4) Рішення задачі складання маршрутів;
- 5) Рішення задачі розміщення вантажу по транспортним засобам.

Функціональну схему взаємозв'язку зазначених задач подано на рисунку 3.3. Варто підкреслити, що між рішеннями транспортних задач та задачами, пов'язаними з розподілом вантажу по транспортних засобах, існує тісна взаємодія. Такий взаємозв'язок свідчить про необхідність врахування особливостей завантаження транспортних засобів уже на етапі формування

маршрутів.

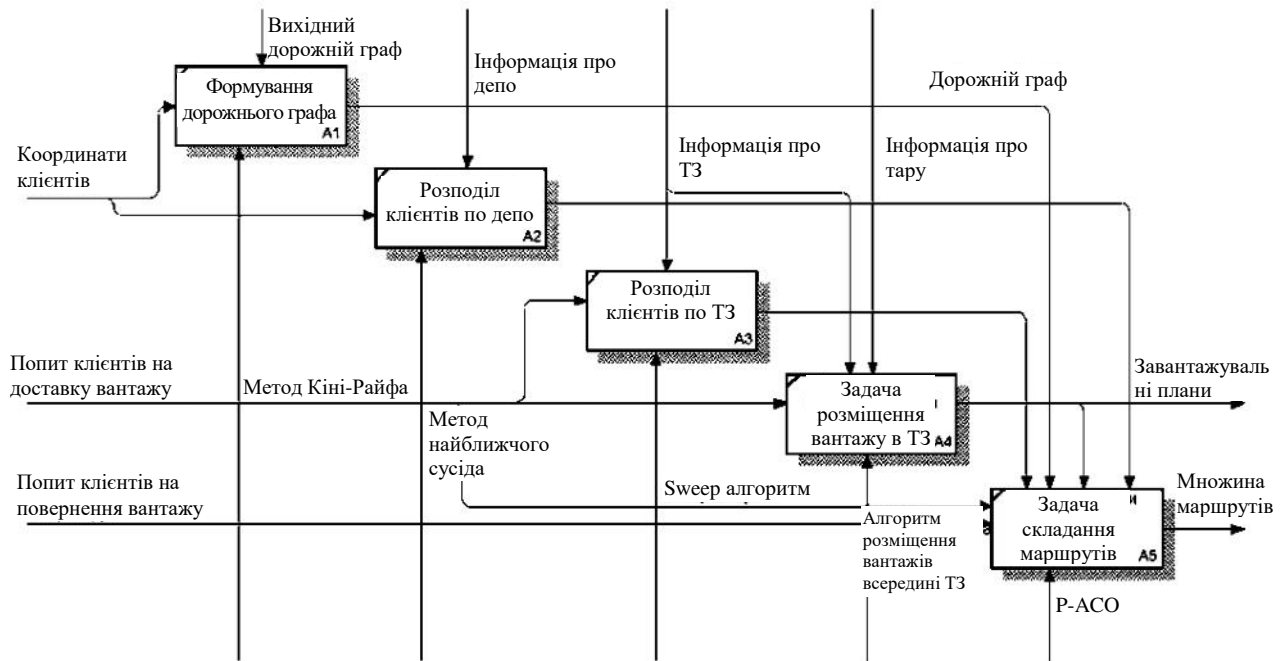


Рисунок 2.3. Взаємодія підзадач

Ігнорування цього чинника може призвести до виникнення непрактичних або неефективних рішень, оскільки оптимальний маршрут з точки зору відстані чи часу може виявитися непридатним, якщо розподіл вантажу унеможливило його фактичне виконання. Саме тому інтегроване врахування параметрів маршрутизації та завантаження забезпечує підвищення ефективності логістичної системи та дозволяє формувати реалістичні та економічно обґрунтовані рішення.

У сучасних умовах глобалізації та інтенсивного розвитку міжнародних торговельних відносин особливого значення набувають питання оптимізації транспортної логістики підприємств. Компанія «Шредер», що розташована у місті Тернопіль, є виробником сучасних освітлювальних систем, які постачаються як внутрішнім клієнтам в Україні, так і замовникам у країнах Європейського Союзу та за його межами. Основним видом продукції, яка потребує доставки, є світильники, що відносяться до категорії однотипних вантажів, але характеризуються відносно великими габаритами та різною вагою. Це створює специфічні виклики для організації ефективної системи транспортування.

Проблема, яка постає перед компанією, полягає у формуванні оптимальних маршрутів доставки з урахуванням різноманітних обмежень. До таких належать: вантажопідйомність автомобільного транспорту, часові вікна доставки, обмеження на проходження платними дорогами, швидкісні ліміти, облік якості дорожньої інфраструктури, митні процедури при міжнародних перевезеннях, а також необхідність дотримання принципу «точно вчасно» (Just-in-Time).

Задача формування маршрутів доставки у даному випадку належить до класу NP-важких задач комбінаторної оптимізації, що робить її розв'язання за допомогою точних методів практично неможливим при великій кількості клієнтів. Саме тому виникає необхідність застосування евристичних та метаевристичних алгоритмів, які дозволяють отримати рішення прийнятної якості за обмежений проміжок часу.

З математичної точки зору задача може бути сформульована як модифікована задача маршрутизації транспортних засобів (Vehicle Routing Problem, VRP) з обмеженнями. Нехай існує множина клієнтів $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ кожен з яких має попит d_i , виражений у кількості світильників або їхній загальній масі. Є множина транспортних засобів $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, з вантажопідйомністю Q_j . Склад (депо) компанії позначимо як вузол 0.

Необхідно побудувати маршрути таким чином, щоб:

1. Кожен клієнт був обслужений хоча б одним транспортним засобом;
2. Попит клієнта не перевищував доступну місткість транспортного засобу;
3. Сумарна довжина маршрутів та витрати на транспортування були мінімальними;
4. Доставка виконувалась з урахуванням часових вікон та обмежень на дороги.

Задачу можна описати за допомогою наступної математичної моделі. Нехай $x_{ij}^k = 1$, якщо транспортний засіб k рухається від клієнта i до клієнта j , і 0 у протилежному випадку. Вартість перевезення (час чи відстань) між пунктами i та j позначимо як c_{ij} .

Функція мети:

$$\min \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} x_{ij}^k \quad (2.4)$$

Обмеження:

1. Вантаж повинен бути доставлений до кожного клієнта

$$\sum_{k=1}^m \sum_{j=0}^n x_{ij}^k = 1, \quad \forall i \in C \quad (2.5)$$

2. Вантажопідйомність транспортноо засобу не повинна перевищувати гранично допустимі значення

$$\sum_{i=1}^n d_i \cdot \left(\sum_{j=0}^n x_{ij}^k \right) \leq Q_k, \quad \forall k \in V \quad (2.6)$$

3. Забезпечення коректності маршрутів (умова підключеності графа):

$$\sum_{j=0}^n x_{ij}^k = \sum_{j=0}^n x_{ji}^k, \quad \forall i \in C, \forall k \in V \quad (2.7)$$

4. Урахування часових вікон:

$$a_i \leq t_i \leq b_i, \quad \forall i \in C \quad (2.8)$$

де a_i , b_i – межі часового вікна для клієнта i , а t_i – час прибуття транспортного засобу.

Для розв’язання цієї задачі доцільно використати метаевристичні підходи, такі як алгоритм мурашиних колоній (Ant Colony Optimization, ACO), генетичні алгоритми (Genetic Algorithms, GA) або метод табу-пошуку (Tabu Search).

Алгоритм мурашиних колоній добре підходить для маршрутизації завдяки своїй здатності враховувати велику кількість варіантів та знаходити компроміс між пошуком нових рішень і покращенням вже відомих. У даному випадку мурахи моделюють транспортні засоби, що рухаються між клієнтами, залишаючи «феромони» на кращих маршрутах. Ітераційне оновлення інтенсивності феромонів дозволяє алгоритму поступово концентруватися на оптимальних або наближених до оптимальних маршрутах.

Генетичні алгоритми також мають значний потенціал у розв’язанні задачі доставки світильників компанії «Шредер». Хромосома може кодувати певний

маршрут або набір маршрутів, а операції кросоверу та мутації дозволяють формувати нові, більш ефективні рішення. Використання спеціалізованих операторів, які враховують обмеження вантажопідйомності та часових вікон, дозволяє суттєво підвищити якість рішень.

Для практичного впровадження методу можна застосувати гібридний підхід, що поєднує алгоритм мурашиних колоній та генетичний алгоритм. Спочатку використовується АСО для побудови наближеного рішення, після чого ГА виконує тонке налаштування маршрутів, забезпечуючи мінімізацію витрат. Такий підхід дозволяє врахувати як просторово-географічні особливості транспортної мережі, так і специфіку вантажу, що доставляється.

Обґрунтування вибору саме цих методів полягає у їхній здатності працювати з великими обсягами даних і забезпечувати достатньо якісні рішення у прийнятний проміжок часу. Точні методи, такі як цілочислове лінійне програмування, у цьому випадку малопридатні через експоненційне зростання кількості варіантів при збільшенні числа клієнтів.

Таким чином, розроблений метод доставки світильників компанії «Шредер» передбачає поєднання математичного моделювання задачі маршрутизації транспортних засобів із використанням метаевристичних алгоритмів. Це дозволяє мінімізувати транспортні витрати, забезпечити своєчасність поставок, підвищити рівень обслуговування клієнтів та конкурентоспроможність компанії на міжнародному ринку.

Оскільки задача належить до NP-важких, точні методи розв'язання (наприклад, за допомогою цілочисельного програмування) є обчислювально надмірними для великої кількості клієнтів. Тому для нашої ситуації доцільно застосовувати метаевристичні алгоритми.

Найбільш прийнятними є:

Метод мурашиної колонії (Ant Colony Optimization, ACO) — ефективний для побудови маршрутів у графах із багатьма обмеженнями. Враховуючи, що поставки компанії «Шредер» мають як українських, так і європейських клієнтів,

алгоритм АСО дозволяє знаходити адаптивні маршрути з урахуванням різної якості дорожнього покриття та транспортних витрат.

Генетичні алгоритми (GA) — добре підходять для пошуку оптимальних або близьких до оптимальних рішень при великій кількості клієнтів. Для нашого випадку можна закодувати маршрути у вигляді хромосом, де гени відповідають порядку відвідування клієнтів.

Метод імітації відпалу (Simulated Annealing, SA) — може бути застосований як локальний пошук для покращення вже згенерованих рішень, що особливо важливо при необхідності швидко коригувати маршрути у випадку змін у замовленнях чи дорожній ситуації.

Для компанії «Шредер» найбільш доцільним є використання гібридного підходу, що поєднує генетичний алгоритм (для глобального пошуку рішень) та мурашину оптимізацію (для уточнення локальних маршрутів). Це дозволяє одночасно враховувати велику кількість клієнтів, різноманітні обмеження та змінні умови перевезень.

Наприклад, алгоритм може працювати в два етапи:

Генетичний алгоритм визначає набір перспективних маршрутів доставки, які відповідають обмеженням по вантажопідйомності та часовим вікнам.

Алгоритм мурашиної колонії уточнює маршрути, мінімізуючи витрати за рахунок врахування характеристик доріг та можливих зупинок.

Запропонована модель і методологія дозволяють оптимізувати доставку світильників клієнтам компанії ТОВ «Шредер» як в Україні, так і за її межами. Використання метаевристичних алгоритмів робить систему достатньо гнучкою для адаптації до змін попиту та обмежень у транспортній мережі. Такий підхід забезпечує мінімізацію транспортних витрат, підвищує рівень обслуговування клієнтів та робить логістичну систему більш конкурентоспроможною на міжнародному ринку.

3 ПРОЕКТНО-РЕКОМЕНДАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ

3.1 Побудова ефективної транспортної системи доставки світильників, з використанням принципів мурашиної логістики.

У сучасних умовах глобалізації ринків і розвитку міжнародних торговельних зв'язків перед компаніями, що спеціалізуються на виробництві високотехнологічної продукції, постає завдання не лише створювати конкурентний товар, але й забезпечувати його безперебійну, надійну та економічно вигідну доставку кінцевим споживачам. Для компанії ТОВ «Шредер», яка займається виготовленням світильників у місті Тернопіль, важливим стає питання побудови ефективної транспортної системи, орієнтованої здебільшого на міжнародних клієнтів, оскільки більша частина продукції експортується за кордон. Водночас внутрішній ринок України формує лише незначний сегмент попиту, що накладає особливості на планування транспортної логістики, адже основна увага повинна бути зосереджена на міжнародних коридорах та транзитних маршрутах.

Проблематика полягає в тому, що сучасні ланцюги поставок характеризуються складною структурою та високим рівнем невизначеності. Доставка вантажів у Європу, Азію чи інші країни світу пов'язана з необхідністю проходження митних процедур, подоланням транспортних бар'єрів, погодними ризиками та залежністю від надійності партнерів-перевізників. Будь-які непередбачувані зміни, наприклад, затори на кордонах чи коливання вартості палива, можуть суттєво вплинути на загальну ефективність. Тому застосування традиційних методів планування маршрутів, які базуються на статичних показниках і враховують лише середні умови, уже не може гарантувати оптимальних результатів. Саме в таких умовах актуальним стає використання інноваційних підходів, серед яких особливе місце займають методи мурашиної логістики.

Мурашина логістика як концепція виникла на основі спостереження за поведінкою колоній мурах, які завжди знаходять оптимальні шляхи між джерелами їжі та мурашником. У природі це досягається завдяки колективному інтелекту: окремі особини рухаються випадковими маршрутами, але залишають на своєму шляху феромони. Ті шляхи, які ведуть до джерела їжі швидше і з меншими затратами, збагачуються більшою кількістю феромону і стають привабливішими для інших мурах. У результаті з часом колонія знаходить найкоротший і найефективніший шлях. У логістиці аналогія з мурашиним алгоритмом дозволяє побудувати адаптивну модель, яка здатна самостійно шукати найкращі маршрути з урахуванням великої кількості параметрів.

Якщо перенести цю концепцію на практику доставки світильників компанії ТОВ «Шредер», то виробничий майданчик у Тернополі можна розглядати як точку походження потоків, а клієнтів у Європі та інших країнах світу — як цільові вузли транспортної мережі. Кожен можливий маршрут доставки можна подати у вигляді ребра графа, що має свої характеристики, такі як час транспортування, вартість перевезення, надійність, ймовірність виникнення затримок, а також наявність певних транзитних обмежень. У цій моделі «мурашки» виконують роль агентів, які імітують спроби різних перевізників доставити товар за найвигіднішим шляхом.

Важливою перевагою цього підходу є те, що система не зупиняється на одному варіанті. Феромони у моделі мають властивість випаровуватися, і це забезпечує динамічний баланс між використанням уже перевірених маршрутів і пошуком нових альтернатив. Наприклад, якщо певний логістичний коридор раптово перевантажується через черги на митниці, система завдяки випаровуванню феромонів починає поступово переключати увагу на інші шляхи. Це забезпечує гнучкість і дозволяє уникати критичних затримок.

Реалізація принципів мурашиної логістики у транспортній системі компанії може відбуватися шляхом створення спеціалізованого програмного комплексу, інтегрованого з наявними управлінськими системами (ERP чи TMS). У такому програмному модулі формується цифрова карта транспортної мережі,

де враховані всі можливі напрямки, а також динамічні характеристики перевізників. Для компанії, яка постачає продукцію здебільшого на ринки Європейського Союзу, надзвичайно важливо враховувати митні правила, години роботи пунктів пропуску, можливі зміни тарифів на фрахт та екологічні обмеження.

У процесі функціонування мурашиного алгоритму агенти-«мурашки» прокладають маршрути і на основі успішності їх виконання залишають сліди феромонів, що формують базу знань для наступних ітерацій. Поступово система накопичує інформацію про оптимальні напрямки доставки та здатна рекомендувати найбільш ефективні з них у конкретний момент часу. Це особливо важливо для компанії «Шредер», оскільки характер її продукції вимагає стабільних строків постачання та високої надійності партнерів, адже світильники використовуються у великих інфраструктурних проєктах, де будь-які затримки неприпустимі.

Практичні переваги впровадження мурашиної логістики для компанії проявляються у кількох ключових аспектах. По-перше, це оптимізація витрат. Завдяки алгоритмічному пошуку найвигідніших маршрутів можна досягти зниження середньої вартості транспортування без шкоди для швидкості чи надійності. По-друге, підвищується гнучкість системи, оскільки вона може швидко адаптуватися до змінних умов ринку, включаючи коливання цін на паливо, страйки транспортників чи тимчасове закриття митних пунктів. По-третє, формується новий рівень прозорості управлінських рішень, адже кожна рекомендація системи має обґрунтування, яке можна проаналізувати.

Ще одним важливим напрямом удосконалення є інтеграція мурашиного підходу з сучасними інструментами аналізу великих даних. Завдяки використанню даних про трафік у реальному часі, погодні умови, статистику затримок і навіть геополітичні новини система отримує змогу швидко коригувати ваги маршрутів і оперативно реагувати на будь-які виклики. Для міжнародної компанії це стає конкурентною перевагою, оскільки забезпечує безперервність постачань і зменшує ризики невиконання контрактів.

Важливим є також аспект масштабованості. На початковому етапі мурашина логістика може бути використана лише для оптимізації доставки в межах найближчих ринків, наприклад, Польщі, Словаччини чи Угорщини, які є першими транзитними вузлами для експорту продукції з Тернополя. Проте в подальшому система може бути поширена і на більш віддалені ринки — Німеччину, Францію, країни Скандинавії чи навіть Північну Америку. Це робить рішення універсальним та придатним для стратегічного розвитку компанії.

Побудова ефективної транспортної системи на основі мурашиної логістики вимагає також проведення етапу валідації. Необхідно протестувати алгоритм на історичних даних, порівняти запропоновані ним маршрути з фактичними та оцінити відхилення. За результатами такого тестування здійснюється калібрування параметрів моделі, зокрема швидкості випаровування феромону, вагових коефіцієнтів вартості й часу, а також інтенсивності генерації нових агентів.

У підсумку реалізація принципів мурашиної логістики у транспортній системі доставки світильників компанії ТОВ «Шредер» дозволяє сформувати новий підхід до управління міжнародними перевезеннями. Такий підхід не лише забезпечує економію ресурсів і підвищує надійність, але й робить компанію більш стійкою до зовнішніх викликів глобального ринку. Гнучка система, яка здатна адаптуватися до постійних змін, стає ключовим фактором успішного розвитку бізнесу, забезпечуючи конкурентоспроможність на європейському та світовому рівнях.

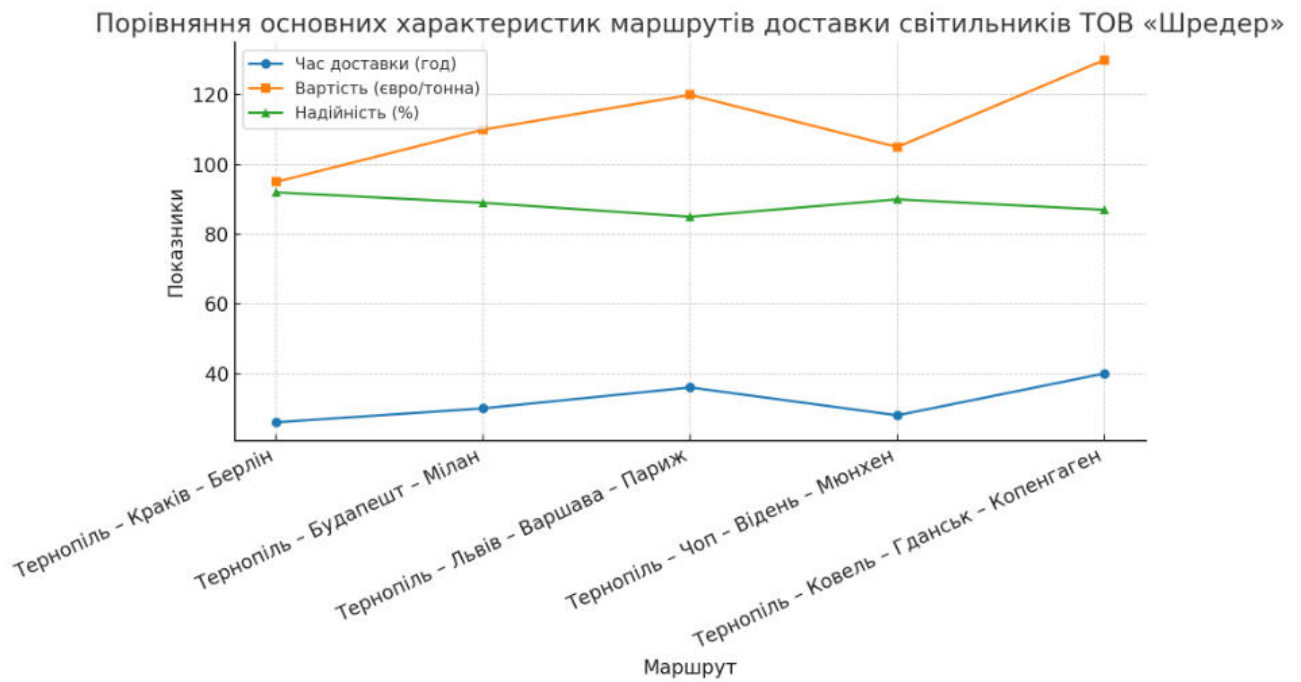


Рисунок 3.1. Порівняння основних характеристик маршрутів доставки світильників ТОВ «Шредер»

Як видно з рисунку, маршрути суттєво відрізняються за своїми характеристиками. Наприклад, напрямок через Краків та Берлін забезпечує відносно низький час доставки і високу надійність, тоді як маршрут до Копенгагена, попри більшу географічну відстань, характеризується найдовшим часом перевезення та високою вартістю. Це демонструє важливість використання алгоритмів, здатних автоматично визначати компроміс між цими показниками.

На графіку видно, що співвідношення середнього часу доставки, вартості та надійності різних маршрутів. Візуалізація підтверджує, що жоден із маршрутів не можна вважати ідеальним з усіх точок зору. Кожен напрямок має власні переваги та недоліки, і лише комплексний підхід, що базується на принципах мурашиної логістики, здатний забезпечити збалансований вибір з урахуванням множини параметрів. Таким чином, поєднання математичного моделювання з інтелектуальними алгоритмами дозволяє сформувати транспортну систему, яка буде адаптивною, стійкою до зовнішніх змін і орієнтованою на максимальне задоволення потреб клієнтів.

Транспортна логістика для однотипних вантажів, таких як світильники вуличного освітлення, вимагає спеціалізованого підходу через їхні унікальні характеристики: стандартизовані габарити, високу крихкість та сезонний характер поставок. Цей розділ аналізує оптимізацію ланцюга поставок для 20 000+ одиниць продукції на рік, враховуючи вимоги ДСТУ EN 13001-3:2021 та досвід компаній "Фаріон" (Україна) та "Philips Lighting" (ЄС).

Параметри світильників:

Габарити: 1200–1800 мм × 300–500 мм × 300–400 мм

Вага: 15–40 кг/од.

Чутливість: скляні плафони, алюмінієві корпуси.

Упаковка: індивідуальні картонні кокони з пінополіуретановими вкладишами.

Ключові проблеми:

Ризик механічних пошкоджень (до 23% зворотних перевезень);

Необхідність захисту від вологи (IP67);

Сезонні піки попиту (травень–вересень).

Таблиця 3.1 – Транспортні рішення для оптимізації логістичної системи підприємства

Етап	Технологія	Ефективність
Виробник → склад	Європалети (1200×800 мм)	48 од./палета
Склад → регіони	Тентовані напівпричепи (Jumbo)	576 од./рейс (12 палет)
Місцева доставка	Авто з гідробортом (типу Foton Aumark)	Зменшення часу розвантаження на 40%



Рисунок 3.2. Структура логістичного ланцюга при впровадженні елементів технології «мурашиної логістики»

3.2 Заходи із впровадження мурашиної логістики при побудові транспортної системи доставки однотипного вантажу підприємства ТОВ «Шредер»

Для ТОВ «Шредер» мурашина логістика є особливо актуальною через необхідність організації перевезень однотипних вантажів великого обсягу. Світильники вуличного освітлення потребують спеціальної упаковки та дбайливого транспортування, а ефективне управління маршрутами доставки дає змогу знизити витрати підприємства та підвищити якість обслуговування клієнтів.

Особливості організації доставки продукції ТОВ «Шредер»

Підприємство випускає серії світильників, які транспортуються у стандартизований тарі. Це створює умови для оптимізації завантаження автотранспорту та побудови ефективних маршрутів доставки. Основними напрямками перевезень є:

- міжнародні постачання у країни Європейського Союзу (Польща, Чехія, Словаччина, Німеччина), які потребують дотримання митних процедур і координації з транспортно-експедиторськими компаніями;
- внутрішні постачання на території України для муніципальних проектів освітлення вулиць, магістралей та індустріальних зон.

Проблематика транспортування для підприємства включає:

- нерівномірність замовлень за обсягом та географією;

- потребу в швидкій адаптації до змін логістичних умов;
- обмежену кількість транспортних засобів у власному автопарку;
- необхідність зниження витрат на міжнародні перевезення та уникнення затримок.

У зв'язку з цим важливим завданням є впровадження сучасних алгоритмів оптимізації маршрутів доставки.

Конкретні заходи впровадження мурашиної логістики на підприємстві

1. Організаційні заходи

Для успішної інтеграції нових алгоритмів у транспортну систему підприємства необхідно здійснити низку організаційних змін:

- створення спеціалізованого відділу або групи у складі логістичного підрозділу, яка відповідатиме за впровадження та моніторинг роботи мурашиних алгоритмів;
- формування єдиної бази даних про клієнтів, замовлення та маршрути, яка забезпечить алгоритм актуальною інформацією для пошуку оптимальних рішень;
- розробка регламентів роботи диспетчерів і водіїв, де буде описано новий порядок формування маршрутів, реагування на зміни у замовленнях та механізми контролю.

2. Технічні заходи

Для роботи мурашиної логістики необхідно оновити та розширити технічну базу підприємства:

- оснащення всіх транспортних засобів GPS-трекерами та бортовими терміналами для передачі даних у реальному часі;
- встановлення на складі автоматизованої системи обліку вантажів (штрих-коди, RFID-мітки), що дозволить швидше формувати партії відправлень;
- впровадження системи електронного документообігу, яка мінімізує затримки через паперову бюрократію під час міжнародних перевезень.

3. Програмні заходи

Ключовим елементом впровадження мурашиної логістики є програмна реалізація алгоритму оптимізації:

- розробка або придбання програмного забезпечення, що моделюватиме маршрути доставки із використанням АСО;
- інтеграція алгоритму в існуючу ERP-систему підприємства (наприклад, SAP Business One або іншу платформу, яку використовує компанія);
- створення дашбордів для диспетчерів, де візуалізуватимуться маршрути, завантаження транспорту та прогнозовані витрати;
- застосування симуляційних модулів, що дозволять тестувати різні варіанти маршрутів ще до їхньої реалізації.

4. Кадрові заходи

Важливим фактором є підготовка персоналу:

- навчання диспетчерів роботі з новими системами планування маршрутів;
- проведення тренінгів для водіїв з використання навігаційних систем, мобільних додатків і цифрового документообігу;
- підготовка ІТ-фахівців для обслуговування програмного забезпечення, аналізу даних і доопрацювання алгоритмів.

5. Економічні заходи

Впровадження нової системи потребує економічних інвестицій і має забезпечити фінансовий ефект:

- проведення попередніх розрахунків інвестицій у програмне забезпечення, GPS-системи, навчання персоналу;
- складання прогнозу економії коштів за рахунок оптимізації маршрутів (зменшення витрат на паливо, скорочення пробігу порожнім транспортом, зменшення штрафів за прострочення доставки);
- створення механізмів внутрішнього контролю ефективності, коли економічний ефект від впровадження мурашиної логістики відстежується щоквартально.

Приклади практичних кроків для ТОВ «Шредер»

Оптимізація міжнародних маршрутів. Для доставки світильників у Польщу та Німеччину підприємство може використовувати алгоритм пошуку найкоротших шляхів з урахуванням митних пунктів пропуску, часу їх роботи та середньої швидкості проходження. Алгоритм дозволить уникнути перевантажених пунктів і мінімізувати затримки.

Удосконалення внутрішніх перевезень. При доставці в українські міста алгоритм може формувати гнучкі маршрути, що враховують стан доріг, затори у великих містах та потребу об'єднання кількох дрібних замовлень в один маршрут.

Балансування завантаження транспорту. Оскільки світильники є однотипним вантажем, мурашина логістика дозволяє рівномірно розподілити їх між наявними автомобілями, щоб уникати недовантаження чи перевантаження.

Створення цифрового симулятора. Перед запуском нового маршруту диспетчери можуть «прогнати» його через симуляційну систему, щоб оцінити витрати, час доставки та можливі ризики.

Адаптація до сезонності. Під час пікових замовлень (наприклад, у весняно-літній період реалізації муніципальних проєктів освітлення) алгоритм буде швидко перебудовувати маршрути, аби забезпечити доставку у встановлені терміни.

Зворотний зв'язок від водіїв. У мобільних додатках водії можуть залишати інформацію про затори, аварії, перекриття доріг, і ця інформація одразу враховується у роботі алгоритму для наступних партій відправлень.

Очікувані ефекти для підприємства

Впровадження комплексу заходів дозволить:

- знизити логістичні витрати на 15–20 %;
- скоротити середній час доставки на 10–12 %;
- підвищити рівень точності виконання замовлень до 97–98 %;
- зменшити кількість простоїв транспорту на митниці завдяки вибору оптимальних пунктів пропуску;
- створити умови для подальшої цифровізації логістичних процесів.

– підвищення конкурентоспроможності компанії на міжнародному ринку за рахунок зниження логістичних витрат.

Перспективи розвитку транспортної системи

Впровадження мурашиної логістики є першим кроком у напрямку цифрової трансформації транспортної системи підприємства. У майбутньому доцільно розширити її можливості шляхом інтеграції з:

- технологіями big data, що дозволяють аналізувати великі обсяги інформації про ринок перевезень і поведінку клієнтів;
- GPS-моніторингом для відстеження реального руху транспортних засобів;
- системами прогнозовної аналітики, які враховують сезонність і ймовірність затримок;
- хмарними логістичними платформами, що забезпечують координацію між різними учасниками міжнародних перевезень.

Комплекс заходів із впровадження мурашиної логістики у діяльність ТОВ «Шредер» охоплює організаційний, технічний, програмний, кадровий та економічний аспекти. Їхня реалізація дозволить не лише оптимізувати перевезення однотипного вантажу, а й підвищити конкурентоспроможність компанії на міжнародному та внутрішньому ринках. Для виробника світильників вуличного освітлення це означатиме зниження витрат, скорочення часу постачання, підвищення надійності доставки і створення передумов для впровадження більш складних інтелектуальних логістичних систем у майбутньому.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Охорона праці при здійсненні завантажувально-розвантажувальних робіт світлотехнічних виробів

Організація безпечного процесу завантаження світлотехнічних виробів є важливою складовою виробничої та транспортної діяльності компаній, що займаються їх виготовленням і реалізацією. Такі вироби, зокрема світильники, прожектори та інші елементи освітлення, мають специфічні особливості, які безпосередньо впливають на вимоги до охорони праці. По-перше, більшість світлотехнічних виробів є крихкими, містять скляні, електронні та інші делікатні компоненти, пошкодження яких може призвести не лише до матеріальних збитків, а й до виникнення небезпечних ситуацій для працівників. По-друге, процес завантаження пов'язаний з фізичними навантаженнями на персонал, а також із застосуванням технічних засобів механізації, що вимагає дотримання ряду технічних, організаційних і санітарно-гігієнічних заходів.

Безпечна організація робіт починається з правильного облаштування виробничо-складських приміщень і зон завантаження. Майданчики повинні бути рівними, мати достатнє освітлення та вентиляцію, а також позначені сигнальною розміткою, що визначає зони перебування персоналу та місця руху транспортних засобів. Не допускається проведення робіт на слизьких або нерівних поверхнях, що можуть спричинити падіння працівників чи перекидання вантажу. Додатково слід передбачити встановлення захисних бар'єрів у місцях підвищеної небезпеки.

Особливу увагу слід приділяти підготовці персоналу. Працівники, які залучаються до завантаження світлотехнічної продукції, повинні пройти вступний та первинний інструктаж з охорони праці, а також періодичне навчання з правил безпечного поводження з вантажами, що містять скляні та електронні компоненти. Практичні навички роботи з пакувальними матеріалами, вантажопідіймальними механізмами та допоміжними пристроями повинні

відпрацьовуватися під наглядом кваліфікованого інструктора. Працівники зобов'язані використовувати засоби індивідуального захисту: рукавички, захисні окуляри, взуття з протиковзною підошвою, а за необхідності — каски та захисний одяг.

При завантаженні важливим фактором є правильна організація праці з урахуванням ергономічних вимог. Роботи з переміщення світильників вручну повинні бути обмежені нормативами щодо максимально допустимих мас, встановлених чинним законодавством. Наприклад, для жінок і молоді передбачені нижчі граничні норми підйому та перенесення вантажів, ніж для чоловіків. При масі світлотехнічного виробу, що перевищує допустимий рівень, обов'язковим є застосування засобів механізації: гідравлічних візків, вантажних платформ, підйомників. Забороняється піднімати вантаж ривком, з нахилом корпусу чи зігнутими спиною та ногами, оскільки це може призвести до травм опорно-рухового апарату.

Завантаження світлотехнічних виробів у транспортні засоби вимагає дотримання технологічної послідовності дій. Перед початком робіт необхідно перевірити справність транспортного засобу, стан його кузова та вантажного відсіку, а також пристроїв для кріплення вантажу. Поверхня кузова має бути сухою, чистою та рівною. Працівники повинні забезпечити розташування виробів у тарі чи контейнерах, що відповідають їхнім габаритам і ступеню крихкості. Тара повинна мати маркування «Крихке» або «Обережно», а також бути обладнана м'якими прокладками, що запобігають ударам при транспортуванні.

При укладанні вантажу необхідно забезпечити його стійкість та недопущення переміщення під час руху автомобіля. Для цього використовуються кріпильні ремені, розпірні балки, м'які прокладки та антиковзні підкладки. Світлотехнічні вироби не можна розташовувати у декілька ярусів без використання жорстких перегородок, оскільки це може призвести до руйнування нижніх коробок. Важкі елементи укладаються знизу, а легкі — зверху. Забороняється використовувати пошкоджену або непридатну тару.

Додатково слід враховувати електробезпеку під час завантаження, оскільки частина світлотехнічних виробів містить елементи живлення, блоки живлення або інші електричні компоненти. Перед завантаженням необхідно перевіряти, щоб усі пристрої були відключені від електромережі, належним чином упаковані та не мали ознак пошкодження ізоляції. Працівники не повинні допускати контакту електронних компонентів із вологою, агресивними хімічними речовинами або джерелами відкритого вогню.

Психофізіологічні фактори також відіграють значну роль у забезпеченні безпеки праці. Перевтома, монотонність роботи, дефіцит уваги або порушення режиму праці та відпочинку можуть призвести до аварійних ситуацій. Тому організація завантажувальних робіт має передбачати оптимальні перерви, чергування фізичних і менш напружених завдань, а також підтримання сприятливого мікроклімату на робочому місці. Рівень шуму, освітлення та вентиляції повинен відповідати санітарним нормам, аби забезпечити комфортні умови для працівників.

Важливим елементом системи охорони праці є контроль за дотриманням правил безпеки. На підприємстві повинна діяти служба охорони праці, яка здійснює регулярні інструктажі, перевірки стану обладнання, аудит виробничих процесів та оперативне реагування на можливі порушення. Працівники повинні мати можливість повідомляти керівництво про виявлені небезпечні фактори без ризику дисциплінарних стягнень. Для попередження нещасних випадків варто впроваджувати систему колективної відповідальності та мотивації за дотримання норм безпеки.

З огляду на міжнародні вимоги до транспортування світлотехнічних виробів, особливо у випадках експорту, компанії повинні враховувати не лише національне законодавство, але й стандарти Європейського Союзу та міжнародні норми безпеки. Це стосується маркування вантажів, характеристик пакування, параметрів зберігання та вимог до робочих місць персоналу. Дотримання таких стандартів дозволяє не лише гарантувати безпеку працівників, а й підвищує конкурентоспроможність компанії на міжнародному ринку.

Таким чином, охорона праці при завантаженні світлотехнічних виробів є комплексною системою заходів, що охоплює організаційні, технічні, санітарно-гігієнічні та психофізіологічні аспекти. Виконання вимог законодавства, застосування сучасних технічних засобів, проведення регулярного навчання персоналу та забезпечення належних умов праці дозволяє значно знизити ризики виникнення травм, пошкодження вантажу та аварійних ситуацій. Раціональна організація цього процесу сприяє підвищенню ефективності логістичної діяльності підприємства, мінімізації фінансових втрат і зміцненню репутації компанії на ринку світлотехнічної продукції.

4.2 Дії працівників при виникненні пожеж на підприємствах світлотехнічного комплексу

Забезпечення пожежної безпеки на підприємствах світлотехнічної галузі є однією з ключових складових загальної системи охорони праці та промислової безпеки. Особливість таких підприємств полягає у високому рівні використання електрообладнання, великій кількості електронних компонентів, наявності пластмас, горючих матеріалів, тари з картону та деревини, а також застосуванні технологічних процесів, які пов'язані з нагріванням, паянням, сушінням або випалюванням. Усі ці чинники підвищують імовірність виникнення пожежі як на виробничих ділянках, так і у складських приміщеннях. Тому правильні, чіткі й своєчасні дії працівників у випадку загоряння відіграють вирішальну роль у запобіганні людським жертвам, масштабним матеріальним збиткам та зупинці виробництва.

Першочерговим завданням кожного працівника підприємства є своєчасне виявлення ознак пожежі. До таких ознак належать: поява диму або запаху гару, іскріння електроприладів, підвищення температури поверхонь обладнання, полум'я або тління матеріалів. У разі виявлення хоча б однієї з цих ознак працівник зобов'язаний негайно повідомити про це безпосереднього керівника, чергового диспетчера або охорону, використовуючи встановлені канали зв'язку

— внутрішній телефон, радіозв'язок або пожежну сигналізацію. Одночасно необхідно активувати систему оповіщення про пожежу, яка виводить звукові або світлові сигнали для оповіщення всього персоналу про небезпеку.

Важливим етапом є оцінка ситуації на місці загоряння. Якщо вогнище пожежі має локальний характер, площа загоряння не перевищує допустимі норми, а умови дозволяють здійснити гасіння без загрози життю та здоров'ю працівників, слід негайно розпочати ліквідацію пожежі за допомогою первинних засобів пожежогасіння. До таких засобів належать: порошкові або вуглекислотні вогнегасники, пожежні крани, пісок, азбестові покривала. Кожен працівник повинен бути попередньо навчений правилам користування цими засобами та знати їхнє розташування на своїй виробничій ділянці. Вибір типу вогнегасника залежить від характеру загоряння: при пожежі електрообладнання заборонено використовувати воду або пінні вогнегасники, оскільки це може призвести до ураження електричним струмом або поширення полум'я.

Якщо локалізувати загоряння самотійно неможливо або воно набуває загрозливого масштабу, необхідно негайно організувати евакуацію працівників із небезпечної зони. Для цього використовуються заздалегідь розроблені та затверджені плани евакуації, що повинні бути розміщені на видимих місцях у кожному цеху, на складі, у побутових приміщеннях та в адміністративних корпусах. Працівники зобов'язані чітко знати напрямки руху до евакуаційних виходів, правила поведінки під час евакуації, а також місце збору після виходу з будівлі. Всі евакуаційні шляхи повинні бути вільними від перешкод, добре освітленими, позначеними фотолюмінесцентними вказівниками «Вихід».

Під час евакуації необхідно зберігати спокій, уникати паніки та діяти відповідно до вказівок відповідальних осіб — керівників евакуаційних груп або уповноважених з пожежної безпеки. Не допускається використання ліфтів, оскільки у разі знеструмлення електромережі це може призвести до блокування людей всередині шахти. Особлива увага приділяється евакуації осіб з обмеженими фізичними можливостями, жінок та молоді, а також виведенню

сторонніх осіб або відвідувачів, якщо вони перебували на території підприємства під час виникнення пожежі.

Після виведення людей із небезпечної зони необхідно провести перевірку присутності персоналу за допомогою обліку — звірки із затвердженими списками або електронною реєстрацією. У випадку виявлення відсутніх осіб необхідно негайно повідомити рятувальні служби, вказавши останнє місце перебування цих осіб, їхні можливі маршрути пересування та характер виконуваних робіт.

Паралельно із заходами з евакуації відповідальні особи підприємства зобов'язані викликати пожежно-рятувальну службу за номером 101, надаючи максимально повну інформацію: точну адресу об'єкта, характер пожежі (електрична, хімічна, загоряння тари тощо), масштаби загоряння, наявність людей у приміщеннях, типи небезпечних речовин або компонентів, що можуть бути джерелом вибуху або токсичного задимлення. Прибуття пожежно-рятувальних підрозділів має супроводжуватись зустріччю та супроводом до осередку пожежі представниками адміністрації або уповноваженими працівниками, які добре орієнтуються на об'єкті.

Важливо зазначити, що на підприємствах світлотехнічного комплексу можуть зберігатися хімічні реагенти, лакофарбові матеріали, пластики, полімери та інші речовини, які при горінні виділяють токсичні гази. У такому випадку працівники повинні використовувати засоби індивідуального захисту органів дихання — фільтрувальні респіратори або евакуаційні капюшони, що знижують ризик отруєння продуктами горіння. За наявності загрози хімічного ураження необхідно проводити евакуацію у напрямку, протилежному напрямку вітру, з урахуванням рельєфу місцевості та розташування будівель.

Після повної ліквідації пожежі здійснюється аналіз ситуації, виявлення причин її виникнення та розробка заходів щодо запобігання аналогічним випадкам у майбутньому. До аналізу залучаються служба охорони праці, пожежна безпека, адміністрація підприємства, представники профспілкових організацій та, за необхідності, органи Державної служби України з

надзвичайних ситуацій. Проводиться обстеження технічного стану обладнання, перевірка справності електромереж, вентиляційних систем, пожежної сигналізації, засобів гасіння та систем оповіщення.

З метою підвищення готовності персоналу до дій у разі пожежі на підприємствах світлотехнічної галузі повинні регулярно проводитися навчальні тренування та протипожежні навчання. Такі заходи дозволяють відпрацювати алгоритм дій у реальних умовах, скоротити час реакції персоналу, сформувати у працівників психологічну готовність до дій в умовах стресу. Результати навчань документуються, аналізуються та використовуються для вдосконалення планів евакуації, розміщення вогнегасників, оновлення інструкцій.

Усі зазначені вище заходи повинні бути відображені в нормативній документації підприємства: інструкціях з пожежної безпеки, положеннях про дії у надзвичайних ситуаціях, планах евакуації, схемах розташування первинних засобів пожежогасіння. Кожен працівник повинен бути ознайомлений із цими документами під підпис, а також проходити щорічну перевірку знань вимог пожежної безпеки.

Таким чином, дії працівників при виникненні пожежі на підприємствах світлотехнічного комплексу мають базуватися на принципах оперативності, організованості, дисципліни та знань. Вчасне виявлення загоряння, правильне використання засобів пожежогасіння, чітке виконання евакуаційних заходів та ефективна взаємодія з рятувальними службами — це основні чинники, які дозволяють мінімізувати наслідки пожежі. Комплексна система навчання, профілактики, технічного забезпечення та контролю дозволяє створити безпечне виробниче середовище, зберегти життя та здоров'я працівників, а також забезпечити стабільність і надійність функціонування підприємства світлотехнічної галузі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

В роботі досліджено специфіку побудови транспортної системи доставки однотипного вантажу. Було розглянуто алгоритми мурашиної колонії як один із найбільш перспективних підходів до вирішення задач комбінаторної оптимізації. Проаналізовано особливості функціонування мурашиної логістики, виявлено її переваги над традиційними методами та обґрунтовано можливість застосування при розв'язанні задач маршрутизації. На основі проведеного аналізу було розроблено метод доставки вантажів різним клієнтам із урахуванням технічних і організаційних обмежень.

Розроблено практичні рекомендації щодо побудови ефективної транспортної системи доставки світильників підприємства ТОВ «Шредер» із використанням принципів мурашиної логістики. Було змодельовано схему оптимізованих маршрутів і показано, що застосування алгоритмів мурашиної колонії дає змогу зменшити загальні транспортні витрати, підвищити точність дотримання термінів доставки та забезпечити раціональне використання автопарку. Також запропоновано заходи з упровадження мурашиної логістики у практичну діяльність підприємства, що сприятиме підвищенню конкурентоспроможності та адаптивності транспортної системи до змін зовнішнього середовища.

Розглянуто питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях. Проаналізовано умови виконання завантажувально-розвантажувальних робіт зі світлотехнічними виробами, визначено потенційні ризики та запропоновано комплекс заходів для їх мінімізації. Окрему увагу приділено діям персоналу у разі виникнення пожеж на підприємствах світлотехнічного комплексу. Таким чином, у роботі доведено доцільність і практичну ефективність застосування мурашиної логістики в організації транспортної системи доставки однотипних вантажів. Запропоновані підходи не лише дозволяють оптимізувати маршрути та зменшити витрати, але й сприяють підвищенню рівня безпеки, надійності та гнучкості транспортних процесів у сучасних умовах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Aby K Abraham, Bobin Cherian Jos, Georgekutty S Mangalathu. The Pickup And Delivery Vehicle Routing Problem For Perishable Goods In Air-Cargo Industry // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – 2012. – V 2. – N 12. – P. 790-794
2. Bard J.F., Huang L., Jaillet P., Dror M. A decomposition approach to the inventory routing problem with satellite facilities // Transportation Science. – 1998. – V. 32. – N. 2. – P. 189
3. Beltrami E. J., Bodin L. D. Networks and vehicle routing for municipal waste collection // Networks. – 1974. – V. 4. – P. 65–94
4. Casco D. O., Golden B. L., Wasil E. A. Vehicle Routing with Backhauls: Models, Algorithms and Case Studies. / Vehicle Routing: Methods and Studies, Elsevier. – 1988. P. 127-147
5. Dantzig G.B., Ramser J.H. The Truck Dispatching Problem // Management Science. – 1959. – V 6. – P. 80-91
6. Desrosiers Jacques, Soumis François, Desrochers Martin. Routing with time windows by column generation // Networks. – 1984. – V. 14. – N. 4. – P. 545-565
7. Dror M., Trudeau P. Savings by Split Delivery Routing // Transportation Science. – 1989. – Vol. 23. – No. 2. – P. 141-145
8. Gendreau M., Iori M., Laporte G., Martello S. A tabu search algorithm for a routing and container loading problem // Transportation Science. – 2006. – V. 40. – N. 3. – P. 342-350
9. Goodson Justin Christopher. Solution methodologies for vehicle routing problems with stochastic demand / Dissertation, University of Iowa. – 2010
10. Hall R. Survey of vehicle routing software spotlights critical supply chain management role / R. Hall // On the Road to Integration, 2006
11. Iori M., Salazar Gonzalez J.J., Vigo D. An exact approach for the Vehicle Routing Problem with two dimensional loading constraints // Transportation Science. – 2005. V. 41. – N. 2. – P. 253–264

12. Langevin A., Riopel D. Logistics Systems: Design and Optimization. – New York: Springer, 2005. – 388 p
13. Laporte G. Classical Heuristics for the Vehicle Routing Problem. / Les Cahiers du GERAD, G98-54, Group for Research in Decision Analysis, 1998, Montreal, Canada
14. Laporte G., Nobert Y., Arpin D. Optimal solutions to capacitated multi depot vehicle routing problems // Congressus Numerantium. – 1984. – 44. – P. 283–292
15. Nurfahizul W. Ifwah. WA, Shaiful M., Shamsunarnie M.Z, Zainuddin Z.M, Fuad M. Genetic Algorithm for Vehicle Routing Problem with Backhauls // Journal of Science and Technology. – 2012. – T. 4, 1. – P. 9-16
16. Toth P., Vigo D. The Vehicle Routing Problem. – Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics. – 2002. – 386 p.
17. Schmid Verena, Doerner Karl F., Laporte Gilbert. Rich Routing Problems Arising in Supply Chain Management // European Journal of Operational Research. – 2013. – V 224. – N 3. – P. 435-448.
18. Lenstra J., Rinnooy K. Complexity of vehicle routing and scheduling problems // Networks. – 1981. – V. 11. – N. 2. – P. 221-227.