

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

КАФЕДРА ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ І ЛОГІСТИКИ

**ПІДХОДИ ДО УПРАВЛІННЯ МАТЕРІАЛЬНИМИ
ПОТОКАМИ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ
ПЕРЕВЕЗЕНЬ**

Колективна монографія

Харків

2025

УДК 656.025.2+073

П 32

*Затверджено до видання Вченою Радою ХНАДУ, Дозвіл № 76/25/5.17 від 16.05.2025***Рецензенти:**

Давідич Ю.О. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова.

Степанов О.В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри тракторів і автомобілів, Національний університет біоресурсів і природокористування України.

Попович П.В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри транспорту і логістики, Західноукраїнський національний університет.

Редакційна колегія колективної монографії:

Горбачов П.Ф. – головний редактор, доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет.

Любий Є.В. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет.

Свічинський С.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет.

Кочина А.А. – кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет.

П 32 Підходи до управління матеріальними потоками та оптимізації вантажних перевезень : колективна монографія / Н.В. Птиця, К.Г. Ковцур, О.О. Орда, О.С. Колій; за загальною редакцією проф. П.Ф. Горбачова. Харків: СГ НТМ «Новий курс», 2025. 154 стор. ISBN 978-617-7886-80-7. DOI: 10.61718/tsl2025m2

Колективна монографія присвячена дослідженню сучасних проблем і перспектив розвитку транспортно-логістичних систем України в умовах економічної трансформації та європейської інтеграції. У книзі розглянуті питання управління матеріальними потоками, організації взаємодії вантажного транспорту з перевалочними пунктами, розвитку інтермодальних перевезень у контексті інтеграції української транспортної системи з TEN-T, а також проаналізовані алгоритмічні підходи до маршрутизації перевезень. Монографія орієнтована на науковців, викладачів, здобувачів вищої освіти, а також практиків у сфері логістики, транспорту й управління інфраструктурою.

Представлені у монографії матеріали учасників подані в авторській редакції і відображають власну наукову позицію авторів. Автори несуть повну відповідальність за точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, наукової термінології, імен власних, джерел посилання.

П 32

УДК 656.025.2+073

ISBN 978-617-7886-80-7

DOI: 10.61718/tsl2025m2

© Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 2025

© СГ НТМ «Новий курс», 2025

© Автори, текст, 2025

ЗМІСТ

Вступ	5
--------------------	---

Птиця Н.В.

1. Дослідження особливостей управління матеріальними потоками у системі забезпечення виробництва та дистрибуції	7
1.1. Актуальність питання	7
1.2. Особливості управління матеріальними потоками у системі виробництва	8
1.3. Управління матеріальними запасами у системі виробництва.....	15
1.4. Управління дистрибуцією: організація каналів розподілу	23

Ковцур К.Г.

2. Теоретичні та практичні аспекти організації сумісної роботи вантажних автомобілів і пунктів перевалки	37
2.1. Актуальність питання	37
2.2. Постановка проблеми	38
2.3. Аналіз робіт українських дослідників з питань оптимізації процесів обробки вантажів.....	40
2.4. Визначення часу перебування транспортних засобів у пунктах перевалки.....	43
2.5. Існуючі системи масового обслуговування з пріоритетами.....	48
2.6. Пріоритетність в обслуговуванні	56
2.7. Вирішення задачі.....	60
2.8. Опис часу обслуговування транспортного засобу у пункті перевалки.....	63
2.9. Висновки	67

Орда О.О.

3. Розвиток інтермодальних контейнерних перевезень як інструмент інтеграції українських логістичних шляхів до TEN-T: проблеми і перспективи	72
3.1. Актуальність питання	72
3.2. Аналіз практичних аспектів розвитку інтермодальних контейнерних перевезень в ланцюгах постачань	72
3.3. Теоретичні основи організації інтермодальних контейнерних перевезень в ланцюгах постачань	85
3.4. Висновки	103

Колій О.С.

4. Комплексний аналіз алгоритмічних стратегій

розв’язання задачі маршрутизації транспортних засобів	109
4.1. Конструктивні алгоритми.....	111
4.1.1. Алгоритм Кларка-Райта.....	111
4.1.2. Розширення алгоритму Кларка-Райта.....	113
4.1.3. Послідовний алгоритм вставки Моля-Джеймсона	116
4.1.4. Послідовний алгоритм вставки Крістофідеса-Мінгодзі-Тосса.....	117
4.2. Двофазні класичні алгоритми	118
4.2.1. Алгоритм заметання.....	119
4.2.2. Алгоритм Фішера-Джекумера	121
4.2.3. Алгоритм Брамела-Сімчі-Леві	122
4.2.4. Алгоритм пелюстків.....	123
4.2.5. Методи з розв’язанням ЗК перед кластеризацією	127
4.3. Класичні поліпшуючі алгоритми.....	128
4.3.1. Оптимізація окремого маршруту.....	129
4.4. Алгоритм Османа – пошук з виключеннями	130
4.4.1. Поняття околу розв’язання	131
4.4.2. Стратегія заборони.....	132
4.4.3. Стратегія дозволу (видалення зі списку виключень).....	133
4.4.4. Стратегія вибору.....	134
4.4.5. Спеціальна структура даних для стратегії «найкращий допустимий»	135
4.4.6. Загальний вигляд алгоритму	136
4.4.7. Імітований відпал	137
4.4.8. Алгоритм Османа	139
4.5. Генетичний алгоритм.....	140
4.5.1. Основний вигляд генетичного алгоритму	140
4.5.2. Застосування генетичного алгоритму для задач упорядкування	141
4.6. Метаевристики.....	144
4.6.1. Алгоритм на основі мурашиних колоній.....	145
4.7. Нейронні мережі.....	147

ВСТУП

Сучасні виклики, що постають перед транспортно-логістичною системою України, обумовлюють необхідність комплексного осмислення підходів до управління матеріальними потоками, удосконалення взаємодії транспортних ланок логістичних ланцюгів, розширення використання інтермодальних перевезень і застосування алгоритмічних методів оптимізації використання транспортних засобів на маршрутах. В умовах динамічного розвитку внутрішнього ринку та інтеграції до трансєвропейської транспортної мережі (TEN-T) значно зростає роль наукових досліджень, спрямованих на підвищення ефективності логістичних процесів, їх адаптації до цифрових технологій і міжнародних стандартів.

Ці напрями повністю відповідають стратегічним завданням, закладеним у Національній транспортній стратегії України на період до 2030 року, Плані заходів з реалізації Національної транспортної стратегії, а також Угоді про асоціацію між Україною та ЄС. Важливим орієнтиром для імплементації розглядуваних у монографії науково-практичних підходів до управління роботою транспорту з урахуванням його зв'язку з іншими ланками ланцюгів постачань виступають також документи Європейської комісії щодо розвитку TEN-T та Зеленої угоди (European Green Deal), які визначають пріоритетність задачі забезпечення сталості транспорту і декарбонізації перевезень.

Метою цієї колективної монографії є висвітлення актуальних теоретичних і прикладних аспектів функціонування та розвитку транспортно-логістичних систем з акцентом на матеріально-технічне забезпечення, організацію перевезень і використання інструментів алгоритмічної оптимізації.

У першому розділі монографії розглянуто особливості управління матеріальними потоками у системі забезпечення виробництва та дистрибуції. Розкрито теоретичні основи логістичного управління, охарактеризовано структуру матеріальних потоків, методи їхнього планування, а також наведено практичні приклади застосування логістичних стратегій у реальних умовах функціонування підприємств.

Другий розділ присвячено теоретичним і практичним аспектам організації сумісної роботи вантажних автомобілів і пунктів перевалки. Детально проаналізовані особливості виконання стикових операцій, варіанти організації перевалочних процесів, їхній вплив на безперервність функціонування ланцюгів постачань, а також запропоно-

вано шляхи підвищення ефективності транспортних і перевалочних процесів в умовах обмежених ресурсів.

У третьому розділі висвітлено питання розвитку інтермодальних контейнерних перевезень як інструменту інтеграції транспортної галузі України з TEN-T. Здійснено аналіз бар'єрів розвитку, інфраструктурних потреб, правових аспектів та перспектив застосування інтермодальних технологій в українських реаліях.

Четвертий розділ присвячено комплексному аналізу алгоритмічних стратегій розв'язання задачі маршрутизації перевезень. Увагу зосереджено на математичних методах, зокрема евристичних та метаевристичних, які дозволяють оптимізувати маршрути руху транспортних засобів з урахуванням багатьох обмежень – від часових вікон до змінної завантаженості інфраструктури.

Монографія адресована науковцям, викладачам, аспірантам, студентам технічних і економічних спеціальностей, а також фахівцям-практикам у сфері логістики, транспорту та управління ланцюгами постачання. Представлений матеріал може стати основою для подальших досліджень, стратегічного планування та практичних рішень у галузі логістики в умовах модернізації та євроінтеграції.

1. Дослідження особливостей управління матеріальними потоками у системі забезпечення виробництва та дистрибуції

Н.В. Птиця

доцент кафедри транспортних систем і логістики ХНАДУ,
канд. техн. наук, доцент

1.1. Актуальність питання

За умови динамічного розвитку економіки підприємства зіштовхуються з необхідністю постійного вдосконалення логістичних процесів, що забезпечують ефективне функціонування виробництва та дистрибуції продукції. Зростання вимог до швидкості, точності та надійності постачань вимагає оптимізації всього ланцюга постачань, що включає управління запасами, складську логістику, транспортні перевезення та розподіл готової продукції.

Організація ефективного управління матеріальними потоками передбачає врахування особливостей двох ключових процесів: забезпечення виробництва необхідними матеріалами, сировиною та комплектуючими, а також дистрибуції готової продукції до кінцевого споживача. Обидва процеси є взаємопов'язаними та суттєво впливають на загальну ефективність підприємства. Невчасне постачання матеріалів може спричинити збої у виробничому циклі, тоді як нерациональна система дистрибуції може призвести до затримок у постачанні продукції на ринок і втрати конкурентних переваг.

Розвиток транспортної логістики і впровадження новітніх технологій моніторингу, маршрутизації та управління перевезеннями дозволяють підвищити контроль над матеріальними потоками та забезпечити їхню безперебійну координацію. Це особливо важливо для підприємств, що працюють з товарами, які потребують спеціальних умов зберігання та транспортування. Висока точність і надійність доставки стають ключовими факторами, що впливають на якість продукції та рівень задоволеності споживачів. Крім того, ефективна транспортна логістика сприяє зниженню витрат на перевезення та оптимізації використання ресурсів. Раціональне планування маршрутів дозволяє мінімізувати затримки, уникати простоїв і підвищувати загальну продуктивність перевізників. Це створює умови для стабіль-

ної роботи підприємств і своєчасного виконання зобов'язань перед партнерами.

1.2. Особливості управління матеріальними потоками у системі виробництва

Система забезпечення виробництва відіграє фундаментальну роль у досягненні стратегічних цілей підприємства, оскільки ефективне управління складськими операціями сприяє мінімізації витрат, скороченню часу виконання замовлень і підвищенню продуктивності. Оптимізація складської логістики дозволяє значно покращити фінансовий стан підприємства, зменшуючи обсяги незатребуваних запасів та оптимізуючи процеси закупівлі. Сучасні підходи до управління запасами передбачають застосування цифрових технологій та автоматизованих систем контролю, що дозволяє оперативно реагувати на зміни у виробничих потребах.

Окремо слід приділити увагу організації процесу дистрибуції готової продукції, який охоплює вибір оптимальних каналів розподілу, планування маршрутів доставки та забезпечення координації між усіма учасниками логістичного ланцюга. У сучасних умовах дистрибуція передбачає використання інноваційних рішень, таких як автоматизовані системи відстеження вантажів, хмарні платформи для управління замовленнями та штучний інтелект для прогнозування попиту. Раціональний вибір каналів розподілу дозволяє підприємству знизити витрати, підвищити швидкість доставки продукції та адаптуватися до змін ринкової кон'юнктури. Крім економічних аспектів, управління матеріальними потоками відіграє важливу роль у забезпеченні сталого розвитку підприємства. Впровадження екологічно безпечних складських рішень, зменшення обсягів відходів і скорочення викидів парникових газів у логістичних процесах сприяють досягненню високих стандартів соціальної відповідальності.

Зростання вимог до оперативності постачання, якості сировини та точності забезпечення виробничих потреб створює необхідність впровадження сучасних логістичних методів і технологій. Система забезпечення виробництва охоплює весь цикл: від планування потреб у матеріалах до їх доставки на робочі місця [1-5]. Важливо інтегрувати всі складові цієї системи, зокрема склади, транспортні засоби та постачальників, щоб уникнути збоїв у забезпеченні й мінімізувати втрати.

Ключовим аспектом ефективної системи забезпечення виробництва є гнучкість у реагуванні на змінні виробничі потреби та ринкові умови. Використання цифрових технологій, таких як автоматизовані системи управління запасами, програмне забезпечення для планування поставок і моніторинг постачання в режимі реального часу, сприяє покращенню точності та своєчасності виконання операцій. Інтеграція інформаційних потоків між усіма учасниками забезпечення дозволяє забезпечити прозорість процесів, швидке прийняття рішень і зниження логістичних витрат.

Раціоналізація системи забезпечення виробництва потребує застосування комплексу інструментів. Зокрема, особливого значення набуває управління складськими процесами: ефективне зберігання, оптимізація процесів обробки вантажів і правильний вибір системи відбору матеріалів. Планування маршрутів транспортування з урахуванням потреб виробництва, обсягів постачань, часу доставки та собівартості перевезень є важливим для забезпечення рівномірного і безперебійного постачання. Також слід враховувати сезонні коливання попиту на ресурси та передбачати оптимальні обсяги постачань, щоб уникнути як дефіциту, так і надмірного накопичення запасів.

Дослідження та вдосконалення системи забезпечення виробництва є стратегічно важливими для підприємств, які прагнуть підвищити свою ефективність і адаптивність до сучасних викликів. Раціональна організація цієї системи дозволяє підприємствам ефективніше використовувати ресурси, зменшувати витрати та створювати довгострокові конкурентні переваги завдяки підвищенню надійності та якості виробничих процесів.

Система виробництва – це сукупність взаємопов'язаних елементів, які забезпечують процес створення продукції або надання послуг. Вона включає ресурси, засоби виробництва, технології, працівників, а також управлінські підходи, спрямовані на ефективне досягнення цілей підприємства [2-5]. Основними елементами системи виробництва є матеріальні ресурси (сировина, матеріали, енергоресурси та комплектуючі), технології (методи, процеси та обладнання), персонал (працівники, які виконують виробничі операції та управляють процесами), організація процесів (логістика, планування, контроль якості та управління потоками інформації) та інфраструктура (виробничі цехи, склади, транспортні системи). У загальних рисах система виробництва представлена на рис. 1.

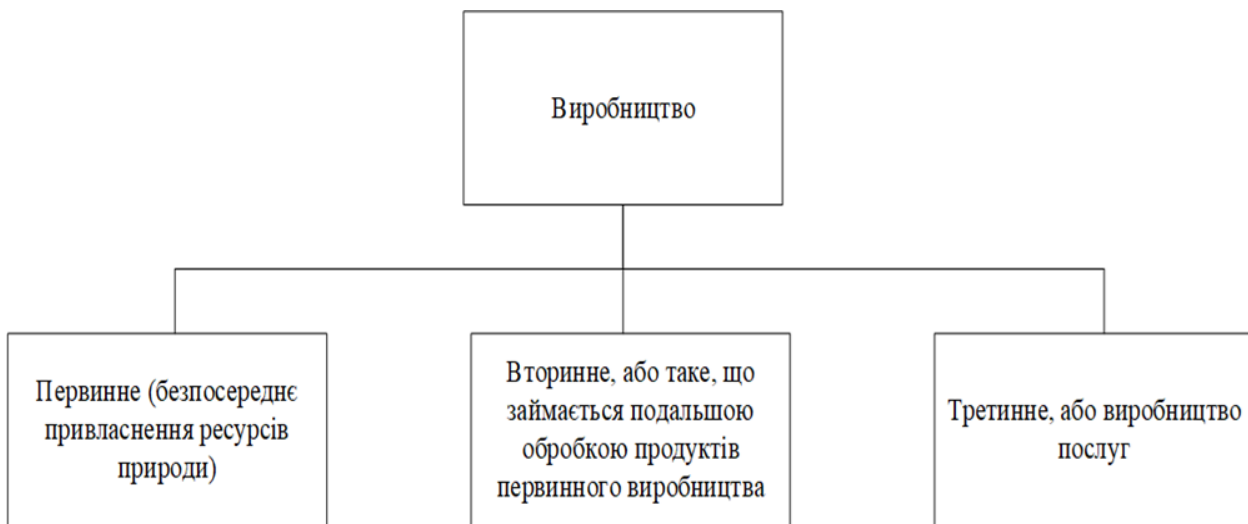


Рис. 1. Структура виробництва

Для правильної організації системи виробництва важливо врахувати кілька ключових аспектів. Насамперед необхідно ефективно планувати виробничі процеси: визначати потреби в ресурсах, розробляти графік виробництва для уникнення простоїв чи перевантаження, а також враховувати сезонні коливання попиту та можливі ризики. Важливим є також оптимальне організування робочих місць – забезпечення безпеки, зручності для працівників і мінімізації часу переміщення матеріалів.

Сучасні технології відіграють критично важливу роль – автоматизовані системи управління (наприклад, ERP, MES) допомагають у плануванні та моніторингу виробничих операцій, а впровадження інноваційних рішень підвищує точність і знижує витрати. Управління запасами та постачаннями також є невід’ємною частиною ефектвної системи виробництва – необхідно тримати оптимальний рівень запасів для безперебійної роботи, водночас мінімізуючи витрати на їхнє зберігання, а також налагоджувати співпрацю з надійними постачальниками.

Контроль якості на кожному етапі виробництва є важливим для дотримання стандартів продукції, а також для забезпечення відповідності процесів вимогам споживачів. Управління персоналом передбачає навчання працівників, впровадження новітніх технологій, мотивацію через гідну оплату праці, бонуси за ефективність і можливість професійного розвитку.

Система виробництва також повинна бути стійкою, адже підприємство має: мінімізувати відходи; впроваджувати екологічно чисті технології; використовувати відновлювані ресурси та знижувати

енергоспоживання. Метою правильної організації системи виробництва є забезпечення високої продуктивності, якості продукції, гнучкості до змін попиту та оптимізації витрат. Добре налагоджена система виробництва дозволяє підприємству залишатися конкурентоспроможним і успішним навіть в умовах нестабільного ринку. Представлення підприємства, як виробничої системи показано на рис. 2.



Рис. 2. Підприємство як система виробництва

Система забезпечення виробництва є основою функціонування будь-якого виробничого підприємства. Її головною метою є своєчасне і якісне забезпечення виробничих процесів необхідними ресурсами, зокрема матеріалами чи сировиною та ін. Ефективність організації системи забезпечення визначає безперебійність виробничого процесу, його продуктивність, а також загальний успіх підприємства.

Організація системи забезпечення виробництва – це завжди складний процес, оскільки потрібно врахувати велику кількість факторів. В основному система складається з кількох основних елементів. Управління матеріальними потоками включає планування, контроль та організацію постачання сировини, матеріалів і комплектуючих для підтримки виробництва. Це один з основних елементів від якого залежить безперебійність виробництва. Такий елемент як логістична інфраструктура виробничих потужностей охоплює транспор-

тні засоби, склади, механізми завантаження та розвантаження, а також системи зберігання. Від логістичної інфраструктури залежатимуть обсяги виробництва, що можуть обробитися. Координація поставачань відповідає за забезпечення злагодженої роботи між постачальниками, транспортними компаніями та підрозділами підприємства. Не маловажним є також контроль якості матеріалів, що передбачає перевірку відповідності продукції від постачальників встановленим стандартам.

У контексті наукових підходів до забезпечення виробництва важливим є визначення оптимальної моделі організації даної системи. Це може бути централізована модель, коли всі рішення щодо поставчання приймаються на рівні головного офісу підприємства, або децентралізована модель, коли кожен виробничий підрозділ має автономію в забезпеченні ресурсами.

Основною функцією забезпечення виробництва є підтримка та забезпечення виробництва готової продукції необхідною сировиною, також є додаткові функції [3, 5]. Їх можна поділити на кілька основних груп:

- планування потреб;
- управління постачальниками;
- організація закупівель;
- зберігання та складування;
- контроль процесу поставчання.

Функціонально процес починається з визначення кількості та якості матеріалів, необхідних для виконання поставленої виробничої програми. Далі виконується аналіз ринку, проводиться вибір постачальників, укладання контрактів та підтримка довгострокових партнерських відносин. На наступному етапі виконується вибір оптимальних способів придбання ресурсів, включаючи прямі закупівлі, тендери або довгострокові контракти. Потім необхідно забезпечити умови для зберігання сировини, що мінімізують втрати якості та обсягів. На останньому етапі провести моніторинг виконання графіків поставчання, виявити та усунути всі можливі збої.

Система забезпечення виробництва також охоплює широкий спектр технологічних процесів, які забезпечують безперебійне поставчання сировини до місць їх переробки, починаючи від закупівлі ресурсів. Закупівля включає ідентифікацію потреб виробництва, пошук постачальників, ведення переговорів, укладання договорів та оформлення майбутніх замовлень. Процес транспортування забезпечує дос-

тавку сировини від постачальників до підприємства або всередині, між підрозділами підприємства. Особливо важливою ланкою є складування сировини на етапі виробництва. Тут забезпечується зберігання матеріалів, створення умов для їх довготривалого чи короткотермінового зберігання ресурсів, в залежності від специфіки виробництва.

Технологічна операція підготовки до виробництва забезпечує перевірку відповідності поставленої сировини всім технічним вимогам, виконується попередня обробка, фасування чи комплектація. Також необхідно провести контроль якості, тобто тестування отриманих ресурсів на відповідність технічним стандартам та вимогам.

На ефективність системи забезпечення виробництва чинять вплив велика кількість факторів. Серед зовнішніх факторів можна відмітити економічну ситуація, рівень конкуренції на ринку постачальників, зміни в законодавстві та митній політиці, геополітичні ризики та ін. Внутрішні фактори включають фінансовий стан підприємства, кваліфікація персоналу, рівень автоматизації процесів, організаційна структура підприємства. Також в окрему групу можна віднести логістичні фактори впливу, це доступність транспортної інфраструктури, відстань до постачальників, складність логістичних ланцюгів та наявна система управління запасами.

Забезпечення виробництва ресурсами починається з визначення потреб. Для цього використовується система матеріально-технічного планування, яка враховує виробничий план, наявні запаси та можливості постачальників. Визначивши потреби, підприємство розробляє графік закупівель і транспортування.

Під час вибору постачальників аналізуються такі аспекти, як ціна, якість, репутація на ринку, надійність виконання замовлень, умови оплати та доставки. На основі цього приймається рішення про укладання договору.

Оптимізація процесів забезпечення є однією з ключових складових ефективності системи. Це включає декілька складових: оптимізацію виробничих запасів, раціоналізацію логістики та зменшення витрат.

Оптимізацію запасів має забезпечувати підтримку мінімального рівня матеріалів, достатнього для безперервного виробництва.

Вибір найефективніших маршрутів транспортування сировини та методів її складування забезпечує раціоналізацію логістики.

Зменшення витрат це орієнтація на зниження витрат при забезпеченні системи виробництва, першочергово при виконанні основних технологічних процесів зберігання та транспортування ресурсів.

Взагалі система забезпечення виробництва є комплексною структурою, що забезпечує функціонування всіх виробничих процесів підприємства. Її ефективність залежить від правильної організації технологічних процесів, вибору постачальників, оптимального управління запасами та злагодженої роботи всіх підрозділів. Основними завданнями цієї системи є забезпечення своєчасного постачання ресурсів, мінімізація витрат та підтримання високого рівня якості, що дозволяє підприємству залишатися конкурентоспроможним навіть у складних ринкових умовах.

Система забезпечення виробництва – це ключовий елемент виробничої діяльності, який забезпечує підприємство необхідними матеріалами, сировиною та комплектуючими для безперервного функціонування. Вона охоплює не лише придбання ресурсів, але й управління логістичними процесами, постачальниками та запасами. Основною метою системи забезпечення є надійне постачання підприємства матеріалами необхідної якості, у потрібній кількості, у встановлений термін та за прийнятною ціною, що є важливою складовою конкурентної переваги підприємства.

З позицій логістичного управління та управління ланцюгами поставок, постачання – це процес, який виконується організаційною одиницею підприємства або частиною інтегрованого ланцюга поставок. Цей процес включає отримання предметів постачання необхідної якості, у потрібній кількості, у потрібний час та за прийнятною ціною. Водночас він охоплює управління постачальниками, тим самим роблячи внесок у реалізацію корпоративної стратегії підприємства.

Сфера діяльності системи забезпечення виробництва значно ширша, ніж проста закупівля матеріалів. Вона включає визначення потреб у сировині та матеріалах, пошук потенційних ринків та постачальників, оцінку альтернативних варіантів постачання, встановлення умов співпраці, моніторинг процесу доставки та супровід матеріалів на всіх етапах їх руху до моменту надходження на підприємство. Логістична складова цієї системи охоплює управління закупівлями, тобто організацію процесу доставки сировини чи матеріалів потрібної кількості та якості від постачальників до виробничих потужностей підприємства.

Ефективність системи забезпечення виробництва залежить від оптимального поєднання короткострокових і довгострокових стратегій. Короткострокова стратегія включає забезпечення оперативного постачання виробництва, а довгострокова спрямована на встановлення надійних відносин із постачальниками, розвиток системи управління запасами та застосування новітніх логістичних технологій.

Основною метою системи забезпечення виробництва є створення умов для безперервного функціонування підприємства за мінімальних витрат ресурсів. Це досягається шляхом оптимізації логістичних процесів, зокрема, у ланці «постачання – виробництво», де важливим завданням є мінімізація витрат на закупівлю матеріалів при збереженні високого рівня надійності постачань. Одночасно підприємство повинно прагнути до зниження загальних логістичних витрат, включаючи транспортні, складські та витрати на управління запасами.

Використання сучасних цифрових технологій, таких як ERP-системи, автоматизовані платформи для моніторингу постачань та аналітичні інструменти, дозволяє значно підвищити ефективність системи забезпечення виробництва. Це сприяє скороченню часу виконання операцій, підвищенню прозорості процесів та зниженню ризиків збою у постачанні.

Таким чином, система забезпечення виробництва є багатофункціональною структурою, яка забезпечує підприємству стабільність, гнучкість і конкурентні переваги. Її вдосконалення сприяє ефективнішому використанню ресурсів, зниженню витрат та підвищенню продуктивності, що є важливим у сучасних умовах глобальної конкуренції.

1.3. Управління матеріальними запасами у системі виробництва

Питання управління запасами актуальне для багатьох галузей економіки, особливо для підприємств, які працюють у сфері виробництва та торгівлі, де точне прогнозування попиту і раціональне управління ресурсами визначають переваги підприємства поміж конкурентів. Ефективне управління запасами є важливим аспектом діяльності підприємств, що прагнуть досягти конкурентних переваг, підвищити операційну ефективність та знизити витрати.

Сучасні умови ведення бізнесу в Україні створюють нові виклики в питанні управління запасами підприємств, змушуючи компанії

адаптуватися до нестабільного економічного середовища та мінливих потреб ринку. Зміни в логістичних ланцюгах, вплив глобальних криз, екологічні виклики ще гостріше поставили перед виробничими підприємствами нові труднощі та виклики в завданні ефективного управління запасами [6-7].

В останні роки питання управління запасами підприємств в нових реаліях сьогодення постійно перебуває у фокусі досліджень, як іноземних, так і українських науковців, фахівців та практиків логістичної галузі. Значна увага у дослідженнях приділяється цій темі через постійні стрімкі зміни економічного середовища, вплив глобалізації, інтеграцію новітніх технологій та широке коло викликів, що пов'язані з нестабільністю через військові дії в Україні. Тенденції розвитку напряму управління запасами в нашій країні відображають загальносвітові тренди, зокрема у використанні технологій штучного інтелекту, потреби у екологічній відповідальності та адаптації до глобальних викликів.

Запаси підприємства являють собою ресурси (активи), що тимчасово не використовуються у виробничій або комерційній діяльності, але перебувають у власності підприємства та зберігаються на його складах, складах постачальників або споживачів, а також в інших спеціально відведених місцях. Вони утримуються з метою забезпечення безперервності виробництва, продажу, перепродажу та управління. До складу запасів можуть входити сировина, напівфабрикати, комплектуючі, матеріали, незавершене та готове виробництво тощо [6]. Запаси підприємства – це одні з найважливіших активів підприємства, оскільки вони безпосередньо впливають на швидкість та якість обслуговування клієнтів, витрати та, як наслідок, на фінансові результати. Неефективне управління запасами може потенційно привести до втрати бізнесу, значних втрат, затримок у постачанні, надмірних витрат на зберігання та зривів виробничих процесів й контрактів. Саме тому, правильно організовані логістичні процеси значно впливають на здійснення ефективного управління запасами. Ці процеси охоплюють планування, закупівлю, транспортування, складування та розподіл товарів. Шляхом оптимізації цих процесів підприємства можуть значно знизити витрати, пов'язані з замовленням, зберіганням та транспортуванням запасів, підвищити продуктивність власної діяльності та покращити задоволеність клієнтів. Використання сучасних технологій та інновацій у логістиці, таких як автомати-

зація та аналітика даних, відкриває нові можливості для підвищення ефективності управління запасами.

Стратегія управління запасами в сучасних умовах має базуватися на принципах гнучкості, адаптивності та забезпечення неперервності виробництва. У якості забезпечувальних інструментів використовується динамічне прогнозування, яке дозволяє швидко адаптуватися до змін, впровадження принципу Just-In-Time для мінімізації обсягів запасів, створення стратегічних резервів, розширення кола постачальників, а також застосування інноваційних технологій для підвищення ефективності логістики та підтримки критично необхідних запасів. Також слід відмітити успішне використання технологій штучного інтелекту в управлінні запасами. Постійне оцінювання та коригування цієї стратегії дозволить підприємствам своєчасно реагувати на зовнішні та внутрішні зміни, забезпечуючи стабільну роботу та готовність до потенційних ризиків.

Забезпечення системи виробництва та управління виробничими запасами на будь-якому підприємстві залежить від його конкретних потреб та особливостей. ABC-аналіз допомагає класифікувати та пріоритезувати виробничі запаси, Інтегровані ІТ-системи забезпечують єдність управління та автоматизацію управлінських процесів, об'єднуючи в одній системі фінанси, виробництво, постачання та управління запасами, «RFID-технології» (радіочастотна ідентифікація) полегшують відстеження руху та використання обладнання, спрощуючи інвентаризацію та підвищуючи точність обліку, Методи Just-In-Time та Lean Inventory (ощадливі запаси) спрямовані на мінімізацію запасів, а Електронні системи замовлення та постачання (EOQ та ROP) оптимізують процеси постачання [7].

Сучасні тенденції управління матеріальними запасами свідчать про необхідність швидкої адаптації бізнесу до мінливих умов економічного середовища, обумовлених кризовими явищами та глобальними викликами. Ефективне управління є критичним для підтримання стабільності бізнесу, оптимізації витрат, підвищення якості обслуговування клієнтів та забезпечення конкурентних переваг на ринку. Актуальні методи та стратегії базуються на методах таких, як Just-In-Time, динамічне прогнозування, формування стратегічних резервів диверсифікація постачальників. Таке впровадження стає основою для гнучкого й адаптивного управління запасами. Використання інноваційних технологій, зокрема штучного інтелекту, «великих даних» (Big Data) та автоматизації, значно покращує точність і ефективність

процесів, дозволяючи підприємствам краще реагувати на зміни та ризику.

Відомо, що витрати на управління виробничими запасами значно впливають на загальну ефективність логістичної системи підприємства. Виробничі запаси, які є основою забезпечення безперервності виробничої діяльності та комерційних операцій, відіграють ключову роль у стабільності матеріального виробництва та забезпеченні конкурентоспроможності підприємства. Витрати, пов'язані з управлінням запасами, становлять одну з основних складових собівартості продукції чи послуг і мають вирішальний вплив на здатність підприємства залишатися конкурентоспроможним.

Аналіз численних досліджень [4-6], спрямованих на підвищення ефективності логістичних систем, дозволив систематизувати основні поняття, що використовуються в теорії управління виробничими запасами.

Виробничі запаси – це матеріальний потік, що перебуває в стані очікування вступу в процес споживання чи використання у виробництві, або ж продажу. Таким чином, вони є однією з форм руху матеріального потоку, де швидкість переміщення дорівнює нулю.

Це поняття є багатограним і охоплює як виробничі, так і невиробничі об'єкти. Наприклад, поряд із запасами сировини чи напівфабрикатів, існують запаси корисних копалин, водні ресурси тощо. У наукових дослідженнях також розглядаються інформаційні, фінансові та трудові запаси, які часто називають резервами.

У низці публікацій [4-8] наводяться результати, які демонструють значний вплив логістичних підходів на ефективність управління виробничими запасами. Оптимізація логістичних процесів дозволяє суттєво знизити витрати шляхом зменшення рівня запасів. У середньому, застосування сучасних логістичних методів дає змогу скоротити ці витрати на (30–50) %.

Ефективне управління виробничими запасами охоплює такі ключові аспекти:

- оптимізація рівня запасів, тобто уникнення надлишкових або дефіцитних запасів забезпечує баланс між безперервністю виробничих процесів і мінімізацією витрат на їх утримання;
- раціоналізація складських операцій, або забезпечення правильного зберігання запасів для запобігання їх пошкодженню або втра-там;

– впровадження методів прогнозування потреб. Аналітичний підхід до прогнозування дозволяє краще планувати обсяги та терміни поповнення запасів, враховуючи коливання попиту.

Управління запасами є критичним фактором у забезпеченні гнучкості виробничої системи. Надмірні запаси можуть призводити до заморожування капіталу, а недостатні – до затримок у виробничому циклі або навіть до зупинки виробництва. Саме тому застосування інструментів логістичного управління є ключовим для підтримки оптимального рівня виробничих запасів і забезпечення конкурентних переваг.

Формування виробничих запасів пов'язане з дискретним характером поставок, випадковими коливаннями попиту в різні періоди між поставками та змінами, обумовленими сезонними факторами, інфляційними процесами або зростанням цін. Виробничі запаси виконують низку важливих економічних функцій. Зокрема, вони забезпечують незалежність у часі та просторі між процесами споживання проміжної й кінцевої продукції та зовнішніми чинниками. Крім того, вони підтримують безперервність матеріальних потоків у процесі відтворення, що включає виробництво, розподіл, обмін і споживання. Виробничі запаси також сприяють підвищенню ефективності відтворювальних процесів шляхом зниження окремих складових собівартості продукції та витрат, пов'язаних із логістикою.

У виробничих і торгових системах існує ряд причин, які обумовлюють необхідність формування запасів. По-перше, це невідповідність обсягів попиту та пропозиції, що стосується як матеріальних ресурсів і незавершеного виробництва, так і готової продукції. По-друге, порушення нормального перебігу виробничих процесів, які можуть виникати через збої в транспортуванні, розподілі або через коливання в забезпеченні матеріальними ресурсами. По-третє, сезонні зміни у виробництві та споживанні також спричиняють необхідність створення резервів. Нарешті, спекулятивні наміри та інфляційні очікування через нестабільність ринкової ситуації спонукають до накопичення додаткових запасів для захисту від ризиків.

Основними цілями створення виробничих запасів є забезпечення ефективності виробничих процесів, обслуговування споживачів, страхування від збоїв у постачанні та економія за рахунок оптових закупівель. Запаси дозволяють мінімізувати простой у виробництві через відсутність необхідних ресурсів, а також забезпечують наявність товарів, щоб компенсувати сезонні коливання попиту та пропо-

зиції. Вони служать засобом страхування від ризиків, пов'язаних із затримками поставок або порушенням умов транспортування. Крім того, накопичення запасів дає можливість скористатися знижками при закупівлі матеріалів чи товарів у великих обсягах.

Таким чином, виробничі запаси є стратегічним інструментом, який дозволяє підприємствам підтримувати стабільність виробничих і логістичних процесів, зберігати конкурентоспроможність і оперативно реагувати на ринкові коливання та зовнішні загрози. Вони виконують роль буфера, що компенсує зовнішні та внутрішні коливання, забезпечуючи безперервність і ефективність діяльності підприємства.

Управління виробничими запасами передбачає виконання комплексу операцій, спрямованих на підтримання їх оптимального рівня для забезпечення безперервності виробничих процесів. Основні етапи включають: збір та аналіз інформації про запаси, споживання та залишки; прогнозування попиту; ідентифікацію неліквідних, морально застарілих і надлишкових запасів; обчислення показників рівня запасів; визначення допустимого рівня дефіциту; вибір методів поповнення запасів; формування номенклатури товарів та матеріалів; визначення оптимальних місць їх розміщення в логістичній системі.

У логістичному контексті виробничі запаси розглядаються як форма існування матеріального потоку, який характеризується не лише просторовим переміщенням, а й якісними та кількісними змінами у часі. Якісні зміни відображаються у старінні, зношенні, втраті споживчих властивостей, що можуть бути спричинені як об'єктивними факторами, так і людськими помилками. Кількісні зміни пов'язані з використанням запасів у виробництві, збуті або через природні втрати, такі як усадка, випаровування, стирання тощо.

Вибір системи управління виробничими запасами залежить від умов діяльності підприємства та доступної інформації. Система управління може базуватися на економіко-математичних моделях або послідовності дій, спрямованих на оптимізацію рівня запасів. Для цього необхідно враховувати класифікацію запасів, що включає такі ознаки, як їх природна форма (сировина, напівфабрикати, готова продукція), роль у виробничому процесі (запаси сировини, допоміжних матеріалів), ступінь завершеності (виробничі або товарні запаси) і загальний обсяг або рівень споживання (нормативні, надлишкові, страхові запаси).

Існує кілька стратегій управління запасами, які можна адаптувати до конкретних умов підприємства. Найпоширенішими є періодич-

ні моделі, у яких запаси поповнюються через фіксовані проміжки часу, та моделі з критичними рівнями, які передбачають поповнення, коли кількість запасів досягає встановленого мінімуму. Аналіз ефективності цих підходів вимагає врахування таких факторів, як стабільність попиту, тривалість циклу постачання, витрати на зберігання та транспортування.

Класифікація запасів дозволяє визначити специфічні характеристики різних типів запасів і їхнє місце в логістичній системі. Наприклад, запаси сировини забезпечують безперервність виробництва, страхові запаси мінімізують ризик збоїв у постачанні, а сезонні запаси враховують коливання попиту та пропозиції. Така систематизація сприяє оптимізації витрат і зниженню ризиків.

Наукові основи управління запасами включають поєднання теорії логістики, економіки та математичних методів. Для оптимізації процесів важливим є аналіз звітних даних підприємства, що дозволяє адаптувати обрану систему управління до реальних умов. Наприклад, у логістичних системах ефективність управління запасами часто визначається балансом між витратами на зберігання та забезпеченням безперервності постачання.

Система управління запасами є комплексом узгоджених принципів, завдань, елементів і методів, які визначають порядок розробки та реалізації рішень щодо управління оборотним капіталом у межах чітко встановлених параметрів. Ефективне управління запасами дозволяє підтримувати безперервність виробництва, забезпечувати логістичне обслуговування споживачів і водночас оптимізувати витрати, пов'язані зі зберіганням та поповненням запасів.

Чіткий контроль стану виробничих запасів та розмір майбутнього замовлення є критично важливим для гарантії якості сировини, запобігання її псуванню та забезпечення відповідності кінцевого продукту встановленим стандартам. Регулярний контроль стану запасів сировини та перевірка стану запасів на складі дозволять максимально ефективно організувати систему забезпечення виробництва. Оптимальний розмір замовлення для забезпечення виробництва можна визначити з використанням формули Вільсона

$$g_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{2 \cdot C_3 \cdot g_c}{C_{зб}}}, \quad (1)$$

де C_3 – витрати на одноразове поповнення запасів, грн./од.;

g_c – добовий розхід запасів, од./добу;

$C_{зб}$ – витрати на зберігання запасів, грн/од.·добу.

У нестабільному ринковому середовищі створення виробничих запасів особливо важливе. Значний рівень запасів сприяє надійному логістичному обслуговуванню споживачів та знижує ризик перебоїв у постачанні. Однак надлишок запасів може призводити до зростання витрат, пов'язаних із їх управлінням, потребувати залучення додаткових фінансових ресурсів, спричиняти псування або моральне старіння сировини та готової продукції.

Оцінку важливості та корисності кожного виду сировини, що потрібен для забезпечення процесів виробництва можна провести із застосуванням класифікації за методом ABC-аналізу. Методика цього способу класифікації дозволяє розподілити виробничі, чи будь-які інші ресурси підприємства за ступенем важливості для головного процесу. Проаналізувавши важливість кожного виду виробничого запасу можна покращити діяльність виробництва та підвищити ефективність логістичної системи підприємства.

ABC-аналіз може ґрунтуватися на ранжуванні асортименту за різними критеріями. Переважно, у результаті проведеного аналізу, виділяються три основні групи [6-8]:

- група А найбільш цінні товари, які приносять 50 % результату;
- група В товари середньої важливості, що приносять 30 % результату;
- група С найменш важливі товари, що забезпечують останні 20 % результату.

Також для оптимізації управління та аналізу виробничих запасів сировини доцільно проведення XYZ-аналізу. Він дозволяє краще зрозуміти характер потреби на різні види сировини, що сприяє ефективнішому плануванню закупівель, зберігання та безпосередньо виробництва готової продукції. Отримана в результаті аналізу інформація допомагає знизити ризики та витрати, пов'язані з надлишковими запасами або дефіцитом ресурсів, що особливо важливо в умовах економічної нестабільності. Завдяки XYZ-аналізу можна підвищити точність прогнозування майбутніх потреб у сировині, адаптуючи методи залежно від стабільності попиту, що є критичним для сезонних чи епізодичних матеріалів. Класифікація запасів за групами дозволяє зосередити увагу на ключових позиціях із передбачуваною потребою, забезпечуючи їх доступність і раціоналізуючи управління нестабільними категоріями. Це посприяє більш стабільному виробни-

чому процесу, знизить ймовірність збоїв і допоможе забезпечити своєчасне виконання планів виробництва. Крім того, використання результатів XYZ-аналізу в стратегічному плануванні дає змогу адаптувати довгострокові рішення щодо управління запасами відповідно до змін у структурі попиту на готову продукцію.

Процес XYZ-аналізу передбачає визначення коефіцієнта варіації попиту, який слугує критерієм для віднесення певної асортиментної позиції до однієї з груп – X, Y або Z. Критерієм віднесення товару до однієї з груп X-Y-Z є значення коефіцієнту варіації обсягів потреби у сировині.

Рационалізація забезпечення виробничих процесів потребує використання стратегій, спрямованих на скорочення логістичних витрат та підвищення рівня обслуговування. Зокрема, інтеграція концепції Just-in-Time дозволяє мінімізувати складські запаси та скоротити час очікування матеріалів, а впровадження принципів Lean-логістики сприяє усуненню зайвих операцій та підвищенню ефективності використання ресурсів. Удосконалення системи забезпечення виробничих процесів передбачає також адаптацію до змін ринкового середовища. Важливим елементом цього процесу є впровадження концепції гнучких ланцюгів постачань (Agile Supply Chain), що дозволяє швидко реагувати на зміни попиту, адаптувати обсяги виробництва та забезпечувати безперебійність постачання. Крім того, застосування методів прогнозування попиту на основі великих даних (Big Data Analytics) сприяє підвищенню точності планування матеріальних потоків і запобіганню дефіциту або надмірного накопичення запасів. Оптимізація маршрутів постачання, використання інтелектуальних транспортних систем та впровадження технологій блокчейн для відстеження вантажів дозволяють значно підвищити прозорість та ефективність логістичних процесів.

1.4. Управління дистрибуцією: організація каналів розподілу

Необхідність забезпечення ефективного управління розподілом матеріалопотоків виводить дистрибуцію (від лат. *distributio* – розподіл) на ключову позицію серед усіх факторів для успішної діяльності підприємств [3, 4]. Вибір раціонального каналу розподілу впливає на зниження логістичних витрат, покращення обслуговування клієнтів та забезпечення конкурентоспроможності продукції на ринку.

Зростання попиту на високоякісні товари, посилення вимог до швидкості доставки та дотримання відповідних умов транспортування формують потребу в застосуванні логістичних методів і технологій. Управління розподілом продукції, як правило, охоплює весь цикл: від моменту її виробництва до передачі кінцевому споживачу. Особливо важливо забезпечити інтеграцію всіх учасників ланцюга постачання, включно з транспортними компаніями, складами та точками продажу, для зменшення витрат і збоїв у постачанні.

Ключовим аспектом є необхідність гнучкості у виборі каналів розподілу, оскільки зміни в ринковій ситуації або споживчих потребах вимагають оперативного коригування логістичних стратегій. Використання сучасних цифрових технологій, таких як CRM-системи, автоматизовані інструменти моніторингу перевезень і програмне забезпечення для планування маршрутів, дозволяє підвищити точність управління та скоротити витрати. Водночас інтеграція інформаційних потоків між усіма учасниками дистрибуції сприяє забезпеченню прозорості процесів і оперативності в прийнятті рішень.

Сучасний дизайн каналів дистрибуції для бізнесу, логістики та промисловості є результатом зростаючої взаємодії між технологічним розвитком, вимогами стійкості, та необхідністю оптимізації витрат. З огляду на нові глобальні виклики, включно з екологічною відповідальністю та зростанням ринку електронної комерції, підприємства йдуть шляхом модернізації та переосмислення структури своїх дистрибутивних каналів. Останні тенденції у розвитку дизайну каналів розподілу відображають стійку спрямованість на зниження вуглецевого сліду, забезпечення гнучкості постачання, інтеграцію штучного інтелекту та використання нових технологій для управління та моніторингу процесів у реальному часі [9, 10].

Зміни клімату та вплив виробничих процесів на довкілля стали критичними чинниками, які стимулюють компанії до вибору екологічно безпечних рішень. Це включає перехід на відновлювані джерела енергії в ланцюгу постачання, розробку оптимізованих маршрутів транспортування з мінімальними викидами вуглецю та вибір екологічних матеріалів для пакування. Зараз великі компанії впроваджують «зелений» дизайн каналів, що націлений на зниження енергоспоживання та викидів у процесі транспортування та зберігання товарів. Зокрема, використання «екологічно чистих» автомобілів та впровадження інтелектуальних систем моніторингу дозволяє скоро-

чувати викиди шкідливих речовин, що важливо для забезпечення стійкості дистрибутивної мережі [10, 11].

В умовах зростання кількості зовнішніх викликів, включаючи економічні коливання, природні катаклізми та політичну нестабільність, компанії прагнуть створити такі канали дистрибуції, які можуть швидко реагувати на зміни. Постійні зміни ринкових умов вимагають здатності до оперативної адаптації. Дизайн каналів дистрибуції сьогодні розглядається як стратегічний актив, що дозволяє компаніям збільшувати або зменшувати обсяги постачань, змінювати розташування складів і логістичних центрів залежно від поточних потреб. Це призводить до розширення концепцій регіональної інтеграції, які дозволяють зберігати високу якість обслуговування в будь-яких умовах.

Суттєвий вплив на принципи роботи та організації логістичних ланцюгів та каналів дистрибуції спричинило збільшення відсотку електронної комерції та кількості інтернет-магазинів. За таких умов потребується більша кількість розподільчих центрів та складів, які максимально будуть наближені до кінцевих споживачів, для забезпечення зменшення часу доставки та витрат на транспорт, що докорінно змінює дизайн каналу дистрибуції [10, 11]. Зростає попит на доставку останньої милі, яка є важливим етапом, особливо для швидкопсувних товарів і продуктів з високими стандартами збереження та у ситуації, що спричинила собою пандемія COVID-19. Деякі компанії зараз активно досліджують можливість використання дронів та автономних транспортних засобів для здійснення доставки, що дозволить зменшити навантаження на основну інфраструктуру та забезпечити гнучкість доставки.

Зростаюча урбанізація створює нові виклики для дизайну каналів дистрибуції, що стимулює розвиток концепції міської логістики. Склади та логістичні центри обробки замовлень все частіше розміщують в безпосередній близькості до міських районів, що дозволяє компаніям оперативно реагувати на запити своїх споживачів. Особливо це важливо для продукції з коротким строком придатності (швидкопсувна продукція, ліки, фармацевтична продукція та ін.). Необхідно оцінювати та досліджувати особливості дизайну для таких каналів дистрибуції, щоб врахувати компроміси між витратами на розподілення і доставку, екологічною складовою (викиди вуглецю) та кількістю зіпсованої продукції при не дотриманні строків постачання.

Один із важливих аспектів сучасного дизайну каналів розподілу є досягнення оптимального балансу між вартістю експлуатації та впливом на довкілля. Оптимізація маршрутів доставки з використанням аналітичних інструментів дозволяє мінімізувати як витрати на паливо, так і викиди вуглекислого газу. Впровадження мульти- або омніканальних стратегій, що охоплюють різні способи доставки, також дає змогу скоротити витрати та покращити якість обслуговування споживачів. Завдяки таким стратегіям компанії можуть ефективно використовувати ресурси, не порушуючи при цьому принципів сталого розвитку [10, 11].

Розвиток дизайну сучасних каналів дистрибуції у ринкових умовах є багатограним процесом, в якому необхідно враховувати всі технологічні інновації, екологічні вимоги та економічні обмеження. Компанії, які прагнуть залишатися конкурентоспроможними, мають інтегрувати останні тенденції, методи та інструменти до планування власних стратегій та мереж. Перехід до стійких, гнучких та технологічно розвинених каналів розподілу сприяє ефективному управлінню логістикою, зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище та задоволенню потреб кінцевих споживачів у найкоротші терміни. При створенні каналів розподілу необхідно використовувати новий підхід у технологіях, роблячи його більш адаптивним і спрямованим на довгострокове збереження ресурсів, це забезпечить раціоналізацію його структури та «стале» існування.

Раціоналізація каналів розподілу готової продукції вимагає використання кількох ключових інструментів. Одним із них є маршрутизація транспортних засобів із врахуванням часу доставки, техніко-експлуатаційних параметрів роботи транспортних засобів, попиту на продукцію, зручності під'їзду до точок дистрибуції, та собівартості перевезень. Використання спеціалізованих транспортних засобів та вплив коливань попиту роблять процес організації каналів розподілу особливо важливим для ефективного функціонування логістичної системи підприємства. Врахування оптимальної частоти поставок, має забезпечити рівномірний розподіл продукції без надмірного накопичення її на складах.

Дистрибуція є ключовим елементом системи управління бізнесом, що відіграє вирішальну роль у формуванні конкурентних переваг сучасних підприємств. В останні роки спостерігається значне посилення її ролі, оскільки ефективна система дистрибуції дозволяє не лише забезпечити доступність продукції для кінцевого споживача,

але й значно підвищити ефективність функціонування логістичної системи підприємства. Український ринок перебуває на етапі «ринку дистрибутора», що є перехідним від «ринку виробника» до «ринку споживача». Це означає, що дистрибуція відіграє вирішальну роль у забезпеченні взаємодії між виробниками та кінцевими споживачами, стаючи вирішальною для ланцюга постачань.

Система дистрибуції об'єднує всі елементи, які дозволяють переміщувати товар від виробника до кінцевого споживача, включаючи посередників, транспорт, склади та канали збуту [12]. Ефективне управління цією системою визначає не лише можливість задоволення попиту, але й оптимізацію витрат на логістику, що є особливо важливим для підвищення конкурентоспроможності підприємств. Сучасні умови бізнесу вимагають від компаній інтеграції новітніх технологій у процес управління дистрибуцією, наприклад, автоматизація складів, аналіз споживчого попиту, а також впровадження цифрових платформ для контролю логістичних операцій.

У порівнянні з традиційними конкурентними стратегіями, які фокусувалися на якості та ціні товару, сьогодні значна увага приділяється саме організації дистрибуції. Це пояснюється тим, що споживачі все частіше орієнтуються на зручність, яка включає три ключові фактори: час, місце та умови придбання товару. Задоволення цих потреб стає можливим завдяки гнучким і адаптованим каналам дистрибуції, що здатні швидко реагувати на зміни ринку та потреб клієнтів.

Важливість дистрибуції зумовлена її впливом на загальну ефективність логістичної системи підприємства. Раціонально побудована система дистрибуції дозволяє мінімізувати витрати на транспортування та зберігання продукції, забезпечуючи водночас її наявність у потрібному місці в потрібний час. Це створює умови для стійкого розвитку компанії та формування довгострокових конкурентних переваг.

Історично зростання промислової спеціалізації та удосконалення способів транспортування і інформаційного обміну канали збуту ставали довшими і складнішими. Тому, продукція, що вироблена у одному регіоні, може бути перероблена в іншому регіоні, а потім розподіляється по всій території країни.

Канали збуту ще називають також маркетинговими каналами, і визначають як сукупності взаємозалежних організацій, що беруть участь в процесі надання продукції для споживання або використання, при цьому забезпечуючи механізм сплати постачальника [4, 6, 7, 9].

Дане визначення вміщує декілька важливих характеристик каналу дистрибуції. Перше – це те, що канал дистрибуції складається з організацій, які є під контролем, або поза контролем виробника. При цьому всі учасники мають бути визнані, відібрані та інтегровані в ефективне розташування каналів. Друге – процес управління каналами дистрибуції є постійним і вимагає безперервного контролю та оцінки. Канали працюють цілодобово і існують в постійно змінному середовищі.

Дистрибутивні канали повинні мати певні цілі, що направляють їх діяльність. Отже, структура та управління дистрибутивним каналом частково є функцією мети розподілу підприємства – особливо необхідністю отримання максимального прибутку. Зазвичай канали дистрибуції представляють найбільші витрати на розподіл продукту.

Організація системи дистрибуції готової продукції є важливою складовою ефективного функціонування сучасних підприємств. Система дистрибуції охоплює процеси переміщення продукції від виробника до кінцевого споживача, включаючи управління логістикою, транспортом, складськими операціями, а також взаємодію з посередниками. Розвиток ринку, технологій і зростаючі очікування клієнтів роблять організацію дистрибуції ключовим фактором успішної діяльності підприємств.

У сучасних умовах економіки, орієнтованої на задоволення потреб споживачів, ефективна дистрибуція забезпечує компаніям можливість залишатися конкурентоспроможними. Це пов'язано зі здатністю швидко й якісно доставляти продукцію у потрібний час і місце з мінімальними витратами. Зокрема, правильна організація дистрибуції дозволяє оптимізувати логістичні витрати, зменшувати час на транспортування, мінімізувати втрати від псування товарів та забезпечувати задоволення попиту клієнтів.

Сучасні умови ведення бізнесу характеризуються швидкою зміною ринкової кон'юнктури, глобалізацією ринків і посиленням конкуренції. У цьому контексті система дистрибуції не тільки забезпечує доставку продукції, але й сприяє формуванню лояльності споживачів завдяки зручності та доступності товарів.

Як і будь-яка система дистрибуції складається з певної кількості елементів. Ефективна система дистрибуції складається з взаємопов'язаних елементів [4, 6]:

– канали дистрибуції. Можуть бути прямі (поставка товарів безпосередньо від виробника до споживача) та непрямі (через посеред-

ників, таких як оптовики або роздрібні мережі) канали. Вибір каналу залежить від типу продукції, її характеристик, обсягу ринку та специфіки кінцевого споживача;

– логістичні процеси. Включають планування, організацію та контроль перевезення, зберігання і переміщення продукції. Логістика є ключовим фактором у зниженні витрат та забезпеченні своєчасності поставок;

– транспортна інфраструктура. Використання різних видів транспорту залежить від специфіки продукції та умов доставки. Наприклад, швидкопсувні товари, або товари з обмеженим строком придатності, потребують спеціального транспорту з контрольованою температурою;

– інформаційні системи. Включають системи для управління клієнтами, системи GPS для моніторингу транспорту та платформи для управління запасами. Інтеграція цих технологій дозволяє підвищити ефективність і прозорість процесів дистрибуції.

Раціоналізація дистрибуції передбачає оптимізацію ресурсів, процесів та технологій, що використовуються для доставки продукції. Основними напрямками раціоналізації є [4-7]:

- оптимізація маршрутів доставки;
- консолідація вантажів;
- аутсорсинг логістики;
- застосування цифрових технологій.

Використання сучасних логістичних програм для оптимізації маршрутів дозволяє зменшити витрати на транспортування, знизити час доставки і покращити обслуговування клієнтів.

Консолідація вантажів, тобто об'єднання товарів для транспортування великими партіями сприяє зниженню витрат на логістику.

Аутсорсинг логістики – передача функцій транспортування чи зберігання стороннім компаніям дозволяє зосередитися на ключових напрямках діяльності.

Стосовно застосування цифрових технологій, то інтеграція інформаційних систем дозволяє ефективно керувати запасами, планувати попит і контролювати процеси в реальному часі.

Попри переваги, організація системи дистрибуції стикається з численними викликами. Це, зокрема, високі витрати на логістику, зростаючі вимоги клієнтів до швидкості доставки, недостатньо розвинена інфраструктура у деяких регіонах, а також ризики, пов'язані з глобалізацією ринку. Ефективна система дистрибуції має враховува-

ти ці фактори, адаптуючи стратегії та технології до змін ринкових умов [3, 6, 8].

Розвиток цифрових технологій, таких як блокчейн, штучний інтелект та автоматизація, відкриває нові можливості для оптимізації системи дистрибуції. Використання сучасних цифрових технологій, таких як блокчейн дозволяє забезпечити прозорість усіх етапів ланцюга постачання, а штучний інтелект може передбачати попит і оптимізувати запаси. Крім того, автоматизація складських операцій і транспорту сприятиме зниженню витрат та підвищенню швидкості обслуговування.

Управління каналами розподілу є одним із ключових інструментів для підвищення конкурентоспроможності підприємства та створення додаткової цінності для споживачів. Рационально побудовані канали дистрибуції дають змогу підприємствам не лише знижувати витрати, але й підтримувати високий рівень обслуговування, що стає визначальним фактором успіху на сучасному ринку. Ефективність розподілу дозволяє підвищити прибутковість бізнесу, зокрема шляхом зменшення витрат на логістичні процеси. У багатьох галузях витрати на організацію розподілу сягають (30–40) % загальних витрат підприємства, а частка ресурсів, що інвестуються у розподіл, може становити понад третину загальних активів компанії [4, 6].

Оптимізація каналів дистрибуції сприяє мінімізації витрат на транспортування, складське зберігання та управління запасами, що особливо важливо в умовах інтегрованих логістичних систем. Основною метою формування ефективної системи розподілу є підвищення споживчої цінності готової продукції. Досягнення цієї мети можливе через удосконалення транспортних процесів і глибоке розуміння потреб клієнтів. Висока споживча цінність продукції є запорукою лояльності споживачів, що, у свою чергу, сприяє зростанню обсягів продажу, залученню нових клієнтів за рахунок рекомендацій, зменшенню витрат на маркетинг і підвищенню прибутковості бізнесу.

Логістичний підхід до управління каналами розподілу дозволяє скоротити час переміщення продукції по всьому ланцюгу постачання. Дослідження показують, що на виробничі операції припадає лише (3–5) % загального часу обігу, тоді як понад 95 % часу витрачається на логістичні процеси, включаючи складування та транспортування. Скорочення цих витрат часу дає змогу прискорити оборотність коштів, зменшити собівартість продукції та підвищити прибуток підприємства [5, 8].

Економічний ефект від оптимізації каналів розподілу також проявляється у зниженні витрат на транспортування. Завдяки раціоналізації маршрутів, координації графіків доставки, зменшенню порожніх пробігів транспорту та покращенню інших показників використання ресурсів підприємства можуть досягти значної економії. Таким чином, ефективна організація системи розподілу не лише знижує витрати, але й сприяє поліпшенню загальної ефективності бізнес-процесів, що є вирішальним фактором для успішного функціонування підприємств у сучасних ринкових умовах.

Організація каналів розподілу є ключовим аспектом маркетингової стратегії та логістичного управління, що забезпечує ефективний рух продукції від виробника до кінцевого споживача. У науковій літературі питання організації каналів розподілу висвітлюються з різних точок зору, включаючи їхню структуру, функції, критерії вибору та управління, а також роль у забезпеченні конкурентоспроможності підприємств.

Понад 95 % тривалості часу обороту припадає саме на логістичні операції. Зменшення даної складової дозволяє прискорити життєвий цикл продукції, оборотність грошових коштів, збільшити дохід та прибуток та знизити собівартість продукції. Розподіл часу на операції у життєвому циклі продукції представлено на рис. 3.

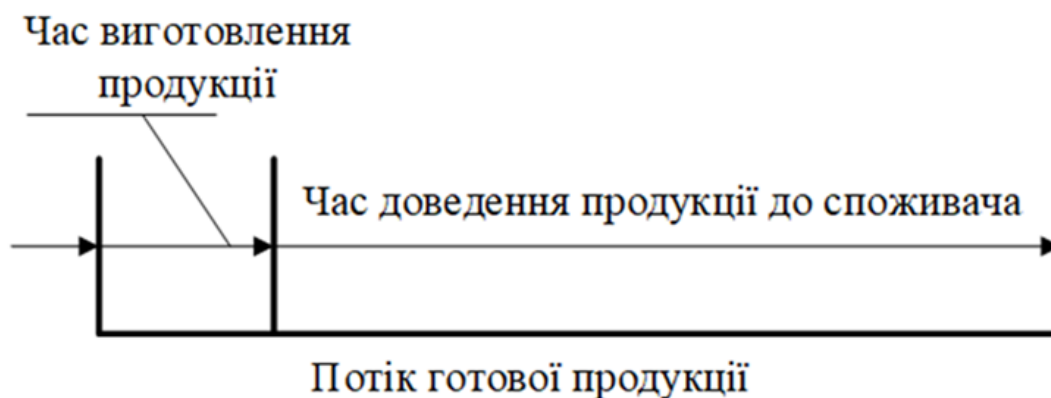


Рис. 3. Розподіл часу на операції у життєвому циклі продукції

Економічний ефект від раціональної організації каналів розподілу виникає також від зниження транспортних витрат. Оптимізуються маршрути руху транспорту, узгоджуються графіки постачання, скорочуються нульові пробіги, покращуються інші показники використання транспорту [9, 11].

Важливість каналів розподілу в сучасному бізнесі важко переоцінити. Вони не лише забезпечують доставку продукції від виробника до кінцевого споживача, але й формують сталий імідж підприємства, впливають на сприйняття та забезпечують конкурентні переваги. Залежно від специфіки ринку й товару, підприємства можуть використовувати різні типи каналів розподілу, які можна розділити на прямі й непрямі, а також однорівневі й багаторівневі [3, 5, 6]. Дослідники поділяють канали розподілу залежно від їхньої довжини, ширини та функцій. Прямі канали передбачають мінімальну кількість учасників і дозволяють виробникам безпосередньо взаємодіяти із споживачами, знижуючи витрати на посередництво.

Непрямі канали можуть включати одного або кількох посередників (оптовиків, дистриб'юторів, роздрібних торговців), які виконують специфічні функції: транспортування, зберігання, маркетинг тощо. У наукових роботах наголошується, що вибір між прямими та непрямими каналами залежить від таких факторів, як характер продукції, ринкові умови, фінансові можливості виробника та потреби споживачів.

Визначальними функціями каналів розподілу є:

- фізичний рух товарів, включаючи транспортування та зберігання;
- просування продукції через маркетингові кампанії, рекламу та акції;
- фінансове забезпечення, яке охоплює кредитування та управління ризиками;
- комунікація, що полягає у зворотному зв'язку між виробником і споживачем для корекції пропозиції.

Прямі канали розподілу передбачають продаж продукції безпосередньо від виробника до споживача. Це дозволяє підприємству мати більший контроль над процесом просування продукції та забезпечувати високу якість обслуговування споживачів.

Непрямі канали включають посередників, таких як дистриб'ютори, оптовики, роздрібні торговці, та інші учасники. Вони можуть знижувати витрати на логістику й розширювати ринкове охоплення, проте вимагають більш ефективного керування ними для забезпечення тісного інформаційного обміну, узгодженості дій і підтримки високого рівня обслуговування. У широкому каналі дистрибуції беруть участь декілька посередників, що просувають продукцію до споживачів.

Процес організації каналів розподілу охоплює кілька важливих етапів, які є основою для забезпечення ефективності логістичних систем. Насамперед необхідно ідентифікувати потенційних споживачів, врахувати їхні потреби та очікування. Це дозволяє сформулювати стратегію розподілу, адаптовану до вимог цільової аудиторії. Після цього аналізуються доступні канали розподілу, що ґрунтується на характеристиках продукції, специфіці ринку та ресурсних можливостях підприємства. Подальший етап включає побудову ефективної співпраці з учасниками каналу, яка може охоплювати як формальні договірні відносини, так і неформальну комунікацію для зміцнення партнерських зв'язків.

Моніторинг та оцінка ефективності каналів розподілу є ключовими для управління ними. Це включає аналіз таких показників, як час доставки, рівень запасів, ступінь задоволеності клієнтів та фінансові результати. Регулярне відстеження цих параметрів дозволяє виявляти проблеми, вчасно вносити корективи та оптимізувати витрати на логістичні операції.

Деякі дослідники відзначають, що ефективність цих функцій суттєво залежить від узгодженості дій усіх учасників каналу та від використання інформаційних систем для управління процесами.

Література підкреслює, що управління каналами розподілу включає три ключові етапи: планування структури каналу, що базується на аналізі потреб ринку, характеристик продукції та можливостей підприємства; організація взаємодії між учасниками каналу, яка забезпечує узгодженість дій, формування договірних відносин і розподіл відповідальності; контроль і оцінка ефективності, включаючи моніторинг таких показників, як швидкість доставки, рівень запасів і задоволеність клієнтів.

Наукові джерела пропонують широкий перелік критеріїв для оцінки та вибору каналів розподілу [3, 5, 6, 12]. До них належать:

- економічна ефективність, що вимірюється рівнем витрат на транспортування, зберігання та управління запасами;
- гнучкість каналу, здатність адаптуватися до змін у ринкових умовах;
- надійність постачання, що включає своєчасність і точність виконання замовлень;
- доступність і зручність для кінцевого споживача, що включає розташування точок продажу та швидкість обслуговування.

Сучасні умови, зокрема глобалізація та розвиток цифрових технологій, значно розширюють можливості організації розподілу. Електронна комерція, цифрові платформи та інструменти аналітики дозволяють компаніям оперативніше реагувати на зміни попиту, знижувати витрати та підвищувати ефективність доставки. Це сприяє адаптивності до швидких змін у ринковому середовищі.

Особливу увагу слід приділяти критеріям вибору каналів розподілу та їхніх учасників. Основні з них включають надійність постачання, відстань до споживача, терміни виконання замовлень, умови оплати, обсяги партій продукції, умови розподілу ризиків, репутацію постачальників та інші. Оцінка цих критеріїв допомагає вибрати оптимальні канали та забезпечити ефективність на всіх етапах товароруку.

У загальному вигляді критерії оцінки і відбору потенційних учасників та каналів розподілу залежать від вимог споживаючої логістичної системи і можуть бути різними [3, 4, 6, 8]:

- надійність постачання готової продукції;
- значення відстані між постачальником і споживачем;
- строки виконання замовлень по доставці;
- періодичність постачань;
- наявні умови оплати;
- обсяги розмірів партії продукції;
- можливість отримання дисконту;
- частка постачальника у покритті витрат на доставку;
- умови розподілу ризиків;
- наявність сервісного обслуговування;
- рекламна підтримка продукту;
- репутація потенційного постачальника;
- фінансове становище постачальника, його кредитоспроможність тощо.

Раціоналізація системи розподілу сприяє досягненню низки стратегічних цілей, таких як збереження якості продукції, зниження витрат на транспортування, забезпечення безпеки, екологічності та своєчасності доставки. Інтеграція внутрішніх факторів, таких як ресурси та організаційні особливості, із зовнішніми умовами, включаючи конкурентне середовище та законодавчі вимоги, дозволяє побудувати стійку систему розподілу. Це сприяє підвищенню споживчої цінності продукції та забезпечує конкурентоспроможність підприємства на ринку.

Канали розподілу відіграють критично важливу роль у забезпеченні доступу продукції до кінцевого споживача та є стратегічним інструментом у бізнесі. Існує три основні типи ширини каналів розподілу, кожен з яких відповідає певним бізнес-цілям. Ексклюзивний розподіл передбачає співпрацю з обмеженою кількістю посередників, які відповідають високим стандартам виробника. Це дозволяє компаніям зберігати контроль над процесом товарообігу, підтримувати якість обслуговування та імідж бренду. Інтенсивний розподіл, навпаки, спрямований на охоплення максимальної частини ринку завдяки широкій мережі посередників, що сприяє отриманню найбільшого прибутку. Селективний розподіл поєднує ці підходи, надаючи можливість зберігати контроль за ключовими етапами руху товару та одночасно покривати значну частину ринку.

Ефективність каналів розподілу оцінюється за допомогою низки показників, таких як обсяг продажів, темпи їхнього зростання, відповідність продажів цільовій аудиторії, середній рівень запасів, та окупність інвестицій. Важливим аспектом є швидкість реакції на потреби споживачів, дотримання термінів доставки та аналіз конкурентного середовища. Регулярна перевірка цих показників дозволяє своєчасно виявляти недоліки в роботі каналів та впроваджувати необхідні коригування.

У процесі управління розподілом важливо уникати типових помилок. Наприклад, надмірний контроль виробником усіх процесів без делегування повноважень може призвести до зниження ефективності роботи. Співпраця з посередниками без попереднього аналізу їхніх можливостей чи без укладання чітких договорів також може ускладнити досягнення бізнес-цілей. Конфлікти між партнерами та недостатня передача знань щодо просування продукції негативно впливають на успішність каналів збуту.

Таким чином, організація ефективних каналів розподілу базується на аналізі ринку, визначенні потреб цільової аудиторії та ретельному плануванні процесу товарообігу. Постійний моніторинг ключових показників та адаптація до змін ринкового середовища є запорукою успішного функціонування каналів розподілу та підвищення конкурентоспроможності компанії.

Список літератури до розділу 1

1. Сіренко І.В. Теоретичні аспекти виробничої логістики. К.: Науковий Світ, 2001. 26 с.

2. Перебийніс В.І. Логістичне управління запасами на підприємствах. Полтава: ПУЕТ, 2012. 279 с.
3. Тюріна Н.М., Гой І. В., Бабій І. В. Лоїстика : навч. посіб. К.: Центр навчальної літератури, 2021. 392 с.
4. Крикавський Є.В., Чернописька Н.В. Логістичні системи : навч. посіб. Львів: Львівська політехніка, 2019. 288 с.
5. Сумець О. М. Виробнича логістика: технічні системи і прийоми раціоналізації переміщення матеріальних потоків: навч. посібник для студентів вищих навчальних закладів III–IV рівнів акредитації. Харків: ТОВ «Пром-Арт», 2018. 100 с.
6. Григорак М.Ю., Карпунь О.В., Катерна О.К., Молчанова К.М. Логістика постачання, виробництва і дистрибуції: навч. посібник. Київ: НАУ, 2017. 364 с.
7. Мазарчук А.Ю., Більовська Г.С. Застосування методів аналізу асортименту продукції у багатомономенклатурних моделях управління логістикою. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2018. №6. С. 214–219.
8. Літвінова Я.В. Удосконалення логістичного управління різними видами транспорту, складуванням та переробкою вантажів у транспортних вузлах : монографія. Дніпро: НГУ, 2018. 143 с.
9. Ковцур К.Г., Птиця Н.В., Кочина А.А., Макарічев О.В. Логістичні аспекти при взаємодії видів транспорту : навчальний посібник. Харків: ФОП Бровін О.В., 2024. 164 с.
10. Діамандіс Пітер, Котлер Стівен. Майбутнє ближче ніж здається. Як технології змінюють бізнес, промисловість і наше життя / пер. з англ. Дмитро Кожедуб. Київ: Лабораторія, 2021. 250 с.
11. Компанієць В.В., Полякова О.М., Шраменко О.В. Світові тренди сучасного транспортно-логістичного сервісу. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2020. № 70-71. С. 22–32.
12. Christopher M. Logistics & Supply Chain Management / 4th ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2011. 288 p.

2. Теоретичні та практичні аспекти організації сумісної роботи вантажних автомобілів і пунктів перевалки

К.Г. Ковцур

доцент кафедри транспортних систем і логістики ХНАДУ,
канд. техн. наук, доцент

2.1. Актуальність питання

У сучасних умовах глобалізації та інтенсифікації торговельних процесів ефективна організація вантажних перевезень стає критичним фактором економічного розвитку. Оптимізація взаємодії між вантажними автомобілями та пунктами перевалки постає як один із ключових викликів транспортної логістики, що безпосередньо впливає на конкурентоспроможність підприємств та національної економіки загалом.

Пріоритетним завданням фахівців з логістики та транспортних технологій є мінімізація логістичних витрат при збереженні високої якості обслуговування. Досягнення цієї мети потребує системного аналізу всіх компонентів транспортного процесу та виявлення факторів, що негативно впливають на ефективність доставки вантажів. Особливу увагу варто приділити питанню непродуктивних простоїв транспортних засобів, які найчастіше виникають у пунктах навантаження-розвантаження та суттєво знижують продуктивність транспортної системи.

Сучасний український ринок транспортно-логістичних послуг характеризується значною невизначеністю щодо часу обслуговування транспортних засобів у пунктах перевалки. Укладаючи договори на перевезення, транспортні компанії часто не мають достовірної інформації про тривалість операцій з обробки вантажів, що ускладнює планування роботи автопарку та знижує ефективність використання рухомого складу. Відсутність прогнозованості створює суттєві перешкоди для оптимізації логістичних маршрутів та підвищення загальної ефективності транспортного процесу.

Розробка методології прогнозування часових параметрів перебування транспортних засобів у пунктах перевалки з урахуванням стохастичного характеру вхідного потоку та характеристик вантажно-розвантажувальних робіт дозволить створити потужний інструмен-

тарій для оперативного планування та стратегічної оптимізації транспортних операцій. Такий підхід має враховувати комплекс факторів, що впливають на формування черг, інтенсивність обслуговування та загальні показники ефективності роботи транспортно-логістичної системи.

Даний розділ монографії присвячено теоретичному обґрунтуванню та практичним аспектам вирішення проблеми синхронізації роботи вантажних автомобілів і пунктів перевалки як ключового елемента оптимізації транспортно-логістичних процесів.

2.2. Постановка проблеми

Сучасна організація вантажних перевезень представляє собою складну систему взаємопов'язаних процесів, ефективність якої залежить від злагодженої роботи всіх елементів логістичного ланцюга. У той час як процеси безпосереднього транспортування вантажів досить ґрунтовно досліджені та оптимізовані за допомогою математичних методів (задачі маршрутизації, транспортні задачі, алгоритми оптимізації автопарку тощо), операційні процеси в пунктах переробки вантажів залишаються недостатньо вивченими та, як наслідок, неоптимізованими.

Проблема полягає у відсутності комплексного методологічного підходу до оптимізації процесів у пунктах переробки вантажів з урахуванням їх взаємодії з транспортними засобами. Наявні дослідження часто розглядають ці елементи системи окремо, не враховуючи синергетичний ефект від їх скоординованої роботи. Таким чином, формується дисбаланс, коли оптимізовані транспортні операції стикаються з неефективними процесами навантаження-розвантаження, що призводить до значних непродуктивних простоїв рухомого складу.

Ключовим критерієм оптимізації роботи пунктів переробки вантажів має виступати сукупний час обробки вантажів, який включає час очікування в черзі та час виконання навантажувально-розвантажувальних операцій. Зменшення цього часового показника дозволить підвищити пропускну здатність пунктів перевалки, скоротити непродуктивні простої транспортних засобів та, як наслідок, знизити загальні логістичні витрати всіх учасників перевізного процесу [1].

Однак розв'язання даної проблеми ускладнюється необхідністю врахування значної кількості взаємопов'язаних параметрів, що характеризують:

Технологічні особливості роботи пунктів переробки вантажів:

- кількість та технічні характеристики навантажувально-розвантажувальних механізмів;
- специфіка організації внутрішніх логістичних потоків;
- режим роботи та рівень автоматизації виробничих процесів;
- особливості складської інфраструктури та територіального розташування.

Характеристики вантажопотоків:

- інтенсивність надходження транспортних засобів;
- нерівномірність прибуття ТЗ протягом доби, тижня, сезону;
- структура вантажопотоку за типами вантажів;
- коливання обсягів партій вантажів.

Параметри рухомого складу:

- типи та технічні характеристики транспортних засобів;
- вантажопідйомність та габаритні розміри;
- специфічні вимоги до навантаження-розвантаження;
- технічний стан та укомплектованість додатковим обладнанням.

Організаційно-правові аспекти:

- договірні умови взаємодії з перевізниками;
- система пріоритетів обслуговування;
- штрафні санкції за простої та порушення термінів;
- документообіг та інформаційний супровід вантажопереробки.

Зовнішні фактори впливу:

- сезонні та погодні умови;
- форс-мажорні обставини;
- ринкова кон'юнктура та коливання попиту;
- політичні та економічні фактори.

Складність врахування всієї сукупності перелічених параметрів при моделюванні процесів взаємодії транспортних засобів та пунктів переробки вантажів вимагає розробки спеціальних методів оптимізації, заснованих на системному підході та сучасних математичних інструментах.

Особливої уваги потребує проблема стохастичного характеру вхідного потоку транспортних засобів, що значно ускладнює прогнозування навантаження на пункти переробки вантажів та планування

їх роботи. Відсутність надійних методів прогнозування часу перебування транспортних засобів у пунктах переробки вантажів призводить до неефективного використання як рухомого складу, так і навантажувально-розвантажувальних ресурсів.

Таким чином, наукова проблема полягає у необхідності розробки комплексного методологічного підходу до оптимізації взаємодії вантажних автомобілів та пунктів переробки вантажів з урахуванням стохастичного характеру транспортних процесів та багатофакторності впливу на ефективність функціонування єдиної транспортно-логістичної системи.

Вирішення цієї проблеми дозволить:

- створити науково обґрунтовані методи планування та організації роботи пунктів переробки вантажів;
- розробити ефективні алгоритми координації роботи транспортних засобів та вантажно-розвантажувальних комплексів;
- оптимізувати використання технічних ресурсів та підвищити продуктивність логістичних операцій;
- знизити непродуктивні простої транспортних засобів та, як наслідок, зменшити загальні логістичні витрати;
- забезпечити підвищення рівня сервісу та конкурентоспроможності логістичних операторів.

2.3. Аналіз робіт українських дослідників з питань оптимізації процесів обробки вантажів

Аналіз літературних джерел щодо моделей пріоритетності обслуговування транспортних засобів у пунктах вантажопереробки виявляє кілька підходів та досліджень, спрямованих на оптимізацію процесів обробки вантажів:

- *оптимізація черговості обслуговування ТЗ*. У статті [2] розглядається проблема черговості обслуговування ТЗ у пунктах переробки вантажів. Автори зазначають, що транспортні засоби, які утворюють чергу, мають різні техніко-економічні характеристики, що впливає на загальну вартість обробки. Вони пропонують формалізувати процес обслуговування вантажопотоків у пунктах переробки як задачу оптимізації черговості обробки ТЗ з метою мінімізації сукупних витрат на обслуговування;
- *впровадження інформаційних технологій для підвищення ефективності*. Яновський П.О. та інші [3] досліджують підвищення

ефективності функціонування інфраструктури вантажного комплексу аеропорту шляхом впровадження інформаційних технологій при переробці військових вантажів. Вони підкреслюють, що поліпшення інформаційного забезпечення транспортування вантажів сприяє підвищенню ефективності функціонування авіаційного транспорту України;

– *оптимізація транспортної логістики*. Компанія Neolit [4] у своїх дослідженнях наголошує на важливості оптимізації логістичних процесів у сегменті завантаження. Вони зазначають, що стратегічне пакування вантажу для максимального використання простору, дотримуючись стандартів безпеки, дозволяє скоротити кількість необхідних поїздок, що знижує витрати на паливо та знос транспортних засобів;

– *планування роботи автомобілів на автотранспортних підприємствах*. У дослідженні [5] розглядаються завдання організації та планування виробництва в автотранспортних підприємствах. Автори підкреслюють важливість раціонального поєднання та використання всіх ресурсів виробництва для виконання максимальної транспортної роботи при перевезенні вантажів та кращого обслуговування населення;

– *застосування циклічних моделей в організації логістичних систем*. У статті [6], досліджується використання сучасної математичної моделі PVRP (Periodic Vehicle Routing Problem). Ця модель є узагальненням класичної проблеми маршрутизації транспортних засобів і використовується для побудови базового графіка, в якому комбінуються постачальники та маршрути, з метою знаходження найбільш оптимального щодо фінансових витрат та виконання всіх перевезень. Слід зазначити, що оптимізація черговості обслуговування транспортних засобів у пунктах завантаження (у постачальників) дозволило б скоротити сукупні витрати, що є метою представленого дослідження;

– *управління транспортними та складськими процесами*. В.О. Севрюк у роботі [7] аналізує напрями оптимізації управління транспортними та складськими процесами на підприємствах, підкреслюючи важливість підвищення ефективності логістичних операцій. Особлива увага приділяється автоматизації як ключовому елементу оптимізації складської діяльності, що дозволяє ефективно управляти запасами, знижувати витрати та покращувати планування закупівель.

Е. Савицький [8] досліджує як оптимізація логістичних процесів впливає на ефективність комерційної діяльності підприємства, зок-

рема на зменшення витрат та покращення якості обслуговування клієнтів. В роботі аналізується ключові компоненти логістики, такі як постачання, складське управління та транспортування, і доводиться, що їх оптимізація сприяє зменшенню витрат, покращенню якості обслуговування клієнтів та підвищенню конкурентоспроможності підприємства на ринку.

Отже аналіз літератури показує, що оптимізація процесів обслуговування транспортних засобів у пунктах вантажопереробки є багатогранною проблемою. Вона включає в себе оптимізацію черговості обслуговування, впровадження інформаційних технологій, стратегічне планування логістичних процесів, використання математичних моделей для маршрутизації та багато інших підходів.

На сьогоднішній день опис процесів переробки вантажів в терміналах представлений в роботах багатьох дослідників. Спостерігається інтерес до вивчення процесів функціонування ПП вантажів саме водного транспорту [9-12]. Пояснюється така зацікавленість задовгими простоями ТЗ в очікуванні обслуговування, що призводить до зменшення рентабельності рухомого складу, збільшення витрат на доставку через штрафи за простої тощо.

В роботі [9] визначається перелік необхідних логістичних послуг для комплексного обслуговування в терміналах. Авторами запропоновано показники ефективності та повноти надання послуг в терміналах, що виражаються коефіцієнтами ефективності. Ранжування дозволило встановити, що сумісність та одночасне виконання декількох операцій (наприклад розвантаження і оформлення документів) є найважливішим фактором для клієнтів. Однак такі критерії, що відносяться до економічної групи (наприклад, витрати) за надані послуги виявились незначущими. Реалізація цього підходу може дозволити полегшити процес прийняття рішень. Але слід зазначити, що результати отримані на основі анкетування користувачів послуг конкретного терміналу, розташованого в Польщі, обмежує використання отриманих результатів на інших об'єктах.

Аналіз літературних джерел щодо оптимізації логістичних операцій в ланцюгу постачань показав, що основними напрямками розвитку транспортних послуг виступають такі процеси, які направлені на удосконалення та покращення транспортної логістики в цілому: впровадження різноманітних автоматизацій, які базуються на штучному інтелекті, розвиток різнонаправлених систем блокчейну, введення комплексної політики діджиталізації, впровадження нових ме-

тодів оцифрування інформації та використання хмарних технологій [13]. Але всі ці напрямки є додатковими і зможуть дати позитивний результат тільки після того, як сам технологічний процес переробки вантажів буде оптимізованим.

Однією з проблем раціоналізації надання транспортних послуг є нерегульована ситуація сумісної роботи ПП вантажів і вантажного транспорту. Оптимізація цього процесу дала б змогу збільшити продуктивність роботи як автомобільного транспорту, так і самих пунктів. Так в роботі [14] пропонується рішення проблеми обслуговування транспортних одиниць за допомогою багатоцільової оптимізації. Значущими параметрами при цьому є час обробки ТЗ, його вантажність, тип і характеристики ПП. Запропонована модель перевірялась на реальному об'єкті дослідження. Критерієм ефективності запропоновано час доставки вантажів.

Особливої уваги заслуговують роботи, в яких процес обслуговування ТЗ описується за допомогою методів нечіткої логіки [15], нейтрософських методів [16], теорії масового обслуговування та теорії розкладів [12, 17]. Ці моделі є більш реалістичними. Для опису довжини черги ТЗ в ПП вантажів зазвичай використовується Закон Літтла [18]. Так, в роботі [19] на прикладі терміналу крос-докінгу пропонується вирішення питання визначення послідовності ТЗ на в'їзді і виїзді та план обслуговування, щоб звести до мінімуму час всього процесу. Використовується лагранжева релаксація, як метод, що перетворює складну задачу оптимізації з обмеженнями до наближеного більш простого виду.

Слід розуміти, що на практиці спостерігається наявність черг в ПП вантажів. Неналежне виконання графіків виконання операцій та надмірне очікування ТЗ призводить до додаткових витрат в явному або скритому вигляді. Саме тому спостерігається особливий інтерес дослідників у вивченні та формалізації процесів, що відбуваються в ПП вантажів.

2.4. Визначення часу перебування транспортних засобів у пунктах перевалки

Визначення часу навантаження або розвантаження в системі доставки вантажів представлено в роботах багатьох вчених.

Час, який витрачається транспортними засобами (ТЗ) під навантаженням або розвантаженням, для визначення економічних показ-

ників роботи та для визначення продуктивності роботи транспорту в роботах дослідників країн СНД приймається з посиланням на Прейскурант 13-01-02. Однак представлені в ньому дані носять тільки рекомендаційний характер, оскільки ці норми часу визначались емпіричним шляхом ще в 90-х роках 20 століття, тому через великий проміжок часу мають бути уточненими та відкоригованими. На сьогоднішній день вони майже не використовуються логістами через невідповідність фактичних значень нормативним. Також залишається невідомим, яким чином формувалися ці нормативи, для яких умов придатні та які межі їх застосування.

Автор у роботі [20] припускає, що скорочення тривалості простою автомобіля в пунктах навантаження та розвантаження вантажів може бути досягнуто за умови раціональної організації та технології навантажувально-розвантажувальних робіт (НРР) у пунктах відправлення та прибуття вантажу та підвищення рівня механізації НРР шляхом заміни ручної праці на механізовану та впровадження більш продуктивної конструкції засобів механізації. Загалом, в теперішній час, для формалізації часу доставки та його складових доцільно будувати стохастичні моделі, щоб врахувати випадковість властивостей транспортного процесу.

На сьогодні вченими все більше і більше уваги приділяється синхронізації вхідних і вихідних потоків. В роботі [21] оптимізується робота ТЗ в терміналах кросс-докінгу шляхом визначення відповідних графіків руху ТЗ. У випадку відхилень від запланованого часу завантаження або розвантаження визначається упущена вигода.

У роботах багатьох вчених методика визначення часу навантаження/розвантаження в явному вигляді не представлена [22-23]. Часто в наукових роботах задаються норми часу розвантаження за одну тону конкретного вантажу, які не обґрунтовуються, або ж використовується середнє значення за вибірковою сукупністю. Так в роботі [24] при використанні імітаційних методів моделювання роботи транспорту в ланцюгу постачань приймаються так звані годинні «вікна» на навантаження та розвантаження, тобто в системі обмежень задаються граничні значення даних показників.

Іншим напрямком досліджень часу перебування ТЗ у вантажних пунктах є оцінка якості обслуговування клієнтів [25, 26]. В рамках цього напрямку проводиться SWOT-аналіз, розробляються рекомендації для збільшення швидкості обробки ТЗ.

В роботах пропонується визначення часу обслуговування, виходячи зі способу й організації НРР, кількості вантажу, що підлягає навантаженню, обсягу попутного збору та витрати часу на навантажування та розвантажування однієї тони вантажу. Фактичний же час обслуговування носить непостійний характер, що свідчить про його коливання, тим самим цей спосіб визначення даного показника нецільний, тому що похибка є досить значною.

Так час простою автомобіля під час виконання навантажувально-розвантажувальних операцій, залежить, перш за все, від продуктивності механізмів, що задіяні в процесі обслуговування. Кожен вантажний пункт являє собою окремо функціонуючу систему зі своїми витратами часу на обслуговування, які залежать від ряду факторів. Виділяються найбільш значущі з них: оснащення механізмами різної продуктивності; вид вантажів, запропонованих до перевезення; витрати часу на виконання супутніх операцій, таких як маневрування, зважування, заповнення необхідних документів тощо.

Особливої уваги заслуговують роботи, в яких враховано стохастичний характер величин, що чинять вплив на час перебування ТЗ у пунктах вивантаження [27], розгляд нечітких систем [28] та роботу транспорту в умовах невизначеності [29, 30]. В роботі [27] розглядається час перебування судна в пункті навантаження та розвантаження (терміналі). Пропонується визначати досліджуваній час за наступною залежністю

$$\bar{T}_{\Sigma} = \frac{\bar{d}_{\Sigma}}{\lambda} = \frac{\bar{d}}{\lambda} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\lambda} \cdot \left[S - \sum_{n=0}^S (S-n) \cdot P_n \right] = \bar{T}_{оч} + \frac{1}{\lambda} \cdot \left[S - \sum_{n=0}^S (S-n) \cdot P_n \right], \quad (1)$$

де \bar{d}_{Σ} – середня сумарна кількість судів на терміналі, од.;

\bar{d} – середня кількість судів, що знаходяться у черзі, од.;

λ – інтенсивність прибуття суден до терміналу;

S – кількість причалів, од.;

n – кількість суден, що знаходяться на терміналі, од.;

P_n – стаціонарне значення ймовірності окремих станів;

$\bar{T}_{оч}$ – середній час очікування судна у черзі, який визначається за залежністю

$$\bar{T}_{оч} = \frac{\bar{d}}{\lambda} = \frac{P_0}{\lambda} \cdot \frac{\psi^{S+1}}{\prod_{i=1}^{S-1} r_i \cdot (r_{\max} - \psi)^2} = \frac{P_0}{\mu_0} \cdot \frac{\psi^S}{S \prod_{i=1}^{S-1} r_i \cdot (1 - \varphi)^2}, \quad (2)$$

де ψ – приведена щільність потоку прибуття суден, од./хв.;

μ_0 – середня інтенсивність обробки суден, од./хв.;

r – коефіцієнт інтенсивності переробки вантажів;

φ – коефіцієнт завантаження терміналу.

В цьому дослідженні прийнято припущення про пуасонівський потік приходу судів та показниковий розподіл часу обслуговування контейнерних вантажів. За допомогою апарату теорії масового обслуговування описано процес обробки судів в контейнерних терміналах. Автор приходять до висновку, що використання існуючих моделей масового обслуговування для визначення ймовірнісних характеристик процесів обробки судів не є доцільним. Головною причиною даного висновку є неадекватність модельних значень від реальних, отриманих статистичним шляхом.

В роботі [27] отримано модель доцільності страхування ризику перевищення договірною часу стоянки судна під вантажними операціями. Враховано нерегулярну доставку вантажів на портовий термінал залізницею. Дана модель побудована з використанням лінійних марківських процесів. Інтервали між сусідніми моментами часу, в які вагони з вантажем прибувають на термінал, є випадковими величинами, що розподілені за показниковим законом. Прийняте допущення, що перевантаження вантажу з вагонів на судно виконується з постійною інтенсивністю. Детально розглянуто випадки, коли обсяг вантажу у вагонах є випадковою величиною та фіксованою. Однак слід зазначити, що в обох останніх роботах не розглядається можливість існування пріоритету в обслуговуванні судів, що може суттєво вплинути на результати досліджень.

Час перебування ТЗ у пунктах завантаження-розвантаження висвітлюється і в роботах з дослідження ергономіки роботи водіїв. В дослідженні [31] відмічається, що значний час своєї роботи водії проводять у пунктах завантаження та розвантаження в черзі в очікуванні або під навантаженням-розвантаженням. Так, за підрахунками авторів, водіння забирає в середньому 40 % часу водіїв, а залишок займає процес завантаження/розвантаження (26 %), очікування (12 %) та інші завдання (22 %). Слід розуміти, що в залежності від виду сполучення співвідношення продуктивного та непродуктивного часу буде змінюватись. В роботі [32] зазначається, що очікування обслуговування ТЗ створюється через неефективність обробки вантажопотоків в пунктах обробки. Для уникнення непродуктивних простотів рекомендується підвищення комунікації між всіма учасниками

перевізного процесу. Управління чергою та очікуванням обслуговування може впливати на ризик втоми водіїв, збільшує тривалість його робочого часу та зменшує його зарплату через неоплачені простой. Однак, представлені результати ґрунтуються на опитуванні та носять тільки рекомендаційний характер, що не дає змоги оцінити вплив факторів на ефективність.

Результати аналізу технологічного процесу системи доставки вантажів показав, що незважаючи на особливі умови доставки різних вантажів, час на простій ТЗ у пунктах навантаження та розвантаження залишається нерегульованим. Результати аналізу літературних джерел з питань підвищення ефективності функціонування системи доставки показали, що існуючі підходи щодо удосконалення перевезення недостатньо враховують теоретичне та практичне обґрунтування часу знаходження ТЗ у пунктах навантаження та розвантаження. Виходячи з того, що існуючі підходи не в повній мірі враховують характер обслуговування ТЗ у вантажних пунктах, виникає необхідність формалізації часу їх перебування в пунктах розвантаження з врахуванням показників, що чинять вплив на швидкість обслуговування. Це дозволить розробити науково обґрунтовані заходи щодо підвищення ефективності перевезень в системі постачань [33].

Час знаходження вантажного автомобіля у пункті розвантаження можна представити як суму певних відрізків часу. Час знаходження автомобіля у пункті розвантаження визначається цільовою функцією, яку можна представити як

$$t_{н(р)} = t_m + t_o + t_{обсл} + t_{п} + t_d \rightarrow \min, \quad (3)$$

де t_m – час маневрування, год;

t_o – час очікування обслуговування, год;

$t_{обсл}$ – час обслуговування, год;

$t_{п}$ – час на прийом вантажу (при навантаженні $t_{п} = 0$), год;

t_d – час оформлення документів, год.

Час простою автомобіля у пункті навантаження (розвантаження) має у своєму складі багато показників, що впливають на його значення (рис. 1).

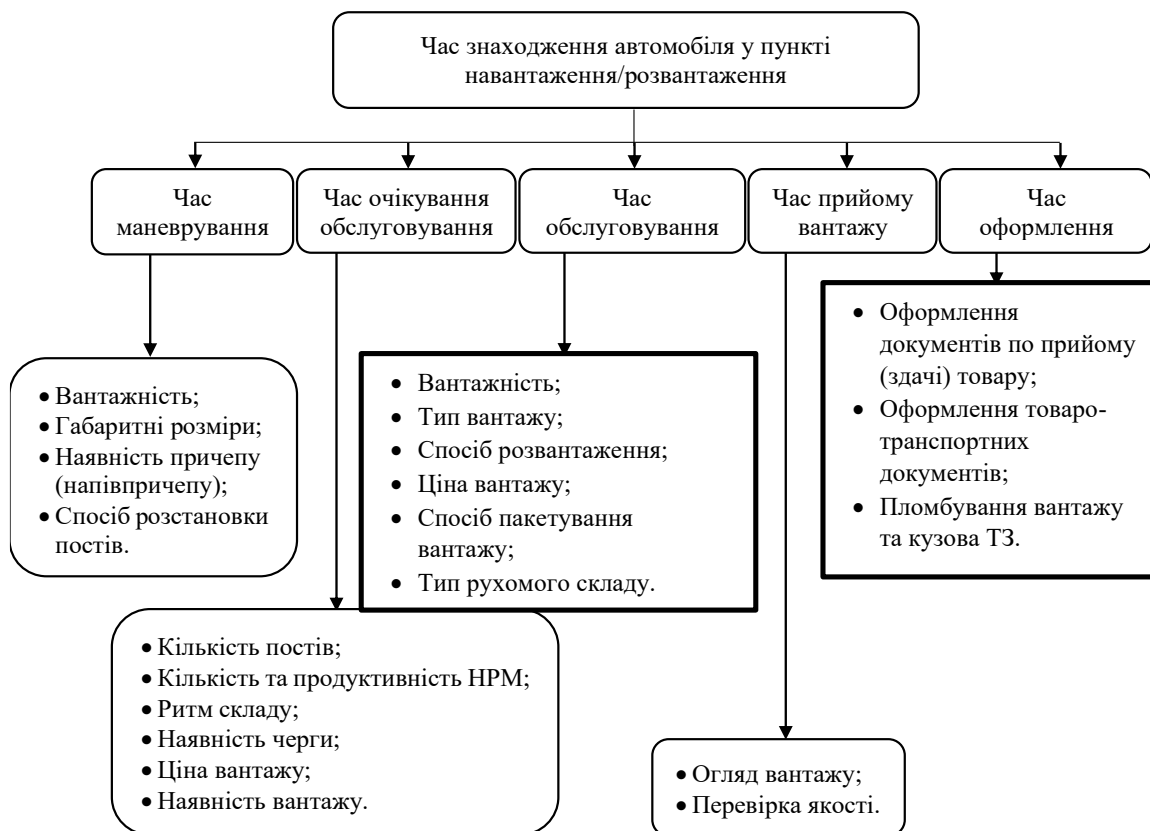


Рис. 1. Складові часу знаходження автомобіля у пунктах навантаження та розвантаження

Вагомими факторами, що мають вплив на час знаходження автомобіля у пункті розвантаження є:

- фактична вантажність автомобіля;
- інтенсивність прибуття ТЗ;
- кількість постів розвантаження;
- спосіб проведення робіт з розвантаження (немеханізований, з використанням засобів малої механізації та механізований).

Час обслуговування залежить від фактичної вантажопідйомності ТЗ та способу виконання робіт з навантаження та розвантаження. Час очікування обслуговування прямопропорційно залежить від кількості постів розвантаження, та методика його визначення повинна ґрунтуватися на теорії стаціонарного пуассонівського потоку і враховувати пріоритетність обслуговування [33].

2.5. Існуючі системи масового обслуговування з пріоритетами

Моделі поведінки черг відіграють важливу роль у побудові моделей логістичних процесів, особливо коли досліджуються процеси в

пунктах переробки вантажів, де ефективність обслуговування транспортних засобів безпосередньо впливає на час доставки товарів. Аналіз таких моделей дозволяє оцінити їхню ефективність, оптимізувати час очікування та уникнути затримок у логістичних ланцюгах поставок.

Розглянемо основні моделі поведінки черги, які застосовуються в пунктах переробки вантажів.

FIFO (First In, First Out) – *перший прийшов, перший обслуговується*. У цій моделі транспортні засоби обслуговуються в порядку їх прибуття. Це найбільш поширена модель, яка використовується на вантажних терміналах, складах і в портах. Наприклад, вантажні автомобілі, які прибувають до пункту переробки вантажів і стають у чергу. Обслуговування здійснюється в тому порядку, в якому вони прибули, без пріоритетів. Недоліком є можливі затримки, якщо транспорт із малим обсягом робіт змушений чекати за автомобілем зі значним обсягом переробки.

LIFO (Last In, First Out) – *останній прийшов, перший обслуговується*. Така модель застосовується рідко, оскільки може призводити до накопичення транспортних засобів у кінці черги. Прикладом може бути ситуація, коли на терміналі обмежений простір, оператор може приймати останній прибулий транспорт першим, щоб швидше звільнити місце. Недоліком є, звісно, те, що водії, що прибули раніше, можуть довго чекати свого обслуговування.

Пріоритетна черга (Priority Queue). У цій моделі певні транспортні засоби отримують вищий пріоритет в обслуговуванні. Пріоритети можуть надаватися залежно від типу вантажу, терміновості або типу транспортного засобу. Наприклад, контейнери з небезпечними вантажами чи швидкопсувною продукцією отримують пріоритетне обслуговування. Також спеціалізовані транспортні засоби (наприклад, рефрижератори) можуть проходити без черги. Використання цієї моделі покращує ефективність, але може викликати невдоволення серед перевізників з вантажем, які не мають такого пріоритету.

Кругова черга (Circular Queue). Ця модель застосовується, коли транспортні засоби формують циклічну чергу і можуть повертатися в початок після певного часу очікування або після проходження певного етапу обслуговування. Наприклад, у великих логістичних центрах із кількома зонами обслуговування вантажівки можуть перенаправлятися між зонами замість того, щоб чекати в одній черзі.

Двостороння черга (Deque – Double-Ended Queue). Ця модель дозволяє додавати та обслуговувати транспортні засоби з обох кінців черги, що забезпечує гнучкість у логістичних процесах. Наприклад, на митних постах транспорт, що має повний комплект документів, може обслуговуватися з передньої частини черги, а той, що очікує додаткової перевірки, залишається в кінці. Це зменшує загальний час обслуговування і запобігає затримкам через невирішені питання окремих транспортних засобів.

Отже аналіз моделей поведінки черги в пунктах переробки вантажів дозволяє зробити висновок, що вибір оптимальної моделі залежить від специфіки логістичних процесів. FIFO є найбільш розповсюдженою моделлю, але використання пріоритетних черг може значно покращити ефективність роботи логістичних центрів. Для зменшення затримок доцільно застосовувати комбіновані підходи, які враховують як послідовність прибуття транспорту, так і важливість його обслуговування.

Імітаційне моделювання – є одним з важливих методів аналізу різних систем, де широке розповсюдження отримали системи масового обслуговування. В теорії масового обслуговування отримані аналітичні рішення різноманітних систем масового обслуговування (СМО).

Моделі систем обслуговування з пріоритетами поділяють на одноканальні та багатоканальні системи обслуговування.

Одноканальні системи обслуговування з пріоритетами передбачають наявність одного сервісного пристрою (наприклад, одного крану, посту обслуговування або завантажувального терміналу), який обробляє заявки за пріоритетами.

Модель M/M/1 з пріоритетами – використовується для аналізу систем масового обслуговування з одним каналом, де вводяться пріоритети для різних класів заявок. Це дозволяє зменшити середній час очікування для критично важливих транспортних засобів та підвищити ефективність роботи терміналів. Модель M/M/1 з пріоритетами використовується для аналізу випадкових потоків прибуття транспортних засобів.

Модель M/G/1 є узагальненням M/M/1, але дозволяє використовувати довільний розподіл часу обслуговування. Це особливо актуально для вантажопереробних пунктів, де обслуговування різних типів транспортних засобів може суттєво відрізнитися за тривалістю.

Багатоканальні системи обслуговування (моделі M/M/c, M/G/c) дозволяють ефективно розподіляти навантаження між кількома каналами, зменшуючи час очікування та збільшуючи пропускну здатність пунктів вантажопереробки. Такі системи особливо актуальні для великих логістичних хабів та портових терміналів. Отже коли у системі є кілька серверів (наприклад, кілька пунктів завантаження), то можна застосовувати моделі M/M/c або M/G/c, де «с» – кількість обслуговуючих пристроїв.

Крім того у багатоканальних системах часто застосовують модифікований алгоритм чергування, наприклад, для термінових вантажів виділяють окремі канали; для стандартних вантажів використовується черга з менш пріоритетним обслуговуванням.

Системи обслуговування з пріоритетами є узагальненням класичних СМО, у яких заявкам (транспортним засобам) надається різний рівень важливості.

В умовах обмеженості ресурсів обслуговування та нерівномірності надходження транспортних потоків особливого значення набуває проблема раціонального вибору порядку обслуговування транспортних одиниць.

Під пріоритетністю в обслуговуванні транспортних одиниць розуміється комплекс організаційно-технологічних заходів, спрямованих на встановлення певного порядку доступу транспортних засобів до обмежених ресурсів обслуговування на основі попередньо визначених критеріїв та правил.

Застосування пріоритетних систем у вантажопереробних пунктах на різних видах транспорту дуже широке. Наприклад, на автомобільний транспорту в пунктах переробки застосовується пріоритетний в'їзд для транспортних засобів із швидкопсувними вантажами або небезпечними матеріалами. Для цього використовуються RFID-технології, які дозволяють автоматично розпізнавати рівень пріоритету транспортного засобу.

На залізничному транспорті надається пріоритетний розподіл шляхів для вантажних потягів з критичними вантажами, такими як, паливо, сировина для виробництва. Також впроваджено оптимізацію часу завантаження та розвантаження залежно від типу вантажу.

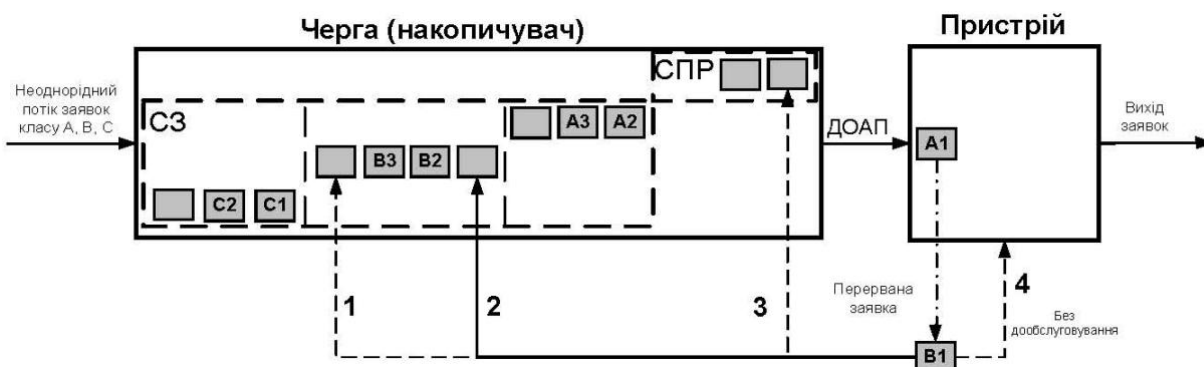
В морських портах та аеропортах також використовується пріоритетність в обслуговуванні транспортних засобів. Відзначається пріоритетність контейнерних суден залежно від договорів із клієнта-

ми. Для цього використовуються автоматизовані системи розподілу ресурсів, наприклад, *Port Community System*.

До основних типів пріоритетів слід віднести:

Жорсткий (абсолютний) пріоритет – заявки з вищим пріоритетом обслуговуються негайно, навіть якщо це призводить до переривання обслуговування заявок нижчого рівня.

Розглянемо роботу одноканального СМО типу G/G/1 з необмеженим накопичувачем та неоднорідним потоком заявок, наприклад, трьох класів «А», «В» та «С». Слід прийняти, що Пріоритет «А» є більший за Пріоритет «В», який в свою чергу більший за Пріоритет «С» (рис. 2).



Умовні позначення:

ДОАП – дисципліна обслуговування з абсолютним пріоритетом;

СПР – список переривань;

СЗ – список затримки.

Рис. 2. СМО типу G/G/1 з жорстким пріоритетом

Наглядний приклад, коли заявка А1, яка має найвищий пріоритет, перериває обслуговування заявки В1. Слід зазначити, що можливі декілька випадків наступних дій, що на рисунку показано відповідними цифрами (1-4):

1 – заявка В1 потрапляє в кінець свого класу «В»;

2 – заявка В1 потрапляє в чергу згідно алгоритму «традиційної» дисципліни обслуговування з абсолютним пріоритетом, В1 стає першою в список затримки після заявок класу «А», які мають вищий за «В» пріоритет;

3 – заявка стає в чергу попереду найпріоритетного класу «А». В цьому випадку заявка В1 переміщується в окремий блок «список переривань», і буде оброблятися раніше ніж список затримок, в якій знаходяться заявки всіх трьох пріоритетів;

4 – заявка без дообслуговування – заявка В1 залишає пристрій необробленою, але даний випадок є малореалістичним для пунктів переробки вантажів.

М'який (відносний) пріоритет – заявки з вищим пріоритетом мають перевагу лише при рівних умовах (наприклад, якщо система вільна). М'який (відносний) пріоритет в обслуговуванні СМО означає, що заявки обробляються відповідно до пріоритетів, але з можливістю порушення суворого порядку. Це відрізняється від жорсткого (абсолютного) пріоритету, де заявки нижчого пріоритету не можуть обслуговуватись, поки є заявки з вищим пріоритетом.

М'який (відносний) пріоритет в обслуговуванні вантажопотоків в пунктах перевалки означає, що обробка вантажів здійснюється з урахуванням їх пріоритетності, але без жорсткого блокування менш пріоритетних вантажів. Це забезпечує ефективне використання ресурсів та запобігає затримкам у логістичних процесах.

Особливості відносного пріоритету у перевалці вантажів є:

– *ймовірнісний підхід* – вантажі з вищим пріоритетом мають більше шансів бути обробленими першими, але менш пріоритетні вантажі також отримують можливість обслуговування;

– *обмежений час очікування* – якщо вантаж із нижчим пріоритетом очікує обробки занадто довго, він може бути включений у чергу поза загальними пріоритетними правилами;

– *квантовий розподіл ресурсів* – перевалочні термінали можуть виділяти певний відсоток ресурсів для менш пріоритетних вантажів, щоб уникнути «заморожування» їх обробки;

– *динамічне коригування* – залежно від поточного завантаження пункту переробки та зовнішніх факторів (наприклад, часу прибуття транспорту, строків доставки) пріоритети можуть змінюватися;

– *рівномірний розподіл пропускної здатності* – забезпечується баланс між швидкою обробкою критично важливих вантажів і запобіганням простою менш термінових партій.

Приклади застосування відносного пріоритету при обслуговуванні вантажопотоків в пунктах перевалки дуже широкі. Це і портові термінали, де контейнеровози з терміновими вантажами отримують перевагу, але звичайні контейнери також завантажуються за планом. Це і залізничні вузли, в яких швидкопсувні товари мають вищий пріоритет, але загальні вантажі теж проходять обробку без довготривалих затримок. Це і автотранспортні хаби, де вантажі з терміновою

доставкою відвантажуються першими, але загальні вантажі не чекають нескінченно довго.

Такий підхід забезпечує оптимальне використання потужностей перевалочних пунктів, мінімізує простої та дозволяє ефективно керувати логістичними процесами.

Динамічний пріоритет – рівень пріоритету змінюється залежно від часу очікування або інших параметрів (наприклад, ваги вантажу, терміновості доставки тощо).

В загальному випадку, системи обслуговування з пріоритетами значно підвищують ефективність роботи вантажопереробних пунктів, дозволяючи оптимізувати використання ресурсів, зменшувати час простою транспортних засобів і підвищувати якість логістичних операцій. Впровадження таких систем є критично важливим у сучасних умовах цифровізації та зростаючих логістичних навантажень.

Усі сучасні пункти переробки вантажів найчастіше включають декілька постів навантаження та розвантаження. Вантаж, що перероблюється в них, є різноманітним і має різну вартісну характеристику. Найчастіше автомобілі, що прибувають до цих пунктів під завантаження або розвантаження, обслуговуються у різні години доби. Практика обслуговування ТЗ у пунктах переробки показує, що існує певний пріоритет в обслуговуванні різних вантажопотоків. Під пріоритетом слід розуміти переважне право вибору з черги для обслуговування заявок одного класу по відношенню до заявок інших класів (рис. 3).

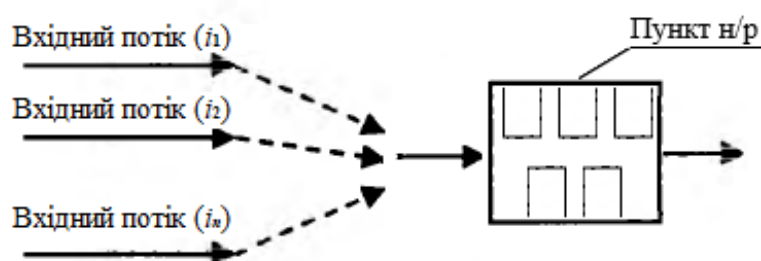


Рис. 3. Блок-схема багатоканальної СМО з декількома вхідними потоками

В загальному випадку ТЗ, що прибувають до пункту переробки, стають у загальну чергу та очікують виклику до конкретного посту розвантаження. Для того, щоб автомобіль, що є першим з-серед тих, що віднесені до найвищого пріоритету, почав обслуговуватися, потрібно йому дочекатись завершення обслуговування автомобіля, який

вже навантажується або розвантажується, тому що заміна недообслуговуваного автомобіля на той, що першочергово претендує на обслуговування, супроводжується значними витратами часу на виконання непродуктивних операцій, що призведе до додаткових витрат.

Це вказує на існування саме *відносного* пріоритету в обслуговуванні ТЗ, який передбачає те, що якщо в процесі поточного обслуговування заявки в систему надходять заявки з більш високими пріоритетами, то обслуговування поточної заявки не переривається.

Якщо ж до обслуговування поступає заявка з найнижчим пріоритетом, то він становиться останнім в чергу. Перед тим, як стати йому під розвантаження, має бути: завершено розвантаження того автомобіля, який вже знаходиться на посту і який вже почали розвантажувати; мають бути обслужені усі ТЗ, які вже знаходились в черзі, до приїзду останнього; а також обслужені всі ті ТЗ, які приїхали до пункту після досліджуваного ТЗ за час його очікування, але які мали більший пріоритет і тому були обслужені раніше. Отже за час очікування обслуговування досліджуваного ТЗ є ймовірність прибуття автомобілів з вищим пріоритетом, що стануть під навантаження (розвантаження) раніше за ТЗ, що розглядається (рис. 4). Вхідний потік, що досліджується, є неоднорідним, а отже і СМО є багатоканальною з декількома вхідними потоками.

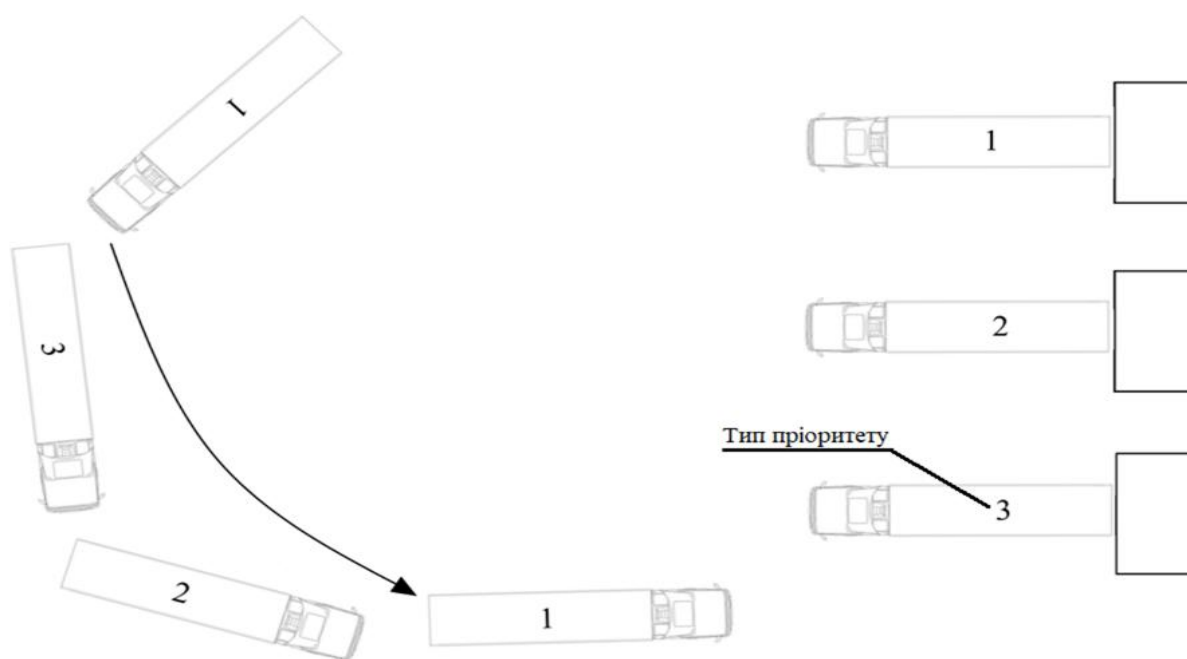


Рис. 4. Відносний пріоритет в обслуговуванні ТЗ в пунктах переробки

2.6. Пріоритетність в обслуговуванні

Формалізовано система пріоритетного обслуговування може бути представлена як

$$S_{pr} = \{TO, P, R, F, D\}, \quad (4)$$

де TO – множина транспортних одиниць, що потребують обслуговування;

P – множина пріоритетних ознак;

R – множина ресурсів обслуговування;

F – функція визначення пріоритету;

D – дисципліна обслуговування.

Ввиділяють наступні основні типи систем пріоритетного обслуговування в транспортній галузі:

– *статичні системи пріоритетів*, в яких порядок обслуговування визначається заздалегідь встановленими правилами, що не змінюються в процесі функціонування системи;

– *динамічні системи пріоритетів*, що передбачають можливість зміни пріоритетів у реальному часі залежно від стану системи;

– *змішані системи*, які поєднують елементи статичних та динамічних систем.

Ефективність системи пріоритетного обслуговування значною мірою залежить від обґрунтованості критеріїв присвоєння пріоритетів. На основі проведеного аналізу транспортно-логістичних процесів та узагальнення практичного досвіду розроблено наступну комплексну систему критеріїв формування пріоритетів.

Економічні критерії. Економічні критерії пріоритетизації спрямовані на максимізацію економічної ефективності функціонування транспортно-логістичної системи та мінімізацію сукупних витрат всіх учасників перевізного процесу. До основних економічних критеріїв належать перелічені нижче.

Вартість простою транспортної одиниці (C_o), що може бути визначена як

$$C_o = \sum_{i=1}^n c_i \cdot t_i, \quad (5)$$

де c_i – питома вартість простою i -го типу ТО за одиницю часу;

t_i – тривалість простою.

Потенційні збитки від затримки доставки (L_d), що враховують можливі штрафні санкції, втрати від псування вантажу, упущену вигоду та інші негативні наслідки порушення термінів доставки.

Договірні зобов'язання (C_c), що відображають фінансові умови контрактів на перевезення та відповідальність сторін за порушення умов обслуговування.

Технологічні критерії. Технологічні критерії враховують особливості транспортних засобів, вантажів та технологічних процесів обслуговування:

Технічні характеристики транспортних засобів, включаючи тип ТЗ, вантажопідйомність, габаритні розміри, маневреність та інші параметри, що впливають на процес обслуговування.

Характеристики вантажу, зокрема, клас небезпеки, температурний режим, термін придатності, специфічні вимоги до навантаження-розвантаження тощо.

Технологічна сумісність транспортних одиниць з наявним обладнанням пунктів обслуговування, що може бути формалізована через коефіцієнт технологічної сумісності

$$K_{tc} = \frac{N_c}{N_t}, \quad (6)$$

де N_c – кількість технологічних операцій, які можуть бути виконані без додаткового переналадження обладнання;

N_t – загальна кількість необхідних технологічних операцій.

Часові критерії. Часові критерії відображають терміновість обслуговування транспортних одиниць та їх вплив на загальну тривалість логістичних процесів:

Залишковий час до граничного терміну доставки (T_r), що може бути визначений як:

$$T_r = T_d - T_c - T_s - T_t, \quad (7)$$

де T_d – договірний термін доставки;

T_c – поточний час;

T_s – очікувана тривалість обслуговування;

T_t – очікувана тривалість подальшого транспортування.

Тривалість попереднього очікування (T_w), що враховує час, який транспортна одиниця вже провела в черзі на обслуговування.

Вплив на загальну пропускну здатність системи (I_c), що оцінює, як пріоритетне обслуговування конкретної транспортної одиниці вплине на загальну ефективність роботи системи.

Логістичні критерії. Логістичні критерії враховують місце конкретної транспортної операції в загальному логістичному ланцюзі та включають наступне.

Значимість у логістичному ланцюзі, що відображає кількість та важливість наступних логістичних операцій, які залежать від своєчасності виконання поточної операції.

Синхронізація з іншими видами транспорту у випадку мульти-модальних перевезень, де затримка одного виду транспорту може призвести до порушення роботи всього ланцюга постачань.

Регулярність перевезень, що враховує, чи є дана транспортна операція частиною регулярного маршруту або разовим перевезенням.

Для формалізації процесу пріоритетного обслуговування транспортних одиниць нами розроблено математичну модель, що дозволяє визначити оптимальний порядок обслуговування з урахуванням множини критеріїв та обмежень.

Нехай $TO = \{1, 2, \dots, n\}$ – множина транспортних одиниць, що очікують обслуговування, а $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ – множина критеріїв пріоритезації. Для кожної транспортної одиниці t_{oi} та кожного критерію p_j визначається оцінка v_{ij} , що відображає значення критерію для даної транспортної одиниці.

Інтегральний показник пріоритетності I_i для транспортної одиниці t_{oi} може бути визначений як

$$I_i = \sum_{j=1}^m \omega_{ij} \cdot v_{ij}, \quad (8)$$

де ω_{ij} – вагові коефіцієнти, що відображають відносну важливість критеріїв пріоритезації, причому $\sum_{j=1}^m \omega_{ij} = 1$.

Задача оптимізації порядку обслуговування транспортних одиниць може бути сформульована як задача визначення такої перестановки $p_i = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in}\}$ індексів транспортних одиниць, що максимізує цільову функцію:

$$F(\pi) = \sum_{i=1}^n I_{\pi i} \cdot f(i), \quad (9)$$

де $f(i)$ – функція, що відображає залежність ефективності системи від позиції транспортної одиниці в черзі на обслуговування.

При цьому необхідно враховувати наступні обмеження. Обмеження на ресурси обслуговування:

$$\sum_{i=1}^n r_{ik} \geq R_k, \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad (10)$$

де r_{ik} – кількість ресурсу типу k необхідна для обслуговування транспортної одиниці t_{oi} ;

R_k – загальна доступна кількість ресурсу типу k .

Часові обмеження:

$$t_{start}(to_{\pi_i}) + t_{service}(to_{\pi_i}) \leq t_{deadline}(to_{\pi_i}), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (11)$$

де $t_{start}(to_{\pi_i})$ – час початку обслуговування транспортної одиниці to_{π_i} ;

$t_{service}(to_{\pi_i})$ – тривалість обслуговування;

$t_{deadline}(to_{\pi_i})$ – граничний термін завершення обслуговування.

Технологічні обмеження:

$$TC(to_{\pi_i}, to_{\pi_{i+1}}) \leq TC_{max}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad (12)$$

де $TC(to_{\pi_i}, to_{\pi_{i+1}})$ – час переналадження обладнання при переході від обслуговування транспортної одиниці to_{π_i} до $to_{\pi_{i+1}}$;

TC_{max} – максимально допустимий час переналадження.

Практична реалізація системи пріоритетного обслуговування транспортних одиниць потребує розробки відповідних методів та алгоритмів, що забезпечують ефективне функціонування системи в реальних умовах.

Для визначення оптимального порядку обслуговування транспортних одиниць можуть застосовуватися різні алгоритмічні підходи:

– *жадібні алгоритми*, що на кожному кроці обирають транспортну одиницю з найвищим інтегральним показником пріоритетності серед доступних для обслуговування;

– *методи динамічного програмування*, що дозволяють знаходити оптимальні рішення шляхом декомпозиції задачі на підзадачі меншої розмірності;

– *метаевристичні алгоритми* (генетичні алгоритми, імітація відпалу, мурашині алгоритми тощо), що дозволяють знаходити наближені рішення задач великої розмірності за прийнятний час;

– *методи багатокритеріальної оптимізації*, що дозволяють знаходити компромісні рішення при наявності множини суперечливих критеріїв.

2.7. Вирішення задачі

В загальному випадку постановка задачі процесу переробки вантажопотоків полягає в тому, що протягом певного періоду часу кожне джерело доставки (вантажопотік) має свої характеристики – інтенсивність надходження, час обслуговування, вантажність ТЗ тощо, і кожен пункт призначення має певні вимоги та характеристики – переробна спроможність, кількість постів тощо. Критерієм ефективності має стати мінімізація сумарного часу, що витрачається як ТЗ, що перебувають в ПП, так і роботи самих пунктів. Раціоналізація даного критерію безпосередньо впливає на витрати усього ланцюга постачань. Очевидно, що при незмінному обсязі матеріалопотоку, що прибуває до ПП наявна кількість механізмів буде здійснювати безпосередній вплив на сумарні витрати на простій ТЗ та механізмів.

В умовах практичної обмеженості переробної спроможності ПП і значної нерівномірності прибуття ТЗ на обслуговування неминуче виникнення черг ТЗ в очікуванні обслуговування. При цьому, ТЗ, що утворюють чергу, мають різні техніко-економічні характеристики. Ця обставина наводить до того, що та чи інша послідовність обробки ТЗ суттєвим чином впливає на загальну вартість обробки. У таких умовах формалізація процесу обслуговування вантажопотоків в ПП зводиться до необхідності оптимізації черговості обробки ТЗ.

Але, оскільки технологія обробки транспортної одиниці в ПП не залежить від місця ТЗ в черзі, то і витрати на обслуговування не залежать і від порядку їх обслуговування. Тоді цільова функція даної задачі має зводитися до мінімізації втрат часу на очікування ТЗ початку обслуговування [2]

$$\sum_{i=1}^n W_i \rightarrow \min, \quad (13)$$

де W_i – час очікування обслуговування i -м ТЗ з черги.

Отже в результаті визначення раціональної черговості і досягається мінімізація сукупних витрат на обслуговування ТЗ.

Якщо формалізувати час очікування ТЗ, що прибув на обслуговування, то маємо наступну залежність [17]

$$W_j = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot \sigma_i + \sum_{i=1}^j \lambda_i \cdot w_i \cdot b_i + w_j \cdot \sum_{i=1}^{j-1} \lambda_i \cdot b_i, \quad (14)$$

де ρ_i – ймовірність застати пост зайнятим заявкою i -го типу;

σ_i – середній час дообслуговування ТЗ, яким зайнятий пост навантаження (розвантаження);

λ_i – інтенсивність прибуття автомобілів до пункту навантаження або розвантаження i -го типу, авт./год;

w_i – середній час очікування обслуговування у черзі для i -го типу заявок;

w_j – час очікування обслуговування, в який прибули автомобілі з вищим пріоритетом;

b_i – середній час обслуговування i -го типу заявок;

j – пріоритет в обслуговуванні (1, 2, 3, ..., k).

Добуток $\lambda_i \cdot w_i$ являє собою середнє число заявок i -го типу, що знаходяться в черзі. Слід відзначити, що вираз (6) є рекурентним, де кожний наступний член послідовності визначається через попередній член послідовності.

Введемо позначення для опису процесів в ПП вантажопотоків. Представимо ПП у вигляді системи масового обслуговування. Під вимогою в даному випадку вважаємо ТЗ, що прибув на обслуговування в ПП вантажів. Нехай

$$k = 1, 2, \dots, r, \quad (15)$$

де k – номери пріоритетних класів вимог, що надходять в систему масового обслуговування.

Тоді функція розподілу ймовірностей тривалості обслуговування X_k вимог k -го пріоритету матиме вигляд

$$G_k(t) = P(X_k \leq t), t > 0. \quad (16)$$

Нехай λ_k – інтенсивність надходження вимог k -го пріоритету, тоді навантаження на систему обслуговування вимог k -го пріоритету буде мати вигляд

$$\rho_k = \lambda_k \cdot M(X_k) = \lambda_k \int_0^{\infty} t dG_k(t), \quad (17)$$

де $M(X_k)$ – перший момент стаціонарного часу очікування вимог.

Нехай W_k – стаціонарний час очікування вимог k -го пріоритету, тоді для випадку, коли сумарне навантаження на систему обслуговування усіх пріоритетних класів буде меншим за одиницю, тобто

$$\rho = \sum_{k=1}^r \rho_k < 1, \quad (18)$$

тоді отримаємо формулу для першого моменту стаціонарного часу очікування вимог k -го пріоритету

$$M(W_k) = \frac{\sum_{j=1}^r \lambda_j^2 M(X_j^2)}{2 \left(1 - \sum_{j=1}^{k-1} \rho_j \right) \left(1 - \sum_{j=1}^k \rho_j \right)}. \quad (19)$$

У випадку, коли сумарне навантаження на систему обслуговування усіх пріоритетних класів буде більшою за одиницю, звісно, необхідно додати кількість каналів обслуговування в систему так, щоб навантаження на один канал стало меншим за одиницю.

Перший момент часу обслуговування визначається за залежністю

$$Mb_i = \int_0^{\infty} x \cdot dF_i(x) = \int_0^{\infty} x \cdot F_i'(x) dx, \quad (20)$$

тоді другий момент часу обслуговування складе

$$Mb_i^2 = \int_0^{\infty} x^2 \cdot dF_i(x) = \int_0^{\infty} x^2 \cdot F_i'(x) dx, \quad (21)$$

де $F(x)$ – функція закону розподілу, що описує час обслуговування ТЗ у пункті навантаження/розвантаження. Дана величина знаходиться з функції розподілу кожного пріоритету, що має вигляд

$$F(x) = P\{b_i \leq x\}. \quad (22)$$

Таким чином, час очікування обслуговування для автомобіля з найвищим пріоритетом – автомобілі з імпортованим вантажем (Пріоритет 1) складе

$$Mw_1 = \frac{\lambda_1 \cdot Mb_1^2 + \lambda_2 \cdot Mb_2^2 + \lambda_3 \cdot Mb_3^2}{2 \cdot (1 - \rho_1)}, \quad (23)$$

автомобілів з Пріоритетом 2 складе

$$Mw_2 = \frac{\lambda_1 \cdot Mb_1^2 + \lambda_2 \cdot Mb_2^2 + \lambda_3 \cdot Mb_3^2}{2 \cdot (1 - \rho_1) \cdot (1 - (\rho_1 + \rho_2))}, \quad (24)$$

автомобілів Пріоритету 3 складе

$$Mw_3 = \frac{\lambda_1 \cdot Mb_1^2 + \lambda_2 \cdot Mb_2^2 + \lambda_3 \cdot Mb_3^2}{2 \cdot (1 - (\rho_1 + \rho_2)) \cdot (1 - (\rho_1 + \rho_2 + \rho_3))}. \quad (25)$$

2.8. Опис часу обслуговування транспортного засобу у пункті перевалки

Час знаходження транспортних засобів в пунктах навантаження та розвантаження є постійною (детермінованою) величиною лише в замкнених системах і притаманний тільки в питаннях розробки план-графіків роботи складів. В реальних же умовах весь час, що витрачається на виконання операцій в пунктах переробки, характеризується певним розподілом часу обслуговування відповідно до умов функціонування останніх. Таким чином, час обслуговування транспортних засобів в пунктах розвантаження практично завжди невідомий. Тобто основним статистично невизначеним показником, що впливає на ефективність роботи як складу, так і перевізників є час обслуговування транспортних засобів у пунктах навантаження-розвантаження. Саме тому економічні результати діяльності учасників перевізного процесу, не дивлячись на велику кількість методик зниження витрат, носять стохастичний, випадковий характер, який негативним чином впливає на поточну і перспективну діяльність усіх учасників перевізного процесу.

Виходячи з статистичних даних про коливання часу обслуговування транспортних засобів у пунктах навантаження-розвантаження, доцільно визначити стохастичні параметри, такі як середнє значення та середньоквадратичне відхилення.

Фактичні значення часу перебування транспортних засобів у пунктах навантаження та розвантаження зібрані у період піку потреби ринку, а саме у літній період, для овочевої бази, одної з дис-

триб'юторів плодово-овочевої продукції на ринку України, що виступає пунктом як навантаження, так і розвантаження транспортних засобів. Отримані статистичні дані вказують на випадковий характер величини часу обслуговування транспортних засобів у пункті. Фіксувався час з моменту прибуття автомобіля до пункту навантаження та розвантаження до моменту його виїзду за територію. Даний час складається з часу маневрування, часу перебування ТЗ в черзі, часу безпосереднього обслуговування, часу на прийом вантажу (при навантаженні дорівнює 0) і часу на оформлення документів.

Приклад визначення пріоритету. На досліджуваному пункті переробки вантажу ТЗ обслуговуються за наступним пріоритетним порядком з відносним характером:

- найвищій пріоритет мають власні або орендовані ТЗ. Для підприємства доцільно мінімізувати простої взятих у найм та власних автомобілів;

- високу пріоритетність мають ТЗ для ключових клієнтів. Доставка даному типу клієнта є пріоритетною, оскільки за недопоставку клієнт виставляє штрафні санкції та не приймає автомобіль після встановленого у план-маркеті часу;

- ТЗ з вантажем для дистриб'юторів, так як такий клієнт буде обслуговувати ТЗ у будь-який робочий час;

- ТЗ з вантажем для міжскладського переміщення. Цей вид доставки є внутрішнім, тобто переміщення походить з одного складу на інший;

- ТЗ з тарою та вхідний вантаж. Збитки, які можуть виникнути у зв'язку з простоєм автомобілів та/або псуванням даного виду вантажу є, порівняно з іншими пріоритетами, незначні. Тому для пунктів переробки доцільно обслуговувати такі ТЗ останніми.

Так як ймовірність наявності черги в пункті переробки, її довжина та тривалість простою ТЗ в очікуванні обслуговування є випадковими величинами, для їх оцінки необхідно використовувати ймовірнісні характеристики процесів, що розглядаються. Отримати ці оцінки можливо за рахунок припущення про стаціонарність потоків замовлень [34].

За результатами дослідження характеру часу обслуговування, визначено закон розподілу для кожного з пріоритетів (рис. 5).

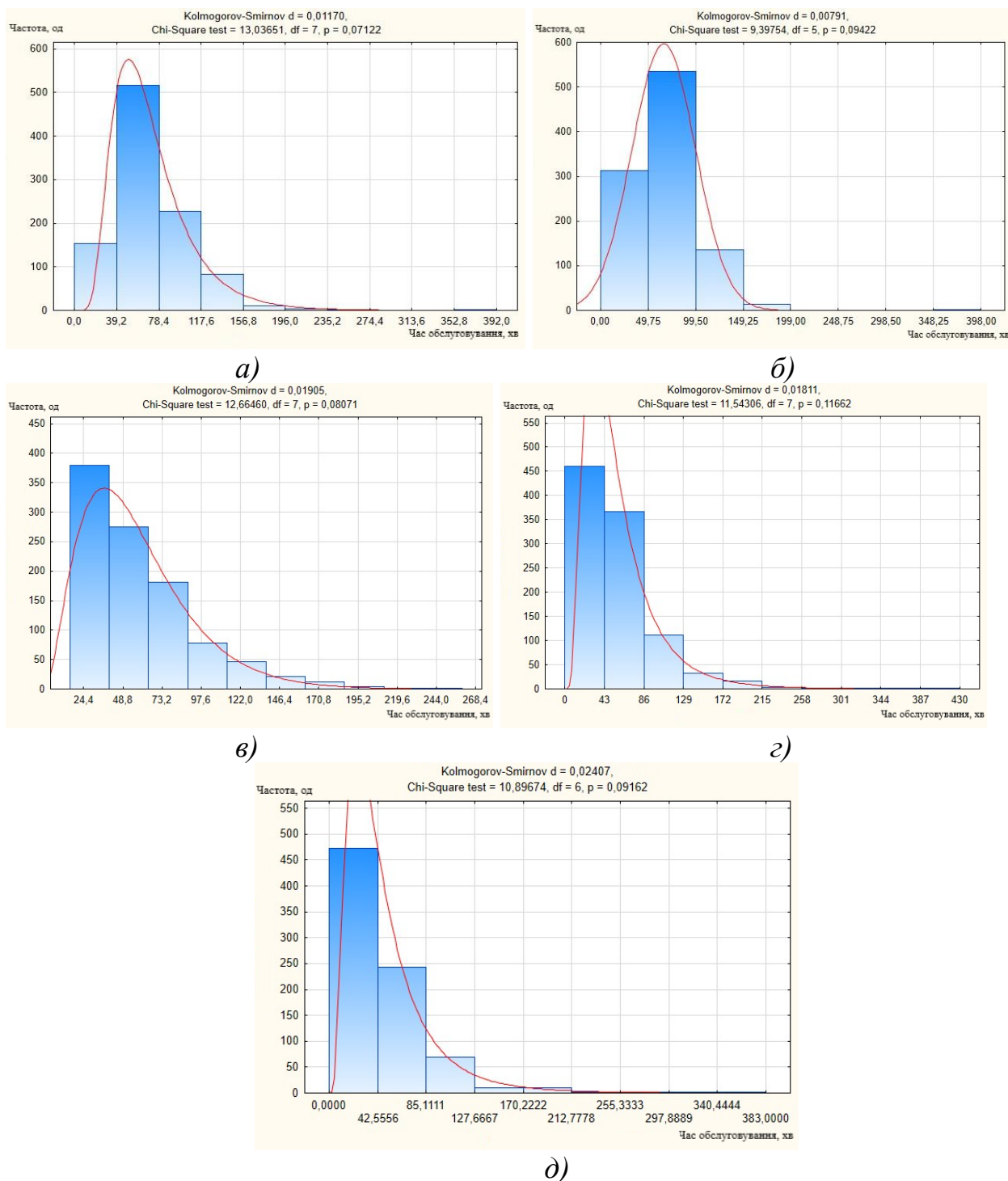


Рис. 5. Закон розподілу часу обслуговування ТЗ різних пріоритетів
 а) час обслуговування власних ТЗ у пункті переробки;
 б) час обслуговування ТЗ для ключових клієнтів у пункті переробки;
 в) час обслуговування ТЗ для інших клієнтів у пункті переробки;
 г) час обслуговування ТЗ для внутрішніх переміщень у пункті переробки;
 д) час обслуговування ТЗ закордонних клієнтів у пункті переробки

Перевірка гіпотези про належність досліджуваної вибірки *по ключовим клієнтам* теоретичній кривій виду нормального закону розподілу проведена за критерієм відповідності Пірсона (табл. 1)

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(f_i - f_m)^2}{f_m} \quad (26)$$

де k – кількість груп, на які розбито емпіричний розподіл;

f_i – спостережувана частота ознаки у i -й групі;

f_m – теоретична частота.

Кількість ступенів свободи визначається

$$df = k - s - 1 \quad (27)$$

де s – кількість параметрів передбачуваного розподілу, оцінених за даними вибірки ($s = 2$).

Таблиця 1

Показники визначення закону розподілу часу обслуговування ТЗ ключових клієнтів у пункті переробки

Назва показника	Закон розподілу	Показники визначення закону розподілу	
		$\chi^2_{\text{розн}}$	$\chi^2_{\text{табл}}$ при $p = 0,05$
Час обслуговування ТЗ для ключових клієнтів у пункті переробки	Нормальний	9,39	9,49

Для даного закону розподілу при кількості груп, на які розбито розподіл

$$df = 7 - 2 - 1 = 4.$$

Таким чином, табличне значення χ^2 складає 9,49. Отримані значення χ^2 підтверджують гіпотезу про розподіл часу обслуговування ТЗ для *ключових клієнтів* у пункті переробки.

Аналогічно перевіряються закони розподілу часу обслуговування ТЗ з іншими пріоритетами в пункті переробки.

Формалізація часу очікування ТЗ в черзі з урахуванням потреб ПП вантажів дає змогу спланувати роботу учасників даного процесу. В подальших дослідженнях необхідно провести апробацію запропонованої методики на реальному об'єкті для визначення типів існуючих пріоритетів потоків, здійснити збір та обробку статистичних да-

них про час обслуговування ТЗ для визначення часу перебування в таких пунктах.

2.9. Висновки

Головною особливістю функціонування ПП вантажів є робота з вантажопотоками, що надходять і є різними за своїми характеристиками та часом надходження. Така неоднорідність та стохастичність процесів призводить до неминучого виникнення черг автомобілів в очікуванні обслуговування, що призводить до зниження ефективності функціонування усього ланцюга постачань.

Результати аналізу існуючих підходів до визначення часу перебування ТЗ у пунктах розвантаження свідчать про обмежені можливості моделей, заснованих на використанні емпіричних даних, і досить низьку точність розрахунків з використанням аналітичних залежностей.

При вирішенні завдань визначення показників і дослідженні їх впливу на час перебування ТЗ у пунктах розвантаження доцільно проводити з використанням методів математичного моделювання та теорії масового обслуговування з урахуванням як економічних, так і технологічних показників, а також вимог, що висуваються вантажоодержувачами.

Аналіз діяльності пунктів розвантаження показав, що існує відносний пріоритет в обслуговуванні ТЗ. На основі чого виділено основні потоки ТЗ, що характеризуються різним пріоритетом обслуговування та для яких розроблено математичні моделі часу їх перебування у пунктах переробки.

За результатом статистичної обробки зібраних даних встановлено, що розподіл часу обслуговування ТЗ різних пріоритетів узгоджується із теоретичними законами розподілу випадкової величини з визначеними параметрами.

Результати оцінки отриманих значень часу перебування автомобілів у пункті розвантаження свідчать про те, що моделі є адекватними.

Результати дослідження можуть бути використані спеціалістами з планування роботи автомобільного транспорту та спеціалістами з планування роботи пунктів переробки для удосконалення роботи з уникнення непродуктивних простоїв ТЗ і додаткових витрат на організацію транспортного процесу.

Список літератури до розділу 2

1. Fedorov V. Yu., Voronova E. M., Kovtsur K. H. Study of the definition of vehicle downtime at the point of loading and unloading. Proceedings of the 5th International scientific and practical conference. Tokyo: CPN Publishing Group, 2021. P. 266–271.
2. Федоров В., Ковцур К., Птиця Н. Взаємодія видів транспорту: особливості обслуговування транспортних засобів в пунктах переробки вантажів. *Розвиток транспорту*. 2023. № 4(15). С. 123–130. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2022.4-15.10>.
3. Яновський П. О., Ткаченко В. А., Гайченя Д. В. Підвищення ефективності функціонування інфраструктури вантажного комплексу аеропорту за рахунок впровадження інформаційних технологій при переробці військових вантажів. *Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення* : тези доповідей III Всеукраїнської науково-технічної конференції, м. Житомир, 26-27 листопада 2020 р. Житомир: Житомирська політехніка, 2020. С. 91–92.
4. Оптимізація транспортної логістики. *Neolit logistics*: веб-сайт. URL: <https://neolit.ua/ua/articles/optimizaciya-transportnoyi-logistiki/>.
5. Кашканов В.А., Склярів М.В., Головащенко Б.В. Планування роботи автомобілів на АТП при виконанні вантажних перевезень. *Сучасні технології та перспективи розвитку АТ*: матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції. 2021. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/38911/139234.pdf?sequence=2>.
6. Сенік Ю. Застосування циклічних моделей організації логістичних перевезень продукції чи сировини. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic sciences*. 2023. Vol. 320(4). С. 278–285. URL: <https://heraldes.khmnu.edu.ua/index.php/heraldes/article/view/471>.
7. Севрюк В. О. Напрями оптимізації управління транспортними та складськими процесами на підприємстві. *Управління розвитком*. 2014. № 8. С. 150–152. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Uproz_2014_8_62.
8. Савицький Е. Вплив оптимізації логістичних процесів на ефективність комерційної діяльності підприємства. *Економіка та суспільство*. 2023. № 52. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-52-47>.
9. Filina-Dawidowicz L., Kostrzewski M. The Complexity of Logistics Services at Transshipment Terminals. *Energies*. 2022. Vol. 15(4). Paper 1435. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15041435>.

10. Samrout M., Yassine A., Sbihi A. Optimization Model for Berth and Transshipment Scheduling. *15th International Doctoral Students Workshop on Logistics*, Magdeburg, 2022. P. 72–82. DOI: <http://dx.doi.org/10.25673/85956>.
11. Tagawa H., Kawasaki T., Hanaoka S. Conditions influencing the choice between direct shipment and transshipment in maritime shipping network. *Journal of Shipping and Trade*. 2021. Vol. 6(4). DOI: <https://doi.org/10.1186/s41072-021-00085-3>.
12. Voevodskii E.N., Postan M.Y. Stochastic models of transport flow interaction at transshipment points. *Cybern Syst Anal*. 1993. Vol 29. P. 78–87. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01130092>.
13. Jović M., Tijan E., Brčić D., Pucihar A. Digitalization in Maritime Transport and Seaports: Bibliometric, Content and Thematic Analysis. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10(4): 486. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10040486>.
14. Al-Sultan A., Alsaber A. Solving vehicle transshipment problem using multi-objective optimization. *Far East Journal of Applied Mathematics*. 2022. Vol. 114. P. 65–82. DOI: <https://doi.org/10.17654/0972096022015>.
15. Baskaran R., Dharmalingam K., Mohamed S., Mohamed Assarudeen S. Fuzzy transshipment problem with trans. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2016. Vol. 107(4). P. 1053–1062. DOI: <https://doi.org/10.12732/ijpam.v107i4.22>.
16. Kumar A., Chopra R., Saxena R. An Enumeration Technique for Transshipment Problem in Neutrosophic Environment. *Neutrosophic Sets and Systems*. 2022. Vol. 50. P. 552–563. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6774926>.
17. Voevodskii E. N., Postan M. Ya. Stochastic models of transport flow interaction at transshipment points. *Cybernetics and Systems Analysis*. 1993. Vol. 29.1. P. 78–87.
18. Kruse K. Waiting time in continuous review (s,s) inventory systems with constant lead times. *Operations Research*. 1981. Vol. 29. P. 202–207.
19. Monaco M., Sammarra M. A multiplier adjustment algorithm for a truck scheduling and transshipment problem at a cross-docking terminal. *Soft Comput*. 2022. P. 1–25. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00500-022-06999-9>.
20. Severyn O. O. Vantazhni roboty na avtomobilnomu transporti: orhanizatsiia i tekhnolohiia. Kharkiv: KhNADU, 2006. 322 p.

21. Boysen N., Fliedner M., Scholl A. Scheduling in boundandout bound trucks at crossdocking terminals. *OR Spectrum*. 2010. Vol. 32. P. 135–161.
22. Галкін А. С., Куш Є.І., Фіялко Н.А. Планування транспортного процесу перевезення вантажів в умовах міста (на прикладі міста Харкова). *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектури*. 2016. №. 132. С. 98–103.
23. Скрипін В. С., Куш Є. І. Визначення оптимальної вантажопідійомності транспортних засобів залежно від схем розвезення вантажів в логістичній системі. *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура*. 2016. № 130. С. 70–75.
24. Fallah A., Ghalekhondabi I., Weckman G. R. Optimal supplier selection in a supply chain with predetermined loading/unloading time windows and logistics truck share. *IFIP: International Conference on Advances in Production Management Systems*. Cham: Springer, 2019. P. 100–108.
25. Handajani M., Janto Y. Level of customers at is faction with loading/unloading services at semarang container terminals. *Journal of Transportation*. 2015, Vol. 15(1). P. 21–30.
26. Darmanto S. () Analysis of the effect of service quality and export facilities on customer satisfaction and loyalty of containership regional containerline (RCL) Semarang. *Media Economics and Management*. 2017. Vol. 32, Issue 2. P. 137–153.
27. Postan M., Savelieva I., Stadnik V. Developmentof a method for determination of ship's loading time distribution under irregular cargo arrival. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 6(3(102)). P. 49–56.
28. Toly Chen, Chi-Wei Lin. A fuzzy collaboration system for ubiquitous loading/unloading space recommendation in the logistics industry. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2017. Vol. 45. P. 86–98.
29. Rahbari A., Mahdi Nasiri M. Robust vehicle routing and cross-dock scheduling with uncertain loading and unloading time. *Systems Optimization & Business Management: 1st International Conference, Babol, 2017*.
30. Bertsimas D., Sim M. Robust discrete optimization and network flows. *Mathematical Programming. Ser. B*. 2003. Vol. 98. P. 49–71.

31. Hanowski R., Nakata A., Olson R. Methodological Overview of the Drowsy Driver Warning System Field Operational Test *SAE Transactions*. 2004. Vol. 113. P. 610–615.
32. Friswell R., Williamson A. Management of heavy truck driver queuing and waiting for loading and unloading at road transport customers' depots. *SafetyScience*. 2019. Vol. 120. P. 194–205.
33. K. Kovtsur, N. Ptytsia, Ye. Liubiyi, V. Fedorov An approach to determine vehicle idle time at unloading points. *AIP Conference Proceedings*. 2021. Vol. 2439. Paper 020012. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0068437>.
34. Ковцур К.Г., Федоров В.Ю. Оцінка часу обслуговування транспортних засобів у пункті переробки вантажів. *Стратегія якості в промисловості і освіті: матеріали XVII Міжнародної конференції, Варна, Болгарія, 05–08 червня 2023 р. Варна: ТУ Варна, 2023. С. 349–353.*

3. Розвиток інтермодальних контейнерних перевезень як інструмент інтеграції українських логістичних шляхів до TEN-T: проблеми і перспективи

О.О. Орда

доцент кафедри транспортних технологій ХНАДУ,
канд. техн. наук, доцент

3.1. Актуальність питання

Транспортна система є однією з ключових галузей економіки країни, що відіграє вирішальну роль у забезпеченні сталого соціально-економічного розвитку країни, функціонуванні логістичних ланцюгів та систем доставки, а також підвищенні конкурентоспроможності національної економіки. В умовах європейського інтеграційного курсу України, перед вітчизняним транспортним сектором постають амбітні завдання щодо підвищення рівня його стійкості та значного зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Європейська транспортна політика, визначена, зокрема, «Стратегією сталого та розумного розвитку мобільності» [1-2] ЄС, орієнтується на досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року зі скороченням викидів парникових газів на 55 % до 2030 року. Ця трансформація відкриває нові перспективи для України, включаючи модернізацію галузі, формування «зелених» ланцюгів постачання, створення робочих місць для висококваліфікованих кадрів та розробку екологічно чистих продукції і послуг.

3.2. Аналіз практичних аспектів розвитку інтермодальних контейнерних перевезень в ланцюгах постачань

Незважаючи на стратегічну важливість та потенціал розвитку, український транспортний сектор наразі перебуває у стані довготривалої кризи, стикаючись з низкою невирішених проблем. Аналіз сучасного стану транспортного сектору в Україні, наведений в оновленій Національній транспортній стратегії України на період до 2030 року [3], свідчить про те, що галузь лише частково забезпечує потреби населення та бізнесу, охоплюючи переважно кількісні, а не якісні показники. Крім того, наявний рівень розвитку галузі не відповідає повною мірою вимогам євроінтеграції, зокрема через: необхідність

адаптації вітчизняного законодавства до норм *acquis* ЄС; запровадження та контроль дотримання міжнародних стандартів; виконання міжнародних зобов'язань України; інтеграцію національної транспортної системи в Транс'європейську транспортну мережу (TEN-T).

Нагальним питанням для європейської інтеграції України є узгодження Національної транспортної стратегії з євроінтеграційними пріоритетами, зокрема з принципами Європейського зеленого курсу у сфері транспорту та мобільності [4]. Запорукою успішної імплементації є наявність організаційних, кадрових та фінансових ресурсів, а також ефективної нормативно-правової бази. До ключових викликів належать: невідповідність транспортного парку та ланцюгів постачання сучасним екологічним вимогам ЄС, що обмежує конкурентоспроможність українських перевізників-експортерів; проблеми з розвитком інфраструктури, мультимодальних перевезень та контейнеризації вантажів; відсутність обґрунтованої транспортної політики з конкретизацією дій для досягнення цілей. Відповідність проектів розвитку транспортного сектора України екологічним показникам та вимогам ЄС є критично важливою для залучення міжнародних інвестицій.

У рамках солідарної відповіді ЄС з Україною, у 2022 році Європейська Комісія (ЄК) представила комплекс заходів, спрямованих на допомогу Україні в експорті продукції. З метою запобігання глобальній продовольчій безпеці та задоволення потреби у створенні альтернативних логістичних маршрутів з використанням усіх відповідних видів транспорту після вторгнення Росії в Україну та блокування нею українських портів, було запроваджено план дій «Шляхи солідарності». За три роки обсяги торгівлі між Україною та ЄС оцінюються у 211 млрд. євро: експортовано продукції з України на суму 61 млрд. євро, імпортовано товарів на суму близько 150 млрд євро [5].

У середньостроковій та довгостроковій перспективі план дій ЄК охоплює питання щодо збільшення інфраструктурної потужності нових експортних коридорів та над створенням нових інфраструктурних сполучень у рамках реконструкції України. Підтримка проектів, що покращують транспортні сполучення з Україною, зокрема залізничні сполучення та залізнично-дорожні термінали, дозволить забезпечити реалізацію політики Комісії щодо оновлення карт TEN-T розширення мережі на сусідні країни.

Інтеграція українських логістичних шляхів до TEN-T є стратегічно важливою метою, яка вимагає модернізації рухомого складу та

розвитку транспортно-логістичної інфраструктури у відповідності до міжнародних стандартів екологічності та якості обслуговування. Одним з ефективних інструментів, який дозволяє одночасно вирішувати завдання підвищення ефективності, надійності, безпеки та екологічності перевезень, є розвиток інтермодальних (мультимодальних) контейнерних перевезень. Контейнеризація вантажів визнана найекономічнішим, надійним та екологічним способом транспортування. Застосування сучасних логістичних технологій у контейнерних перевезеннях забезпечує швидку та вигідну доставку «від дверей до дверей» зі зменшенням кількості операцій та ризиків для майна. Крім того, транспортна галузь входить до числа ключових забруднювачів навколишнього середовища, значною мірою відповідаючи за викиди парникових газів. Зокрема, автомобільний транспорт становить (90-95) % шкідливих викидів у повітря міських територій та зон з високою концентрацією населення [6]. Переорієнтація вантажних потоків з автомобільного транспорту (який має найбільшу частку в експорті/імпорті України і вважається «найбруднішим») на більш екологічні залізничний та водний види транспорту, зокрема шляхом розвитку контейнерних перевезень, є ключовим напрямком скорочення викидів CO₂ та зменшення додаткових витрат, пов'язаних з екологічними вимогами [7]. Так, автором [7] розроблено 4 сценарію сталого розвитку транспортного сектору України, що забезпечує експорт продукції на міжнародні товарні ринки, рис. 1.

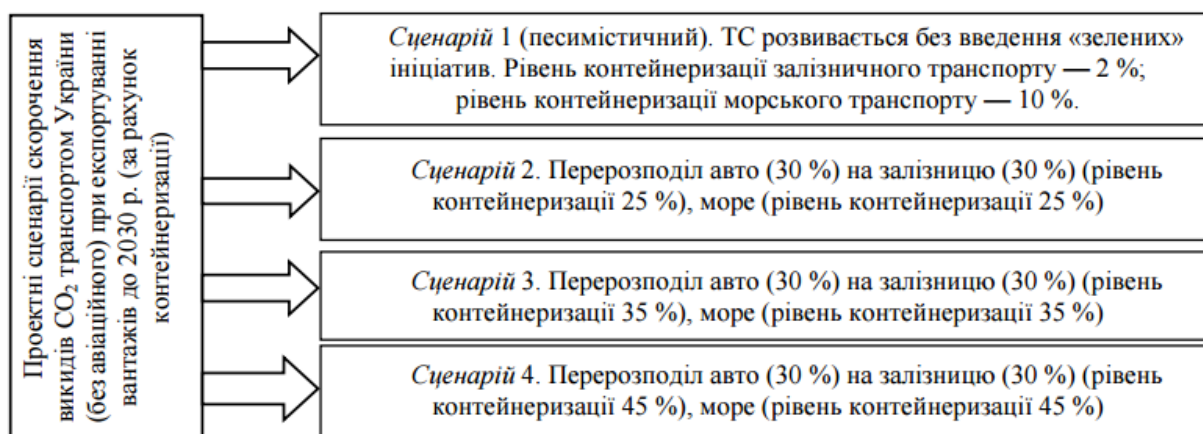


Рис. 1. Альтернативні сценарії сталого розвитку транспортного сектору України при експортуванні вантажів до 2030 р. [7]

За результатами дослідження [7] реалізація саме четвертого сценарію в Україні дозволить зменшити негативний вплив транспортної

системи на довкілля. Тобто, розвиток контейнерних та мультимодальних перевезень за участю екологічних видів транспорту, розбудова необхідної інфраструктури обслуговування транспорту з нульовими викидами та постачання альтернативної енергії є перспективними напрямками для забезпечення стійкості функціонування транспортної галузі України та її інтеграції у європейський простір.

Війна в Україні внесла суттєві корективи в процеси міжнародної логістики. Нагальність перебудови логістичних ланцюгів обумовлено суттєвою зміною географії транспортно-економічних зв'язків та зменшенням обсягів перевезень у східному напрямку, наслідками блокування морських шляхів та портів, закриття повітряного простору, зміни маршрутів та руйнування інфраструктури, блокування кордонів із суміжними європейськими країнами та високими ризиками тощо. В свою чергу, це призводить до зростання вартості послуг та зниження швидкості доставки та збоїв та недотримання термінів доставки, обумовлених договорами.

Дослідження змін Індексу ефективності логістики (LPI) України за 2014-2023 роки виявило значне зниження рейтингу країни, з 61 до 79 місця, та відповідних ключових параметрів, що підтверджує негативний вплив системних проблем та економічної нестабільності на галузь [8]. Це також свідчить про низьку активність у розвитку цього сегменту та наявність значних проблем, які потребують детального дослідження та ефективних рішень, особливо, в умовах повоєнного відновлення економіки України для забезпечення ефективної логістики для постачання товарів, сировини та обладнання. Враховуючи транзитний потенціал України та розгалужену транспортну систему сучасним пріоритетним напрямом розвитку національної економіки постає зростання рівня транзитних перевезень, особливо в європейському векторі [9].

Контейнерні перевезення залишаються найзатребуванішим серед вантажовласників способом доставки вантажів у міжнародному сполученні. У країнах-членах ЄС рівень контейнеризації перевезень вантажів становить (35-55) % загального обсягу перевезень [3]. Перевагами використання контейнерів при транспортуванні вантажів є збереження вантажів, відсутність потреби в перевантаженні окремих партій, можливість перевезення великих обсягів з меншими витратами, за рахунок чого прискорюється процес доставки та підвищується її ефективність. Формування та вибір ефективної схеми доставки вантажів у контейнерах є актуальним питанням, бо від технології обро-

бки замовлення вантажовласника залежать витрати на доставку та рівень обслуговування клієнтів, що віддзеркалює конкурентні переваги, перш за все, замовників та впливає на посилення конкурентних переваг транспортних компаній.

У 2021 році в Україні з прийняттям Закону «Про мультимодальні перевезення» був зроблений значний крок щодо підвищення рівня інтегрованості вітчизняної транспортної системи [10]. Однак, незважаючи на вдосконалення нормативно-правової бази розвитку інтермодальних, мультимодальних перевезень, очевидні переваги та європейські орієнтири, повноцінне запровадження та використання комбінованих перевезень в Україні гальмується низкою факторів. До ключових проблем, що перешкоджають активному розвитку цього сегменту, належать [9]:

- низький рівень контейнеризації експортних та імпорتنих вантажів порівняно з країнами ЄС – лише 0,5 % вантажних перевезень здійснюється за принципами мультимодальності та інтермодальності [6];

- невідповідність транспортного парку та інфраструктури сучасним екологічним вимогам ЄС та стандартам якості;

- нестача спеціалізованої логістичної інфраструктури, зокрема, внутрішніх мультимодальних терміналів для виконання вантажних операцій;

- брак залізничного рухомого складу, особливо контрейлерних платформ;

- недостатнє унормування правового підґрунтя для організації контрейлерних перевезень вантажів між Україною та країнами ЄС;

- відмінності між вітчизняними та європейськими технологічними аспектами, такі як ширина залізничної колії (1520 мм в Україні проти 1435 мм в ЄС) та висота вагону з транспортною одиницею (5,3 м в Україні проти 4,18 м в ЄС);

- складність вибору оптимальної технології через конструкційні особливості вітчизняних залізниць;

- високі витрати на маневрування та перевантаження в інтермодальних терміналах;

- нестабільність тарифної політики та необхідність інвестицій у спеціалізований рухомий склад та будівництво терміналів;

- відсутність збалансованої регуляторної політики для всіх учасників;

– відсутність національних мультимодальних операторів, які б розділяли високі ризики в ланцюгах постачань разом із закордонними сервісними компаніями [11].

Транспортна політика Європейського Союзу орієнтована на споживачів та забезпечення їх інтересів, лібералізацію ринку перевезень в умовах конкурентних відносин у сфері перевезень. Впродовж тривалого часу ключовими напрямками формування єдиного транспортного ринку та спільного простору переміщень залишаються міжнародна інтеграція та стійкість національних транспортних мереж країн-членів [12]. ЄС формує єдиний транспортний простір через розвиток сполучень і екологічну трансформацію. Регламент TEN-T задає масштабну мережу транс'європейських коридорів. З метою визначення перспективних напрямків інтеграції українських логістичних шляхів до TEN-T необхідно розглянути основні етапи її розвитку, структуру, основні стандарти, політику та вимоги, що висуваються до країн-членів мережі тощо [13-14].

TEN-T спрямована на впровадження та розвиток загальноєвропейської мережі, що охоплює всі види транспорту: автомобільні та залізничні шляхи, внутрішні водні шляхи, морські транспортні маршрути, порти, аеропорти та мультимодальні термінали, а також послуги, необхідні для функціонування цієї інфраструктури. TEN-T являє собою дев'ять мультимодальних коридорів, які поєднують транспортні мережі 28 країн – членів ЄС, рис. 2.

Мережа TEN-T складається з двох рівнів:

– основна мережа (core network) – має цільовий термін завершення до 2030 року;

– загальна мережа (comprehensive network) – має цільовий термін завершення до 2050 року.

Однак, у дослідженні [13] станом на 2021 рік зазначено, що національні плани не повністю відображали зобов'язання країн-членів щодо планування та імплементації мережі TEN-T. Жоден національний план не надавав огляд поточних та очікуваних показників завершення TEN-T до 2030 року. Це ускладнювало точну оцінку рівня імплементації TEN-T в кожній країні-члені. Для 21 країни-члена (78 %) недостатньо було інформації в національних планах, щоб з упевненістю зробити висновок про завершення мережі TEN-T до 2030 року.

Тому, у 2024 році Європейський Парламент та Європейська Рада оновили нормативні вимоги щодо розвитку мережі TEN-T та означили три етапи розвитку: завершення формування базової мережі – до

2030 р., розширеної базової мережі – до 2040 р., а до 2050 р. – формування загальної мережі. Оновлений регламент TEN-T (2024) містить жорсткі вимоги з інтеграції різних видів транспорту з акцентом на стійкість і декарбонізацію. У відповідності до Європейського Зеленого Курсу (ЄЗК) і пакету «Fit for 55» ЄС ставить завдання знизити викиди транспорту майже до нуля до 2050 року.

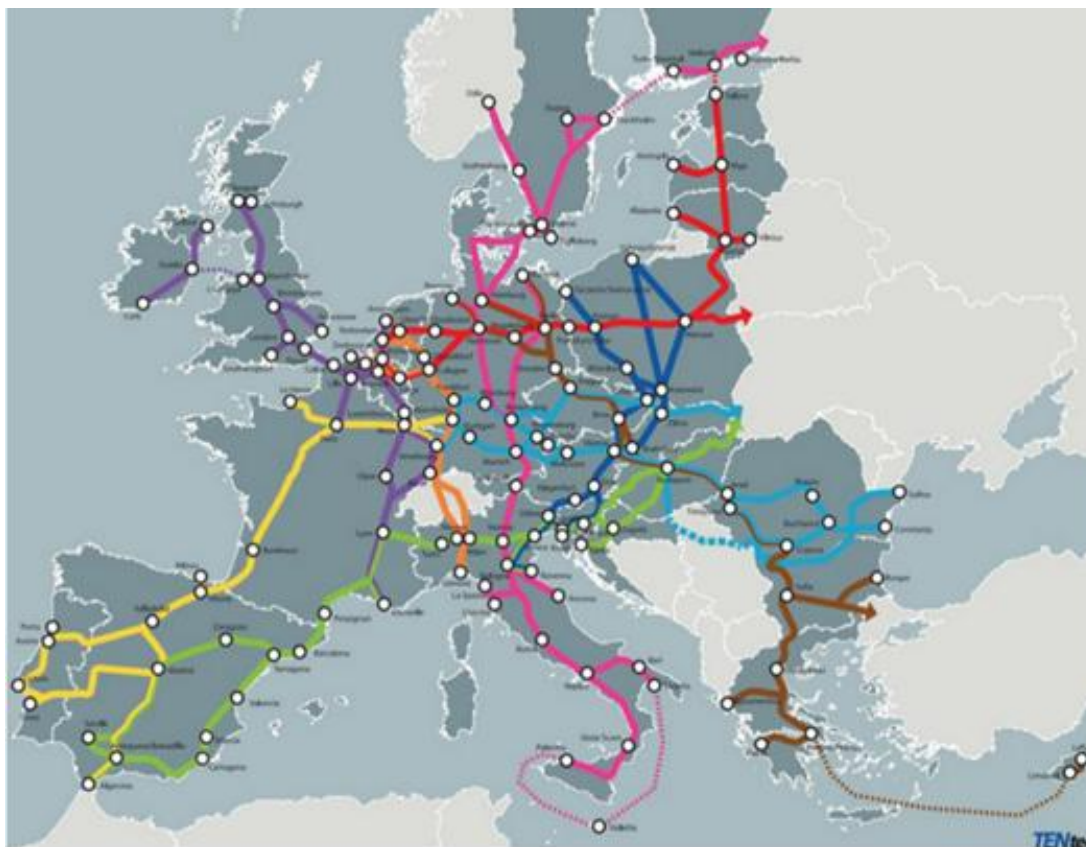


Рис. 2. Базова мережа транспортних коридорів TEN-T [14]

Цілями TEN-T є усунення прогалин, «вузьких місць» та технічних й організаційних бар'єрів між транспортними мережами країн-членів ЄС. До основних цілей TEN-T, які узгоджені із Цілями сталого розвитку, відносяться [14]:

- забезпечення мобільності осіб та вантажів;
- розвиток високоякісної інфраструктури;
- включення всіх видів транспорту;
- дозвіл на оптимальне використання існуючих потужностей;
- інтероперабельність всіх її компонентів;
- економічна життєздатність мережі;
- охоплення всієї території ЄС.

Специфічні цілі TEN-T, які оцінюються в контексті відповідності національних планів, включають: усунення «вузьких місць» та забез-

печення безшовної логістики (сполучень); ліквідація відсутніх зв'язків (Missing Links); доступність транспорту; можливість зміни виду транспорту (Modal Shift); транскордонні проекти; інтеграція з міськими вузлами; зв'язність периферійних та найвіддаленіших регіонів; телематичні застосунки (ERTMS – залізниця, RIS – внутрішні водні шляхи, VTMIS – морський транспорт, SESAR – авіація); зменшення часу подорожі та заторів; зв'язність із сусідніми/третіми країнами.

Оцінка національних планів та програм проводиться для перевірки їх узгодженості та відповідності імплементації TEN-T. Країни-члени повинні надавати ЄК резюме національних планів та програм, які вони розробляють з метою розвитку мережі. Для оцінки сумісності національних планів зі стандартами/підходом TEN-T визначено набір критеріїв та індикаторів. До них належать:

- обов'язковість (bindingness) наявності планів у вигляді договірних угод або закріплені у національному законодавстві;
- часовий горизонт повинен охоплювати період до 2030 року (відповідно до терміну, встановленого Регламентом);
- покриття мережі TEN-T повинно визнаватися та повністю охоплюватися планом;
- наявність проектів з розвитку мережі, їх терміни та кошториси витрат.

Національні плани повинні включати інформацію про те, як країна-член розвиває мережу TEN-T, дотримуючись своїх зобов'язань: поточні показники відповідності та кроки до повної реалізації основної та загальної мереж TEN-T; місцезнаходження проектів у мережі TEN-T, терміни їх реалізації, очікувані інвестиції (із зазначенням забезпеченої та відсутньої частини); виявлення відсутніх зв'язків та невідповідних ділянок без запланованих проектів.

Транспортна політика ЄС, що стосується TEN-T, регламентується низкою нормативно-правових актів, регуляторна дія яких спрямована на вирішення питань фінансового та організаційного регулювання [14].

Договір про функціонування Європейського Союзу (Маастрихтська угода, 1992 рік) – окреслив наміри про створення Транс'європейської транспортної мережі.

«Біла книга ЄС – транспорт 2050» (2011 рік) – довгостроковий стратегічний документ, що визначив пріоритети щодо територіального узгодження, економічного зростання, системи фінансування, ціноутворення та поєднання TEN-T зі світовими мережами.

Регламент ЄС № 1315/2013, яким встановлено керівні принципи для розвитку Транс'європейської транспортної мережі, включаючи її двошарову структуру (комплексна та базова мережі). Також прописує інфраструктурні вимоги до компонентів мереж.

Регламент ЄС № 1316/2013, що стосується механізму «З'єднання Європи» (CEF), Регламент ЄС № 1300/2013 про Фонд згуртування та Регламент ЄС № 1301/2013 про Європейський фонд регіонального розвитку, якими встановлено загальні правила надання фінансової допомоги ЄС для проєктів TEN-T.

Галузеві директиви, що встановлюють специфічні вимоги та стандарти для кожного виду транспорту (залізничного, автомобільного, морського, авіаційного) щодо сумісності, безпеки, управління та використання інтелектуальних систем.

Однак, на шляху розвитку TEN-T країни-учасниці стикаються з із загальними проблемами, серед яких можна виділити наступні: неоднорідність національних транспортних систем у різних країнах, висока вартість та тривалі терміни розбудови інфраструктури, а також відставання впровадження нових технологій. Розвиток сталих інтермодальних транспортних систем обумовлює зростання інтеграції різних видів транспорту в рамках концепції єдиного оператора змішаних перевезень, а також розвиток аутсорсингу типу 4PL і 5PL, вимагає забезпечення надійного та оперативного інформаційного обміну в сучасних логістичних системах [15].

Обмежене зростання інтермодальних перевезень в Європі вказує на загальну недостатню конкурентоспроможність інтермодальних транспортних послуг, що вимагає детальних оцінок і політичних заходів для підвищення продуктивності та ефективності.

У процесі оновлення індикативних мап TEN-T у 2024 році особливу увагу було приділено інтеграції нових залізничних коридорів до Польщі та Молдови. Вони відібрані як стратегічні для забезпечення зв'язку з ЄС через інфраструктуру європейського стандарту (1435 мм). Територію України оновленням передбачено розбудова маршрутів: Львів – Рава-Руська – Люблін; Одеса – Березино – Басарабська (Республіка Молдова); Житомир – Вінниця – Ямпіль (Республіка Молдова); Чоп – Ужгород – Самбір – Львів; Красноград – Полтава, Красноград – Харків, Красноград – Дніпро.

Тому, Україна повинна орієнтуватися на стандарти TEN-T, зокрема вимоги до інфраструктури, що висуваються країнам-членам ЄС та затверджені у Регламенті ЄС № 1315/2013. В контексті питання

розвитку інтермодальних контейнерних перевезень в Україні слід звернути увагу на вимоги щодо залізничної, дорожньо-транспортної та мультимодальної інфраструктури [16]. Залізничні коридори повинні відповідати вимогам щодо з'єднання вантажних терміналів з іншими видами транспорту, функціональна сумісність (відповідність Директивам ЄС № 2008/57 та № 2012/34), оснащення системою ERTMS (The European Railway Traffic Management System – Європейська система управління залізничним рухом), повна електрифікація базової мережі, характеристики вантажних колій (навантаження на вісь, швидкість, довжина поїздів 740 м), стандартна ширина колії 1435 мм для нових ліній.

Дорожньо-транспортна інфраструктура повинна відповідати наступним вимогам: висока якість доріг (автомагістралі/швидкісні/стандартні стратегічні), безпека (відповідність Директиві ЄС № 2008/96), мінімальні вимоги безпеки в тунелях (Директива ЄС № 2004/54), використання інтелектуальних транспортних систем (Директива ЄС № 2010/40). Для базової мережі зони відпочинку кожні повинні бути розташовані на відстані 100 км, обов'язково наявність інфраструктури для альтернативних видів палива.

Інфраструктура для мультимодальних перевезень: забезпечення наявності терміналів, портів, аеропортів для мультимодальних перевезень, оснащення для надання інформаційних послуг (включаючи дані в режимі реального часу, позиціонування, стеження), постійний пасажиропотік, наявність телематичних прикладних програм, обладнання для переміщення і зберігання вантажів у терміналах.

Перебудова логістичних ланцюгів в Україні та переорієнтація вантажопотоків з морського на інші види транспорту в умовах воєнного стану виявила гострі проблеми в існуючих ланцюгах поставок, пов'язані з технологічними обмеженнями, руйнуванням транспортної інфраструктури та низьким рівнем розвитку транспортно-логістичних технологій, інтермодальних та мультимодальних перевезень в Україні порівняно зі світовими тенденціями.

Слід виділити окремі заходи, запроваджені у 2023 році АТ «Укрзалізниця» і спрямовані на підвищення рівня обслуговування вантажовласників, зокрема підвищення обсягів інтермодальних перевезень дочірньою компанією «UZ Cargo Poland» між портами Польщі, Румунії та Україною, доставка контейнерів у складі збірних інтермодальних потягів між Україною та Польщею, розширення мережі вантажних переходів до 19 од. у відповідності до Програми роз-

витку прикордонних залізничних станцій на 2022–2025 роки; запровадження європейського стандарту колії (1435 мм) на українських залізницях [17]. Обслуговування контейнерів здійснює Транспортний сервісний центр «Ліски».

Іншим прикладом можна навести перехід транспортних компанії на «зелену» логістику. Так, логістичний провайдер DSV з 2021 року запровадив комплекс рішень, спрямованих на розвиток контрейлерних перевезень вантажів, що дозволяє мінімізувати час перетину кордону наземними пунктами пропуску та зменшити вуглецевий слід логістичного ланцюга [18].

Слід зазначити, що наведені приклади рішень мають наслідковий характер та були запроваджені у відповідь на недосконалість дозвільної системи (до 2022 року) та в зв'язку з блокуванням кордонів перевізниками сусідніх європейських держав (у 2023 році).

Ключовою інфраструктурною ланкою для забезпечення ефективного перевезення контейнерів різними видами транспорту є інтермодальні термінали. Найбільш розвинуту мережу контейнерних терміналів має Філія Транспортний сервісний центр «Ліски», що є структурним підрозділом АТ «Укрзалізниця», 6 терміналів в містах: Київ, Одеса, Дніпро, Харків, поблизу Львова та Чоп. Окрім зазначених терміналів, в Україні діють і декілька інших терміналів. Слід зазначити, що переважна частина прикордонних терміналів потребує модернізації, табл. 1.

Таблиця 1

Характеристика інтермодальних терміналів в Україні

Назва терміналу	Місце розташування	Види транспорту	Пропускна спроможність (TEU/рік)	Стан інфраструктури	Потенціал розвитку / Примітки
Ліски	Київ	Залізничний, автомобільний	150 000	Частково застаріле	Центр внутрішнього мультимодального сполучення
Контейнерний Термінал Одеса	Одеса	Морський, залізничний	300 000	Сучасне	Частина проекту «Вікінг», міжнародні ланцюги
ТІС	Південний (порт)	Морський, залізничний	400 000	Автоматизований	Великий приватний інвестор, цифрова логістика

Назва терміналу	Місце розташування	Види транспорту	Пропускна спроможність (TEU/рік)	Стан інфраструктури	Потенціал розвитку / Примітки
Мостиська (Західний хаб)	Львівська обл.	Залізничний, автомобільний	50 000	Потребує модернізації	Шлях до Польщі, важливий для TEN-T
Ягодин	Волинська обл.	Залізничний, автомобільний	30 000	Обмежена інфраструктура	Інтермодальний перетин з Польщею
Чоп (Ужгород)	Закарпатська обл.	Залізничний, автомобільний	35 000	Перевантаження	Важливий прикордонний хаб. Стратегічний доступ до Словаччини
Ізов	Волинська обл.	Залізничний	20 000	Вузька спеціалізація	Унікальна перехідна станція для зміни візків
Батево	Закарпатська обл.	Залізничний	15 000	Низький рівень оснащення	Має потенціал для розширення, прикордонний напрямок

До загальних проблем, властивих інтермодальним терміналам в Україні, можна віднести відсутність достатньої кількості автоматизованого обладнання, обмеження за рівнем потужності, нерівномірний розподіл об'єктів термінальної мережі за місцем дислокації, висока вартість переробки вантажів, що знижує впливає на конкурентоспроможність порівняно з країнами ЄС.

Однак, не зважаючи на існуючі обмеження та недоліки транспортної системи, АТ «Укрзалізниця» відзвітувала у 2024 році про зростання обсягів перевезень вантажів в контейнерах до максимального рівня за останні 7 років. В порівнянні з аналогічним періодом січень-травень 2023 року обсяг перевезень збільшився на 60 % до 116 129 TEU [19]. Розподіл обсягів перевезень вантажів у контейнерах за напрямками у 2024 році наведено на рис. 3.

Основними товарами, що перевезено у контейнерах є сільськогосподарська продукція (39 %) та чорні метали (15 %). Статистичні дані свідчать про те, що Україна зберігає своє положення топ-експортера зазначених видів експортної продукції на світовому рин-

ку, що обумовлює необхідність забезпечення стійкості, надійності та сталості логістичних ланцюгів постачань продукції.

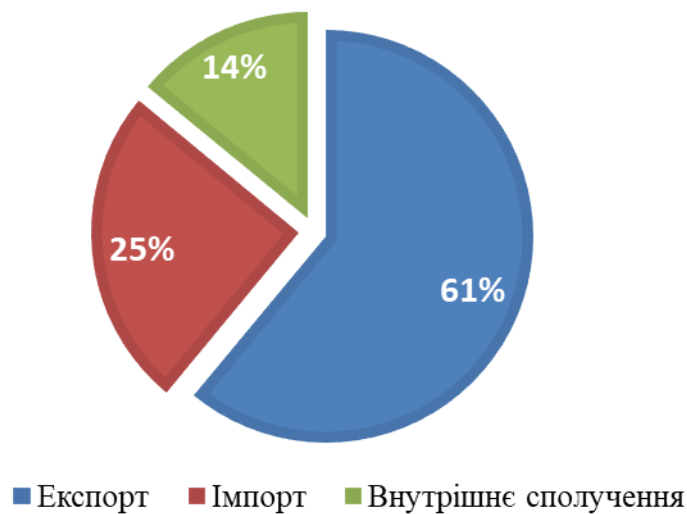


Рис. 3. Розподіл обсягів перевезень вантажів у контейнерах у 2024 році

З огляду транспортної політики розбудови та розвитку мережі TEN-T для реалізації транзитного потенціалу України в повоєнний період та інтеграції її логістичних шляхів до Транс'європейської мережі, необхідно розробляти системні комплексні рішення за стратегічними напрямками розвитку транспортної системи, зокрема комбінованих перевезень, шляхом:

- формування нормативно-правової бази в сфері організації комбінованих перевезень, заснованої на засадах європейської транспортної політики та досвіду;

- технологічної модернізації транспортного комплексу, включаючи оновлення парку контейнерних платформ та адаптацію інфраструктури;

- підтримки проєктів діджиталізації вантажних перевезень, спрямованих на використання сучасних інформаційних технологій (ІТ, супутниковий зв'язок, IoT, блокчейн) для створення ефективної системи комунікацій, підвищення автоматизації та прозорості відстеження вантажів у логістичних ланцюгах, переходу на безпаперові технології супроводу вантажних перевезень, зокрема процедури митного та прикордонного контролю з країнами ЄС;

- формування програм у сфері технологічних новацій, оновлення рухомого складу та інфраструктурного розвитку, включаючи будів-

ництво та модернізацію транзитних терміналів та інформаційно-комунікаційної інфраструктури;

– використання адаптивної тарифної політики та запровадження гнучких форм ціноутворення зі спеціальними тарифами та системою знижок для контрейлерних перевезень, що сприятиме підвищенню їх конкурентоспроможності порівняно з автомобільним транспортом;

– забезпечення відповідності проектів розвитку транспортного сектора України екологічним показникам та вимогам ЄС для залучення міжнародних інвестицій.

3.3. Теоретичні основи організації інтермодальних контейнерних перевезень в ланцюгах постачань

Процес доставки вантажів в контейнерах в межах міжнародних транспортних коридорів (МТК) в рамках TEN-T потребує постійного моніторингу в режимі реального часу, аналізу та передбачення потужностей логістичних потоків, координації та узгодження дій учасників. Для розвитку емерджентних якостей ланцюга постачань в межах МТК треба здійснювати координацію дій та зусиль всіх учасників та розподіл між ними витрат, зиску та ризиків. Одним з перспективних напрямків досліджень є формування технології доставки контейнерних вантажів в ланцюгах поставок із використанням логістичних принципів шляхом побудови раціональних маршрутів через МТК.

Система доставки вантажів у контейнерах має переваги в порівнянні з іншими системами, а саме:

– дозволяє перевозити консолідовані партії вантажів в одному відправленні;

– забезпечує ефективне та швидке виконання перевантажених операцій;

– спрощені вимоги до упаковки;

– забезпечення схоронності вантажів;

– забезпечення прозорих та спрощених процедур оформлення документів;

– дозволяє зменшити вартість перевезень;

– забезпечення дотримання термінів доставки, обумовлених в договорі.

Питанню розробки транспортно-технологічних систем доставки (ТТСД) та підвищенню ефективності процесу доставки вантажів у контейнерах у міжнародному сполученні присвячено багато уваги в

наукових працях таких вчених, як Є.В. Нагорний, Н.Ю. Шраменко, Д.В. Ломотько, С.У. Піньковецький, Г.С. Прокудін, Н.Т. Кунда, С.У. Ушаков, Ю.В. Пилипенко, К.І. Плужніков, Д. Ерліх, В.І. Шишков, О.О. Орда, Г.О. Примаченко та інших науковців.

Інтенсивне курсування великовантажних контейнерних поїздів між портовими і внутрішніми залізничними терміналами з швидкою, гнучкою і автоматичною перевалкою, маневруванням і зчепленням контейнерних вагонів має вирішальне значення для підвищення конкурентоспроможності інтермодальних контейнерних перевезень залізничним транспортом. Зосередженість ЄС на ефективній транс'європейській транспортній мережі і поточний перегляд керівних принципів TEN-T висвітлюють виклики і можливості, пов'язані з плануванням і реалізацією декількох проектів, пов'язаних з використанням Інтелектуальних Транспортних Систем (ІТС), для підвищення ефективності вантажних і логістичних потоків в Європі [20].

Процес перевезень вантажів в контейнерах складається з великої кількості технологічних операцій та потребує застосування логістичних принципів управління потоками на кожному окремому етапі. Перевагами інтелектуалізації інтермодальних перевезень є можливість оптимізації маршрутів, транспортно-технологічних схем доставки (ТТСД) з одночасним зменшенням витрат енергетичних ресурсів, а також підвищення точності прогнозування з урахуванням стохастичних умов перевезень. За таким підходом взаємодія між різними видами транспорту стає безперервною, більш надійною завдяки постійному зв'язку з системами різних учасників процесу доставки [21]. Розробка та впровадження інтелектуальних транспортних систем з впровадженням інтегрованих транспортних технологій, заснованих на принципах ко-модальності, зазначені як ключові напрямки трансформації європейської транспортної системи [22]. Ко-модальність вимагає підвищення ефективності, сумісності та взаємозв'язку різних видів транспорту, а також станцій і транспортних вузлів, що з'єднують їх між собою. При цьому всі види транспорту розглядаються як взаємодоповнюючі підсистеми, поєднання яких може забезпечити користувачам і суспільству максимальні економічні, екологічні та соціальні вигоди [23]. Принцип ко-модальності набуває актуальності в контексті посилення співпраці між різними видами транспорту, особливо для України в сучасних умовах, коли основні вантажопотоки автомобільного та залізничного транспорту спрямовуються до західних міжнародних залізничних переходів до ЄС.

Прийняття рішень щодо вибору технології доставки ускладнюється існуючими проблемами взаємодії між гравцями транспортного ринку через постійні зміни на самому ринку та наявність великої кількості взаємозв'язків між учасниками процесу доставки вантажів [24]. Тому розробляються нові підходи до формування маршрутів. Більшість підходів базуються на принципах інтегрованої логістики [20, 23-27] і спрямовані на вирішення завдань підвищення ефективності процесу доставки в окремих логістичних ланцюгах як підсистемах логістичної системи. Запропоновані авторами робіт [25, 28-29] аналітичні моделі підвищення ефективності процесу доставки шляхом формування раціональної технології та структури ланцюга поставок не враховують комплексний вплив випадкових факторів процесу.

Автор [30] пропонує двоетапну стохастичну модель стійкої мультимодальної системи, яка дозволяє врахувати невизначеності поставок вантажовідправників та невизначеності в роботі інтермодальних терміналів, не беручи до уваги ризику під час транспортування вантажів. Розроблений в роботі [27] підхід на основі генетичних алгоритмів для оптимізації стійкої мультимодальної вантажно-логістичної системи з точки зору часу, відстані та викидів CO₂ дозволяє розробляти стратегії організації перевезень контейнерних вантажів залізничним та річковим транспортом для зменшення домінування автомобільного транспорту.

Моделі, розроблені на основі мереж Петрі в [20, 24, 26], мають переваги, пов'язані з простотою використання та наочністю, порівняно з описаними вище підходами. Крім того, ці моделі дозволяють враховувати імовірнісні фактори, досліджувати поведінку системи та її окремих елементів, отримувати їх характеристики. Однак, в якості критерію ефективності доставки вантажів автори [24, 26] пропонують розглядати лише часові параметри технологічного процесу без вартісної оцінки, яка впливає на кінцеву споживчу цінність експортної продукції на ринку.

Вибір ефективної схеми доставки повинен ґрунтуватися на визначенні транспортних ризиків, що виникають під час транспортного процесу внаслідок прийняття невірних управлінських рішень. Для оцінки величини (вартості) ризику при виборі ефективної схеми доставки інтермодальних перевезень контейнерних вантажів можуть бути використані моделі різного типу: логічні, емпіричні, імовірнісно-статистичні, теоретико-імовірнісні, інтегральні тощо. При цьому, іс-

нує класифікація факторів ризику: керовані, які можна передбачити та мінімізувати або усунути на етапі якісної оцінки; частково керовані та некеровані (невизначені та випадкові).

При оцінці невизначених факторів можна тільки встановити відповідність можливих наслідків певному діапазону кількісних значень, тобто їх стохастичні характеристики: закони розподілу, математичні очікування та дисперсії. Фактори втрати вантажу та неподачі його замовнику в умовах військового стану на території України можна віднести до невизначеного, тому оцінити його кількісно вкрай складно. З цією метою передбачено застосування методів пошуку оптимальної стратегії поведінки в умовах ризику: математичний апарат теорії ігор та імітаційне моделювання тощо.

Наразі, найбільш широко використовується операторами при прийнятті рішень щодо вибору схеми доставки з урахуванням ризиків концепція прийнятності ризику, що полягає у мінімізації ризику до компромісного рівня. При цьому, необхідно визначити такий компромісний рівень, при якому можливе досягнення балансу між очікуваними вигодами і небезпеками (загрозою) допустимих втрат.

Слід виділити складові елементи системи ризиків, які виникають при доставці вантажів в контейнерах в/з України в умовах військового стану:

– ризик втрати або псування вантажів, транспортного обладнання під час доставки через ведення бойових дій на території України. З метою мінімізації рівня ризиків втрати транспортного обладнання власники контейнерів (судноплавні лінії) істотно обмежують ввезення контейнерів на територію України, введено додатковий депозит;

– комерційний ризик у вигляді зриву або неподачі вантажів, недотримання термінів постачання, додаткових витрат, пов'язаних з доставкою за нераціональною схемою, з тривалими непродуктивними простоями у «вузьких місцях» ланцюга постачання тощо;

– екологічний ризик, що виражається у розмірі негативного впливу на навколишнє середовище при організації доставки вантажів у контейнерах на територію України з іноземних портів, виключно, автомобільним транспортом.

Головними функціями оператора міжнародної доставки вантажів є аналіз, визначення та мінімізації можливих втрат, пов'язаних з виконанням ризикованих операцій. Цього можливо досягнути за умови вірного визначення стратегії і тактики оператором на етапі розробки схеми доставки, зокрема кожного окремого елемента системи.

Для мінімізації ризиків під час доставки застосовують наступні керуючі дії [31]:

- аналіз правил управління запасами шляхом визначення доцільності зміни циклів замовлень, оптимального розміру партії вантажів тощо;

- порівняння альтернативних схем доставки за обґрунтованим критерієм ефективності;

- розосередження запасів по складах різної локації, відповідно до потенційних ризиків зберігання, обсягів споживання, терміну доставки;

- використання гнучких систем управління перевезеннями за рахунок оперативного комплексного моделювання альтернативних сценаріїв функціонування схеми доставки, тощо.

Результати проведеного аналізу теоретичних досліджень підтверджує необхідність вирішення існуючих проблем, що виникають в процесі доставки вантажів у контейнерах в експортно-імпортному напрямках з України в умовах військового стану, за рахунок розробки ефективної схеми доставки в умовах ризику. Тому необхідною задачею постає розробити методологічний підхід формування стратегій організації інтермодальних контейнерних перевезень з метою забезпечення високого рівня якості обслуговування вантажовласників та досягнення прийняттого рівня ризику, що дозволить підвищити конкурентоздатність вітчизняних операторів та транспортних компаній на міжнародному ринку транспортних послуг.

Практичний досвід доставки контейнерних вантажів в ланцюгах постачань свідчить про те, що інтермодальні перевезення найчастіше здійснюються за участю 2-3 видів транспорту, поєднуючи їхні переваги. Формування альтернативних варіантів формуються з множини комбінацій різних видів транспорту, виходячи з потреб клієнта щодо умов перевезень, можливостей інфраструктури, обсягу партій відправки, особливостей розвитку транспорту різних країн [24].

На етапі формування альтернативних схем доставки вантажів в контейнерах слід розрізняти: транспорт, який застосовується для підвозу вантажів до терміналу відправлення або вивозу вантажу з терміналу призначення – автомобільний транспорт; магістральний транспорт (МТ-1 / МТ-2). Схематично процес інтермодальних перевезень вантажів у контейнерах наведено на рис. 4.

Вибір оптимального варіанту доставки з комбінації альтернативних технологій повинен здійснюватися на підставі інструменту підт-

римки прийняття управлінського рішення, що дозволяє провести оцінку з урахуванням факторів невизначеності та ризиків.

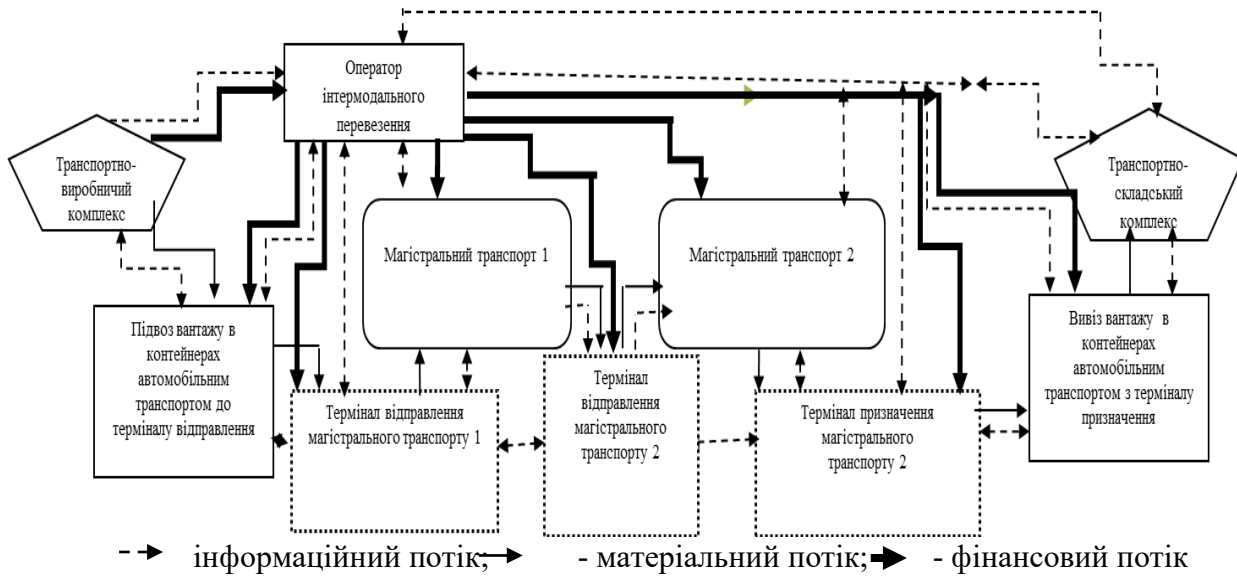


Рис. 4. Структурна схема процесу інтермодальних перевезень вантажів у контейнерах

Для кожної системи з множини альтернативних схем доставки вантажів у контейнерах технологічний процес являє собою сукупність технологічних операцій відповідної тривалості (4), необхідних для доставки. Однак, мінімізація часу не є вимогою вантажовласника при замовленні, тому при виборі оптимальної схеми доставки необхідно враховувати рівень питомих витрат (2), відповідний до вимог замовника. При порівнянні альтернативних варіантів не менш важливим критерієм є ступінь прийнятного ризику. Саме цей показник дозволить охарактеризувати рівень обслуговування замовника, який забезпечується безперебійним функціонування ланцюга постачань в умовах військового стану в Україні.

З порівнюваних альтернативних схем доставки вантажів у контейнерах оптимальною вважається та, що дає оптимальний рівень питомих витрат на доставку при дотриманні умови «Точно в термін» при забезпеченні відповідного вимогам вантажовласника рівня обслуговування [24]

$$TSD_{opt} = optf(B_{заг}[S_{TSDr}], T_{дост}[S_{TSDr}], R_{ТВІКП}[S_{TSD}]), \quad (1)$$

де TSD_r — множина r -альтернативних структур транспортно-технологічних схем інтермодальної доставки вантажів у контейнерах, $r = \overline{1, N}$.

Обраний критерій ефективності дозволяє комплексно враховувати інтереси всіх учасників доставки при формуванні ефективної схеми доставки вантажів у контейнерах з урахуванням різних видів ризиків на умовах узгодження параметрів процесу доставки взаємодії учасників на принципах кооперації.

Формалізація процесу взаємодії учасників доставки з позицій інтеграційного підходу дозволяє комплексно вирішити задачу вибору раціональних стратегій організації інтермодальних перевезень з урахуванням інтересів усіх учасників доставки.

В якості критерію вибору раціональних стратегій розглядаються оптимальні питомі витрати на доставку (2). Пропонується питомі витрати за кожним з альтернативних варіантом схеми доставки вантажів визначати за кожною складовою наступним чином.

$$B_{\text{заг}}(t) = f(Q, I_3, N_j, T_d, R_y) \rightarrow \min, \quad (2)$$

де $B_{\text{заг}}$ – загальні питомі витрати на доставку вантажів, ум.од./конт.;

Q – обсяг партії вантажу, т;

I_3 – інтервал надходження замовлень на доставку вантажів, од./год;

N_j – переробна потужність елементів системи, т/год;

T_d – час доставки партії вантажу, діб;

R_y – розмір очікуваного збитку y -го виду.

Визначена функція має систему обмежень

$$\left\{ \begin{array}{l} 15 \leq Q \leq 70, \text{ т;} \\ 90 \leq L_{ij}^{Y_{kp}} \leq 1000, \text{ км;} \\ q_n^k = 22,0, \text{ т;} \\ n > 0, \text{ конт.;} \\ \frac{n}{g_T} \leq T_p^T, \text{ год.;} \\ N_s^{\text{заг}} \leq W_{MT_s}, \text{ конт.;} \\ n \leq N^T, \text{ конт.;} \\ 0 < R_y < 1 \end{array} \right. \quad (3)$$

де q_n^k – вантажність контейнеру, т;

T_p^T – час роботи терміналу магістрального транспорту, год;

W_{MT_s} – контейнеромісткість магістрального транспорту, контейнерів;

N_s^{zar} – загальна кількість контейнерів, що прибуває на s -ий термінал, контейнерів;

n – кількість контейнерів в партії відправлення, контейнерів.

Слід зазначити, що доставка вантажів у контейнерах здійснюється за умовою «точно в термін»

$$T_d = \sum_{j=1}^n t_{ij} \leq T_{угод}, \quad (4)$$

де T_d – час доставки вантажів, год;

t_{ij} – виконання послідовних i -их технологічних операцій в j -му модулі системи, год;

$T_{угод}$ – термін доставки вантажів згідно з угодою з вантажовласником, год.

При визначенні ефективності функціонування кожного модуля та системи, в цілому, необхідно враховувати нерівномірність роботи, яка виникає у пунктах їх «стикування», внаслідок чого виникають простої рухомого складу, перевантажувальних комплексів; затримки та утворення черг в очікуванні обслуговування.

Основними елементами пунктів «стикування» діяльності учасників доставки являються склади, термінали, залізничні колії, причали, пороми, навантажувально-розвантажувальні механізми та інші пристрої, оснащення яких визначає ефективну та безперебійну роботу системи інтермодальних перевезень.

Ефективність взаємодії характеризується сукупністю технологічних параметрів таких, як: часові параметри тривалості окремих технологічних операцій; інтервал надходження замовлень на поставку вантажів у контейнерах (I), розмір партії контейнерів, що підлягає переробці (n); пропускні спроможності елементів системи: ТВК, ТСК ВО та терміналів ($\omega_{ТВК}, \omega_{скл}, \omega_T$), переробні спроможності вантажних фронтів на ТВК/ТСК та терміналах ($g_{скл}, g_T$); інтенсивність (I_z, I_g) та нерівномірність ($\eta_{нер}$) вибуття та надходження контейнерів від та до, відповідно, окремих модулів системи просування матеріалопотоку в ЛП; множина інтервалів подачі рухомого складу для пе-

ревеження партії вантажів ($\{I_{nod}\}$); термін доставки партії вантажів у контейнерах ($T_{досм}$); тарифні ставки (T_m) та вартісні показники виконання технологічних операцій (C_{ij}) тощо.

Особливості виконання технологічних процесів встановлюють певні обмеження на послідовність виконання взаємопов'язаних операцій та визначаються задачею синхронізації. У кожному конкретному випадку синхронізація задається за допомогою синхронізуючих правил, які встановлюються системою між технологічними процесами і визначають порядок їх виконання з метою забезпечення належної взаємодії. Можна стверджувати, що технологічні процеси переробки вантажів у контейнерах в пунктах «стикування» та в кожному модулі системи ІПК мають універсальний набір операцій, які характеризуються часом на їх виконання.

Безперебійність функціонування системи інтермодальних контейнерних перевезень забезпечується мінімальним часом затримання матеріального потоку в кожному модулі системи та часом пересування, взагалі, системою у відповідності до терміну доставки, встановленого угодою з замовником. Задача синхронізації параметрів технологічних процесів в пунктах стикування полягає у забезпеченні мінімального значення часу t_i знаходження потоку вантажів у контейнерах в модулі F_m (рис. 5 - на прикладі модулю Транспортно-виробничого комплексу (ТВК) [24]).

$$t_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m t_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m t_{затрпij} \rightarrow \min, \quad (5)$$

Де $t_{затрпij}$ – час простою рухомого складу при виконанні послідовних i -х технологічних операцій в j -му модулі або пункті «стикування», який виникає внаслідок ряду причин: відсутності вільних навантажувально-розвантажувальних механізмів, невідповідності пропускної спроможності елементів системи інтенсивності заведення або вивезення партії вантажу тощо, год; $i = \overline{1, N}$; $j = \overline{1, M}$.

При цьому, слід враховувати наявність та, відповідно, тривалість понаднормативних простоїв рухомого складу, внаслідок негативного впливу ймовірнісних факторів, які виникають при взаємодії.

$$\sum_{j=1}^m t_{затрпij} = f(\mathcal{G}) \rightarrow \min, \quad (6)$$

де ϑ – сукупність параметрів системи доставки, які є характеристикою технічних та технологічних факторів процесу обробки потоку вантажів у контейнерах в окремому модулі системи або пунктах їх «стикування».

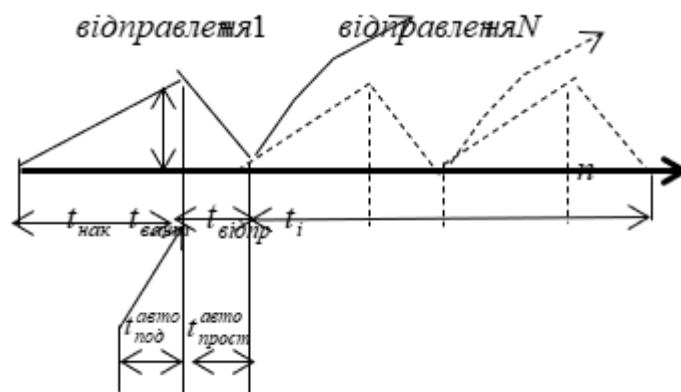


Рис. 5. Схема переробки потоку вантажів у контейнерах у модулі ТВК [24]

Слід зазначити, що особливістю пунктів «стикування» модулів системи є виконання окремих властивих їм процесів з оптимальним значенням критерію ефективності за рахунок управління вхідними параметрами системи. До показників, які підлягають оптимізації, належать: кількість задіяних при виконанні i -ї технологічної операції ресурсів та параметри потоку замовлень від вантажовласників.

Задача управління ризиками функціонування системи інтермодальних перевезень контейнерних вантажів полягає не стільки в мінімізації ризиків, скільки в максимальному збереженні вантажу і у визначенні рівня прийняттого ризику як для забезпечення схоронності вантажів, так і для замовника у вигляді додаткових витрат (гранично допустимого рівня небезпеки).

На першому етапі за методом експертних оцінок виявляють ризики, що найчастіше виникають. На другому етапі необхідно оцінити ймовірність виникнення ризиків. На третьому – оцінити можливі збитки шляхом декомпозиції їх по окремих модулях системи інтермодальних перевезень вантажів у контейнерах.

Для визначення можливого збитку від визначених видів ризиків кожний експерт оцінює ймовірність та ступінь збитку за рівнем «низький» (low), «середній» (middle) або «високий» (high). Підсумкова оцінка ступеню збитку визначається

$$R_y = \frac{0,1 \cdot l + 0,5 \cdot m + 0,9 \cdot h}{N}, \quad (7)$$

де l, m, h – кількість експертів, що надали оцінку ступеню збитку від кожного виду ризику по відповідних рівнях, «низький», «середній» або «високий»;

N – загальна кількість експертів.

Математичне сподівання збитку по кожному виду ризику визначається

$$r_y = p_a \cdot \Delta B_a, \quad (8)$$

де p_a – ймовірність настання a -ї події;

ΔB_a – величина збитку при настанні a -ї події.

За допомогою методів множення і складання ймовірності необхідно визначити ймовірність настання a -ї події унаслідок виникнення ризиків [32]. Так, подія a настає внаслідок n ризиків сильного впливу

$$p_a = p_1 + p_2 + \dots + p_n = r_{y11} \cdot r_{y12} \cdot r_{y13} + r_{y21} \cdot r_{y22} \cdot r_{y23} + \dots + r_{yn1} \cdot r_{yn2} \cdot r_{yn3}, \quad (9)$$

де p_1, \dots, p_n – ймовірності настання подій в результаті виникнення n ризиків.

Ймовірність настання a -ї події внаслідок виникнення ризиків визначається таким чином по кожному елементу системи окремо.

Величина сукупного ризику (10) в системі доставки визначається шляхом складання ймовірностей двох або більше неспільних подій в кожному елементі системи – відповідно, на терміналах, магістральному транспорті, в оператора міжнародної доставки, на кордонах:

$$p_{\Sigma a} = p_{T_s} + p_{MT} + p_{OMD} + p_{KPP}. \quad (10)$$

Оцінку найбільш ймовірної суми збитків по альтернативних схемах доставки вантажів у контейнерах передбачено проводити як визначення арифметичного середнього між мінімальним (W_{\min}) та максимальним (W_{\max}) значенням суми збитків по кожній схемі доставки

$$W_{\text{оч}} = \frac{W_{\min} + W_{\max}}{2}. \quad (11)$$

При цьому, ціна ризику настання небажаної a -ї події, при якій доставка вантажу у контейнерах унеможлиблюється, складатиме

$$R_{y_y} = p_{\Sigma a} \cdot W_{\text{оч}}, \quad (12)$$

де $p_{\Sigma a}$ – величина сукупного ризику в системі доставки;

$W_{оч}$ – найбільш вірогідна сума збитків.

Слід зазначити, якщо при настанні a -ої події загрози для людських життів немає, а очікуваний прибуток вище вказаної ціни ризику, то цей ризик вважається прийнятним. Величина очікуваного прибутку вантажовласника зазначається у відсотках від вартості партії вантажу. Приклад результатів проведеного ранжування ризиків на підставі результатів опитування експертів наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Результати ранжування ризиків

№ рангу	Магістральний транспорт	Термінал	Доставка автомобільним транспортом на ділянці території України
1	Недотримання вимог щодо умов перевезення	Псування вантажу та контейнерів	Знищення вантажу внаслідок бойових дій
2	Псування контейнерів та втрата вантажу	Відмова технічних засобів	Недотримання вимог щодо умов перевезення
3	Відмова технічних засобів	Недостатня пропускна здатність	Складні дорожні умови
4	Складні погодні умови (для морського транспорту)	Недотримання графіків виконання технологічних операцій	Аварійна ситуація
5	Крадіжка вантажу	Крадіжка вантажу	Незадовільний технічний стан транспортного засобу

Для оцінювання очікуваних (можливих) збитків визначаються величини математичного очікування можливих збитків по кожному виду ризиків, приклад в табл. 3.

Ступінь прийнятного ризику (оптимальна ціна ризику) встановлюється, виходячи зі значень очікуваного прибутку вантажовласника при реалізації товарів, що доставляються, та на підставі ціни ризику, що враховує вартість партії вантажу та питомих витрат на доставку за альтернативними схемами.

Процес інтермодальних контейнерних перевезень передбачає вплив, як внутрішніх системних змінних, так й вплив зовнішніх факторів.

Таблиця 3

**Математичні сподівання можливих збитків по кожному
виду ризиків**

Вид ризику	Значення математичного очікування можливих збитків
Магістральний транспорт	
Недотримання вимог щодо умов перевезення	0,008
Псування контейнерів та втрата вантажу	0,015
Відмова технічних засобів	0,009
Складні погодні умови (для морського транспорту)	0,007
Крадіжка вантажу	0,004
Термінал	
Псування вантажу та контейнерів	0,013
Відмова технічних засобів	0,008
Недостатня пропускна здатність	0,02
Недотримання графіків виконання технологічних операцій	0,005
Крадіжка вантажу	0,008
Доставка автомобільним транспортом на ділянці території України	
Знищення вантажу внаслідок бойових дій	0,05
Недотримання вимог щодо умов перевезення	0,013
Складні дорожні умови	0,011
Аварійна ситуація	0,014
Незадовільний технічний стан транспортного засобу	0,013

В загальному вигляді складна багатокомпонентна модель призначена імітувати динаміку декількох змінних (Y), які залежать одна від одної, та факторів зовнішнього середовища

$$Y = f(A, \varphi, X, T), \quad (13)$$

де $\varphi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m\}$ – множина залежних m -змінних; $\varphi = \{Z_{\text{заг}}, T_{\text{д}}\}$;

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_p\}$ – множина незалежних p -змінних,

$X = \{K_i^{\text{ТВК}}, N_{\text{роб}}^{\text{ТВК}}, K_m^{\text{Тс}}, N_{\text{роб}}^{\text{Тс}}, Q_i, I\}$;

$A = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$ – множина k -параметрів моделі;

$i = \{1, 2, \dots, T\}$ – лічильник часу.

Множина параметрів моделі

$$A = \{C_j, \Pi_{\text{вант}}, \omega_{\text{ТВК}}, g_T, q^k, t_{\text{оч}_z}, I_s, N_s, W_i^{\text{ТВК}}, W_m^{\text{Т}_s}\}. \quad (14)$$

Налагодження складної моделі системи інтермодальних перевезень вантажів у контейнерах здійснюється у 2 етапи:

- налагодження окремих модулів;
- налагодження загальної моделі в цілому.

Мета другого етапу полягає в тому, щоб усі наявні модулі були «замкнуті» один на одному, коли вихідні параметри окремого модулю на кожному часовому кроці стають вхідними параметрами для іншого наступного модулю. На кожному кроці ітерації окремий модуль використовує в якості аргументів значення, розраховані іншим модулем, які відрізняються від значень попередніх ітерацій. В свою чергу, ці нові розрахункові значення параметрів передаються далі по ланцюгу наступним модулям.

Таким чином, кожний окремий модуль може здійснювати вплив на всі модулі, при цьому, параметри налагоджуються за усім масивом змінних. Необхідно враховувати, що якщо зміна параметрів одного окремого модулю може без вагомого збитку для свого модуля покращити результати іншого, то ці параметри зміняться. Обмеженням до моделі є вимоги вантажовласника щодо загального часу (умова доставки «точно в термін») та витрат на доставку вантажів у контейнерах.

Моделювання процесу інтермодальних перевезень з метою формування раціональних стратегій доцільно здійснювати за наведеним на рис. 6 алгоритмом. Перший блок (етап) визначає етапи моделювання динаміки перевезення вантажів у контейнерах в модулях системи, тривалість знаходження контейнерів в кожному модулі, часу очікування виконання послідовних технологічних операцій в модулях або пунктах «стикування».

Вхідними даними для визначення інтенсивностей потоку вантажів у контейнерах в кожному з модулів системи є:

- кількість наявних ресурсів, що задіяні в обслуговуванні потоку вантажів у контейнерах в модулях ТВК та терміналах відправлення і призначення – відповідно, $K_i^{\text{ТВК}}$, $K_m^{\text{Т}_s}$, од.; $N_{\text{роб}}^{\text{ТВК}}$, $N_{\text{роб}}^{\text{Т}_s}$, осіб;

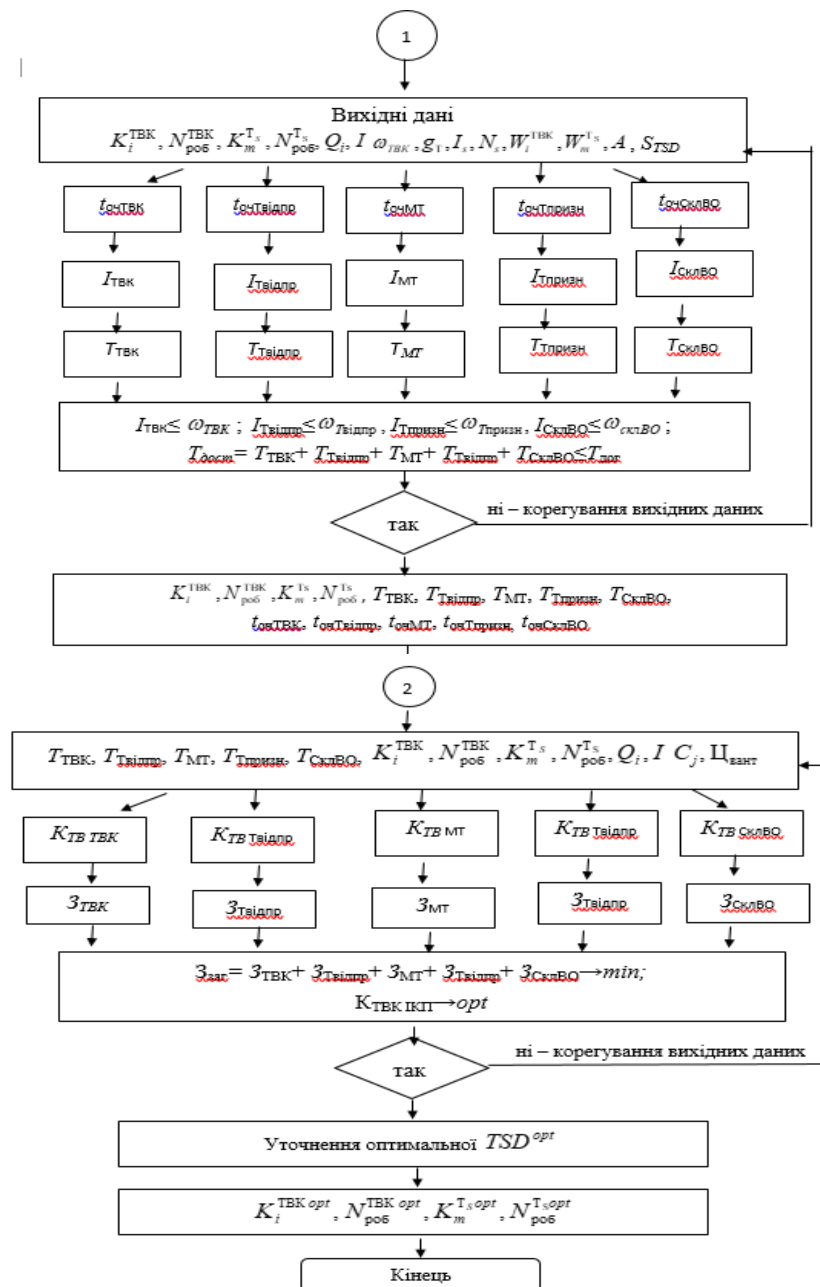


Рис. 6. Алгоритм моделювання процесу організації інтермодальних контейнерних перевезень

– параметри потоку замовлень: обсяг вантажу, Q_i , т; інтервал надходження замовлень, I , год;

– величини переробних спроможностей ТВК та терміналів відправлення/призначення – відповідно, ω_{TBK} , т/добу; g_t , контейнерів/добу.

– величини продуктивностей навантажувальних механізмів, відповідно, на ТВК та терміналах відправлення/призначення – W_i^{TBK} , т/год; W_m^{Ts} , контейнерів/год;

– кількість автомобілів, які використовуються для підвозу і вивозу контейнерів з та до терміналів призначення і відправлення, A , од.

– параметри вхідного зовнішнього матеріального потоку на Терміналах відправлення/призначення: інтенсивність надходження контейнерів до s -го терміналу магістрального транспорту, I_s , контейнерів/добу; розмір партії вантажів у контейнерах на s -му терміналі, що накопичується для перевезення магістральним транспортом, N_s , контейнерів;

– множина альтернативних ТТСД вантажів у контейнерах, S_{TSD} .

Досліджувати поведінку системи, що моделюється, та отримати інформацію про найбільш важливі її характеристики дозволяють властивості мереж Петрі з використанням формальних методів. Тому перший блок моделі за допомогою мережі Петрі на базі програмного продукту TNET (рис. 7), що передбачає послідовне або паралельне функціонування модулів системи [24]. При проектуванні моделі системи доставки, повинні враховуватися функціональні зв'язки між окремими модулями.

Отримані часові параметри процесу та кількість ресурсів при певних параметрах потоку замовлень в першому блоці, за умови дотримання встановленого терміну доставки вантажів у контейнерах, являються вхідними даними для другого блоку моделі, де передбачається оптимізація незалежних змінних моделі при виборі оптимальної схеми доставки в умовах ризику при взаємодії учасників на принципах кооперації.

Вхідними параметрами для визначення оптимального варіанту схеми доставки є [24]:

– часові параметри функціонування модулів системи: $T_{ТВК}$, $T_{Твідпр}$, $T_{МТ}$, $T_{Тпризн}$, $T_{СклВО}$, $t_{очТВК}$, $t_{очТвідпр}$, $t_{очМТ}$, $t_{очТпризн}$, $t_{очСклВО}$;

– кількісні характеристики ресурсів, що задіяні в обслуговуванні вантажів в контейнерах в модулях: $K_i^{ТВК}$, K_m^{Ts} , од.; $N_{роб}^{ТВК}$, $N_{роб}^{Ts}$, осіб;

– параметри потоку замовлень: обсяг вантажу, Q_i , т; інтервал надходження замовлень, I год;

– вартісні показники виконання технологічних операцій в j -х модулях системи ІКП, C_j , ум. од.;

– ціна вантажу, що перевозиться в контейнерах, $C_{вант}$, ум. од.

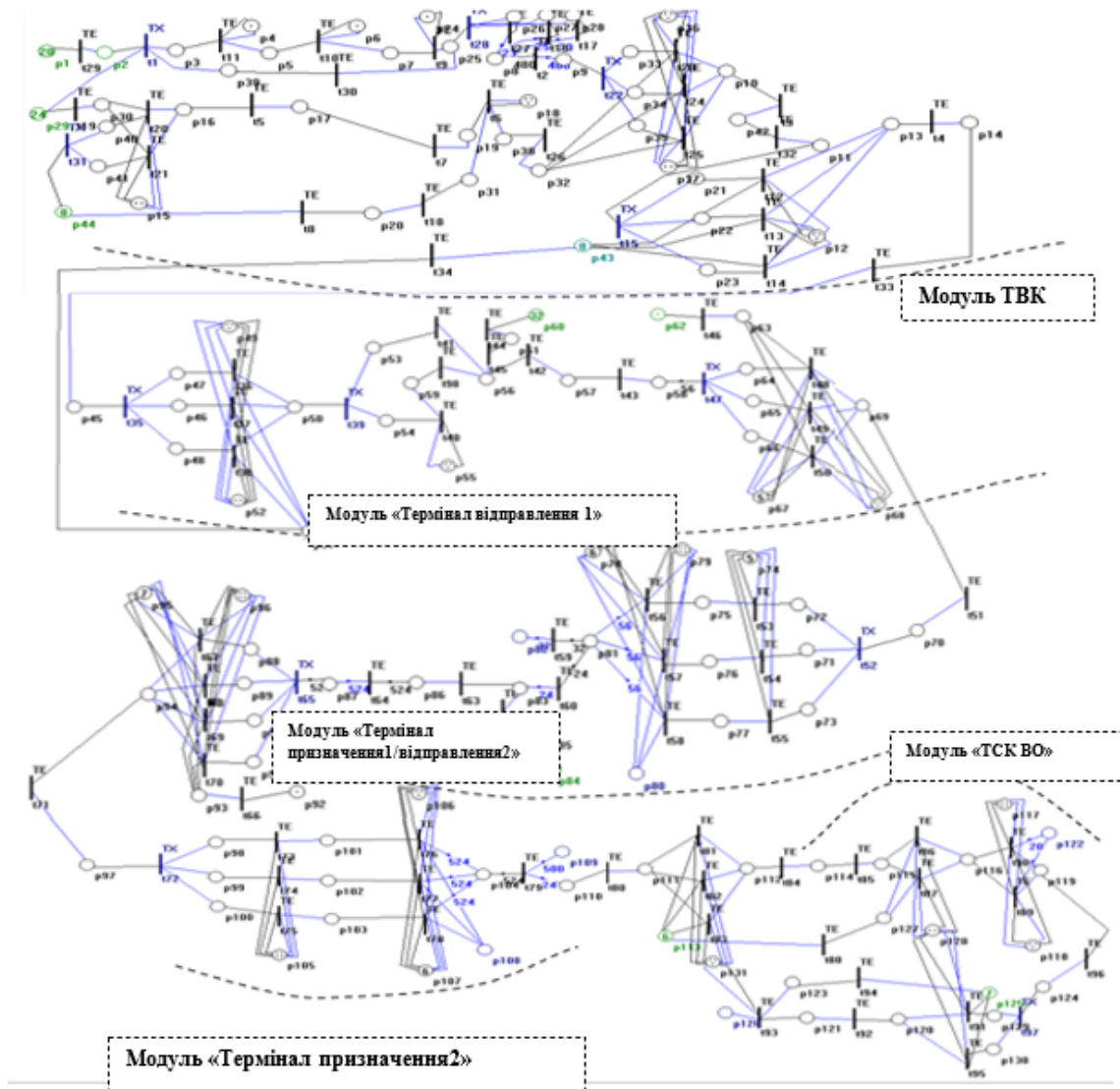


Рис. 7. Імітаційна модель процесу інтермодальних перевезень вантажів у контейнерах в ланцюгах постачань [24]

За результатами визначення у другому блоці критерію ефективності з урахуванням встановлення прийнятного рівня ризику визначається оптимальна схема доставки вантажів при дотриманні вимог вантажовласника щодо встановленого терміну, тарифу та рівня якості обслуговування (ризик).

Також, результати імітаційного моделювання дозволяють визначити «вузькі місця» логістичного ланцюга, з метою визначення управляючих впливів щодо забезпечення доставки вантажів з мінімальним сумарним часом затримок при максимальній ефективності взаємодії її елементів. В якості управляючих впливів слід розглядати кількісні характеристики ресурсів, що забезпечують оптимальний рівень управління – величину логістичних параметрів функціонування окремих модулів системи.

Функціонування елементів системи та вхідні параметри моделі доставки вантажів у контейнерах в ланцюгах постачань залежать від випадкових параметрів щодо обсягів вантажів, часових параметрів виконання технологічних операцій в кожному елементі системи. Тому, можна вважати запропоновану модель процесу з урахуванням випадкових величин параметрів стохастичною, а результат моделювання характеризуватиметься величинами математичного очікування параметрів та законом розподілу цих величин.

Застосування принципів ризик-менеджменту при організації доставки вантажів у контейнерах у змішаному сполученні являється необхідним при виборі оптимального варіанту схеми доставки для зменшення впливу та запобіганню небажаних наслідків. З метою мінімізації ризиків при організації доставки вантажів у контейнерах в міжнародному сполученні управління ризиками необхідно здійснювати за алгоритмом, рис. 8.

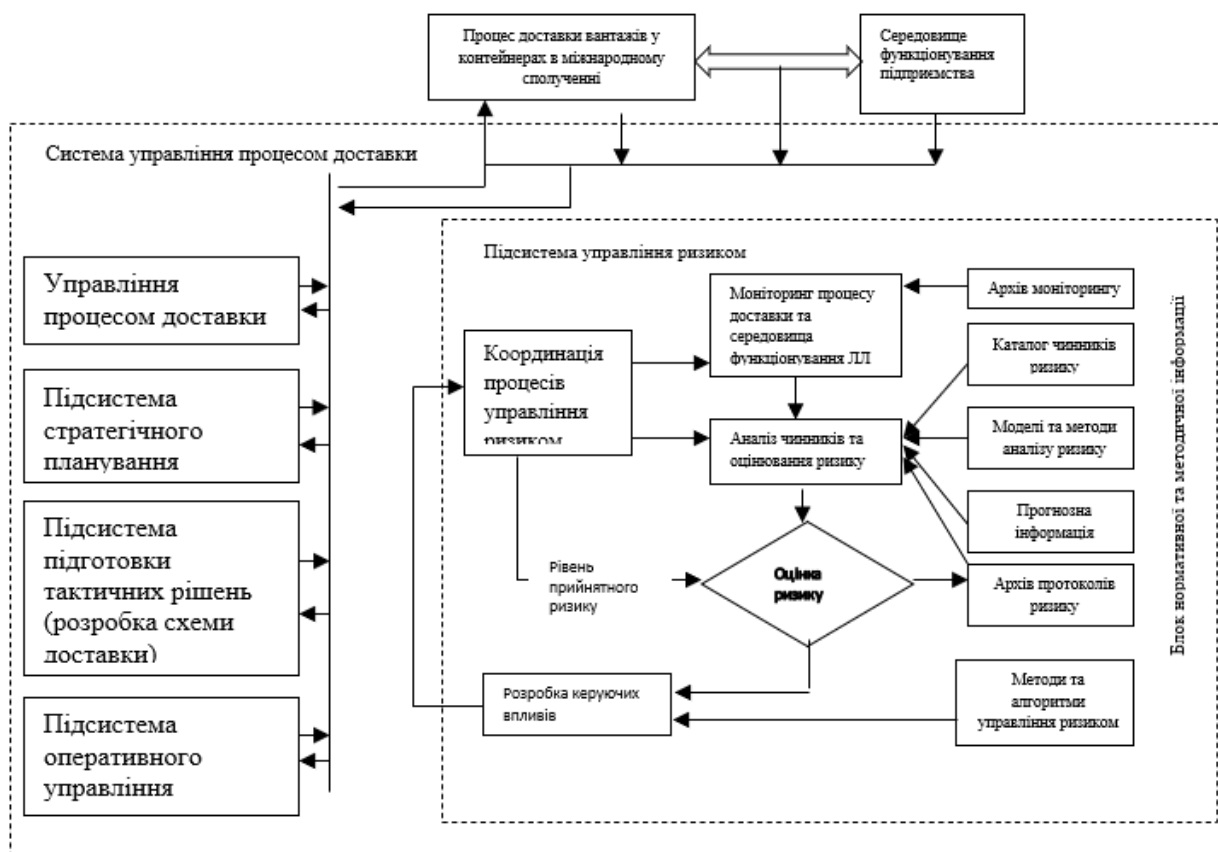


Рис. 8. Алгоритм управління ризиком в процесі інтермодальних перевезень контейнерних вантажів в ланцюгах постачань

Оцінку та обґрунтування вибору оптимального варіанту доставки вантажів у контейнерах в ланцюгах постачань доцільно проводити на основі запропонованої методики [29] визначення економічної

ефективності раціональної ТТСД за показником – інтегрований сумарний ефект від вибору раціональної ТТСД, який визначається як сума вартісних оцінок зменшення витрат на перевезення, дострокового вивільнення грошей за рахунок скорочення термінів доставки вантажів та зниження екологічної шкоди

$$E_{\text{інт}} = E_1 + E_2 + E_3 \rightarrow \max, \quad (15)$$

де $E_{\text{інт}}$ – інтегрований сумарний ефект, ум. од.;

E_1 – вартісна оцінка зменшення витрат на перевезення, ум. од.;

E_2 – вартісна оцінка дострокового вивільнення грошей за рахунок скорочення термінів доставки вантажів, ум. од.;

E_3 – вартісна оцінка зниження екологічної шкоди, ум. од.

Вартісну оцінку зменшення витрат на доставку вантажів у контейнерах при застосуванні оптимальної схеми доставки, дострокового вивільнення грошей за рахунок скорочення термінів доставки вантажів та зниження екологічної шкоди можна визначити, як різницю між значеннями показників за альтернативними варіантами організації процесу інтермодальних перевезень вантажів.

Вартісну оцінку зниження екологічної шкоди, як соціальний ефект, доцільно проводити за показником, що характеризує зміни в навколишньому середовищі в результаті здійснення відповідних заходів. В якості такого показника доцільно розглядати загальний пробіг автотранспортних засобів, що задіяний в різних модулях системи за альтернативних варіантами схем доставки. Основою розрахунків для визначення соціального ефекту від зменшення негативного впливу на навколишнє середовище є визначення витрат палива та викидів шкідливих сполук при доставці за альтернативними варіантами.

3.4. Висновки

Таким чином, розвиток інтермодальних контейнерних перевезень є ключовим напрямом для використання транзитного потенціалу України та її інтеграції до європейської транспортної мережі. В результаті проведення теоретичних досліджень були визначені основні проблеми та перспективи розвитку інтермодальних перевезень як інструменту інтеграції українських логістичних шляхів до TEN-T. Незважаючи на значні проблеми, пов'язані з правовим регулюванням, технічними відмінностями, нестачею інфраструктури та рухомого

складу, а також впливом війни, Україна має потенціал для трансформації своєї транспортної системи. Подолання цих викликів потребує комплексного підходу, що включає гармонізацію законодавства, значні інвестиції у модернізацію, активне впровадження цифрових технологій та поглиблену співпрацю з ЄС.

Незважаючи на значні переваги технології інтермодальних перевезень, її повноцінне запровадження в Україні стикається з низкою системних проблем, пов'язаних з правовим регулюванням, відмінностями за технічними та технологічними параметрами процесу, нестачею інфраструктури та рухомого складу, а також тарифною політикою. Подолання цих викликів вимагає комплексного підходу, що включає формування сприятливої політики, значні інвестиції у модернізацію інфраструктури та рухомого складу, активне впровадження цифрових технологій, гармонізацію стандартів з європейськими.

Запропонований методологічний підхід щодо організації інтермодальних контейнерних перевезень у ланцюгах постачань, зокрема в рамках TEN-T, дозволяє комплексно визначати ефективну схему перевезень на принципах сталого розвитку. При цьому враховано сучасні умови воєнного стану в Україні, а також принципи ризик-менеджменту для забезпечення балансу між очікуваними вигодами та потенційними втратами всіх учасників процесу.

Розроблена математична модель дозволяє комплексно враховувати інтереси всіх учасників доставки за рахунок вибору ефективної схеми доставки вантажів у контейнерах на умовах узгодження техніко-технологічних параметрів процесу доставки при взаємодії учасників на принципах кооперації.

Розроблена імітаційна модель процесу інтермодальних перевезень на базі мереж Петрі дозволяє досліджувати та аналізувати поведінку системи, визначати «вузькі місця» та оптимізувати схеми доставки з урахуванням часових, вартісних параметрів та оцінки рівня ризику. З метою зменшення впливу та запобіганню небажаних наслідків при організації інтермодальних перевезень вантажів розроблено алгоритм управління ризиком, що дозволяє враховувати принципи ризик-менеджменту при прийнятті управлінських рішень в сучасних умовах.

Оцінку економічної ефективності оптимальної схеми доставки запропоновано проводити за допомогою комплексного інтегрованого показника, що дозволяє врахувати зниження витрат, вивільнення коштів за рахунок скорочення термінів та зменшення екологічної шко-

ди за ефективним варіантом організації доставки вантажів у контейнерах у відповідності до загальної політики TEN-T по досягненню Цілей сталого розвитку.

Слід зазначити, що розвиток інтермодальних перевезень є не тільки економічним, але й політичним завданням, що сприятиме забезпеченню транспортної сумісності, скороченню часу доставки та оптимізації логістичних витрат на шляху України до європейського транспортного простору.

Список літератури до розділу 3

1. Бондаренко І. Разом до сталої і розумної мобільності!. К.: Екодія, 2021. 16 с. URL: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2021/07/razom-do-staloi-mobilnosti.pdf> (дата звернення: 05.03.2025).
2. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. *United Nations* : веб-сайт. URL: <https://sdgs.un.org/2030agenda> (дата звернення: 05.03.2025).
3. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#n17> (дата звернення: 10.03.2025).
4. The European Green Deal. Striving to be the first climate-neutral continent : веб-сайт. URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en (дата звернення: 11.03.2025).
5. АПК Інформ. Обсяг торгівлі між Україною і ЄС «Шляхами солідарності» перевищив 210 млрд євро: веб-сайт. URL: <https://www.apk-inform.com/uk/news/1547766> (дата звернення: 13.03.2025).
6. Європейський зелений курс: можливості та загрози для України» : аналітичний документ. *Ресурсно-аналітичний центр «Суспільство і довкілля»* : веб-сайт 2020. URL: <https://dixigroup.org/storage/files/2020-05-26/european-green-dealwebfinal.pdf> (дата звернення: 25.03.2025).
7. Соколова О. Є. Розробка сценаріїв сталого розвитку транспортної системи України. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2021. № 5. С. 117–125. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-158-5-117-125>.
8. Коврига О.М. Оцінка стану української логістичної системи та шляхи удосконалення транспортної логістики підприємства. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14535296> (дата звернення: 25.03.2025).

9. Петренко О.І. Контрейлерні перевезення вантажів як напрям розвитку транспортної системи України з урахуванням сучасних реалій. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Том 34 (73), № 6 С. 263–269. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/39/>
10. Закон України 1887-ІХ Про мультимодальні перевезення від 17.11.2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1887-20#Text> (дата звернення: 25.03.2025).
11. Jacyna-Gołda I, Shmygol N, Gavkalova N, Salwin M. Sustainable Development of Intermodal Freight Transportation – Through the Integration of Logistics Flows in Ukraine and Poland. *Sustainability*. 2024. Vol. 16(1). Paper 267. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16010267>.
12. Деркач Е. М. Щодо врахування європейських перспектив у правовому забезпеченні транспортної політики України. *Право і суспільство*. 2017. № 4. С. 76–83. URL: http://pravoisuspilstvo.org.ua/archive/2017/4_2017/part_1/16.pdf (дата звернення: 30.03.2025).
13. Support Study For The TEN-T Policy Review, Concerning Relevant National Plans And Programmes In Member States : Final Report 2021. URL: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/9beb4836-d55b-11eb-895a-01aa75ed71a1?utm_source (дата звернення: 03.04.2025).
14. Федяй Н. О. Особливості інтеграції української транспортної інфраструктури в Транс-Європейську Транспортну Мережу. *Ефективна економіка*. 2018. № 12. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=6764> DOI: [10.32702/2307-2105-2018.12.93](https://doi.org/10.32702/2307-2105-2018.12.93) (дата звернення: 03.04.2025).
15. Яровий В. Теоретичні засади цифровізації контейнерних перевезень. *Економіка та суспільство*. 2024, № 6. DOI: [10.32782/2524-0072/2024-66-136](https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-66-136).
16. Mobility and Transport. *European Commission* : official website. URL: https://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure_en (дата звернення: 05.04.2025).
17. Укрзалізниця пропонує перевезення контейнерів у збірних інтермодальних потягах між Україною та Польщею. URL: <https://www.railinsider.com.ua/ukrzaliznyczya-proponuye-perevezennya-kontejneriv-u-zbirnyh-intermodalnyh-potyagah-mizh-ukrayinoyu-ta-polshheyu/> (дата звернення: 05.04.2025).

- 18.Інтермодальні перевезення. *DSV* : веб-сайт. URL: <https://eba.com.ua/intermodalni-perevezennya-dsv/> (дата звернення: 05.04.2025).
- 19.Container freight shipments in Ukraine in Jan-May 2024 reach maximum over past 7 years. *Ukrainian Railways* : website. URL: https://interfax.com/newsroom/top-stories/103381/?utm_source (дата звернення: 10.04.2025).
- 20.Pavlenko O., Shramenko N., Muzylyov D. Logistics Optimization of Agricultural Products Supply to the European Union Based on Modeling by Petri Nets. *New Technologies, Development and Applications*. 2020. Vol.128. P. 596–604.
21. Hu H., Li J., Zhao X. Study on Location-Route Optimization Model of Logistics Distribution Center and Its Heuristics Solving Algorithm in Multi Modal Transport Network. *Advances in Transdisciplinary Engineering*. 2020. Vol. 14. P. 182–190. DOI: 10.3233/ATDE200231.
- 22.White paper on transport. Roadmap to a single European transport area: towards a competitive and resource efficient transport system / Publications Office of the European Union, 2011. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/bfaa7afd-7d56-4a8d-b44d-2d1630448855/language-en> (дата звернення: 10.04.2025).
- 23.Datsii O., Levchenko N., Shyshkanova G., Platonov O., Zalizniuk V. State policy for the development of multimodal transportation by clean and energy efficient motor transport. *Cuestiones Políticas*. 2021. Vol. 39, no. 71. P. 884–902. DOI: <https://doi.org/10.46398/cuestpol.3971.54>.
- 24.Орда О. О. Формування раціональних стратегій організації інтермодальних контейнерних перевезень в ланцюгах постачань на принципах кооперації учасників : автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.22.01. Харків. 2019. 24 с.
- 25.Chandra A., Pani A., Sahu P.K., Sushant S. Integrating Commodity-Based and Trip-Based Approaches of Freight Demand Modelling Using Trip Length Distributions. *Journal of The Institution of Engineers India: Series A*. 2023. Vol. 104, no. 1. P. 417–437. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40030-023-00712-1>.
- 26.Pavlenko O., Velykodnyi D., Lavrentieva O., Filatov S. The Procedures of Logistic Transport Systems Simulation in the Petri Nets Environment. *ICTERI 2020* : In Proc. of the 16th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer. Volume II: Workshops. 2020. Vol. 2732. P. 854–868.

27. Okyere S., Yang J., Adams C. A. Optimizing the Sustainable Multimodal Freight Transport and Logistics System Based on the Genetic Algorithm. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, no. 18. Paper 11577. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141811577>.
28. Шраменко Н. Ю. Теоретико-методологічні основи ефективного функціонування термінальних систем при доставці дрібнопартійних вантажів: монографія. Харків: ХНАДУ, 2010. 156 с.
29. Нагорний Є. В., Шраменко Н. Ю. Комерційна робота на транспорті : підручник. Харків: ХНАДУ, 2012. 298 с.
30. Badyal V., Ferrell W. G. Jr, Huynh N., Padmanabhan V. A two-stage stochastic model for intermodal terminal location and freight distribution under facility disruptions. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*. 2023. vol. 10, no. 1. Paper 2169055. DOI: <https://doi.org/10.1080/23302674.2023.2169055>.
31. Як управляти ланцюгами поставок в умовах війни?. *TradeMaster* : веб-сайт. URL: <https://trademaster.ua/logistic/313538> (дата звернення 19.04.2025).
32. Огірко О. І., Галайко Н. В. Теорія ймовірностей та математична статистика: навчальний посібник. Львів: ЛьВДУВС, 2017. 292 с.

4. Комплексний аналіз алгоритмічних стратегій розв'язання задачі маршрутизації транспортних засобів

О.С. Колій

доцент кафедри транспортних систем і логістики ХНАДУ,
канд. техн. наук

На сьогодні існує велика кількість алгоритмів, розроблених для розв'язання задачі маршрутизації транспорту (ЗМТ). Переважно це евристичні підходи, що базуються на використанні матриці відстаней або геометричному розташуванні точок на площині. Як уже зазначалося у вступі, задача маршрутизації транспорту є *NP*-складною, тому найбільшу увагу дослідники приділяють розробці наближених (апроксимативних) методів.

Хоча були запропоновані і точні методи, зокрема метод гілок і меж, їх застосування пов'язане зі стрімким зростанням обчислювальної складності. Варто зазначити, що задача маршрутизації транспорту має значно більший простір можливих рішень, ніж задача комівояжера (ЗК) навіть за однакової кількості вершин. До прикладу, метод гілок і меж вже виявляється малоефективним при розв'язанні задачі комівояжера, що містить понад 30 вершин, і ще менш придатним для ЗМТ.

Більшість відомих підходів орієнтовані на узагальнене формулювання задачі, в якому може бути використана як симетрична, так і несиметрична матриця відстаней, без фіксованої кількості транспортних засобів, але з урахуванням обмежень на їх вантажопідйомність або допустиму довжину маршруту. У подальшому розгляді алгоритмів додаються уточнення до постановки задачі, коли це є суттєвим.

Перші дослідження у напрямі пошуку рішень задачі маршрутизації транспорту датуються 1960-ми роками. Класичні евристичні методи були здебільшого створені в період з 1960-х по 1990-ті роки. Упродовж останніх двох десятиліть основний акцент змістився в бік розробки метаевристичних підходів.

Метаевристики відрізняються тим, що не передбачають жорстко заданого алгоритму дій. Натомість вони мають гнучку структуру і потребують налаштування параметрів для досягнення ефективних результатів. Автори таких алгоритмів зазвичай пропонують набір рекомендованих значень параметрів, які демонструють добрі результа-

ти, однак подальше дослідження їхнього впливу може забезпечити ще кращу якість розв'язання.

Класичні алгоритми розв'язання ЗМТ зазвичай поділяють на наступні три основні групи [1].

Конструктивні алгоритми. Ці методи поступово формують розв'язання, послідовно додаючи нові елементи з урахуванням зростання загальної вартості. Проте вони не передбачають етапу подальшого вдосконалення отриманого рішення.

Двофазні (кластерні) алгоритми. У цьому підході розв'язання задачі здійснюється у два етапи: спочатку виконується кластеризація – формування груп вершин для кожного майбутнього маршруту, а потім для кожної групи окремо розв'язується ЗК. Залежно від порядку виконання етапів, двофазні алгоритми поділяються на два підтипи:

- спершу виконується кластеризація, після чого відбувається оптимізація маршрутів для кожного кластеру;
- спочатку розв'язується задача комівояжера для всієї множини вершин, а потім отримане рішення ділиться на окремі маршрути відповідно до заданих обмежень.

У деяких випадках можлива наявність зворотного зв'язку між етапами, що дозволяє коригувати групування з урахуванням результатів маршрутної оптимізації.

Поліпшуючі алгоритми. Ці методи передбачають початкове створення деякого допустимого розв'язання, яке надалі покращується за рахунок локальних змін – перестановок або обміну вершин (ребер) як у межах одного маршруту, так і між різними маршрутами.

До метаевристичних методів, які демонструють високу ефективність у складних випадках задачі маршрутизації транспорту, належать наступні підходи [2]:

- пошук з виключеннями (*Tabusearch*);
- імітоване відпускання (*Simulatedannealing*);
- детерміноване відпускання;
- генетичний алгоритм;
- алгоритм на основі колоній мурах (*Antcolonyoptimization*);
- штучні нейронні мережі.

Більшість метаевристичних алгоритмів, за винятком пошуку з виключеннями, ґрунтуються на ідеях, запозичених із природних явищ – як живої, так і неживої природи. Ці підходи імітують біологічні, фізичні або соціальні процеси, що дозволяє ефективно досліджувати простір рішень складних задач, зокрема ЗМТ.

Перші три метаевристики – пошук з виключеннями, імітоване відпускання та детерміноване відпускання – починають з деякого початкового розв’язання x_1 . На кожному кроці ітераційного процесу t виконується перехід від поточного розв’язання X_t до нового X_{t+1} , який належить до околу $N(x_t)$ – множини розв’язань, що знаходяться поблизу поточного. Цей процес триває доти, доки не буде досягнуто умови зупинки, наприклад, за кількістю ітерацій або стабілізацією результату.

На відміну від класичних евристик, метаевристики допускають ситуацію, коли вартість нового розв’язання $f(x_{t+1})$ може бути більшою, ніж у попереднього $f(x_t)$ [2]. Такий підхід сприяє виходу з локальних мінімумів, однак вимагає впровадження додаткових механізмів, що запобігають зацикленню пошуку та сприяють глобальній оптимізації.

Генетичний алгоритм працює з популяцією рішень, яка на кожному етапі оновлюється шляхом комбінації найкращих особин (розв’язань) з одночасним видаленням найгірших. Цей підхід моделює процес природного добору, забезпечуючи поступове вдосконалення рішень упродовж поколінь.

До алгоритмів, що накопичують інформацію протягом пошуку і використовують її для прийняття рішень у наступних ітераціях, належать:

- пошук з виключеннями (*TabuSearch*);
- генетичний алгоритм;
- алгоритм на основі колоній мурах (*AntColonyOptimization*).

Ці методи ефективно комбінують отриманий досвід із поточними обчисленнями, покращуючи якість розв’язань завдяки використанню історії пошуку.

Штучні нейронні мережі реалізують принцип самоорганізації та самонавчання: вони поступово налаштовують вагові коефіцієнти своїх зв’язків, поки не буде знайдено прийнятне або оптимальне розв’язання. Завдяки здатності адаптуватися до складних структур даних, нейронні мережі стають потужним інструментом для наближеного розв’язання задачі маршрутизації транспорту.

4.1. Конструктивні алгоритми

4.1.1. Алгоритм Кларка-Райта

Алгоритм Кларка-Райта (*Clarke and Wright*) [3] є одним із найвідоміших та найпоширеніших методів для розв’язання ЗМТ. Основна

ідея алгоритму полягає в поетапному об'єднанні коротких маршрутів у довші за умови, що таке об'єднання зменшує загальну вартість (довжину) об'їзду.

Ключовим поняттям у цьому методі є збереження (англ. *saving*) – величина, яка відображає економію в разі злиття двох маршрутів. Збереження обчислюється як різниця між сумою відстаней від складу до двох окремих клієнтів і відстанню між цими клієнтами:

$$s_{ij} = c_{0i} + c_{0j} - c_{ij}, \quad (1)$$

де c_{0i} і c_{0j} – відстані від складу (вершина 0) до клієнтів i та j відповідно;

c_{ij} – відстань між клієнтами i та j .

Об'єднання маршрутів (наприклад, з $(0, \dots, i, 0)$ і $(0, j, \dots, 0)$ у єдиний маршрут $(0, \dots, i), (j, \dots, 0)$ є доцільним лише тоді, коли $s_{ij} > 0$, тобто дає змогу зменшити загальні витрати.

Алгоритм Кларка–Райта особливо ефективний у ситуаціях, коли кількість транспортних засобів не задана заздалегідь, а визначається в процесі побудови рішення. Його можна застосовувати як до симетричних, так і до несиметричних задач, проте, як зазначено у [4], якість результатів при симетричних умовах є нижчою.

Існує два основні варіанти реалізації алгоритму:

- паралельний варіант – одночасне злиття маршрутів на основі найвищих значень збережень;

- послідовний варіант – покрокове об'єднання маршрутів, починаючи з найкращого збереження і оновлюючи список доступних злиттів на кожному кроці.

Перед виконанням основної частини алгоритму необхідно пройти підготовчий етап, що включає:

- обчислення збережень за формулою s_{ij} для всіх пар $i, j = \dots, n$; $i \neq j$;

- формування початкового набору маршрутів: кожному клієнту відповідає окремий маршрут виду $(0, i, 0)$;

- сортування збережень у порядку спадання для подальшого пріоритетного злиття маршрутів із найбільшою потенційною економією.

У паралельному варіанті алгоритму обробка збережень здійснюється глобальна – аналізується увесь список збережень, відсортований у порядку спадання. Алгоритм діє за таким принципом:

– послідовно переглядаємо список збережень s_{ij} , починаючи з найбільшого значення;

– для кожного елемента s_{ij} перевіряємо, чи існують два окремі маршрути один містить дугу $(0, j)$, інший – дугу $(i, 0)$;

– якщо обидва маршрути знайдено і їх можна об'єднати без порушення обмежень (наприклад, за вантажопідйомністю чи довжиною маршруту), виконується злиття видаляються дуги $(0, j)$ і $(i, 0)$, додається нова дуга (i, j) , що об'єднує маршрути.

Процес триває до вичерпання можливостей злиття маршрутів, відповідно до наявних збережень.

Послідовний підхід орієнтується на поступове вдосконалення кожного окремого маршруту. Алгоритм діє так.

1. Для кожного маршруту вигляду $(0, i, \dots, j, 0)$ виконуємо пошук такого елемента у списку збережень s_{ki} , якщо є інший маршрут, що закінчується на $(k, 0)$, або s_{jk} , якщо є маршрут, який починається з $(0, k)$, що дозволяє об'єднати поточний маршрут із сусіднім.

2. Якщо відповідний елемент знайдено, об'єднуємо маршрути, замінюючи кінцеві або початкові дуги відповідною з'єднувальною дугою. Повторюємо пошук для новоутвореного маршруту.

3. Якщо об'єднання неможливе, переходимо до наступного маршруту.

4. Алгоритм завершує роботу, коли жодне злиття більше не дозволене.

Результати числових експериментів свідчать, що паралельний варіант алгоритму Кларка–Райта, як правило, забезпечує кращу якість рішень, ніж послідовний. Це пояснюється тим, що паралельний підхід відразу використовує найбільш вигідні збереження на глобальному рівні, тоді як послідовний може втрачати частину таких можливостей через локальність обробки.

4.1.2. Розширення алгоритму Кларка-Райта

Попри свою популярність і простоту, алгоритм Кларка–Райта має низку недоліків, серед яких найбільш помітним є зниження ефективності на пізніх етапах обчислень. У той час як початкові кроки дають досить якісні результати, подальше об'єднання маршрутів поступово втрачає ефективність, що знижує загальну якість отриманого розв'язання.

З метою усунення цього недоліку, в роботі [5] було запропоновано узагальнене поняття збереження, яке враховує форму маршруту. Замість класичної формули, використовується модифікований вираз:

$$s_{ij}^{\lambda} = c_{0i} + c_{0j} - \lambda c_{ij}, \quad (2)$$

де λ – параметр, який дозволяє керувати впливом відстані між вершинами i та j на доцільність їх об'єднання.

Таким чином, можна змінювати пріоритет об'єднання пар залежно від їх взаємного розташування.

У дослідженні [6] встановлено, що значення параметра $\lambda = 0,4$ дає змогу поліпшити результати як за загальною довжиною побудованих маршрутів, так і за їх кількістю, що особливо важливо для задач із обмеженнями на кількість транспортних засобів.

Ще одним важливим аспектом є проблема продуктивності. У будь-якому варіанті алгоритму Кларка–Райта потрібно:

- обчислити значення всіх можливих збережень;
- зберегти їх у пам'яті;
- відсортувати у порядку спадання.

Ці операції можуть бути досить ресурсоемними, особливо для задач великої розмірності. Саме тому в 1970-х і на початку 1980-х років багато дослідників запропонували модифікації алгоритму, спрямовані на зменшення обчислювальної складності, скорочення обсягу оперативної пам'яті, необхідної для збереження таблиць збережень.

Такі оптимізації були особливо актуальними в умовах обмежених ресурсів обчислювальної техніки того часу, проте деякі з них залишаються релевантними і сьогодні.

У процесі реалізації алгоритмів, що базуються на концепції збереження, варто зважати на два критично важливі аспекти:

- метод пошуку елемента з максимальним збереженням у поточному списку;
- організацію зберігання даних у пам'яті, яка повинна забезпечити швидкий доступ і ефективне оновлення у разі змін маршрутів.

У реалізації алгоритму Кларка–Райта найскладнішим, з обчислювальної точки зору, є етап пошуку максимального збереження. Для його ефективного виконання застосовуються три основні підходи.

1. Повне сортування збережень. У цьому випадку всі значення збережень попередньо впорядковуються за спаданням, наприклад, за

допомогою алгоритму Хоара. Такий підхід забезпечує простоту реалізації, але вимагає значних обчислювальних ресурсів при великій кількості вершин.

2. Обмежене сортування за допомогою структури купи [6]. Для оптимізації пошуку максимального значення використовують спеціальну структуру даних – бінарну купу, в якій кожен батьківський вузол має значення збереження, більше ніж у його дочірніх вузлів. Така структура дозволяє ефективно вилучати та оновлювати елементи після кожного об'єднання маршрутів, істотно скорочуючи час пошуку максимуму.

3. Ітеративний алгоритм для пошуку максимального збереження [7]. У цьому підході використовується аналітична умова для виключення нерелевантних пар вершин. Зокрема, доведено, що збереження $s_{ij} > s$ можливе лише тоді, коли:

$$c_{0i} > 0,5s \quad \text{та} \quad c_{0j} > 0,5s, \quad (3)$$

де s – поточне максимальне значення збереження.

Це твердження базується на припущенні про додатність усіх відстаней і застосуванні нерівності трикутника у визначенні збереження. Використання цієї умови дозволяє значно звужити коло пошуку і пришвидшити процес ідентифікації найбільш вигідного об'єднання.

Окрім класичної реалізації, в літературі описано ряд модифікацій алгоритму Кларка–Райта, які зберігають базову ідею збереження, але застосовують її в нових контекстах. Наприклад, у [8] пропонується метод, за яким на кожному кроці збереження s_{pq} між маршрутами p і q обчислюється як:

$$s_{pq} = t(S_p) + t(S_q) - t(S_p \cup S_q), \quad (4)$$

де S_k – множина вершин маршруту k ;

$t(S_k)$ – довжина оптимального розв'язання ЗК для множини S_k .

Для обчислення $t(S_k)$ можуть застосовуватись як точні методи, так і наближені оцінки, що дає змогу адаптувати алгоритм до задач різного масштабу та складності.

Попри свою простоту, алгоритм Кларка–Райта сьогодні рідко використовується як самостійний метод через наявність більш потужних і гнучких сучасних підходів. Проте він і досі залишається ефективним інструментом для генерації початкових рішень, які надалі удосконалюються за допомогою метаевристик.

4.1.3. Послідовний алгоритм вставки Моля-Джеймсона

Алгоритм Моля-Джеймсона (*Mole and Jameson*) належить до класу послідовних алгоритмів вставки та призначений для задач маршрутизації транспорту, у яких кількість транспортних засобів не задана наперед. Розширення маршруту відбувається шляхом послідовної вставки нових вершин, що здійснюється з урахуванням двох параметрів – λ та μ , які впливають на стратегію вибору.

Основні формули, що використовуються в алгоритмі, мають вигляд

$$\alpha(i, k, j) = c_{ik} + c_{kj} - \lambda c_{ij}, \quad (5)$$

$$\beta(i, k, j) = \mu c_{0k} - \alpha(i, k, j), \quad (6)$$

де c_{ik} , c_{kj} , c_{ij} – відстані між відповідними вершинами;

c_{0k} – відстань від депо до вершини k ;

L – поточна довжина маршруту.

Покроковий опис алгоритму є наступним.

1. Перевірка наявності невикористаних вершин. Якщо всі вершини вже включено до маршрутів – алгоритм завершено. Інакше ініціалізується новий маршрут вигляду $(0, k, 0)$, де k – довільна невикористана вершина.

2. Оцінювання можливості вставки вершини. Для кожної невикористаної вершини k розглядається можливість її вставки між будь-якою парою суміжних вершин i та j останнього побудованого маршруту. Для кожного такого варіанта обчислюється значення:

$$\alpha^*(i_k, k, j_k) = \min\{\alpha(i, k, j)\}, \quad (7)$$

де (i_k, j_k) – така пара, для якої досягається мінімум. Якщо не існує допустимої вставки, повертаємося до кроку 1.

Інакше для всіх можливих вершин k із відомими α^* обчислюється

$$\beta^*(i_k^*, k^*, j_k^*) = \max\{\beta(i_k, k, j_k)\}, \quad (8)$$

тобто обирається така вершина k^* , чия вставка забезпечує найвищу вигоду з точки зору критеріїв алгоритму. Вершину k^* вставляють між i_{k^*} та j_{k^*} .

3. Оптимізація маршруту. Після вставки виконується локальне покращення маршруту за допомогою процедури *3-opt* [9], після чого алгоритм повертається до кроку 2.

Контроль стратегії вставки здійснюється через вибір значень параметрів λ і μ . Зокрема:

- при $\lambda = 1, \mu = 0$: обирається вершина, вставка якої забезпечує найменше збільшення довжини маршруту;
- при $\lambda = \mu = 0$: пріоритет надається вершині, що мінімізує суму відстаней до двох сусідніх точок;
- при $\mu = \infty, \lambda > 0$: обирається вершина, найбільш віддалена від депо.

4.1.4. Послідовний алгоритм вставки Крістофідеса-Мінгодзі-Тосса

Алгоритм Крістофідеса, Мінгодзі та Тосса (*Christofides, Mingozzi and Toth*) [10] є поглибленим послідовним методом вставки, який застосовується для розв'язання задач маршрутизації транспорту з нефіксованою кількістю транспортних засобів. Це двофазна евристика, що дозволяє тонко налаштовувати правила вставки завдяки використанню двох параметрів – λ і μ .

Фаза 1. Побудова початкових маршрутів.

1. Ініціалізація. Встановлюється номер першого маршруту: $k = 1$.
2. Початкова вершина маршруту. Вибирається довільна невикористана вершина i_k , яка ініціалізує маршрут k .
3. Розширення маршруту. Для кожної невикористаної вершини i обчислюються відповідні значення (формули або критерії уточнюються у повній версії алгоритму)

$$\delta_{i^*} = \min\{J_i\}, \quad (9)$$

де J_i – множина допустимих вершин, які можна додати до поточного маршруту k .

Обрана вершина i^* додається до маршруту, після чого застосовується локальна оптимізація за допомогою процедури *3-opt* [9]. Крок повторюється доти, доки залишаються вершини, допустимі для включення до маршруту k .

4. Перехід до нового маршруту. Якщо всі вершини вже розподілені по маршрутах – алгоритм завершено. Інакше значення k збіль-

шується на одиницю: $k = k + 1$, і процес повторюється з кроку 2 для побудови нового маршруту.

Фаза 2. Оптимізація розподілу вершин.

1. Ініціалізація маршрутів. Створюється множина маршрутів $J=(R_1, \dots, R_k)$, де кожен маршрут починається з одного клієнта:

$$R_t = (0, i_t, 0), \quad t = 1, \dots, k. \quad (10)$$

2. Призначення вершин маршрутам. Для кожного маршруту $R_t \in J$ і кожної невикористаної вершини i обчислюється

$$E_{ti} = c_{0i} + \mu c_{iit}, \quad (11)$$

$$E_{t^*i} = \min\{E_{ti}\}. \quad (12)$$

Вершину i асоціюють з маршрутом R_{t^*} , який має найменше значення E_{t^*i} . Процедура повторюється, доки всі вершини не будуть призначені маршрутам.

3. Оновлення маршрутів. Обирається будь-який маршрут $R_t \in J$, після чого він тимчасово виключається з множини: $J := J \setminus R_t$.

Для кожної вершини i , що вже асоційована з R_t , обчислюється:

$$s_{ti} = \min\{E_{ti}\}, \quad R_t \in J, \quad (13)$$

$$\tau_i = E_{ti} - s_{ti}. \quad (14)$$

4. Вставка вершини. Визначається вершина i , для якої $\tau_i = \max(\tau_i)$. Якщо вона належить до множини S_t допустимих вставок, її додають до маршруту R_t . Після вставки знову застосовується процедура 3-opt для оптимізації. Крок повторюється, доки залишаються вершини, що можуть бути додані до маршруту R_t .

5. Завершення або повторення. Якщо множина J порожня – повертаємося до кроку 2. Якщо ж залишилися ще невикористані вершини, створюються нові маршрути, починаючи з першої фази, і процедура повторюється.

4.2. Двофазні класичні алгоритми

Двофазні алгоритми становлять важливий клас евристичних методів розв'язання ЗМТ, у яких процес побудови розв'язання розділе-

но на дві окремі фази. Залежно від порядку виконання етапів, ці алгоритми умовно поділяються на наступні дві основні групи.

1. Алгоритми, що спочатку виконують кластеризацію.

На першому етапі множина вершин розбивається на окремі групи, кожна з яких призначається для одного транспортного засобу. Після цього для кожної групи окремо розв'язується ЗК. До цієї групи належать:

- елементарні кластерні алгоритми – найпростіші методи, які виконують однократну операцію кластеризації, а потім незалежно оптимізують маршрути всередині кожного кластера шляхом розв'язання задачі комівояжера;

- алгоритм пелюсток (*Petal Algorithm*) – більш складна евристика, що генерує велику кількість частково перекривних кластерів і відповідних маршрутів.

З отриманого набору шляхів обирається оптимальна (або близька до оптимальної) підмножина, яка забезпечує найменшу сумарну вартість маршрутизації.

2. Алгоритм, що виконує розбиття загального маршруту.

У цьому випадку спочатку розв'язується задача комівояжера для всієї множини вершин, без урахування обмежень на кількість транспортних засобів. Отриманий маршрут потім ділиться на фрагменти відповідно до заданих обмежень (наприклад, вантажопідйомність, тривалість маршруту тощо), кожен з яких призначається окремому транспортному засобу.

До елементарних кластерних алгоритмів належать такі добре відомі підходи:

- алгоритм заметання (*Sweep Algorithm*) – використовує кутову координату вершин для їх упорядкування та послідовного об'єднання у кластери;

- алгоритм Фішера–Джекумера – виконує кластеризацію на основі центроїдної моделі з урахуванням вагових обмежень;

- алгоритм Брамела–Сімчі-Леві – орієнтований на рівномірне розподілення навантаження між транспортними засобами з урахуванням географічної близькості.

4.2.1. Алгоритм заметання

Алгоритм заметання (*Sweep Algorithm*) [11] є одним з найпоширеніших методів початкової обробки ЗМТ. Його основна ідея полягає

у формуванні кластерів шляхом обертання уявного променя, що виходить із центральної точки – депо. Коли кут обертання досягає певного порогу (зумовленого, наприклад, обмеженнями вантажопідйомності або довжини маршруту), формується новий кластер. Для кожного такого кластера окремо розв’язується ЗК.

У деяких модифікаціях алгоритму реалізовано етап подальшої оптимізації, що включає обмін вершинами між сусідніми кластерами для покращення якості загального розв’язання. Після такого обміну відбувається оновлення маршрутів у відповідних кластерах.

Суттєвою перевагою алгоритму є відсутність потреби у попередньому визначенні кількості транспортних засобів. Однак, варто зауважити, що алгоритм використовує геометричну інформацію про розташування вершин на площині – зокрема, їх полярні координати – що виходить за межі формального математичного формулювання. Попри те, що перші згадки про цей підхід містяться у роботі [12], у науковій літературі його авторство найчастіше приписують дослідженню [11].

Для реалізації алгоритму припустимо, що кожна вершина i задана в полярних координатах (θ_i, ρ_i) , де θ_i – кутова координата вершини (відносно депо), ρ_i – відстань від депо до вершини.

Для впорядкування вершин:

- обираємо довільну вершину i^* і задаємо їй кут $\theta_{i^*} = 0$;
- обчислюємо всі інші значення θ_i відносно θ_{i^*} ;
- сортуємо вершини за зростанням кутових координат θ_i (рис. 1).

Таким чином формується послідовність, за якою вершини об’єднуються в кластери.

Кроки алгоритму полягають у наступному.

1. Обирається невикористаний транспортний засіб k .

2. Починається формування маршруту з вершини, яка має найменше значення кута. Послідовно до маршруту додаються вершини за порядком збільшення θ_i , поки не буде досягнуто обмеження (наприклад, максимальна вантажопідйомність або довжина маршруту).

3. Якщо залишилися вершини, що ще не включені до жодного маршруту – процедура повторюється для нового транспортного засобу.

4. Для кожного отриманого кластера виконується розв’язання ЗК – як за допомогою точних алгоритмів, так і наближених методів.

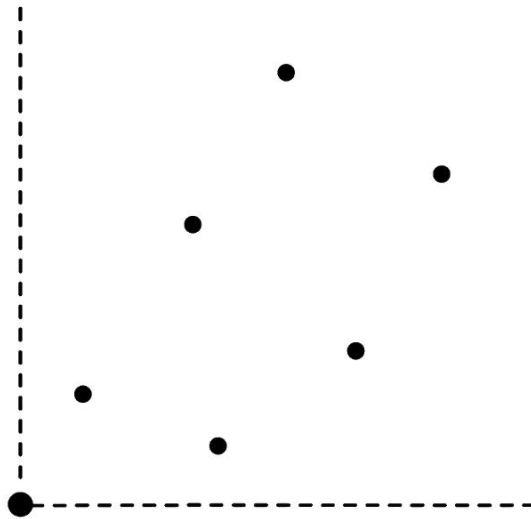


Рис. 1. Розташування вершин у секторі на площині відносно депо

4.2.2. Алгоритм Фішера-Джекумера

Алгоритм Фішера-Джекумера (*Fisher and Jaikumar*) [13] є класичним представником методів кластеризації у ЗМТ, однак, на відміну від геометричних підходів, він базується на розв'язанні узагальненої задачі про призначення. Особливістю цього методу є те, що кількість транспортних засобів k задається явно перед початком виконання алгоритму.

Покроковий опис алгоритму є наступним.

1. Початкова ініціалізація кластерів. З множини всіх вершин V обирається по одній вершині jk для кожного з k кластерів. Ці вершини використовуються як початкові центри відповідних груп.

2. Оцінка вартості призначення вершин. Для кожної вершини i і кожного кластера k обчислюється вартість призначення d_{ijk} за формулою

$$d_{ijk} = \min\{c_{0j} + c_{jk} + c_{k0}, c_{0jk} + c_{jki} + c_{i0}\} - (c_{0j} + c_{jk0}), \quad (15)$$

де c_{uv} – відстань або вартість переміщення між вершинами u і v .

Індекси у формулі можуть представляти певні шляхи або послідовності пересування, що використовуються в модифікованій оцінці.

3. Розв'язання узагальненої задачі про призначення. На основі розрахованих значень d_{ijk} формулюється задача призначення з урахуванням таких обмежень:

- кожна вершина-клієнт має вагу q_i ;
- кожен транспортний засіб має вантажопідйомність Q .

Розв'язок цієї задачі визначає оптимальний розподіл клієнтів між кластерами з урахуванням вартостей призначення та обмежень на ресурси.

4. Оптимізація маршрутів у кожному кластері. Після формування кластерів на основі результатів задачі призначення для кожного окремого кластеру виконується розв'язання ЗК, з використанням відповідних евристичних або точних алгоритмів.

4.2.3. Алгоритм Брамела-Сімчі-Леві

Алгоритм Брамела-Сімчі-Леві (*Bramel and Simchi-Levi*) [14] є ще одним прикладом ефективного двофазного алгоритму, який використовує поняття так званого ядра кластера (*cluster seed*). Ядро кластера визначається як вершина, що слугує початковою точкою для формування маршруту транспортного засобу.

На першому етапі алгоритму ядра кластерів формуються шляхом розв'язання задачі розміщення з обмеженнями на потужність (*capacitated location problem*). Мета полягає у виборі K ядер кластерів із множини n клієнтів таким чином, щоб сумарна відстань від кожного клієнта до найближчого ядра була мінімальною та загальна потреба у доставці товару для кожного ядра не перевищувала задану величину Q .

Після визначення ядер відбувається другий етап – послідовне додавання клієнтів до часткових маршрутів. Нехай частковий маршрут k описується вектором:

$$(i_0, i_1, \dots, i_l, i_{l+1}), \quad (16)$$

де i_0 та i_{l+1} – це вершини, які представляють депо;

$T_k = (i_1, \dots, i_l)$ – поточна множина клієнтів у маршруті.

Позначимо через $t(T_k)$ довжину точного розв'язання ЗК для цієї множини.

Вартість додавання нової вершини i до маршруту k обчислюється як:

$$d_{ik} = t(T_k \cup \{i\}) - t(T_k). \quad (17)$$

Оскільки точне обчислення d_{ik} є обчислювально складним, автори пропонують дві апроксимації цієї вартості.

1. Пряма вартість:

$$d'_{ik} = \min\{2c_{i_h i}\}, \quad h=1, \dots, l. \quad (18)$$

де $c_{i_h i}$ – відстань між уже включеною у маршрут вершиною i_h та новою вершиною i .

2. Вартість найближчої вставки:

$$d'_{ik} = \min\{c_{i_h i} + c_{i_{h+1} i} - c_{i_h i_{h+1}}\}, \quad h=0, \dots, l. \quad (19)$$

У даній формулі оцінюється вартість вставки вершини i між двома суміжними вершинами маршруту.

У своїй роботі Брамел і Сімчі-Леві довели, що застосування першого варіанту апроксимації приводить до асимптотично оптимальних результатів, тобто ефективність алгоритму зростає зі збільшенням розміру задачі.

4.2.4. Алгоритм пелюстків

Алгоритм пелюстків (*Petal Algorithm*) слугує ефективним підходом для розв'язання ЗМТ. Як показано в роботі [15], цей алгоритм дозволяє отримувати розв'язання високої якості.

Основна концепція алгоритму полягає в тому, щоб спочатку згенерувати надлишкову множину маршрутів, а потім відбірково сформувати оптимальний їх набір, розв'язавши задачу про розбиття множини (*Set Partitioning Problem*), в якій мінімізується сумарна вартість обраних маршрутів за умови повного покриття всіх вершин.

Ключовим поняттям є r -пелюсток (*r-petal*) – це множина з r маршрутів, які разом покривають усі вершини, розташовані в межах певного сектора площини, що має центр у депо (рис. 2).

Покроковий опис є наступним.

1. Генерація пелюстків. На першому етапі створюється множина r -пелюстків, що забезпечують повне покриття всієї множини вершин. У варіанті алгоритму, наведеному в [15], формуються лише 1-пелюстки та 2-пелюстки, що будуються за допомогою процедури заметання.

2. Формування маршрутів. Кожна 1-пелюстка відповідає одному маршруту, побудованому для підмножини вершин S , із включенням депо. Побудова маршруту в межах 1-пелюстка зводиться до розв'язання ЗК для множини $S \cup \{0\}$, де 0 – вершина депо.

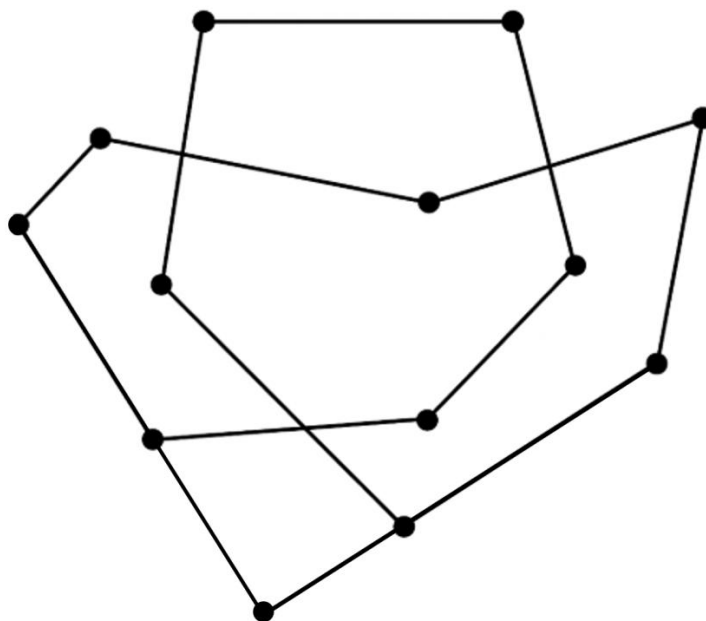


Рис. 2. Приклад маршрутів 2-пелюстка

Для розв'язання ЗК використовується алгоритм *I3* [16], що є трифазним наближеним методом. Його структура така:

- фаза 1: побудова початкової оболонки, що охоплює всі вершини (не обов'язково опуклої);
- фаза 2: вставка вершин, які не ввійшли до початкового маршруту;
- фаза 3: локальна оптимізація з використанням алгоритму *4-opt* – удосконаленої версії класичної евристики.

У результатах числового експериментального тестування, наведених у [15], алгоритм пелюстків у середньому знаходив розв'язання, які відрізнялися від відомих оптимальних лише на 2,2 %, що свідчить про його високу практичну ефективність.

Процедура формування 2-пелюстка для деякої підмножини вершин S включає кілька етапів. Насамперед відбираються дві найбільш віддалені вершини, які слугують базовими точками для ініціалізації двох окремих маршрутів. Решта вершин із множини S поетапно призначаються до одного з маршрутів відповідно до критерію найвигіднішої вставки, із урахуванням заданих обмежень (наприклад, за вантажопідйомністю або довжиною маршруту).

Після кожного кроку вставки запускається процедура *4-opt* для локального вдосконалення поточного (проміжного) маршруту. За потреби може бути застосовано різні варіанти як самого критерію вибору пар початкових вершин, так і принципів розширення маршрутів.

Зокрема, альтернативою до пошуку найбільш віддалених точок є пошук пари вершин з максимальним кутом між ними відносно депо. Однак експериментальні дослідження показали, що такий підхід не приводить до істотного покращення якості розв'язання порівняно з базовим методом.

Автори також дослідили вплив різних стратегій вставки вершин у маршрути. Варіант, у якому для кожної вершини окремо обчислювалася вартість вставки в кожен маршрут і обиралася найменша, призводив до значної розбалансованості маршрутів – особливо у випадках з жорсткими обмеженнями. Така нерівномірність негативно впливала на загальну якість рішення.

У рамках дослідження було також проаналізовано різні методи протидії негативним ефектам незбалансованості, зокрема:

- введення додаткових обмежень або штрафів при формуванні пелюстків;
- застосування глобальних механізмів перегляду кластерів після побудови початкового набору маршрутів;
- глибша інтеграція обмежень у саму процедуру вставки, що дозволяє динамічно реагувати на перевищення ресурсів.

Такі удосконалення дозволяють підвищити стабільність алгоритму пелюстків і роблять його придатним для широкого спектра практичних задач маршрутизації.

Завершення: процедура побудови 1- та 2-пелюстків

Для побудови повної множини 1-пелюстків і 2-пелюстків використовується наступна процедура. Без обмеження загальності припускається, що всі вершини пронумеровані у порядку зростання кута в полярній системі координат з центром у депо. За умов, що індексація циклічна: $v_j = v_{j(modn)}$, якщо $j > n$.

Алгоритм побудови пелюстків складається з таких кроків.

1. Ініціалізація. Встановити $i = 0$.
2. Перехід до нової стартової вершини. Збільшити $i := i + 1$. Якщо $i > n$, завершити роботу.

3. Початкові підмножини. Визначити $S_{i,i} = \{v_i\}$, зберегти її як потенційний 1-пелюсток. Вартість маршруту обчислюється як $c_{ii} = 2c_{0i}$.

Встановити $j := i + 1$, сформуванню множини $S_{i,j} = \{v_i, v_j\}$, побудувати маршрут (v_0, v_i, v_j, v_0) . Якщо маршрут не задовольняє заданим обмеженням – перейти до кроку 5. Інакше – зберегти $S_{i,j}$, відповідний маршрут і його вартість c_{ij} .

4. Розширення множини. Збільшити $j := j + 1$, оновити множини $S_{i,j} = \{v_i, \dots, v_j\}$. Якщо загальна потреба в доставці для $S_{i,j}$ перевищує вантажопідйомність – перейти до кроку 5.

Інакше – спробувати побудувати 1-пелюсток для $S = S_{i,j}$. Якщо допустиме рішення не знайдено – перейти до кроку 5. Якщо знайдено – зберегти $S_{i,j}$, маршрут і його вартість Q_{ij} . Повторити цей крок.

5. Побудова 2-пелюстків. Якщо поточна потреба в доставці для $S_{i,j}$ перевищує подвоєну вантажопідйомність, перейти до кроку 6. Інакше – спробувати побудувати 2-пелюсток для $S = S_{i,j}$. Якщо розв’язання не знайдено – перейти до кроку 6. Якщо знайдено – зберегти $S_{i,j}$, відповідне рішення і його вартість c_{ij} . Збільшити $j := j + 1$ і повторити крок 5.

6. Аналіз домінування та оновлення множини пелюстків. Деякі з побудованих пелюстків можуть бути домінантними, тобто більш ефективними у порівнянні з раніше згенерованими. Якщо $j = 2$, повернутися до кроку 2. Інакше, для кожного $h = j, j - 1, \dots, 3$ розглянути множини $S_{i,h}$ та вершину v_h , яка є останньою в маршруті. Нехай $C_{i,h}$ – вартість відповідного пелюстка. Якщо виконується умова $C_{i,h-1} \leq C_{i,h}$, тоді:

- видалення вершини v_h з $S_{i,h}$ має привести до пелюстка, вартість якого не перевищує $C_{i,h-1}$;

- у цьому випадку пелюсток, побудований на $S_{i,h-1}$, замінюється пелюстком, побудованим на множині $S_{i,h} \setminus \{v_h\}$.

Повернутися до кроку 2.

Однією з ключових переваг описаної вище процедури перед алгоритмом, запропонованим у [17], є те, що згенеровані перехресні маршрути часто входять до складу оптимального розв’язання. Це значно підвищує ефективність алгоритму на практиці.

Після завершення побудови всіх можливих 1-пелюстків і 2-пелюстків постає задача вибору оптимальної підмножини пелюстків, яка забезпечить мінімальну сумарну вартість при повному покритті всіх вершин. Ця задача формалізується як задача про розбиття множини (*Set Partitioning Problem*).

Формулювання задачі. Мінімізація цільової функції:

$$\sum_{\ell \in L} c_{\ell} x_{\ell}. \quad (20)$$

Обмеження:

$$\sum_{\ell \in L} a_{k\ell} x_{\ell} = 1, \text{ для } k = 1, \dots, n, \quad (21)$$

$$x_{\ell} \in \{0, 1\}, \text{ для } \ell \in L, \quad (22)$$

де L – множина всіх згенерованих кандидатів r -пелюстків, $r = 1$ або $r = 2$;

c_{ℓ} – вартість маршруту (пелюстка) ℓ ;

$a_{k\ell} = 1$, якщо вершина v_k входить до пелюстка ℓ , і 0 – інакше.

Таким чином, задача полягає у виборі такого набору пелюстків, який покриває кожен вершину рівно один раз та має мінімальну загальну вартість.

Задача про розбиття множини є NP -складною у загальному випадку, однак, як зазначено в роботі [18], для практично важливих конфігурацій вона може бути ефективно розв’язана за поліноміальний час, використовуючи спеціалізовані методи цілочисельного програмування або евристики.

Після отримання початкового розв’язання можлива додаткова оптимізація, яка полягає у спробі об’єднати окремі маршрути, якщо таке об’єднання не приводить до порушення обмежень (наприклад, за вантажопідйомністю або довжиною маршруту). У разі успішного об’єднання маршрутів рекомендується повторно запустити процедуру побудови 1-пелюстка для множини вершин, які належали до об’єднаних маршрутів, з метою покращення структури розв’язання.

4.2.5. Методи з розв’язанням ЗК перед кластеризацією

До окремого класу двофазних алгоритмів належать методи, в яких спочатку розв’язується ЗК для всієї множини вершин без урахування обмежень, а вже на наступному етапі відбувається кластеризація шляхом розбиття отриманого маршруту на частини, відповідні окремим транспортним засобам.

Такий підхід є доцільним у випадках, коли кількість екіпажів (транспортних засобів) не визначена наперед. Вперше цей підхід було запропоновано у [19], де також продемонстровано, що другий етап, декомпозиція маршруту, може бути зведений до задачі пошуку найкоротших шляхів в ациклічному графі, яка розв’язується за час

$$O(n^2), \quad (23)$$

де n – кількість вершин (клієнтів).

У побудованому ациклічному графі вага дуги між вершинами i та j визначається як:

$$c_{ij} = c_{0i} + c_{0j} + l_{ij}, \quad (24)$$

де c_{0i} , c_{0j} – відстані від депо до відповідних клієнтів;

l_{ij} – вартість проходження від вершини i до j згідно з отриманим маршрутом комівояжера.

Таким чином, кожна дуга в графі представляє можливість побудови окремого маршруту для підмножини клієнтів, а задача зводиться до пошуку оптимального розбиття глобального маршруту на підмаршрути з найменшою сумарною вартістю.

Як показано в [20], у випадку, коли всі клієнти мають одиничну потребу в товарі, запропонований метод є асимптотично оптимальним. Це означає, що зі збільшенням розміру задачі якість розв'язання прямує до оптимального.

Однак у випадках, коли потреба в товарі є довільною, ефективність методу знижується. Як зазначено у [21], за таких умов асимптотична оптимальність не гарантується, за винятком окремих тривіальних ситуацій (наприклад, коли всі клієнти мають однакові або пропорційні вимоги).

4.3. Класичні поліпшуючі алгоритми

Поліпшуючі алгоритми є важливим класом методів для вдосконалення вже отриманих (початкових) рішень у ЗМТ. Їхня мета – покращити наявне рішення шляхом локальних або глобальних модифікацій маршрутів з урахуванням заданих обмежень.

Залежно від підходу до структури розв'язання, поліпшуючі алгоритми умовно поділяють на два типи.

1. Оптимізація окремого маршруту. У цьому випадку обробляється один маршрут незалежно від інших. До нього можуть бути застосовані стандартні алгоритми локальної оптимізації, розроблені для ЗК – такі як *2-opt*, *3-opt*, *or-opt*, *insertion*, *exchange* тощо.

2. Оптимізація множини маршрутів. За цього підходу алгоритми аналізують і змінюють структуру всієї множини маршрутів. Це передбачає, зокрема, обміни вершинами або фрагментами маршрутів між різними транспортними засобами, що дозволяє досягати значного покращення загальної вартості розв'язання. Такі методи вимага-

ють урахування глобальних обмежень, зокрема вантажопідйомності, максимальної довжини маршруту, часових вікон тощо.

4.3.1. Оптимізація окремого маршруту

Більшість алгоритмів локального вдосконалення для ЗК ґрунтуються на використанні так званих *L-opt* операцій, запропонованих Ліном у [9]. Цей підхід полягає у видаленні *L* ребер зі шляху та подальшому повторному з'єднанні *L* отриманих сегментів у всіх можливих комбінаціях. Якщо серед новоутворених маршрутів знайдено такий, що має меншу вартість, зміни вносяться до розв'язання. Процес триває до досягнення локального мінімуму, тобто стану, за якого подальше покращення неможливе без погіршення поточного розв'язання.

Перевірка *L*-оптимальності має експоненційну складність:

$$O(n^L), \quad (25)$$

де *n* – кількість вершин у маршруті.

У роботі [22] Лін і Керніган запропонували вдосконалений метод, у якому значення *L* змінюється динамічно під час пошуку. Цей адаптивний підхід дозволяє уникнути надмірних обчислень у випадках, коли покращення можливе за менших значень *L*, і, водночас, досліджувати складніші перестановки за потреби.

За спрощеною версією *3-opt* її суть полягає у переміщенні послідовностей із 1, 2 або 3 суміжних вершин на іншу позицію в межах того самого маршруту. Завдяки своїй обмеженості, цей метод дозволяє значно скоротити обчислювальні витрати.

Часова складність перевірки *Or*-оптимальності відповідає (23).

У [16] запропоновано обмежену форму *4-opt* алгоритму, що отримала назву *4-opt*. Цей підхід використовує спеціальні правила вибору кандидатів на перестановку, що дозволяє знизити складність перевірки до:

$$O(mn^2), \quad (26)$$

де *m* – кількість маршрутів у задачі.

У дослідженні [23] було здійснено порівняльний аналіз різних варіантів локальної оптимізації. Результати показали, що алгоритм Ліна–Кернігана забезпечує найкращі результати в середньому, поєд-

нуючи гнучкість, ефективність і здатність виходити з локальних мінімумів.

4.4. Алгоритм Османа – пошук з виключеннями

Пошук з виключеннями (*Tabu Search*) – це потужна стратегія розв’язання задач комбінаторної оптимізації, яка зарекомендувала себе як ефективний метод подолання локальних мінімумів. Основи цієї техніки були закладені в класичних роботах [24]. Зокрема, Осман (*Osman*) у [25] успішно застосував пошук з виключеннями до ЗМТ, запропонувавши адаптацію цієї метаевристики з урахуванням специфіки проблеми та відповідних обмежень.

Подібно до імітаційного відпалу, алгоритм пошуку з виключеннями має здатність виходити за межі локального мінімуму, що є критично важливим для задач із великою кількістю допустимих, але не глобально оптимальних рішень.

Ключовим елементом методу є оцінювальна функція, яка формується на основі значення початкової цільової функції (наприклад, довжина маршруту або загальна вартість), а також поточного стану списку заборон (*tabu list*) – механізму, що запам’ятовує нещодавно виконані переміщення (ходи) або їхні характеристики, тимчасово забороняючи повторне їх використання.

На кожному ітераційному кроці зі списку доступних рішень $S' \in N_1(S)$, де $N_1(S)$ – околу поточного розв’язання S , обирається таке, що максимізує оцінювальну функцію, навіть якщо це не приводить до негайного покращення цільового значення.

Однією з проблем локального пошуку є циклічне повернення до раніше відвіданих рішень, особливо у випадках, коли рух в околах не дає суттєвого прогресу. Алгоритм *Tabu Search* ефективно уникає цього завдяки табу-списку, який зберігає інформацію про щойно виконані кроки і забороняє їх повторне виконання протягом певного часу (або кількості ітерацій).

Ця особливість дозволяє алгоритму підтримувати напрямок пошуку, зберігаючи динаміку навіть у випадках тимчасових погіршень рішення, що в підсумку сприяє знаходженню глобально кращих результатів.

Для ефективного застосування пошуку з виключеннями (*Tabu Search*) необхідно чітко визначити низку складових, які формують логіку роботи алгоритму, зокрема:

– стратегія заборони (*tabu definition*) визначає, які саме характеристики поточного кроку (перестановки, переміщення, обміну тощо) вносяться до списку виключень (*tabu list*). Це можуть бути конкретні вершини або ребра, які були переміщені, тип операції (наприклад, *swap*, *relocate*), позиції в маршрутах тощо;

– стратегія дозволу (*tabu tenure and aspiration*) визначає, коли й за яких умов елементи видаляються зі списку виключень. Зазвичай це відбувається після фіксованої кількості ітерацій (довжини списку), або в разі виконання правила дозволу (*aspiration criterion*), наприклад, якщо нове рішення краще за всі попередні;

– стратегія керування пошуком (*search control policy*) визначає загальну логіку проходження простору рішень. Вона включає правила формування околу $N_i(S)$, а також принцип вибору наступного допустимого розв'язання серед кандидатів «найкраще допустиме» (*best admissible*) – обирається найкраще рішення, яке не порушує табу-обмежень; «перше допустиме» (*first admissible*) – обирається перше зі знайдених рішень, яке є допустимим. Така стратегія дозволяє гнучко балансувати між якістю та швидкістю пошуку;

– критерій зупинки (*termination condition*) визначає, коли припиняється робота алгоритму. Типові варіанти досягнення фіксованої кількості ітерацій, відсутність покращення протягом певного числа кроків, перевищення граничного часу виконання.

У деяких задачах, особливо складних або нестандартних, виникає потреба у введенні додаткових стратегій адаптації, зумовлених специфікою прикладної постановки. Це можуть бути, динамічна зміна довжини *tabu*-списку, адаптивні правила дозволу (*aspiration*), специфічні евристичні формування околу $N_i(S)$, комбінація *Tabu Search* з іншими методами (гібридні підходи) тощо.

Подібні розширення дозволяють значно підвищити ефективність методу у складних варіантах ЗМТ [24].

4.4.1. Поняття околу розв'язання

Одним із ключових аспектів реалізації алгоритму пошуку з виключеннями (*Tabu Search*) є визначення околу розв'язання $N_i(s)$, тобто множини кандидатів, які можуть бути розглянуті як наступний крок пошуку на ітерації i .

У своїй реалізації Осман пропонує формувати околи за допомогою механізму генерації L взаємообмінів (*L-exchange mechanism*), який виконується в наступний спосіб.

1. Вибір маршрутів випадковим або цілеспрямованим чином обираються дві маршрути p та q зі множини існуючих маршрутів.

2. Формування підмножин визначаються підмножинами вершин

$$S_p \subseteq R_p, \quad S_q \subseteq R_q \quad (27)$$

таких, що

$$|S_p| \leq L \quad \text{та} \quad |S_q| \leq L, \quad (28)$$

де R_p, R_q – множини вершин маршрутів p і q відповідно.

3. Здійснюється обмін множинами S_p і S_q між маршрутами, за умови дотримання обмежень задачі.

У разі, якщо одна з підмножин порожня, процедура зводиться до переміщення вершин з одного маршруту в інший (тобто операції *relocate*).

Оскільки кількість можливих пар маршрутів, а також комбінацій підмножин S_p і S_q експоненційно зростає зі збільшенням L , автор пропонує обмежити значення L до 1 або 2. Таке спрощення дозволяє зменшити обчислювальні витрати та забезпечити ефективну генерацію околених в рамках допустимого часу.

Запропонований підхід до формування околу призначений для симетричних варіантів ЗМТ, зокрема тих, де кількість транспортних засобів не фіксується наперед і може змінюватися в процесі оптимізації.

4.4.2. Стратегія заборони

Стратегія заборони (*Tabu Strategy*) є ключовим механізмом у алгоритмі пошуку з виключеннями, який забезпечує контроль над простором пошуку, запобігаючи поверненню до раніше відвіданих рішень. Вона базується на правилах заборони (*tabu rules*), які фіксують атрибути певних дій і на їхній основі визначають, чи є поточний хід дозволеним.

У загальному випадку для запобігання зацикленню необхідно зберігати всю історію розв'язань, що є ресурсомістким як з точки зору пам'яті, так і процесорного часу. Щоб уникнути таких витрат, Ос-

ман запропонував структуровану реалізацію списку заборон, яка зберігає атрибути рішень замість повних конфігурацій.

Список виключень реалізується у вигляді матриці `TABL` розміром $(n + 1) \times v$, де n – кількість вершин у задачі, v – кількість маршрутів R_p , кожен рядок відповідає вершині.

Запис `TABL(i, p)` зберігає номер ітерації, на якій вершину i було вилучено з маршруту R_p . На початку роботи всі елементи матриці ініціалізуються максимально від'ємним значенням, що дозволяє уникнути хибного спрацьовування умов заборони.

Правило заборони на основі атрибутів. Кожен хід у пошуку описується як обмін між двома вершинами:

$$(i, R_p) \leftrightarrow (j, R_q), \quad (29)$$

що означає переміщення вершини i з маршруту R_p до маршруту R_q і навпаки – вершини j з R_q до R_p .

Ці пари утворюють атрибути ходу, які використовуються для формування заборони. Хід вважається забороненим, якщо спроба повторно повернути вершини i та j у відповідні маршрути R_p і R_q відбувається раніше, ніж дозволено за умовами списку `TABL`.

Переваги підходу:

- мінімальні витрати пам'яті – зберігаються лише окремі атрибути, а не повні маршрути;
- швидка перевірка заборон – оцінка дозволеності ходу виконується за постійний час;
- гнучкість – дозволяє формулювати складні правила заборони без значного ускладнення структури даних.

4.4.3. Стратегія дозволу (видалення зі списку виключень)

Стратегія дозволу, яку також називають стратегією звільнення (*aspiration strategy*), відповідає за визначення моменту, коли заборонений хід стає знову дозволеним. У базовому варіанті ця стратегія реалізується шляхом автоматичного видалення записів із списку виключень (*tabu list*) після того, як минає певна кількість ітерацій.

Цей інтервал контролюється параметром t_s , що позначає довжину табу-списку, тобто кількість ітерацій, протягом яких хід вважається забороненим. Значення t_s може бути сталим, адаптивним (залежним від перебігу пошуку) або визначеним за емпіричною формулою, що враховує розмір задачі та властивості обраної стратегії пошуку.

На ітерації k хід, що відповідає перестановці $(i, R_p) \leftrightarrow (j, R_q)$, вважається дозволеним, якщо виконується

$$k - TABL(i, p) \geq ts \quad \text{або} \quad k - TABL(j, q) \geq ts. \quad (30)$$

Інакше кажучи, хід вважається забороненим, якщо одночасно виконуються обидві умови:

$$k - TABL(i, p) < ts \quad \text{або} \quad k - TABL(j, q) < ts. \quad (31)$$

Ці перевірки є надзвичайно ефективними, оскільки зводяться до двох простих арифметичних операцій, що особливо важливо у задачах великої розмірності та при довгих табу-списках.

На відміну від класичної реалізації табу-списку як циклічного буфера, де потрібне явне керування чергою та очищення застарілих записів, структура `TABL` забезпечує:

- автоматичне оновлення статусу ходів на основі номера ітерації;
- простоту реалізації та мінімальні витрати пам'яті;
- швидкий доступ до інформації про заборонені операції.

Це робить підхід Османа з використанням `TABL` особливо придатним для складних варіантів ЗМТ, де розмірність задачі та кількість маршрутів можуть бути значними.

4.4.4. Стратегія вибору

Стратегія вибору (*selection strategy*) є критично важливим компонентом алгоритму пошуку з виключеннями (*Tabu Search*). Її завдання – визначити найкращий хід із множини кандидатів в околі поточного розв'язання, з урахуванням змісту списку виключень (*tabu list*) та критерію найкращого розв'язання (*aspiration criterion*).

Хід $S' \in N_i(S)$ вважається допустимим, якщо він не порушує жодного табу-обмеження, або він порушує табу, але відповідає критерію покращення найкращого розв'язання.

Ця подвійна перевірка – через заборонні правила та аспіраційний критерій – одночасно запобігає зацикленню і водночас не блокує прогрес пошуку.

Критерій найкращого розв'язання (*Aspiration Criterion*). Оскільки табу-обмеження ґрунтуються лише на атрибутах рішень, а не на їхній якісній оцінці, іноді допустиме рішення може бути помилково забо-

роненим. Для подолання цієї ситуації вводиться критерій. Нехай S_b – поточне найкраще знайдене розв'язання. Якщо кандидат $S' \in N_i(S)$ є забороненим, але виконується умова

$$C(S') < C(S_b), \quad (32)$$

тобто нове рішення краще за поточне найкраще, тоді хід вважається допустимим незалежно від табу-статусу.

У рамках пошуку з виключеннями розглядаються дві основні стратегії вибору ходу з околу.

1. *TS + BA (best admissible)* алгоритм переглядає всі допустимі рішення в околі та обирає те, що забезпечує найкраще значення цільової функції – або найбільше покращення, або найменше погіршення. Ця стратегія гарантує вибір оптимального варіанту з множини допустимих, проте потребує повного перегляду околу, що може бути обчислювально затратним.

2. *TS + FBA (first best admissible)* – це жадібна (*greedy*) версія попередньої стратегії. Пошук зупиняється при першому знайденому допустимому рішенні, яке покращує цільову функцію, або (за відсутності покращень) забезпечує мінімальне погіршення. Цей підхід дозволяє значно пришвидшити обчислення, але іноді може призводити до менш якісних результатів порівняно з *TS + BA*.

4.4.5. Спеціальна структура даних для стратегії «найкращий допустимий»

Для ефективної реалізації стратегії «найкращий допустимий» (*Best-Admissible, BA*) у межах алгоритму пошуку з виключеннями (*Tabu Search*) доцільним є застосування спеціальної структури даних, яка дозволяє зменшити обчислювальні витрати при перегляді кандидатів з околу $N_i(S)$.

Структура складається з двох матриць: 'BSTM – квадратна матриця розміром $v \times v$; 'RECM – матриця розміром $v(v-1)/2 \times 2$, де v – кількість маршрутів у поточному розв'язанні.

Верхня трикутна частина $\text{'BSTM}(p, q)$ (для $1 \leq p < q \leq v$) зберігає значення найкращого покращення цільової функції Δ_{pq} , яке може бути досягнуто при обміні вершини $i \in R_p$ з вершиною $j \in R_q$. Якщо допустимого ходу не існує – записується велике позитивне значення.

Нижня трикутна частина $\text{`BSTM}(q, p)$ містить індекси l , що вказують на відповідні рядки в матриці `RECM , у яких зберігаються атрибути ходу

$$\text{RECM}(l,1)=i, \quad \text{RECM}(l,2)=j, \quad (33)$$

де i та j – номери вершин, що беруть участь в обміні.

На першій ітерації виконується повний перегляд околу $N_i(S)$, і обчислюються всі можливі зміни цільової функції для пар маршрутів.

У наступних ітераціях відбувається оновлення лише обмеженої кількості записів – це стосується лише маршрутів, які були змінені в результаті останнього ходу.

Зокрема, якщо новий хід вплинув на маршрути R_p та R_q , то необхідно перерахувати лише 2ν пар маршрутів:

- $(R_p, R_m), \forall m \neq p;$
- $(R_q, R_r), \forall r \neq q.$

Це суттєво знижує складність у порівнянні з повним переглядом $\nu(\nu+1)/2$ пар, що був би необхідним без використання цієї оптимізації.

Переваги:

- економія часу на кожній ітерації;
- мінімальні втрати пам'яті;
- збереження якості рішень, оскільки вибір найкращого ходу залишається точним.

Слід зазначити, що алгоритм $TS + FBA$ (*first best admissible*) не може використовувати описану структуру даних, оскільки в ньому околи формуються динамічно, розмір околу змінюється від ітерації до ітерації, кандидати перевіряються на льоту, до моменту знаходження першого допустимого ходу.

4.4.6. Загальний вигляд алгоритму

Нижче подано узагальнену схему реалізації алгоритму пошуку з виключеннями (*Tabu Search*) в інтерпретації Османа, адаптовану для ЗМТ.

Крок 1. Ініціалізація. Формується початкове розв'язання S з використанням алгоритму Кларка–Райта. Якщо використовується стратегія «найкращий допустимий» ($TS + BA$), виконується один цикл повного перегляду околу для ініціалізації матриць `BSTM і `RECM .

Визначається параметр t_s – довжина списку виключень. Створюється і заповнюється матриця `TABL`, що зберігає інформацію про заборонені ходи. Встановлюється критерій зупинки (наприклад, максимально допустима кількість ітерацій без покращення).

Початковому рішенню надається статус поточного найкращого розв’язання $S_b := S$, а номер ітерації його знаходження встановлюється як $k_b := 0$. Ініціалізується лічильник ітерацій: $k := 1$.

Крок 2. Вибір і прийняття ходу. З множини кандидатів $N_i(S)$ обирається допустиме розв’язання S' згідно з обраною стратегією ($TS + BA$ або $TS + FBA$). Атрибути ходу (наприклад, пари (i, R_p)) заносяться до матриці `TABL`. Поточне розв’язання оновлюється: $S := S'$, ітераційний лічильник зростає: $k := k + 1$. Якщо

$$C(S') < C(S_b), \quad (34)$$

тобто нове розв’язання покращує найкраще знайдене – оновлюється $S_b := S'$ та фіксується ітерація $k_b := k$.

Якщо використовується стратегія $TS + BA$, виконується часткове оновлення матриць `BSTM` і `RECM` відповідно до змін у маршрутах.

Крок 3. Перевірка критерію зупинки. Якщо виконується умова $kk_b >$ порогове значення для зупинки, тобто з моменту останнього покращення пройшло занадто багато ітерацій – перехід до кроку 4. Інакше – повернення до кроку 2.

Крок 4. Завершення роботи. Алгоритм припиняє виконання. Виводиться найкраще знайдене розв’язання S_b як результат роботи пошуку.

4.4.7. Імітований відпал

Метод імітованого відпалу (*Simulated Annealing*) – це стохастичний евристичний алгоритм, призначений для пошуку глобального екстремуму в задачах дискретної оптимізації. Його головною перевагою є здатність долати локальні мінімуми цільової функції, завдяки чому він продовжує пошук навіть після досягнення локального екстремуму. У сприятливих умовах це дозволяє знайти глобально найкраще розв’язання.

Хоча метод імітованого відпалу є універсальним і застосовується до широкого кола задач, ЗМТ є однією з тих, де він продемонстрував високу ефективність. Серед багатьох реалізацій цього методу найус-

піднішою вважається версія алгоритму Османа, який також розробив ефективну реалізацію пошуку з виключеннями.

Назва «модельований відпал» походить із термодинаміки – конкретно з процесу повільного охолодження розплавленого металу, під час якого атоми поступово займають енергетично вигідні позиції. Це дозволяє кристалічній решітці металу наблизитися до стану глобального енергетичного мінімуму.

Цей фізичний процес було адаптовано до задач оптимізації через аналогію між енергією фізичної системи та значенням цільової функції.

У всіх варіантах імітованого відпалу використовується поняття околу розв'язання $N(x_t)$, що визначає множину рішень, які можна отримати з поточного розв'язання x_t шляхом одного або кількох елементарних перетворень (наприклад, обміну вершин, вставки, перестановки маршрутів тощо). Конкретний тип перетворень залежить від задачі та реалізації.

На ітерації t випадковим чином обирається розв'язання $x \in N(x_t)$, якщо воно покращує цільову функцію $f(x) < f(x_t)$, тоді приймається безумовно: $x_{t+1} := x$. Якщо розв'язання гірше: $f(x) > f(x_t)$, то воно приймається з певною ймовірністю p_t , яка залежить від різниці у вартості та поточного параметра температури θ_t .

Типове визначення ймовірності прийняття гіршого розв'язання:

$$p_t = \exp\left(-\frac{f(x) - f(x_t)}{\theta_t}\right). \quad (35)$$

Зміна температури θ_t у часі називається графіком охолодження (*cooling schedule*). У класичному варіанті $\theta_1 > 0$ – початкове значення температури, після кожної ітерації:

$$\theta_{t+1} = \alpha \cdot \theta_t, \quad \text{де } 0 < \alpha < 1, \quad (36)$$

таким чином, θ_t є спадною дискретною функцією від t .

Зі зменшенням температури знижується ймовірність прийняття гірших розв'язань, відпал поступово переходить від глобального до локального пошуку, наближаючись до «замороженого» стану, в якому зберігається лише найкраще знайдене рішення.

4.4.8. Алгоритм Османа

Серед різних варіантів алгоритму імітованого відпалу, розглянутих раніше, найбільш ефективним виявився підхід, запропонований Османом [25]. Його реалізація демонструє помітно вищу продуктивність порівняно з іншими методами.

Цей підхід передбачає:

- використання більш досконалого методу пошуку початкового рішення;
- адаптацію параметрів у ході попередньої (пробної) фази;
- глибший аналіз околу рішень;
- застосування спеціально розробленого методу охолодження.

Околу рішень у цьому алгоритмі визначаються аналогічно до тих, що використовуються в алгоритмі виключень Османа.

Перша фаза (підготовчий етап).

1. Формується початкове рішення за допомогою евристики Кларка-Райта.

2. Здійснюється перегляд околу рішень за схемою L -взаємообмінів, і у разі виявлення покращень вони впроваджуються.

Фаза завершується, якщо жодні обміни більше не покращують розв'язання.

Друга фаза (імітація відпалу).

1. На основі результату першої фази ще раз застосовується схема L -взаємообмінів обчислюються Δ_{max} і Δ_{min} – відповідно максимальне й мінімальне можливі покращення цільової функції S – загальна кількість можливих обмінів.

Початкові значення параметрів: $\theta_1 = \Delta_{max}$, $s = 0$, $k = 1$, $k_s = 3$, $t = 1$, $t^* = 1$ (номер ітерації, де зафіксовано найкраще розв'язання), x_1 – поточне рішення, $x^* = x_1$ – найкраще знайдене рішення.

2. Перевіряються околу x_t за схемою L -взаємообмінів.

Якщо знайдено рішення x , для якого $f(x) < f(x_t)$, тоді $x_{t+1} = x$.

Якщо при цьому $f(x) < f(x^*)$, оновлюється: $x^* = x$, $t^* = t$.

Якщо покращення не виявлено, тоді з околу x_t обирається найкраще з доступних рішень x з ймовірністю p_t : $x_{t+1} = x$ з ймовірністю $1 - p_t$: $x_{t+1} = x_t$, де p_t обчислюється за формулою (35). Якщо $x_{t+1} = x_t$, встановлюється $s = 1$.

3. Оновлення температури θ .

Якщо $s = 1$

$$\theta_{t+1} = \max \left\{ \frac{\theta_t}{2}, \theta^* \right\}, \quad s = 0, \quad k = k + 1, \quad (37)$$

інакше

$$\theta_{t+1} = \frac{\theta_t}{[n(3 + nS)\Delta_{max}\Delta_{min}]}. \quad (38)$$

Далі $t = t + 1$. Якщо $k = k_S$, алгоритм зупиняється. В іншому випадку – повертаємось до кроку 2.

Охолодження у варіанті Османа не відповідає класичному підходу, температура не змінюється через кожну ітерацію також вона не є безперервною функцією часу. Натомість вона оновлюється лише тоді, коли поточне рішення не змінюється, або ділиться навпіл, або повертається до значення температури, на якому востаннє було досягнуто покращення.

4.5. Генетичний алгоритм

Генетичний алгоритм (*genetical gorithm*) – це підхід до розв’язання задач, що імітує процеси природної еволюції. Вперше ця концепція була представлена в [26], однак лише через майже десятиріччя вона здобула широке визнання серед науковців та дослідників.

У своїй основі генетичний алгоритм є універсальною евристикою, що вимагає мінімальної інформації про предметну область. Завдяки цьому його можна ефективно застосовувати до слабо формалізованих задач, для яких традиційні чи спеціалізовані методи виявляються неефективними або малопродуктивними [27].

Принцип роботи генетичного алгоритму полягає у формуванні та еволюційному розвитку популяції рішень, які представляються у вигляді бітових рядків (*bit strings*), або ж так званих «хромосом». Кожна хромосома кодує потенційне розв’язання задачі в певній формі. Еволюція відбувається шляхом застосування еволюційних операторів, які моделюють процеси живої природи: селекцію, кросовер (схрещування), мутацію та інші механізми спадковості.

4.5.1. Основний вигляд генетичного алгоритму

Опишемо основну схему роботи генетичного алгоритму. Його виконання починається з деякої початкової популяції хромосом

$X_1 = \{x_1, \dots, x_N\}$, яка формується за допомогою генератора випадкових чисел. На кожній ітерації $t = 1, \dots, T$ виконуються k разів кроки з 1 по 3 (де $k \leq N/2$), після чого виконується крок 4.

1. Вибираються дві батьківські хромосоми з множини X_t .

2. На основі двох батьківських хромосом генеруються двоє нащадків за допомогою оператора схрещування (*crossover operator*).

3. Для кожного нащадка виконується операція мутації (з малою ймовірністю).

4. Створюється нове покоління X_{t+1} з X_t шляхом видалення $2k$ найгірших рішень із X_t та заміни їх на $2k$ нових нащадків.

У наведеному алгоритмі параметр T – це кількість поколінь, а k – кількість вибірок у кожному поколінні. Найкраще розв'язання, отримане за T поколінь, вважається остаточним результатом роботи алгоритму.

На кроці 1 вибір батьківських хромосом імовірно схиляється до вибору найкращих варіантів. На кроці 2 нащадок генерується шляхом схрещування, тобто поєднання бітових рядків (представлення хромосом – тобто кандидатних рішень – у вигляді послідовностей бітів), що належать батькам. Кожен нащадок може бути дещо змінений на кроці 3 – шляхом зміни значень бітів у бітовому рядку з малою ймовірністю для кожної бітової позиції.

Очікується, що випадковим чином створена початкова множина рішень буде покращена в процесі, описаному вище. Такого висновку дотримуються деякі теоретичні дослідження [28].

4.5.2. Застосування генетичного алгоритму для задач упорядкування

Класичний варіант генетичного алгоритму, представлений раніше, не є придатним для задач упорядкування (*sequencing problems*), до яких належать, зокрема, ЗК та ЗМТ. Основна причина – невідповідність бітового представлення природи таких задач. Замість цього доцільно використовувати представлення у вигляді послідовностей чисел, де кожне число відповідає певній вершині, а їхній порядок – порядку відвідування у маршруті. При цьому остання вершина замикається на першу, формуючи цикл.

У таких задачах виникає потреба у спеціалізованих операторах схрещування та мутації, які коректно обробляють впорядковані структури та гарантують формування допустимих нащадків.

Пряме застосування класичного алгоритму без адаптації до задач упорядкування спричиняє численні труднощі. У відповідь на ці виклики було запропоновано низку спеціалізованих варіантів операторів, що враховують специфіку послідовностей [29]. Одним із найвідоміших є оператор «упорядкованого схрещування» (*ordered crossover*) [30], який працює наступним чином.

1. Випадковим чином обираються дві позиції в батьківському хромосомному рядку, які визначають межі фрагмента.

2. Відповідний підрядок копіюється в нащадка без змін.

3. Решта позицій заповнюється вершинами з другого батьківського рішення – у тому порядку, в якому вони в ньому зустрічаються, починаючи з другої обраної позиції, уникаючи повторів і зберігаючи циклічну замкнутість маршруту.

Другого нащадка можна згенерувати аналогічним чином, просто помінявши місцями батьківські хромосоми.

Перевага цього підходу полягає в тому, що нащадок зберігає відносний порядок вершин, успадкований від батьків. Існують також інші оператори, які орієнтуються на збереження порядку самих вершин [31] або навіть порядку дуг (зв'язків між вершинами) у батьківських рішеннях.

Хоча генетичні алгоритми активно застосовуються для ЗК [29] і більш складних варіантів ЗМТ – з часовими вікнами чи обмеженнями на порядок обслуговування [32], досліджень, присвячених саме базовій формі ЗМТ, поки що небагато. Це пояснюється тим, що ЗК – добре вивчена канонічна задача комбінаторної оптимізації, яка слугує зручною платформою для тестування нових алгоритмічних ідей. Натомість обробка складних обмежень у ЗМТ вимагає спеціалізованих механізмів, які важко реалізувати в межах універсальних підходів.

Втім, генетичні алгоритми демонструють високу ефективність саме у випадках складних обмежень, оскільки вони не потребують глибокого моделювання предметної області. На сьогодні доведено, що ці алгоритми мають значний потенціал у розв'язанні ЗМТ, особливо за умов ускладнень. Зокрема, існують успішні реалізації для ЗМТ з часовими вікнами, ЗМТ з обмеженням вантажопідйомності, у яких вивчали вплив різних параметрів на якість отриманих рішень.

На відміну від ЗК, у ЗМТ розв'язок складається з декількох маршрутів, тому класичне представлення хромосоми потребує модифікації. Депо включається в хромосому кілька разів і слугує роздільником між маршрутами.

В алгоритмі було адаптовано оператор схрещування *PMX* [31] та оператор мутації *RAR*. Ці оператори застосовуються доти, доки не буде згенеровано достатню кількість допустимих рішень, які задовольняють усім обмеженням; непридатні нащадки відкидаються.

Крім того, до найкращих індивідів поточної популяції застосовується оператор локального спуску (*local descent operator*), який базується на чотирьох типах локальних змін у маршрутах. У дослідженнях показано, що включення цього оператора суттєво підвищує якість розв'язків.

У плані якості результатів генетичний алгоритм є порівняним із алгоритмом імітованого відпалу та пошуком з виключеннями. Хоча він вимагає трохи більше процесорного часу, це компенсується його гнучкістю та здатністю до адаптації під складні обмеження. Водночас порівняння з алгоритмами на основі мурашиних колоній чи нейромереж поки що відсутні.

У [33] запропоновано цікавий варіант генетичного алгоритму, орієнтований на ЗМТ із часовими вікнами. Особливість підходу полягає в тому, що спочатку розв'язується ЗК для повної множини вершин, після чого застосовується стратегія розбиття маршруту.

У цьому випадку потрібно явно позначати депо в хромосомі, розбиття на маршрути виконується за допомогою процедури замітання, яка починається з першої вершини хромосоми, перехід до нового маршруту ініціюється, коли перевищується допустима довжина або вантажопідйомність транспортного засобу. Такий підхід дозволяє перетворити будь-який генетичний ланцюжок у коректне рішення ЗМТ.

У реалізації з [33] використано оператор схрещування та оператор мутації, що базується на випадковому обміні двох вершин. Надалі цей оператор замінено на застосування алгоритму *2-opt*, який виконується з імовірністю 0,15 для кожної вершини, що дозволило покращити ефективність пошуку.

У [34] запропоновано метод кодування на основі випадкових ключів, у якому кожен елемент пов'язується з випадково згенерованим числом. Рішення формується шляхом сортування цих чисел.

Для ЗМТ кожна вершина асоціюється з випадковим цілим числом, що вказує на номер транспортного засобу, який її обслуговує дійсним числом у діапазоні $(0,1)$, що визначає порядок обслуговування.

Після сортування для кожного маршруту формується послідовність вершин. Цей підхід подається як демонстрація можливості, проте не досліджений глибоко.

4.6. Метаевристики

Розглянемо найпомітніші приклади так званих метаевристичних алгоритмів, які отримали широке застосування в ЗМТ. Усі ці методи, за винятком пошуку з виключеннями (*Tabu Search*), були розроблені на основі вивчення різноманітних природних процесів – як біологічних, так і фізичних. Зокрема:

- організація поведінки мурашиних колоній;
- еволюційні моделі розмноження в популяціях;
- фізичні процеси охолодження (відпалу) металів;
- слугували джерелом натхнення для створення відповідних евристичних моделей пошуку.

Однією з характерних рис (а часто й основною складністю) метаевристичних алгоритмів є наявність великої кількості керуючих параметрів, значення яких істотно впливають на якість розв'язання. У реальних умовах це означає, що:

- параметри потребують ретельного налаштування перед запуском;
- у багатьох випадках налаштування має бути виконане окремо для кожного нового набору вхідних даних;
- використання таких методів вимагає високої кваліфікації фахівця, особливо при застосуванні готових програмних реалізацій.

Ці особливості обмежують застосування метаевристик у прикладних задачах, де пріоритетом є автоматизованість та стабільність алгоритмів.

Утім, основною перевагою метаевристичних методів є їхня здатність долати локальні мінімуми у просторі розв'язків. Завдяки цьому алгоритм може дослідити кілька локальних мінімумів, обрати найкращий з-поміж них, тим самим покращити якість кінцевого розв'язання у порівнянні з класичними евристиками.

Натомість така здатність до глобального пошуку зазвичай супроводжується зростанням обчислювальної складності – як за часом, так і за ресурсами.

Описані тут метаевристичні алгоритми становлять інтерес з кількох точок зору. Хоча пошук з виключеннями (*Tabu Search*) є одним із

найбільш детально досліджених підходів, це жодним чином не знижує цінність і привабливість інших методів, зокрема тих, що засновані на моделюванні природних процесів.

На думку низки дослідників, такі методи, як генетичні алгоритми так і алгоритми на основі колоній мурах, попри свою популярність, залишаються відносно слабо дослідженими у контексті ЗМТ. Водночас вони мають значний потенціал для розвитку. Очікується, що подальше вдосконалення цих алгоритмів, зокрема шляхом адаптації до специфіки ЗМТ, може суттєво підвищити якість розв'язань.

Особливої уваги заслуговує генетичний алгоритм, який відрізняється тим, що практично не покладається на інформацію про структуру задачі. Такий підхід є надзвичайно перспективним у ситуаціях, коли ЗМТ включає складні або нестандартні обмеження, з якими не справляються навіть найефективніші на сьогодні методи. Це робить генетичні алгоритми потужним інструментом для побудови універсальних або спеціалізованих евристик, здатних працювати в умовах високої комбінаторної складності.

4.6.1. Алгоритм на основі мурашиних колоній

Мурашині колонії (*Ant Systems*) – ще один приклад природного явища, що надихнув на створення нового підходу до розв'язання задач комбінаторної оптимізації. Ідея алгоритму виникла внаслідок спостережень за поведінкою реальних мурах під час пошуку їжі. Рухаючись докільцям, мурахи залишають на шляху феромонні сліди – хімічні мітки, кількість яких залежить від довжини маршруту та якості знайденої їжі.

Ці сліди діють як сигнали для інших мурах, які згодом частіше обирають ті маршрути, де концентрація феромонів вища. У такий спосіб формується ефективна система колективного пошуку, де інформація про вдалі шляхи акумулюється та підсилюється з часом.

У роботі [35] було запропоновано алгоритм на основі мурашиних колоній, який моделює цей механізм для дослідження простору рішень задач оптимізації. У цій моделі уявні «мурахи» імітують реальний процес пошуку, а значення цільової функції відповідає якісним характеристикам їжі у природному аналозі.

Для ілюстрації основних ідей розглянемо застосування алгоритму до ЗК. Кожній дузі (v_i, v_j) у графі призначаються два параметри:

- видимість η_{ij} – статичний параметр, обернено пропорційний довжині дуги (тобто чим коротше ребро, тим вища видимість);
- рівень феромонів τ_{ij} – динамічний параметр, який оновлюється під час виконання алгоритму.

На кожній ітерації n мурах формують маршрути, починаючи з усіх вершин графа. Рішення будується на основі ймовірнісної евристики найближчого сусіда, у якій комбінуються:

- значення видимості η_{ij} ;
- поточний рівень феромонів τ_{ij} .

Мурахи з більшою ймовірністю обирають ті ребра, які є короткими та мають високу феромонну мітку.

Після побудови всіх маршрутів, рівень феромонів на ребрах оновлюється з урахуванням випаровування, що запобігає надмірному зосередженню на ранніх, не завжди оптимальних рішеннях. Для цього використовується коефіцієнт випаровування ρ , де $0 \leq \rho \leq 1$.

Феромонна мітка на дузі (v_i, v_j) оновлюється за формулою:

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{ij} + \sum_{k=1}^N \Delta\tau_{ij}^{(k)}, \quad (39)$$

де N – кількість мурах.

$\Delta\tau_{ij}^{(k)} = \frac{1}{L_k}$, якщо мураха k пройшла дугою (v_i, v_j) у своєму маршруті довжиною L_k .

Цей процес повторюється впродовж заданої кількості ітерацій. Завдяки механізму випаровування, значення феромонів поступово зменшуються на менш привабливих маршрутах, дозволяючи алгоритму досліджувати нові варіанти та уникати передчасної конвергенції.

Аналіз наявного досвіду [36-38] дозволяє зробити низку узагальнень. Попри те, що алгоритм мурашиних колоній (АМК) іноді демонструє відмінні результати, загалом він програє за ефективністю іншим метаевристичним або спеціалізованим підходам, якщо не комбінується з додатковими локальними методами оптимізації.

На сьогодні лише три наукові роботи присвячено застосуванню АМК до ЗМТ. У першій роботі [39] запропоновано комбінований підхід, що поєднує класичний АМК, локальну *2-opt* оптимізацію, ймовірнісний механізм прийняття рішень, схожий на імітацію відпаду.

Алгоритм було протестовано лише на двох тестових випадках – із 30 та 60 вершинами, для яких вдалося знайти оптимальні

розв'язки. Проте подальших експериментів не проводилось, тому узагальнення щодо ефективності методу залишаються обмеженими.

Робота [40] присвячена розробці та вдосконаленню власного варіанта алгоритму. У першій версії методу АМК було поєднано з *2-opt* оптимізацією кожного маршруту перед оновленням феромонів враховано обмеження на вантажопідйомність транспортних засобів та інші вимоги при виборі наступної вершини.

У покращеній версії алгоритму були внесені наступні зміни.

1. Обмеження вантажопідйомності більше не використовується під час побудови маршруту, оскільки воно спричиняло високу обчислювальну складність. Натомість запроваджено параметризовану «видимість», що враховує показник економії.

2. На кожному кроці розглядається лише $[n/4]$ потенційних вершин для подальшого відвідування.

3. Лише 5 найкращих рішень на ітерацію використовуються для оновлення феромонних слідів, при цьому вага оновлення залежить від рангу рішення.

Ці модифікації дозволили суттєво зменшити обчислювальні втрати та покращити якість отриманих рішень.

Попри окремі успішні реалізації, загалом можна стверджувати, що АМК залишаються недостатньо вивченими у контексті ЗМТ. Потенціал цього підходу, особливо у поєднанні з локальними евристичними та адаптивними стратегіями, відкриває широкі можливості для подальших досліджень у цій сфері.

4.7. Нейронні мережі

Нейронні мережі (*Neural networks*) – це обчислювальна модель, яка складається з великої кількості взаємозв'язаних елементів, що імітують нейрони головного мозку. Кожен зв'язок між елементами характеризується ваговим коефіцієнтом, який визначає силу передавання сигналу від одного елемента до іншого.

У порівнянні з біологічними аналогами, штучні нейронні мережі виявляють властивості, подібні до людського навчання та сприйняття. Вони здатні навчатися на основі прикладів накопичувати досвід узагальнювати інформацію шляхом поступового коригування вагових коефіцієнтів.

Спочатку нейронні мережі були розроблені для задач, пов'язаних із проявами штучного інтелекту, таких як розпізнавання мовлення, де

класичні алгоритми обчислень виявлялися неефективними. Згодом їх почали застосовувати і для комбінаторних задач. Перші спроби у цьому напрямі зроблено в роботі [41]. Значну увагу було приділено ЗК, для якої було запропоновано кілька спеціалізованих підходів, зокрема:

- метод еластичних мереж (*Elastic Net*) [42];
- метод самоорганізовної карти (*Self-Organizing Map, SOM*) [43].

Ці методи помітно відрізняються від класичних архітектур нейронних мереж, однак виявилися більш ефективними, ніж пряме використання стандартних мереж.

Сенс обох підходів полягає у побудові деформованого шаблону, який адаптується до геометрії вхідних даних. Елементи мережі формують замкнене кільце, яке поступово деформується, підлаштовуючись до розташування вершин. Кожна вершина асоціюється з найближчим елементом кільця. Послідовність елементів кільця визначає маршрут обходу, тобто рішення задачі.

Таким чином, мережа сама формує порядок відвідування вершин, поступово вдосконалюючи топологію кільця, доки не буде досягнуто задовільного розв'язання задачі ЗК.

Хоча еластичні мережі та самоорганізовані карти добре зарекомендували себе у геометричних задачах, особливо для евклідової версії ЗК, їх застосування у більш складних задачах, таких як ЗМТ, суттєво ускладнюється.

Основна причина – відсутність вбудованих механізмів для врахування обмежень, зокрема обмежень на вантажопідйомність, часових вікон, послідовності обслуговування тощо.

Ці обмеження руйнують геометричну природу задачі, на якій ґрунтуються розглянуті підходи. Унаслідок цього нейромережеві методи втрачають ефективність при розв'язанні прикладних варіантів ЗМТ, де важливо враховувати реальні логістичні обмеження застосування нейронних мереж у ЗМТ. На сьогодні існує лише обмежена кількість спроб використання нейронних мереж для розв'язання ЗМТ. Більшість із них ґрунтується на застосуванні самоорганізованих карт *SOM* [44, 45].

Узагальнення моделей, що використовувалися для ЗК, до ЗМТ полягає в розширенні кількості деформованих шаблонів – по одному на кожен окремий маршрут. Зазвичай алгоритм функціонує з посту-

повим збільшенням кількості кілець (тобто маршрутів), доки не буде знайдено прийнятне рішення.

Оскільки одночасно функціонує кілька шаблонів-кілець, між ними виникає конкуренція за вершини, які необхідно обслуговувати. Це накладає додаткову складність на процес побудови рішення. Один із найбільш помітних підходів, розроблений у [46], було спеціально адаптовано для ЗМТ із обмеженням на вантажопідйомність транспортних засобів. Основна ідея алгоритму полягає в такому.

1. Ітеративний процес деформації шаблонів, який повторюється доти, доки існують вершини, близькі до елементів кільця. На кожному кроці переходять до наступної вершини для обробки для кожного кільця обчислюється ймовірність його вибору, кільце вибирається на основі цих ймовірностей для поточної вершини обирається найближчий елемент на цьому кільці та переміщується до неї, разом із кількома сусідніми елементами кільця.

2. Після завершення деформацій вершини остаточно зіставляються з елементами кільця, формуючи кінцеве рішення. У процесі виконання алгоритму ймовірності вибору кільця постійно оновлюються. Спочатку головним критерієм вибору слугує відстань до вершини. Згодом більшу вагу набувають обмеження на вантажопідйомність ймовірність вибору кільця, яке не може обслуговувати вершину без порушення обмежень, поступово знижується. У фінальних ітераціях алгоритм надає перевагу лише тим кільцям, що не порушують жодного обмеження.

У наступних публікаціях [47] алгоритм було модифіковано для врахування обмежень на максимальну довжину маршруту. Це досягалося через адаптацію правила обчислення ймовірностей вибору кільця, що додатково покращило реалістичність моделі.

Хоча результати обчислювального експерименту свідчать про цікавий потенціал підходу, на практиці за якістю отриманих рішень та ефективністю обчислень, цей підхід поступається більш розвиненим метаевристичним методам, зокрема пошуку з виключеннями, який демонструє кращі результати.

Список літератури до розділу 4

1. Laporte G., Semet F. Classical Heuristics for the Vehicle Routing Problem. *Les Cahiers du GERAD*. 1998. Paper G98-54. 22 p. URL: <https://www.gerad.ca/en/papers/G-98-54>.

2. Gendreau M., Laporte G., Potvin J.Y. Metaheuristics for the vehicle routing problem : Technical Report CRT-963. Montreal: Centre de Recherche sur les Transports. Universit de Montral, 1994. 356 p.
3. Clarke G., Wright J.W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*. 1964. № 12. P. 568–581.
4. Vigo D. A heuristic algorithm for the asymmetric capacitated vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*. 1996. № 89. P. 108–126.
5. Yellow P. A computational modification to the savings method of vehicle scheduling. *Operational Research Quarterly*. 1970. № 21. P. 281–283.
6. Golden B.L., Magnanti T.L., Nguyen H.Q. Implementing vehicle routing algorithms. *Networks*. 1977. № 7. P. 113–148.
7. Paessens H. The savings algorithm for the vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*. 1988. № 34. P. 336–344.
8. Altinkemer K., Gavish B. Parallel savings based heuristic for the delivery problem. *Operations Research*. 1991. № 39. P. 456–469.
9. Lin S. Computer solutions of the traveling salesman problem. *Bell System Technical Journal*. 1965. № 44. P. 2245–2269.
10. Christofides N., Mingozzi A., Toth P. The vehicle routing problem. *Combinatorial Optimization* / N. Christofides, A. Mingozzi, P. Toth and C. Sandi eds. Chichester: Wiley, 1979. P. 315–338.
11. Gillett B.E., Miller L.R. A heuristic algorithm for the vehicle dispatch problem. *Operations Research*. 1974. № 22. P. 340–349.
12. Wren A., Holliday A. Computer scheduling of vehicles from one or more depots to a number of delivery points. *Operational Research Quarterly*. 1972. № 23. P. 333–344.
13. Fisher M.L., Jaikumar R. A generalized assignment heuristic for vehicle routing. *Networks*. 1981. № 11. P. 109–124.
14. Bramel J.B., Simchi-Levi D. A location based heuristic for general routing problems. *Operations Research*. 1995. № 43. P. 649–660.
15. Renaud J., Bostor F. F., Laporte G. An improved petal heuristic for the vehicle routing problem. *Journal of Operational Research Society*. 1996. № 47. P. 329–336.
16. Renaud J., Boctor F.F., Laporte G. A fast composite heuristic for the symmetric traveling salesman problem. *INFORMS Journal on Computing*. 1996. № 8. P. 134–143.

17. Foster B. A., Ryan D. M. An integer programming approach to the vehicle scheduling problem. *Operational Research Quarterly*. 1976. Vol. 27, No. 2, Part 1. P. 367–384.
18. Ryan D. M., Hjorring C., Glover F. Extension of the petal method for vehicle routing. *Journal of Operational Research Society*. 1993. № 44. P. 289–296.
19. Beasley J.E. Route-first cluster-second methods for vehicle routing. *Omega*. 1983. № 11. P. 403–408.
20. Haimovich M., Rinnooy Kan A.H.G. Bounds and heuristics for capacitated routing problems. *Mathematics of Operations Research*. 1985. № 10. P. 527–542.
21. Bertsimas D.J., Simchi-Levi D. A new generation of vehicle routing research: Robust algorithms addressing uncertainty. *Operations Research*. 1996. № 44. P. 286–304.
22. Lin S., Kernighan B. An effective heuristic algorithm for the traveling salesman problem. *Operations Research*. 1973. № 21. P. 498–516.
23. Johnson D.S., McGeoch L.A. The traveling salesman problem: A case study. In E.H.L. Aarts and J.K. Lenstra. *Local Search in Combinatorial Optimization*. Chichester: Wiley, 1997. P. 215–310.
24. Glover F. Tabu search – Part II. *ORSA Journal on Computing*. 1990. Vol. 2(1). P. 4–32.
25. Osman I.H. Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem. *Annals of Operations Research*. 1993. № 41. P. 421–451.
26. Holland J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1975. 223 p.
27. Jeon G., Leep H., Shim J. A vehicle routing problem solved by using a hybrid genetic algorithm. *Computers Industrial Engineering*. 2007. Vol. 53, Issue 4. P. 121–151.
28. Goldberg D.E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Reading: Addison-Wesley, 1989. 335 p.
29. Potvin J.-Y. Genetic algorithms for the traveling salesman problem. *Annals of Operations Research*. 1996. № 63. P. 339–370.
30. Oliver I.M., Smith D.J., Holland J.R.C. A study of permutation crossover operators on the traveling salesman problem. *Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms*. Lawrence Erlbaum, Hillsdale, NJ, 1987. P. 224–230.

31. Goldberg D.E., Lingle R. Alleles, loci and the traveling salesman problem. *Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms*. Lawrence Erlbaum, Hillsdale, NJ, 1985. P. 154–159.
32. Thangiah S.R. An adaptive clustering method using a geometric shape for vehicle routing problems with time windows. *Proceedings of the Sixth International Conference on Genetic Algorithm*. San Mateo: Morgan Kaufmann, 1995. P. 536–543.
33. Schmitt L.J. An evaluation of a genetic algorithmic approach to the vehicle routing problem : Working paper. Memphis: Department of Information Technology Management, Christian Brothers University, 1995. 156 p.
34. Bean J.C. Genetic algorithms and random keys for sequencing and optimization. *ORSA Journal on Computing*. 1994. № 6. P. 154–160.
35. Colomi A., Dorigo M., Maniezzo V. Distributed optimization by ant colonies. *Proceedings of the European Conference on Artificial Life / F. Varela and P. Bourguine, eds.* Amsterdam: Elsevier, 1991. P. 54–60.
36. Colomi A., Dorigo M., Maniezzo V., Trubian M. Ant system for job-shop scheduling. *Belgian Journal of Operations Research, Statistics and Computer Science*. 1994. № 34. P. 39–53.
37. Costa D., Hertz A. Ants can colour graphs. *Journal of the Operational Research Society*. 1997. № 48. P. 275–305.
38. Dorigo M., Gambardella L.M. Ant colony system: A cooperative learning approach for the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 1997. № 1. P. 53–66.
39. Kawamura H., Yamamoto M., Mitamura T. Cooperative search on pheromone communication for vehicle routing problems. *IEEE Transactions on Fundamentals*. 1998. Vol. E81-A. P. 1089–1096.
40. Bullnheimer B., Hartl R.F., Strauss C. Applying the ant system to the vehicle routing problem. *Meta-Heuristics: Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization*. Boston: Kluwer, 1998. P. 109–120.
41. Hopfield J.J., Tank D.W. Neural computation of decisions in optimization problems. *Biological Cybernetics*. 1985. № 52. P. 141–152.
42. Durbin R., Willshaw D. An analogue approach to the travelling salesman problem using an elastic net method. *Nature*. 1987. № 326. P. 689–691.
43. Kohonen T. *Self-Organization and Associative Memory*. Berlin: Springer, 1988. 268 p.
44. Matsuyama Y. Self-organization via competition, cooperation and categorization applied to extended vehicle routing problems. *Proceedings*

of the International Joint Conference on Neural Networks. Seattle, WA, 1991. P. 385–390.

45. Schumann M., Retzko R. Self-organizing maps for vehicle routing problems minimizing an explicit cost function. *Proceedings of the International Conference on Artificial Neural Networks* / F. Fogelman-Soulie, ed. Paris, 1995. P. 401–406.

46. Ghaziri H. Algorithmes connexionnistes pour l'optimisation combinatoire : These de doctorat, Ecole Polytechnique. Federate de Lausanne. Switzerland, 1993. P. 175–180.

47. Ghaziri H. Supervision in the self-organizing feature map: Application to the vehicle routing problem. *Meta-Heuristics: Theory and Applications*. Boston: Kluwer, 1996. P. 651–660.

Наукове видання

ПІДХОДИ ДО УПРАВЛІННЯ МАТЕРІАЛЬНИМИ ПОТОКАМИ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Колективна монографія

Птиця Наталія Василівна, Ковцур Катерина Григорівна,
Орда Олександра Олександрівна, Колій Олександр Сергійович

ISBN 978-617-7886-80-7. DOI: 10.61718/tsl2025m2

Видання українською мовою

Авторські аркуші – 7,1

Видавець СГ НТМ «Новий курс» (наукова установа)

+380970440309

Сайт: www.newroute.org.ua

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції: ДК № 8013 від 22.11.2023.

Зареєстровано у Global Register of Publishers. Ідентифікатор видавця 7886.

Зареєстровано у Crossref. Власний префікс 10.61718