

Вінницький національний технічний університет
Факультет машинобудування та транспорту
Кафедра автомобілів та транспортного менеджменту

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Удосконалення маршрутизації при доставці запасних частин Вінницької філії товариства з обмеженою відповідальністю «ЕЛІТ-Україна» застосуванням цифрових технологій»

Виконав: студент 2-го курсу, групи ІТТ-24м спеціальності 275 – Транспортні технології (за видами), спеціалізація 275.03 – Транспортні технології (на автомобільному транспорті) Освітньо-професійна програма – Транспортні технології на автомобільному транспорті

Зазімко Д.В. Зазімко Д.В.

Керівник: к.т.н., доцент каф. АТМ

Смирнов Є.В. Смирнов Є.В.
« 28 » / 11 2025 р.

Опонент: к.т.н., доц. каф. ТАМ

Савченко А.В. Савченко А.В.
« 9 » / 12 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри АТМ

Цимбал С.В. к.т.н., доц. Цимбал С.В.

« 9 » / 12 2025 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет машинобудування та транспорту
Кафедра автомобілів та транспортного менеджменту

Рівень вищої освіти II-й (магістерський)

Галузь знань – 27 – Транспорт

Спеціальність 275 – Транспортні технології (за видами)

Спеціалізація 275.03 – Транспортні технології (на автомобільному транспорті)

Освітньо-професійна програма – Транспортні технології на автомобільному транспорті

ЗАТВЕРДЖУЮ
завідувач кафедри АТМ
к.т.н., доцент Цимбал С.В.

« 25 » 09 2025 року

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Зазімку Денису В'ячеславовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Удосконалення маршрутизації при доставці запасних частин
Вінницької філії товариства з обмеженою відповідальністю «ЕЛІТ-Україна»
застосуванням цифрових технологій,
керівник роботи Смирнов Євгеній Валерійович, к.т.н., доцент,
затверджені наказом ВНТУ від «24» вересня 2025 року № 313.

2. Строк подання здобувачем роботи: 30.11.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Законодавчі та інші нормативні документи у галузі
вантажних автомобільних перевезень (діючі міжнародні, державні, галузеві
стандарти, закони); системні моделі маршрутизації вантажних перевезень; рухомий
склад Вінницької філії ТОВ «ЕЛІТ-Україна»; об'єкт дослідження – система
оперативно-виробничого планування перевезень вантажів в умовах факторів
середовища експлуатації транспортних засобів, що динамічно змінюються.

4. Зміст текстової частини:

1 Стан проблеми маршрутизації вантажних автомобільних перевезень в сучасних умовах.
Аналіз роботи транспортного підрозділу вінницької філії ТОВ «ЕЛІТ-Україна»

2 Теоретичні основи формування маршрутів перевезення вантажів в гетерогенних
динамічних автотранспортних системах

3 Методика визначення оптимальних маршрутів при оперативно-виробничому плануванні
перевезень в динамічно змінних умовах

4 аналіз результатів маршрутизації за запропонованою методикою на прикладі вінницької
філії ТОВ «ЕЛІТ-Україна»

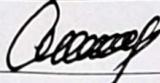
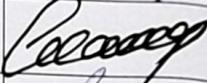
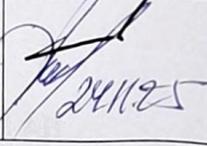
5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

1-3 Тема, мета та завдання дослідження.

4 Методи розв'язання задачі маршрутизації в транспортно-логістичних системах

- 5 Закордонний досвід маршрутизації вантажних перевезень у динамічно змінних умовах
- 6 Характеристика рухомого складу Вінницької філії ТОВ «ЕЛІТ-Україна»
- 7 Модель розв'язання задачі маршрутизації в динамічних умовах
- 8 Алгоритм автоматизованого розрахунку задачі динамічного програмування
- 9 Алгоритм формування матриць ефективності окремих дискретних станів
- 10 Алгоритм розв'язку багатокритеріальної задачі пошуку Парето-оптимальних рішень
- 11 Цифрова об'єктно-орієнтована модель розвізного маршруту
- 12 Результати маршрутизації, яка виконується за допомогою запропонованого протоколу (2-3 слайди)
- 13 Основні висновки по роботі.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

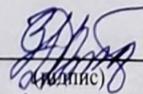
Розділ/підрозділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розв'язання основної задачі	Смирнов Є.В., доцент кафедри АТМ		
Визначення ефективності запропонованих рішень	Макарова Т.В., доцент кафедри АТМ	 17.11.25	 24.11.25

7. Дата видачі завдання « 25 » вересня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

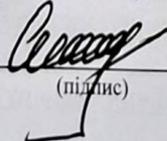
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вивчення об'єкту та предмету дослідження	25.09-29.09.2025	Век
2	Аналіз відомих рішень, постановка задач	30.09-20.10.2025	Век
3	Обґрунтування методів досліджень	30.09-20.10.2025	Век
4	Розв'язання поставлених задач	21.10-10.11.2025	Век
5	Формування висновків по роботі, наукової новизни, практичної цінності результатів	11.11-16.11.2025	Век
6	Виконання розділу/підрозділу «Визначення ефективності запропонованих рішень»	17.11-24.11.2025	Век
7	Нормоконтроль МКР	25.11-30.11.2025	Век
8	Попередній захист МКР	01.12-04.12.2025	Век
9	Рецензування МКР	05.12-09.12.2025	Век
10	Захист МКР	15.12.2025- 17.12.2025	Век

Здобувач


(підпис)

Зазімко Д.В.

Керівник роботи


(підпис)

Смирнов Є.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 656.078

Зазімко Д.В. Удосконалення маршрутизації при доставці запасних частин Вінницької філії товариства з обмеженою відповідальністю «ЕЛІТ-Україна» застосуванням цифрових технологій. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 275 – Транспортні технології (за видами), освітня програма – Транспортні технології на автомобільному транспорті. Вінниця: ВНТУ, 2025. 81 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 31 назва; рис.: 23; табл. 12.

В магістерській кваліфікаційній роботі пророблено питання удосконалення методів маршрутизації перевезень вантажів на кільцевих маршрутах в динамічно змінних умовах. У розділі 1 проаналізовано методи маршрутизації та закордонний досвід формування маршрутів в динамічних умовах; проаналізовано рухомий склад Вінницької філії ТОВ «ЕЛІТ-Україна». В розділі 2 розроблено теоретичні передумови формування оптимальних маршрутів в динамічних автотранспортних системах. В розділі 3 розроблено алгоритми та програмне забезпечення формування оптимальних маршрутів. В розділі 4 виконано оцінку ефективності методики формування кільцевих маршрутів на прикладі доставки запчастин Вінницької філії ТОВ «ЕЛІТ-Україна».

Ілюстративна частина складається з 15 слайдів.

Ключові слова: вантажні автомобільні перевезення, маршрутизація, протокол маршрутизації, цифрові технології, техніко-експлуатаційні показники.

ABSTRACT

UDC 656.078

Zazimko D.V. Improving routing when delivering spare parts to the Vinnytsia branch of the limited liability company “ELIT-Ukraine” using digital technologies. Master's qualification work in the specialty 275 – Transport technologies (by types), educational program – Transport technologies in road transport. Vinnytsia: VNTU, 2025. 81 p.

In Ukrainian Language. Bibliography: 31 titles; Fig.: 23 table 12.

The master's qualification work deals with the issue of improving the methods of routing cargo transportation on circular routes in dynamically changing conditions. In section 1, routing methods and foreign experience in forming routes in dynamic conditions are analyzed; the rolling stock of the Vinnytsia branch of LLC "ELIT-Ukraine" is analyzed. In section 2, theoretical prerequisites for forming optimal routes in dynamic road transport systems are developed. In section 3, algorithms and software for forming optimal routes are developed. In section 4, an assessment of the effectiveness of the method for forming circular routes is performed using the example of the delivery of spare parts by the Vinnytsia branch of LLC "ELIT-Ukraine".

The illustrative part consists of 15 slides.

Keywords: road freight transportation, routing, routing protocol, digital technologies, technical and operational indicators.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 СТАН ПРОБЛЕМИ МАРШРУТИЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В СУЧАСНИХ УМОВАХ. АНАЛІЗ РОБОТИ ТРАНСПОРТНОГО ПІДРОЗДІЛУ ВІННИЦЬКОЇ ФІЛІЇ ТОВ «ЕЛІТ-УКРАЇНА»	7
1.1 Актуальність розробок нових інструментів маршрутизації вантажних автомобільних перевезень	7
1.2 Аналіз наукових досліджень, присвячених розробці моделей оптимізації маршрутів транспортних засобів.....	13
1.3 Закордонний досвід маршрутизації перевезень у динамічно нестійких умовах зовнішнього середовища.....	20
1.3.1 Маршрутизатор інформації як основа розробки протоколів маршрутизації у транспортній мережі	20
1.3.2 Застосування методів інформаційної маршрутизації у транспортній логістиці	27
1.4 Загальна характеристика Вінницької філії ТОВ «ЕЛІТ-Україна»	30
1.5 Аналіз складу, структури і стану рухомого складу	31
1.6 Висновки	33
2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ МАРШРУТІВ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВАНТАЖІВ В ГЕТЕРОГЕННИХ ДИНАМІЧНИХ АВТОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМАХ	34
2.1 Концепція розв'язання багатокритеріальних задач, що задовольняють динамічним умовам роботи транспортно-логістичних систем	34
2.2 Математичне моделювання процедур прийняття рішень у соціально-технічних системах	40
2.3 Застосування методів динамічного програмування у задачах маршрутизації у складних транспортно-логістичних системах.....	47
2.4 Висновки	51

3 МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ МАРШРУТІВ ПРИ ОПЕРАТИВНО-ВИРОБНИЧОМУ ПЛАНУВАННІ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В ДИНАМІЧНО ЗМІННИХ УМОВАХ.....	52
3.1 Розробка алгоритмів формування оптимальних маршрутів у транспортно-логістичних системах.....	52
3.2 Аналітична модель визначення оптимальних маршрутів у динамічно змінних умовах	56
3.3 Порядок роботи протоколу маршрутизації з урахуванням, розробленої методики визначення оптимальних маршрутів	61
3.4 Висновки	65
4 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ ЗА ЗАПРОПОНОВАНОЮ МЕТОДИКОЮ НА ПРИКЛАДІ ВІННИЦЬКОЇ ФІЛІЇ ТОВ «ЕЛІТ-УКРАЇНА»...	66
4.1 Цифрова об'єктно-орієнтована модель розвізного маршруту під час оперативного планування вантажних перевезень	66
4.2 Аналіз результатів маршрутизації, яка виконується за допомогою запропонованого протоколу.....	69
4.3 Застосування розробленого маршрутизатора в економічних умовах, що динамічно змінюються	72
4.4 Висновки	75
ВИСНОВКИ.....	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	78
Додаток А (обов'язковий) Ілюстративна частина	82
Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень.....	98

ВСТУП

Актуальність теми.

Вирішення проблеми ефективної організації процесу вантажних автомобільних перевезень є одним із пріоритетних завдань економіки України. Ключовим елементом в організації транспортного процесу в вантажних перевезень є маршрутизація руху рухомого складу як сукупність процедур щодо вибору оптимальних характеристик шляху, що визначають ефективність організації маршрутів при оперативному плануванні перевезень.

Задача маршрутизації стає особливо актуальною при багатоваріантності і багатоаспектності розподілу вантажних потоків в умовах зовнішнього середовища, що динамічно змінюються. У цьому випадку завдання оптимальної маршрутизації може бути вирішене лише на основі розробки спеціалізованого математичного апарату – аналітичного інструменту прийняття ефективних рішень та програмного забезпечення на його основі. Тому можна стверджувати, що затребуване практикою завдання оптимізації процесів маршрутизації в динамічно змінюваному стані зовнішнього середовища є завданням, що потребує вирішення науковими методами.

Насьогодні процеси оперативно-виробничого планування вантажних автомобільних перевезень відбуваються в умовах, коли результативні показники вантажних перевезень можуть змінюватися в процесі здійснення однієї їздки автомобіля через зміни в інформаційному середовищі «споживач-перевізник». У цих умовах виникає необхідність підвищення ефективності маршрутизації, що полягає у можливості зміни схеми маршруту в «он-лайн» режимі із застосуванням керуючих алгоритмів, перетворених на цифрові формати.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є удосконалення методики визначення оптимальних кільцевих розвізних (збірних) маршрутів при оперативно-виробничому плануванні перевезень вантажів у умовах роботи рухомого складу, що динамічно змінюються, з урахуванням декількох критеріїв ефективності..

Задачі магістерської кваліфікаційної роботи:

- провести аналіз існуючих моделей оптимізації маршрутів транспортних засобів;
- проаналізувати особливості роботи та стан рухомого складу Вінницької філії ТОВ «ЕЛІТ-Україна»;
- розробити концепцію системи визначення оптимальних маршрутів у умовах оперативного планування вантажними перевезеннями, що динамічно змінюються;
- розробити аналітичну модель, алгоритм та ПЗ для визначення оптимальних маршрутів при оперативно-виробничому плануванні перевезень в умовах, що динамічно змінюються;
- розробити методику визначення оптимальних кільцевих маршрутів при оперативно-виробничому плануванні вантажних перевезень;
- оцінити ефект від впровадження розробок в систему перевезення вантажів Вінницької філії ТОВ «ЕЛІТ-Україна».

Об'єктом дослідження є система оперативно-виробничого планування перевезень вантажів в умовах факторів середовища експлуатації транспортних засобів, що динамічно змінюються.

Предметом дослідження є моделі формування кільцевих маршрутів перевезень вантажів, які ґрунтуються на методах динамічного програмування та багатокритеріальної оптимізації.

Новизна роботи:

- удосконалено методику визначення оптимальних маршрутів у динамічно змінних умовах оперативного планування автомобільних вантажних перевезень, що складається з двох основних елементів: теоретичного забезпечення (маршрутизатора) та реалізуючого його програмного забезпечення (протоколу маршрутизації), що має такі унікальні властивості;
- отримали подальший розвиток аналітичні моделі визначення оптимальних кільцевих маршрутів при оперативно-виробничому плануванні перевезень в умовах, що динамічно змінюються.

Практична цінність роботи полягає у можливості застосування в АТП розробленої методики та ПЗ маршрутизації вантажних автомобільних перевезень у складних гетерогенних динамічних транспортних системах (з максимальним ступенем ефективності). Розроблене ПЗ дозволяє в автоматизованому режимі формувати оптимальні розвізні, збірні та розвізно-збірні маршрути у динамічних нестабільних зовнішніх умовах та з урахуванням необмеженої кількості критеріїв ефективності.

Апробація результатів. Основні положення магістерської роботи апробовано на всеукраїнській науково-технічній інтернет-конференції конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2026)».

Публікації. За результатами виконання магістерської кваліфікаційної роботи опубліковані 1 тези доповіді [3].



1 СТАН ПРОБЛЕМИ МАРШРУТИЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В СУЧАСНИХ УМОВАХ. АНАЛІЗ РОБОТИ ТРАНСПОРТНОГО ПІДРОЗДІЛУ ВІННИЦЬКОЇ ФЛІЇ ТОВ «ЕЛІТ-УКРАЇНА»

1.1 Актуальність розробок нових інструментів маршрутизації вантажних автомобільних перевезень

Розробка високоефективної системи управління процесами доставки вантажів автомобільним та іншими видами транспорту залишається одним із ключових завдань, що не отримали належного вирішення в сучасних економічних умовах України. Сукупні витрати на організацію вантажних перевезень залишаються значними, що зумовлено низьким рівнем продуктивності вантажного автомобільного транспорту. Показники ефективності перевезень в Україні майже у чотири рази нижчі порівняно з аналогічними показниками систем доставки вантажів у розвинених країнах.

Попри домінуючу частку автомобільного транспорту (АТ) у структурі транспортної системи України, рівень впроваджених технологічних процесів та методів організації вантажних перевезень істотно відстає від аналогічних показників інших видів транспорту. Відставання у рівні застосовуваних новітніх технологічних процесів на АТ в порівнянні з країнами Європи та США є ще значнішим, що негативно позначається як на об'ємних, так і на економічних показниках ефективності вантажних перевезень. Для порівняння, витрати на перевезення вантажів автомобільним транспортом перевищують аналогічні показники технологічно розвинених країн у 1,8...2,5 рази. З огляду на стратегічну роль автомобільного транспорту в економіці України, завдання підвищення ефективності вантажних перевезень набуває критичної актуальності. Водночас, попри значні обсяги перевезень та різноманітність рухомого складу, автомобільний

транспорт залишається переважно засобом доставки вантажів на короткі відстані з обмеженим вантажообігом.

Невелика середня відстань перевезень вантажів автомобільним транспортом логічно пояснюється його витратними (економічними) характеристиками у порівнянні з іншими видами транспорту (таблиця 1.1 – 1.3) [9].

Таблиця 1.1 – Перевезення вантажів за видами транспорту, млн т

	2000	2005	2010	2015	2017	2018	2019	2020	2021
Транспорт	1529	1805	1765	1474	1582	1643	1579	1641	1518
наземний	1514	1784	1754	1468	1576	1637	1573	1635	1513
залізничний	357	450	433	350	339	322	313	306	314
автомобільний	939	1121	1168	1021	1122	1206	1147	1232	1121
трубопровідний	218	213	153	97	115	109	113	97	78
водний	15	21	11	6	6	6	6	6	5
морський	6,3	8	4	3	2	2	2	2	2
річковий	8,3	13	7	3	4	4	4	4	3
авіаційний ²	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Таблиця 1.2 – Вантажообіг за видами транспорту, млрд т*км

	2000	2005	2010	2015	2017	2018	2019	2020	2021
Транспорт	394,1	473,6	418,7	334,7	364,2	361,3	355,0	313,2	304,7
наземний	379,6	457,4	409,3	329,1	359,6	357,6	351,3	310,0	301,4
залізничний	172,8	224,0	218,1	195,1	191,9	186,3	181,8	175,6	180,4
автомобільний	19,3	35,3	53,9	53,3	62,3	72,1	65,0	65,1	61,8
трубопровідний	187,5	198,1	137,3	80,7	105,4	99,2	104,5	69,3	59,2
водний	14,5	15,9	9,0	5,4	4,3	3,4	3,4	2,9	3,0
морський	8,6	9,6	5,2	3,9	2,9	1,8	1,8	1,5	1,6
річковий	5,9	6,3	3,8	1,6	1,4	1,6	1,6	1,4	1,4
авіаційний ³	0,0	0,3	0,4	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

Таблиця 1.3 – Середня відстань перевезення однієї тонни вантажів окремими видами транспорту

	2000	2005	2010	2015	2017	2018	2019	2020	2021
Залізничний	484	497	504	557	565	578	581	575	574
Морський	1362	1120	1271	1173	1264	963	837	830	859
Річковий	706	491	549	498	391	417	406	362	390
Автомобільний	21	31	46	52	56	60	57	53	55
Трубопровідний	859	932	895	830	918	907	928	711	763

У процесі реформування транспортної галузі критично важливо враховувати інформаційний стан як внутрішнього, так і зовнішнього середовища. Це є необхідною умовою для вибору адекватної методології математичного моделювання, яка визначається характером поставленої задачі (детермінованої, стохастичної або такої, що розв'язується в умовах невизначеності) [2,4,6]. Під інформаційним станом зовнішнього середовища в межах досліджуваної проблеми слід розуміти: економічний інформаційний стан (ринок вантажних перевезень автомобільним транспортом), технологічний інформаційний стан (рівень впровадження ІТ-рішень, наявність елементів інтелектуальних транспортних систем тощо), науково-методологічний інформаційний стан та інші складові.

Економічний інформаційний стан ринку автомобільних перевезень до сьогодні є динамічно нестабільним:

1. Висока диспропорція між попитом і пропозицією на послуги вантажних перевезень, що є наслідком нестабільного економічного стану, обумовленого впливом зовнішніх, сезонних та інших різноманітних факторів;
2. Суттєва варіативність витрат, яка залежить від способу організації автомобільних перевезень: використання найманого рухомого складу, власних транспортних засобів підприємств, а також від виду та обсягу вантажу, регулярності надходження заявок тощо;
3. Необхідність дотримання вимог до якості перевезень (забезпечення безпеки, збереження вантажу, виконання специфічних умов транспортування тощо);
4. Динамічні зміни у географічній структурі вантажопотоків та маршрутизації.

Найбільш складним етапом у даних умовах є формування заключної фази внутрішньовиробничого планування — оперативно-виробничого планування, спрямованого на забезпечення виконання замовлень клієнтів у визначених обсягах та номенклатурі, з урахуванням задоволення попиту різноманітних груп клієнтів (постійних, непостійних, епізодичних) у встановлені терміни при раціональному

використанні ресурсів рухомого складу. На цьому етапі здійснюється постановка конкретних завдань для кожного автомобіля та розробка змінно-добового оперативного плану перевезень. Додатково необхідно формувати схеми мінімальних відстаней між пунктами навантаження та розвантаження, а також оптимальні маршрути. Зазначені особливості характеризують динамічні умови взаємодії «споживач – перевізник» у системі «управління – транспортний засіб – експлуатація», що зумовлює потребу перегляду підходів до побудови систем транспортного моделювання та планування. У таких умовах логістичні служби автотранспортних підприємств стикаються з численними труднощами організації перевезень через відсутність науково обґрунтованих методів ефективного управління АТ.

В результаті витрати на здійснення транспортної роботи значно зростають, збільшуючи вартість кінцевої продукції, що проходить через етап транспортування. При цьому стратегічні завдання розвитку інфраструктури транспортних систем спираються на економічні механізми вільного ринку, коли кожен її експлантат «оптимізує власну логістику». Цей підхід призводить до ситуації, коли результати такої оптимізації не задовольняють нікого. Альтернативою даному підходу є системне використання механізмів синхронної оптимізації результативних показників та показників використання всіх видів перевезень та основних елементів транспортної інфраструктури. Це дозволить диференціювати у часі та у просторі транспортні потоки вантажів та пасажирів у транспортно-логістичних системах (ТЛС).

Технологічний інформаційний стан.

Будь-які процеси оптимізації роботи транспортно-логістичних систем (ТЛС) ускладнюються специфічними властивостями об'єкта управління — транспортного потоку, який характеризується стохастичністю, нестационарністю, інерційністю, відсутністю жорсткої взаємопов'язаності елементів та нестійкістю зв'язків. Транспортна наука постійно розробляла нові технологічні підходи для ефективного управління таким динамічним об'єктом. Еволюція систем управління ТЛС пройшла шлях від моделей жорсткого локального однопрограмного

регулювання до автоматизованих систем управління (АСУ). Сьогодні декларується необхідність впровадження принципів штучного інтелекту, що передбачає трансформацію ТЛС в інтелектуальні транспортні системи (ІТС), які використовують алгоритми самонавчання [30], а також рішення на основі обробки великих масивів даних (Big Data) та нейромережових технологій. [31].

Методологічне забезпечення.

Сучасні підходи у сфері організації процесів обміну інформації мають, зазвичай, клієнт-серверну архітектуру, а серверним ПЗ застосовуються системи управління базами даних (СУБД). Методологією розробки СУБД зазвичай був реляційний принцип побудови системи прийняття рішень. Даний підхід до управління є предметно-орієнтованим, коли засобами управління в системі є інформація, що зберігається у вигляді таблиць. Тобто управління здійснюється за накопиченими статистичними даними, які мають стохастичний характер за встановленими законами розподілу випадкових величин. Основним недоліком даного підходу є те, що при збільшенні складності системи неможливо достовірно оцінювати процедури управління за динамічних змін у системі.

При об'єктно-орієнтованому підході (ООП) програма представляє не тільки опис об'єктів і критеріїв, а й методи їх взаємодії, необхідні операцій над об'єктами. Перевагою ООП є те, що механізми перетворення атрибутів дозволяють будувати похідні структури на основі базових для складніших станів системи, а управління є поліморфними, що робить ПЗ більш гнучким і універсальним. У концепції об'єктно-орієнтованих моделей управління, основним завданням якого є отримання оптимальних траєкторій руху вантажів або пасажирів за допомогою методів аналітичного моделювання, застосовні моделі динамічного програмування та методи багатокритеріальної оптимізації. При цьому актуалізується необхідність розробки методів ефективної маршрутизації в інформаційних умовах зовнішнього середовища, що динамічно змінюються. До нових умов, що ускладнюють інформаційну ситуацію, можна віднести і активний розвиток сучасних транспортних мереж та транспортної інфраструктури, що супроводжуються змінами структури та інтенсифікацією транспортних потоків [4-6]. Необхідність

розробки нових моделей маршрутизації, заснованих на ООП, підтверджується роботами сучасних дослідників, чия наукова та практична діяльність безпосередньо пов'язана з вирішенням завдань оперативного планування руху об'єктів у складних транспортних системах.

Ключовим елементом в організації транспортного процесу вантажних перевезень АТ є маршрутизація руху рухомого складу, як сукупність процедур щодо вибору оптимальних характеристик шляху руху транспортних засобів. Давно доведено, що існує пряма залежність між показниками ефективності при організації маршрутів у транспортній мережі та продуктивністю роботи рухомого складу. Як ідея адаптивного управління під час реалізації процедур маршрутизацією приймається теза необхідність перейти від жорсткої системи управління перевезеннями до більш «гнучких» алгоритмів. Це можливо реалізувати із застосуванням методів аналізу комунікаційних мереж [8] та розробки спеціального програмного забезпечення, що дозволяє оперативно аналізувати та враховувати поточну інформаційну систему. Впровадження адаптивної маршрутизації дозволить враховувати динаміку в транспортній мережі [28] сформувати оптимальний маршрут та сконфігурувати за допомогою ПЗ максимальну кількість експлантатів [24, 26].

Завдання маршрутизації стає особливо актуальним при багатоваріантності і багатоаспектності (багатокритеріальності) розподілу вантажних потоків в умовах зовнішнього середовища, що динамічно змінюються. У цьому випадку задача оптимальної маршрутизації може бути вирішена тільки на основі розробки спеціалізованого математичного апарату як аналітичного інструменту прийняття ефективних рішень на його основі. Тому можна стверджувати, що завдання оптимізації процесів маршрутизації в зовнішньому середовищі, що динамічно змінюється, є проблемою, що вимагає докладання нових наукових знань.

1.2 Аналіз наукових досліджень, присвячених розробці моделей оптимізації маршрутів транспортних засобів

Дослідженнями, присвяченими організації та плануванню перевезень автомобільним транспортом в мінливих умовах його роботи, займалися науковці як за радянських часів, так і сучасні автори [11, 13, 17-28]. Усі перелічені роботи при вирішенні завдань маршрутизації спираються на низку апробованих математичних прикладних методів побудови маршрутів. У зазначених дослідженнях ключовим підходом до вирішення задачі маршрутизації є забезпечення максимально ефективного переміщення вантажів від відправника до одержувачів із використанням заданого парку автомобілів, враховуючи обмеження робочого часу транспортних засобів, їх вантажомісткість та середньотехнічну швидкість. Таким чином, об'єктом аналізованого процесу виступає оптимальна кількість автомобілів, необхідних для виконання вантажних перевезень.

Число математичних методів, що використовуються для вирішення задачі маршрутизації велике, і постійно збільшується зі зростанням складності транспортних мереж можливостей машинної обробки інформації (обчислювальної техніки). Розробкою методів, покладених в основу аналітичного моделювання та алгоритмізації процесів маршрутизації в різні роки займалися великі вчені та дослідники. Їх роботи присвячені створенню та розвитку математичних методів та моделей оптимізації, представлені у таблиці 1.4 [18-28].

Таблиця 1.4 – Зведена таблиця методів розв'язання задач оптимізації у ТЛС

Метод	Короткий опис метода
Метод «гілок та меж» (1965)	В основі даного методу лежить ідея послідовного розбиття множини можливих рішень на окремі підмножини, подальшою перевіркою – чи конкретне підмножина містить оптимальне рішення чи ні

Продовження таблиці 1.4

Метод	Короткий опис метода
Метод локальної оптимізації (1958)	Даний метод призначений для вирішення дискретних завдань, що будуються за наступним принципом. Спочатку визначається вихідне допустиме рішення та призначається околиця цього рішення із знаходженням локального оптимуму. Далі процедура повторюється багаторазово з вибором локального екстремуму, виходячи із встановленого мети, як наближеного рішення.
Методи випадкового пошуку	Цей метод містить ідеї теорії ігор автоматів. Метод випадкового пошуку використовує виявлення кращих станів, пробні зміщення від поточної точки у випадкових напрямках.
Метод теорії розкладів (1968)	Теорія розкладів – це розділ дослідження операцій, у якому будуються та аналізуються математичні моделі календарного планування (тобто упорядкування у часі) різних цілеспрямованих дій з урахуванням цільової функції та різних обмежень.
Метод імітаційного моделювання (1989)	Застосування цього методу обумовлено наступними факторами: необхідністю дослідження динаміки змін у процесі функціонування системи вантажних перевезень, складна структура маршрутів, постійні зміни їх у часі та просторі.
Евристичні методи	Евристичні методи ґрунтуються на підсвідомому мисленні, не допускають алгоритмізації та характеризуються неусвідомленим (інтуїтивним) способом дій для досягнення усвідомлених цілей. Евристичні методи називають методами інженерної творчості.

Розглянемо основні підходи до вирішення оптимізаційних задач формування маршрутної мережі, які активно застосовуються на практиці. Сучасна оцінка ефективності математичних методів маршрутизації, як правило, базується на використанні класичної задачі комівояжера як еталонної моделі.

Суть задачі комівояжера полягає в тому, що «комівояжер», стартуючи з пункту n , у визначеній послідовності відвідує решту пунктів $1, 2, \dots, (n-1)$ і повертається до початкової точки n . При цьому необхідно побудувати маршрут з мінімальною «вартістю» обходу всіх пунктів за умови, що жоден з них не

відвідується повторно. У термінах теорії графів це означає пошук гамільтонового циклу найменшої довжини. Для розв'язання даної задачі метод динамічного програмування інтерпретується як n -кроковий процес прийняття рішень, де на кожному кроці «комівояжер» визначає оптимальний маршрут для залишкових пунктів залежно від поточного місця розташування. Такий підхід акцентує роль транспортного засобу як базового елемента, навколо якого вибудовується система маршрутизації та застосовуються алгоритми оптимізації. Іншими словами, у центрі побудови маршруту знаходиться транспортний засіб, а не вантаж.

Розглянемо ще один метод, що базується на спрощеній моделі динамічного програмування та орієнтований на оптимізацію показників дрібнопартійних перевезень із використанням алгоритму Кларка–Райта.

Завдання розвезення вантажу визначається так:

m – кількість автомобілів вантажомісткістю P_k ($k=1 \dots m$).

$N = \{j/j=1,2, \dots, n\}$ – кількість одержувачів у задачі, де $j=0$ – відправник.

$R_k = |j_1^k, j_2^k, \dots, j_r^k, \dots, j_{s_k}^k|$ – маршрут ($k = 1 \dots m$).

Система кільцевих маршрутів повинна задовольняти умову:

$$\bigcup_{k=1}^m R_k = N, \quad (1.1)$$

при об'єднанні маршрутів у транспортну мережу:

$$R_r \cap R_k = \emptyset (r, k = 1 \dots m; r \neq k), \quad (1.2)$$

при цьому умова неперетину маршрутів:

$$Q_k = \sum_{r=1}^{s_k} q_{j_r^k} \leq P_k (k = 1 \dots m), \quad (1.3)$$

де j_r – потреба у вантажі j -го пункту,

Q_k – обсяг перевезення на маршруті R_k .

Повинна виконуватись умова:

$$\sum_{k=1}^m \sum_{r=0}^{s_k} l_{j_r^k j_{r+1}^k} \rightarrow \min \quad (j_0^k = j_{s_k+1}^k = 0), \quad (1.4)$$

де l_j – пробіг між пунктами i та j , ($i, j = 0 \dots n$).

Довжина маршруту R_k становитиме

$$L(R_k) = \sum_{r=0}^{s_k} l_{j_r^k j_{r+1}^k}, \quad (1.5)$$

таким чином мінімізується загальний пробіг.

Однак метод Кларка–Райта та його модифікації не змінюють базового однокритеріального підходу до вирішення основного завдання — побудови оптимальних маршрутів. Розглянуті методи застосовуються для обчислення відстаней як між парою об'єктів, так і всередині множини об'єктів, результатом чого є матриця відстаней. Проте даний підхід потребує значного обсягу розрахунків, точність яких не завжди відповідає очікуванням. Методи ґрунтуються на припущенні, що відстань між об'єктами пропорційна прямій відстані між ними. Іншими словами, використовується принцип апроксимації, який не враховує численні фактори зовнішнього середовища, що впливають на транспортну мережу.

При поточному плануванні роботи вантажних автомобілів виникають завдання раціональної організації змінно-добових перевезень по кільцевим, маятниковим і збірно-розвізним маршрутам, оптимального закріплення споживачів за постачальниками і клієнтури за автотранспортними підприємствами, складання графіків роботи автомобілів та ін. Розв'язання багатьох із цих завдань слідує різним цілям, та й критерії ефективності, що приймаються в них, повинні бути різними.

У ряді таких задач вибір показника ефективності не становить складності. Наприклад, у задачі закріплення споживачів за постачальниками таким показником виступає транспортна робота, тому закріплення слід здійснювати так, щоб її величина була мінімальною. Однак цей критерій є коректним лише за умови

збалансованості задачі (сумарний попит дорівнює сумарній пропозиції). Крім того, при закріпленні споживачів за постачальниками швидкопсувних продуктів застосування цього критерію недопустиме: у таких випадках показником ефективності слід обрати максимальний час доставки вантажу споживачу та здійснювати закріплення так, щоб мінімізувати цей час.

Проте у більшості випадків визначення критерію ефективності вирішення автотранспортних завдань не є очевидним.

У процесі вирішення практичних задач управління автомобільним транспортом застосовуються різні критерії ефективності, серед яких:

- 1) максимум перевезеного обсягу вантажу;
- 2) максимум виконаної транспортної роботи;
- 3) максимум прибутку, отриманого від перевезення вантажу;
- 4) мінімум витрат, пов'язаних із виконанням перевезень;
- 5) мінімум використаних на перевезеннях автомобілів;
- 6) максимум середнього коефіцієнта використання пробігу;
- 7) мінімум простою під час вантажно-розвантажувальних робіт;
- 8) мінімум втрат транспортної роботи в процесі перевезень;
- 9) мінімум часу виконання перевезень та ін.

Кожен із наведених критеріїв має свої переваги та може бути застосований у сфері автомобільного транспорту. Наприклад, у ряді досліджень для змінно-добового планування пропонується використовувати як критерій ефективності мінімізацію витрат транспортної організації на виконання перевезень або мінімізацію тонно-годин, що витрачаються на реалізацію заданого обсягу перевезень.

В інших роботах наводяться математичні моделі задачі планування перевезень маятниковими маршрутами. Як показник ефективності в цих роботах прийнято кількість використаних на перевезеннях автомобілів. Після визначення мінімального числа автомобілів складаються маршрути, під час роботи якими мінімізуються сумарні порожні пробіги автомобілів [7, 13, 21].

У задачі закріплення клієнтури за АТП критерієм ефективності найчастіше приймають мінімізацію сумарних нульових пробігів автомобілів. Однак цей критерій є коректним лише за умови використання одномаркових автомобілів. Якщо ж у розподілі беруть участь різномарочні транспортні засоби, критерій ефективності набуває більш складного вигляду. У багатьох випадках застосування різних критеріїв дає однаковий результат, наприклад, коли вантажопотоки задані (тобто відомо, звідки, куди і який обсяг вантажу потрібно доставити). У такій ситуації дохід (D) від виконання перевезень є фіксованою величиною, що не залежить від способу розподілу автомобілів по лініях. Як відомо, між витратами (C) та прибутком (Π) існує наступний зв'язок:

$$\Pi = D - C, \text{ грн.} \quad (1.6)$$

Це означає, що мінімізація витрат забезпечує максимізацію прибутку, і обидва критерії приводять до однакового рішення. Для описуваної ситуації справедливе наступне співвідношення:

$$A = A_B + A_{\Pi}, \quad (1.7)$$

де A , A_B і A_{Π} - сумарні тонно-кілометри пробігу автомобілів відповідно загальні, з вантажем і без вантажу.

Оскільки задані вантажопотоки, то сумарні тонно-кілометри пробігу автомобілів з вантажем (A_B) теж задані і є постійними незалежно від системи побудови маршрутів і розподілу автомобілів по них. Таким чином, при мінімізації показника (A_{Π}) досягається мінімум (A), і обидва критерії приводять до однакового результату. Це дозволяє в окремих випадках використовувати як показник ефективності мінімізацію сумарних тонно-кілометрів роботи автомобілів A , оскільки з математичної точки зору мінімізація A є значно простішою, ніж мінімізація A_{Π} . Перелік критеріїв ефективності не обмежується наведеними прикладами, адже вибір показника визначається конкретною метою виробництва,

яка може динамічно змінюватися залежно від умов експлуатації автомобілів. Тому різні задачі вирішуються за різними критеріями, і постановка питання про єдиний універсальний критерій є некоректною. Відповідно, для окремих автотранспортних задач не існує єдиного критерію ефективності. Більшість досліджень зосереджено на поглибленому аналізі методу Кларка–Райта, задачі комівояжера та їх адаптації до конкретних випадків, проте підхід залишається традиційним – статичні методи, недостатньо точні для умов роботи, що динамічно змінюються, і тому, як правило, не застосовуються на практиці в АТП. Незважаючи на значне розмаїття математичних моделей маршрутизації, вони мають спільну властивість – підтверджують найбільш загальний принцип до вирішення оптимізаційних завдань таким чином:

Задача маршрутизації – це NP-повне (від англ. non-deterministic polynomial – «недетерміновані з поліноміальним часом») задача. Це означає, що час вирішення такої задачі зростає за експонентом залежно від кількості одержувачів вантажу. Тому нині відомі методи, що забезпечують точне розв'язання задачі маршрутизації, застосовуються для вирішення задач обмеженою кількістю вхідних параметрів. Даний похід є основою багатьох досліджень для застосування евристичних чи наближених алгоритмів розв'язання задачі маршрутизації, методів локальної оптимізації, методів випадкового пошуку, теорії розкладів, імітаційного моделювання, але значно підвищує суб'єктивізм отриманого рішення. Слід зазначити, що численні дослідження практично не реалізуються через хаос і некомпетентність управління у сфері логістики переміщення вантажів. В таких умовах виникає необхідність розробки ефективної методики маршрутизації для оперативного планування перевезень вантажів. Це можливе лише із застосуванням алгоритмів, розроблених на основі математичних методів динамічного програмування та оптимізації в умовах значної невизначеності в умовах роботи АТП.

1.3 Закордонний досвід маршрутизації перевезень у динамічно нестійких умовах зовнішнього середовища

1.3.1 Маршрутизатор інформації як основа розробки протоколів маршрутизації у транспортній мережі

Аналіз зарубіжних досліджень свідчить, що традиційні методи розв'язання задачі маршрутизації транспортних засобів (Vehicle Routing Problem, VRP) виявляються неефективними у випадках, пов'язаних із «швидкими сценаріями маршрутизації». Основна проблема полягає в тому, що VRP є статичною задачею, оскільки всі клієнти відомі на початковому етапі планування. Натомість розподілена маршрутизація (Distributed Vehicle Routing Problem, DLRP) є динамічним процесом, де клієнти з'являються непередбачувано, а ймовірності їх появи невідомі на старті.

Коректне планування транспортних потоків в умовах невизначеності є ключовим елементом управління цими факторами. Для його ефективної реалізації необхідне використання сучасних цифрових інструментів, які повинні постійно вдосконалюватися. Одним із ІТ-рішень, що застосовуються при формуванні маршрутів, є протоколи маршрутизації, які раніше використовувалися для організації потоків даних. Під протоколами маршрутизації розуміють керуючі алгоритми та математичні моделі, що лежать в їх основі. Методи планування маршрутів є одним із ключових завдань у рамках VRP, основною метою якого є пошук оптимальних маршрутів. Цікаво, що в зарубіжній практиці для вирішення цієї задачі застосовуються підходи, розроблені для маршрутизації інформаційних потоків у телекомунікаційних мережах. Термін «маршрутизація» спочатку використовувався для опису процесу вибору шляху передачі пакетів даних через Інтернет (мінімум дві фізичні мережі, з'єднані маршрутизатором) — від передавальної станції до приймальної (рисунок 1.1).

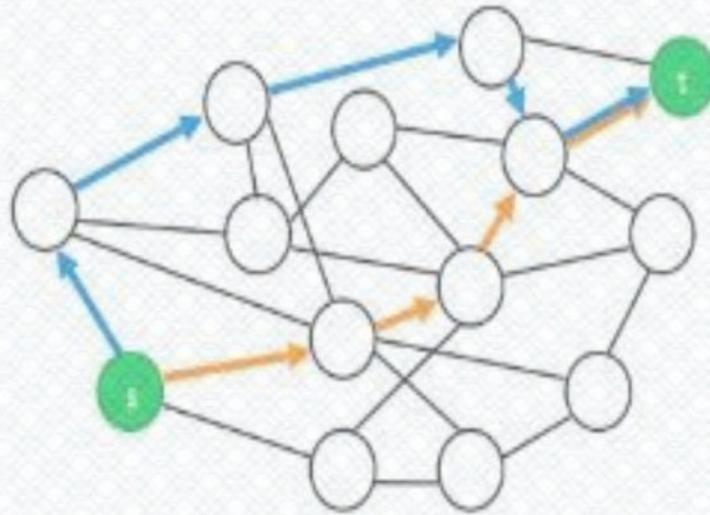


Рисунок 1.1 - Маршрутизація та вибір оптимального маршруту

З інформаційної точки зору маршрутизація забезпечує можливість передачі даних з однієї локальної мережі до іншої, незалежно від її географічного розташування. Призначений маршрут може проходити через кілька проміжних мереж, що дозволяє здійснювати управління глобальними мережевими структурами.

При визначенні маршрутів інформаційних пакетів дії мають бути оптимізовані настільки, наскільки це можливо, щоб дозволити доставляти пакети даних якнайшвидше. На практиці можна виділити три етапи маршрутизації: перший етап складається з генерації пакетів в єдиний «хост» та прийняття рішення про їх прямого одержувача та шляхи; другий етап маршрутизатор повинен переслати пакет до цілі; остання, третя стадія полягає у прийнятті маршрутизатором рішення, чи відправляти пакети безпосередньо одержувачу або на проміжний маршрутизатор (і, можливо, до якого маршрутизатора, коли їх більше). Сам процес маршрутизації можна поділити на статичні протоколи маршрутизації та динамічні (рисунок 1.2).

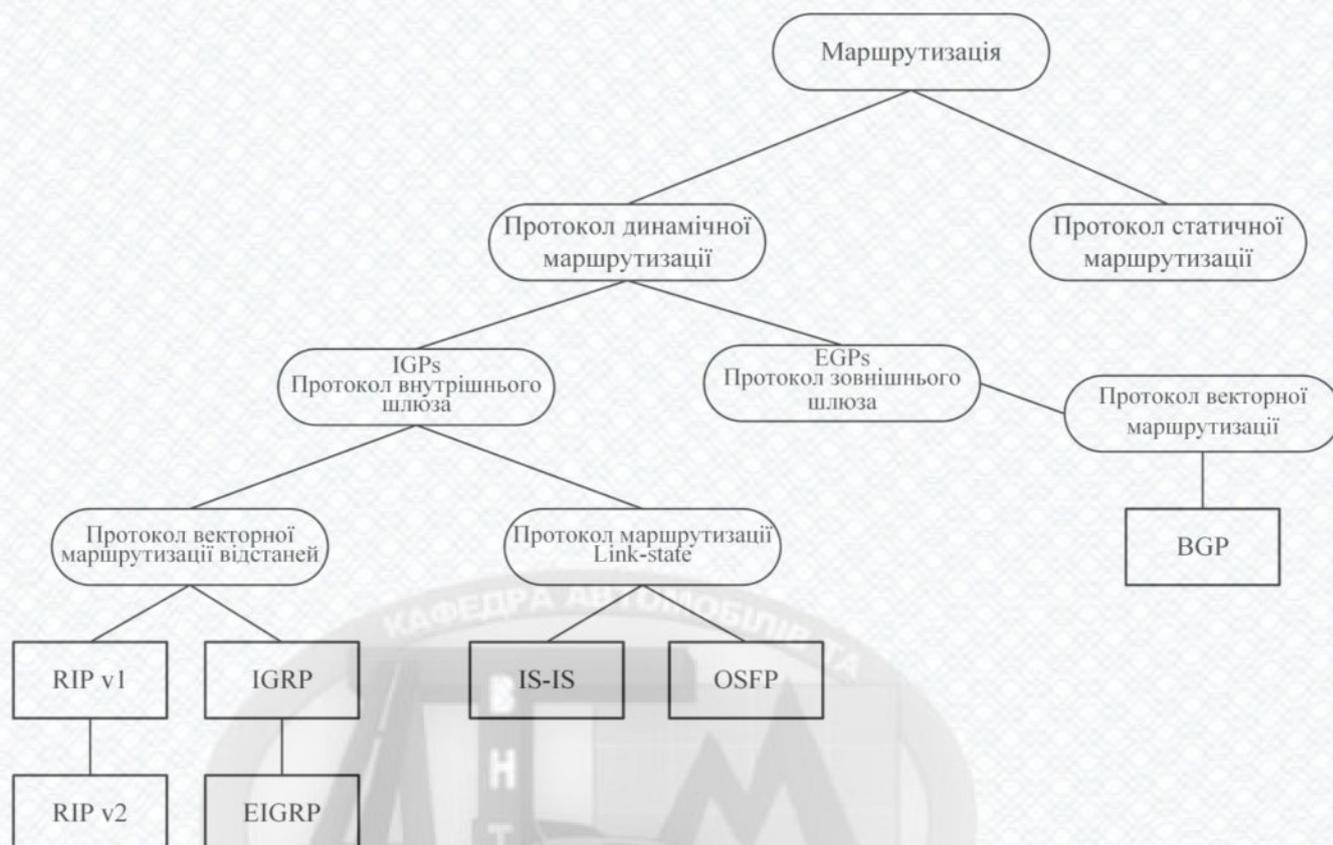


Рисунок 1.2 – Схема протоколів маршрутизації

Статичні протоколи маршрутизації. Статична маршрутизація передбачає ручне введення адміністратором мережі адрес окремих вузлів. Для створення маршруту необхідно вказати такі параметри: адресу цільової мережі, адресу мережевого інтерфейсу та IP-адресу наступного маршрутизатора на шляху. Цей метод потребує значних трудових витрат на початковому етапі проектування, проте на подальших етапах є економічно доцільним для невеликих мереж. Недоліком статичної маршрутизації є відсутність можливості реагувати на збої маршрутів у реальному часі. Оскільки цей метод не враховує зміни в мережі, він непридатний для великих мереж, де зміни відбуваються постійно. З огляду на це, сьогодні основним підходом є динамічна маршрутизація, яка здатна адаптуватися до змінних умов мережі та оперативно оновлювати маршрути на основі отриманих повідомлень маршрутизації.

Динамічні протоколи маршрутизації. Цей тип маршрутизації базується на автономній роботі маршрутизаторів, які збирають інформацію для оновлення таблиць маршрутизації. Якщо повідомлення маршрутизації вказує на зміну,

маршрут перераховується відповідно до алгоритмів програмного забезпечення, а нові дані передаються іншим маршрутизаторам. Динамічні протоколи маршрутизації поділяються на внутрішні та зовнішні. Внутрішні, у свою чергу, класифікуються на протоколи на основі відстані та протоколи на основі векторів зв'язку, тоді як зовнішні реалізуються у вигляді path-vector протоколів. Усі ці типи протоколів виконують функції пошуку нових маршрутів, передачі інформації про знайдені маршрути іншим вузлам та пересилання пакетів через маршрутизатори.

Внутрішні протоколи. Першим типом внутрішніх протоколів є протокол на основі вектора відстані. У рішеннях, що базуються на цьому принципі (відомому також як алгоритм Беллмана–Форда), кожному з'єднанню у внутрішній мережі призначається вектор, який містить інформацію про відстань та напрямок.

Перевагою протоколу векторів відстані є простота конфігурації, що робить його доцільним для використання у невеликій мережі. Недоліками протоколу векторів відстані є:

1. Погана конвергенція, тобто повільна реакція на зміни у топології мережі;
2. Генерація додаткового мережевого трафіку шляхом періодичної трансляції повних таблиць маршрутизації навіть за відсутності змін у топології мережі;
3. Відсутність механізмів запобігання утворенню «шлейфів» між маршрутизаторами (як між безпосередніми сусідами, так і в ширококомовних сегментах) призводить до взаємного пересилання пакетів з інформацією про одну й ту саму мережу.

Щодо векторних протоколів маршрутизації на основі відстані, їхня інтеграція з мережею є недостатньо оптимізованою, а механізми запобігання утворенню петель відсутні, що критично впливає на проектування моделей трафіку. Водночас ці протоколи мають перевагу у вигляді спрощеної конфігурації та низької складності налаштування. Наведемо приклади протоколів векторної відстані:

– RIP (Routing Information Protocol - Протокол маршрутизації інформації–протокол IGP, що найчастіше використовується, в Інтернеті. У протоколі RIP як єдина метрика використовується лічильник цілей. Якщо кілька шляхів ведуть до точки призначення, RIP вибирає той, який має найменшу кількість хмелю. Однак,

через використання рахунку цілей як єдиної метрики в протоколі RIP, не завжди буде вибиратися найшвидший шлях. Більше того, RIP не може маршрутизувати пакети на відстані понад 15 цілей.

– IGRP (Internal Gateway Routing Protocol – Протокол маршрутизації внутрішніх шлюзів) –цей протокол було створено спеціально для вирішення проблем маршрутизації у великих мережах, де покриття таких протоколів, як RIP, більше не є достатнім. Протокол IGRP вибирає найшвидший доступний шлях на основі пропускної спроможності, навантаження, затримки та надійності. Він також характеризується набагато вищою кількістю максимальних стрибків порівняно з протоколом RIP. Протокол IGRP використовує лише класову маршрутизацію.

Інший клас внутрішніх протоколів маршрутизації представлений протоколами стану каналу. Алгоритми, що базуються на інформації про стан з'єднань, реалізують підхід «Shortest Path First» (SPF). На відміну від протоколів на основі відстані, вони виконують збір та збереження даних про метрики вартості маршрутів у межах усієї мережі, а також відстежують актуальний стан кожного каналу.

У протоколах на основі стану каналу маршрутизатор формує та підтримує повну базу даних топології мережі, яка містить інформацію про структуру з'єднань та відповідні метрики вартості кожного маршруту (рис. 1.3).

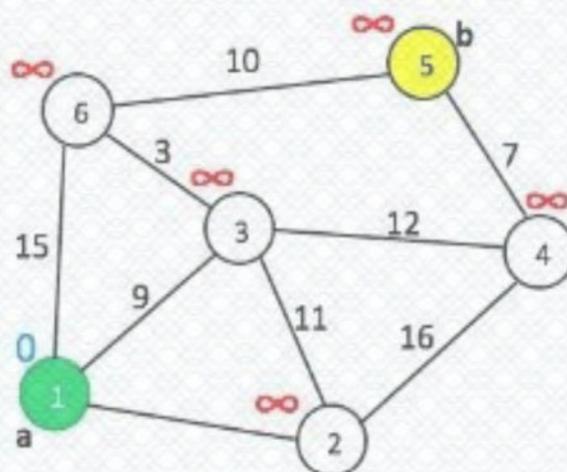


Рисунок 1.3 - Приклад графу, який показує роботу протоколу стану з'єднання

Протокол працює на основі чотирьох етапів:

1. Кожен маршрутизатор надсилає інформацію про свої підключені мережі та їх стан (увімкнений або вимкнений).

2. Далі ці дані розповсюджуються між маршрутизаторами: кожен проміжний вузол отримує та зберігає копію LSA-пакетів у власній базі даних, при цьому їхній вміст залишається незмінним і не редагується.

3. Через деякий час (конвергенція) кожен маршрутизатор має ідентичну топологічну базу даних (тобто карту мережі) і на її основі створюється дерево найкоротших шляхів першого (SPF) шляху до окремих мереж.

4. Маршрутизатор завжди розташовується в кореневій позиції дерева найкоротших шляхів, а вибір маршруту здійснюється на основі сумарної вартості досягнення цільової мережі. При цьому оптимальний шлях не обов'язково збігається з маршрутом із мінімальною кількістю переходів. Для побудови дерева найкоротших шляхів застосовується алгоритм Дейкстри [20].

Перевагами протоколу стану з'єднання є:

1. Реагування на зміни у топології мережі. Після зміни стану з'єднання маршрутизатор генерує новий пакет LSA, який відправляється з маршрутизатора на маршрутизатор, і кожен маршрутизатор, що отримує цей пакет, повинен перерахувати найкоротше дерево шляхів і оновити таблицю маршрутизації.

2. Протокол "Silent" - не розсилає оголошення, що повторюються, а генерує додатковий трафік тільки при зміні стану з'єднання. Завдяки своїй роботі та можливостям протоколи стану з'єднання призначені для підтримки більших мереж.

Недоліками протоколу стану з'єднання є:

1. На початковому етапі роботи протоколу спостерігається підвищене навантаження на смугу пропускання, що пов'язано з активною передачею LSA-пакетів між маршрутизаторами. Це тимчасове зниження ефективності триває до завершення процесу синхронізації (стану «мовчання»), але його вплив на продуктивність мережі є досить відчутним.

2. У зв'язку зі складністю обчислень дерева SPF, протоколи збільшили вимоги до процесора та оперативної пам'яті маршрутизатора.

3. Маршрутизатори, налаштовані до роботи, відносно шляху.

4. Типовим представником цієї групи протоколів є OSPF (Open Shortest Path First).

Зважаючи на наведені вище переваги та недоліки, можна стверджувати, що найбільш сприятливим протоколом для створення транспортної мережі є протокол стану з'єднання. Протокол здатний в реальному часі реагувати на зміни в мережевих припущеннях шляхом створення нових пакетів даних. Наведемо приклади протоколів зі статусом з'єднання:

– OSPF – це протокол маршрутизації на основі стану каналу зв'язку, розроблений у 1988 році Цільовою групою інженерів Інтернету (IETF). Він був розроблений для потреб великомасштабних міжмереж, для яких протокол RIP не є достатнім.

– Протокол IS-IS (Intermediate System-to-Intermediate System - Проміжна система) є протоколом маршрутизації стану каналу зв'язку, використовуваний маршрутними протоколами, відмінними від протоколу IP. Інтегрований протокол IS-IS є розширеною реалізацією протоколу IS-IS, що підтримує різні маршрутні протоколи, включаючи протокол IP.

– Останньою формою динамічної маршрутизації з внутрішніх протоколів є протокол EIDRP, який є розширеним векторним протоколом відстаней, який також використовує деякі функції протоколу стану з'єднання. З цієї причини протокол EIGRP називається гібридним протоколом маршрутизації. Завдяки такій комбінації він характеризується відмінною продуктивністю (швидка конвергенція та низькі накладні витрати на пропускну спроможність). Протокол використовує систему DUAL FSM (Diffused Update Algorithm Finite State Machine) для перерахунку маршрутів. Використовується у мережах, де не більше 50 маршрутизаторів. Має плоску мережеву структуру з розподілом на автономні системи. Для транспортування пакетів використовує надійні протоколи транспортного протоколу.

Зовнішні протоколи маршрутизації реалізують обмін маршрутною інформацією за допомогою механізму path-vector. Маршрутизатори, що

забезпечують взаємодію між різними автономними системами, називаються зовнішніми або крайовими. Прикладом такого протоколу є EGP (Exterior Gateway Protocol), який дозволяє маршрутизаторам узгоджувати обмін маршрутними даними з іншими маршрутизаторами, навіть якщо вони не знаходяться у безпосередньому фізичному сусідстві.

Протокол періодично виконує перевірку працездатності мережі та наявності проблем зі зв'язком із сусідніми маршрутизаторами. Сусідні вузли обмінюються службовими повідомленнями, що забезпечують актуалізацію таблиць маршрутизації. Прикладом такого протоколу є BGP (Border Gateway Protocol), який підтримує обмін інформацією про маршрути між автономними системами, гарантуючи виключення зациклених шляхів. На відміну від внутрішніх протоколів (IGP), таких як RIP або OSPF, BGP не використовує метрики на кшталт кількості стрибків чи затримки. Натомість прийняття рішень щодо маршрутизації ґрунтується на політиках та правилах, визначених мережею.

1.3.2 Застосування методів інформаційної маршрутизації у транспортній логістиці

Аналіз протоколів інформаційної маршрутизації в мережах дозволив транспортним компаніям провести аналогію з процесами формування розкладів та планування маршрутів у логістичних системах. На основі цього підходу було виконано дослідження компаніями Reksersbrink, Makuschewitz та Scholz-Reiter. У рамках дослідження розглядалася концепція протоколу маршрутизації, адаптованого для логістики, під назвою DLRP (Distributed Logistics Routing Protocol). Впровадження принципів розподіленої маршрутизації мало на меті забезпечення відповідності між «пакетами» (транспортними засобами) та динамічне реагування на зміни, що виникають у процесі прийняття рішень при управлінні транспортними потоками. Такий підхід дозволяє ефективно працювати

з великими мережами без централізованого вузла керування та забезпечує контроль рухомих об'єктів у реальних сценаріях транспортних процесів.

У міських умовах потік транспортних засобів змінюється надзвичайно динамічно. Через це формування статичних сценаріїв є недоцільним, оскільки запити на транспортні послуги постійно змінюються, що потребує гнучких та адаптивних рішень.

Протокол DLRP орієнтований на вирішення динамічних задач маршрутизації та функціонує наступним чином. Після отримання вхідних даних, що містять пропозицію маршруту разом із додатковими повідомленнями, протокол у режимі реального часу визначає оптимальний напрямок руху (наприклад, маршрут із максимальною прогнозованою ефективністю використання). Обраний маршрут далі планується для суміжних вузлів мережі (рисунок 1.4 – оголошення маршруту).

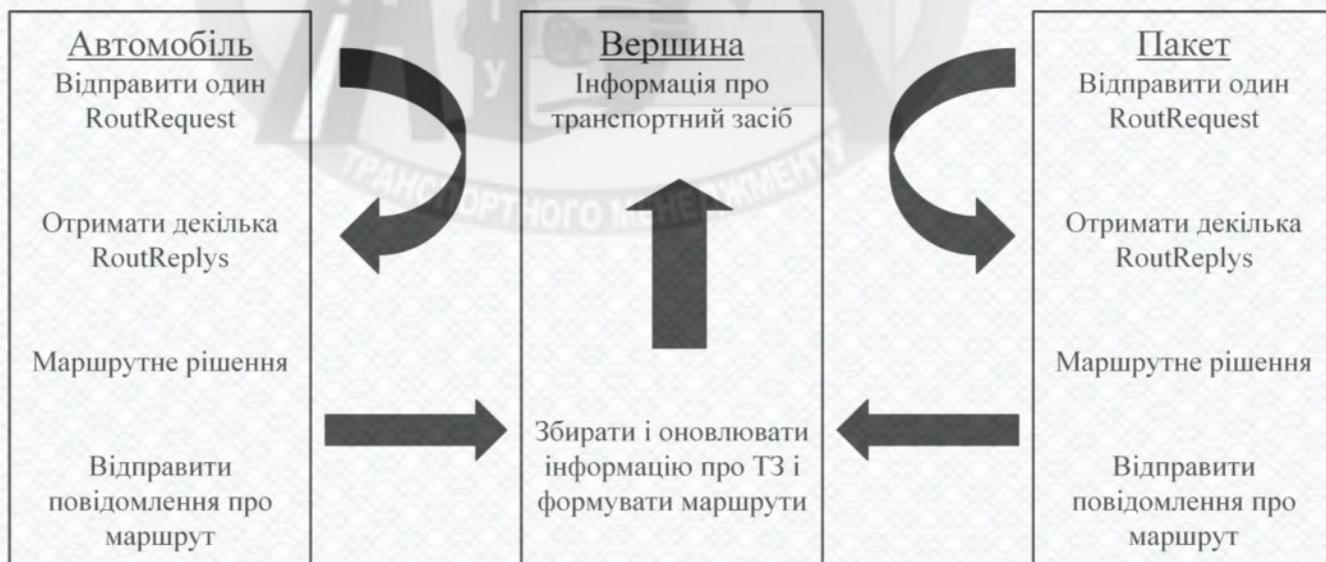


Рисунок 1.4 – Технологія оновлення даних у маршрутній мережі

Цільовою моделлю в даному випадку є кооперативна структура. Елементи транспортної мережі не виконують синхронне планування маршрутів, а діють незалежно один від одного. У цьому підході «пакети» (транспортні засоби) завжди або з'являються, або завершують рух у визначеній точці призначення. Для кожного маршруту на момент прийняття рішення доступний достатній обсяг інформації, що забезпечує коректність вибору.

Концепція протоколу DLRP пропонує низку унікальних переваг: можливість самонавчання, ручне коригування маршрутів та припущень, прогнозування майбутніх умов руху, врахування невизначених негативних факторів у процесі прийняття рішень, а також роботу з будь-яким типом та обсягом інформації. У межах DLRP маршрути не мають фіксованого завершення, що унеможливило визначення точки, де транспортний засіб закінчує роботу в межах обмеженого сценарію. Оскільки DLRP виступає як метод управління, його ключові переваги полягають у формуванні динамічних сценаріїв, максимально наближених до реальних умов. Результати досліджень підтверджують значний потенціал цього підходу.

Попит на методи оптимізації маршрутів, здатні адаптуватися до змін зовнішнього середовища в режимі реального часу, постійно зростає. Розвиток міських агломерацій створює додаткові складнощі для суб'єктів, що займаються плануванням транспортних маршрутів. При формуванні задач оптимізації враховується широкий спектр критеріїв, серед яких: час у дорозі; тривалість вантажно-розвантажувальних операцій; довжина маршруту; вартість доставки; інфраструктурні обмеження та інші фактори. Зазначені вимоги можуть бути реалізовані за допомогою методів та моделей оптимізації, здатних до:

- самовдосконалення;
- ручна зміна маршрутів та припущень;
- оцінка майбутніх умов руху;
- невизначене знання негативних факторів, що прописують процеси прийняття рішень;
- будь-який вид та обсяг інформації.

1.4 Загальна характеристика Вінницької філії ТОВ «ЕЛІТ-Україна»

ТОВ «ЕЛІТ-Україна» це потужне підприємство, яке займається постачанням запасних частин для легкових, вантажних автомобілів, автобусів і мотоциклів, а також технологічного обладнання для автосервісних підприємств.

Компанія ТОВ «ЕЛІТ-Україна» працює на ринку автозапчастин України з 1994 року. Головний офіс знаходиться в м. Києві. З 2015 року компанія «ЕЛІТ-Україна» стала частиною LKQ Corporation – відомого американського постачальника альтернативних і спеціальних запчастин для ремонту та аксесуарів до автомобілів та інших транспортних засобів. LKQ працює в Північній Америці, Європі та, частково, Азії.

ТОВ «ЕЛІТ-Україна» має потужний інтернет-магазин «ESHOP від LKQ» та електронний каталог eCat для постійних та оптових клієнтів. Компанія «ЕЛІТ-Україна» забезпечує широкий перелік запчастин та, що важливо, наявність на запасів на складі, щоб клієнти могли швидко і легко отримати автозапчастини як оптом, так і в роздріб, в будь-яку частину України.

На сьогоднішній день ТОВ «ЕЛІТ-Україна» налічує 37 діючих філій в різних регіонах України. Вінницька філія забезпечує оптову та роздрібну доставку запчастин для автосервісних, транспортних підприємств та приватних клієнтів у м. Вінниця та Вінницькій області. Філія розташована за адресою м. Вінниця, вул. Лебединського, 34. Зовнішній вигляд філії наведено на рис. 1.5.

Вінницька філія налічує великий склад запчастин, який формується з урахуванням місцевих особливостей попиту та сезонних коливань. Доставка запчастин здійснює насамперед з регіонального складу. Проте, за відсутності запчастин на регіональному складі, доставка може здійснювались з центрального складу України, або з центральних складів Європи.



Рисунок 1.5 – Вінницька філія ТОВ «ЕЛІТ-Україна»

1.5 Аналіз складу, структури і стану рухомого складу

Для доставки запчастин клієнтам Вінницька філія ТОВ «ЕЛІТ-Україна» має власний рухомий склад, дані про який наведені в табл. 1.5.

Таблиця 1.5 – Рухомий склад Вінницької філії ТОВ «ЕЛІТ-Україна»

Найменування марок автомобілів	Рік		
	2022	2023	2024
Fiat Doblo Cargo	8	8	8
Skoda Fabia	2	2	2
Skoda Octavia	1	1	1
Разом:	11	11	11

Основну транспортну роботу здійснюють малотоннажні вантажні фургони Fiat Doblo Cargo. Легкові автомобілі переважно використовуються як службовий

транспорт, а також для здійснення невеликих термінових доставок по місту Вінниця.

Проаналізуємо рухомий склад філії. Вікова структура та пробіг з експлуатації показано в таблицях 1.6 – 1.7.

Таблиця 1.6 – Склад парку транспортних машин за тривалістю їх використання

Марки транспортних машин	Кількість транспортних машин за тривалістю їх використання в роках, од.				
	До 3	Від 3 до 5	Від 5 до 7	Від 7 до 10	Більше 10
Fiat Doblo Cargo	-	-	2	6	-
Skoda Fabia	-	-	2	-	-
Skoda Octavia	-	-	-	1	-
Разом:	-	-	4	7	-

Таблиця 1.7 – Склад парку транспортних машин за пробігом з початку їх використання

Марки і кількість транспортних машин	Кількість транспортних машин з пробігом за початком роботи в тис. км, од.						
	до 50	Від 50 до 100	Від 100 до 150	Від 150 до 200	Від 200 до 250	Від 250 до 300	Більше 300
Fiat Doblo Cargo	-	-	-	-	-	6	2
Skoda Fabia	-	-	2	-	-	-	-
Skoda Octavia	-	-	1	-	-	-	-
Разом:	-	-	3	-	-	6	2

Як видно з таблиць 1.6 – 1.7 рухомий склад Вінницької філії має вік 7-8 років, а пробіги автомобілів Fiat Doblo Cargo знаходяться в межах 280-320 тис. км. Отже автомобілі мають допустимі показники згідно рекомендацій по експлуатації, проте вже знаходяться на межі терміну ефективної експлуатації. Таким чином можемо рекомендувати ТОВ «ЕЛІТ-Україна» планувати поступове оновлення рухомого складу.

1.6 Висновки

1. Процеси оперативно-виробничого планування роботи транспортних засобів відбуваються у умовах середовища взаємовідносин «споживач-перевізник», що динамічно змінюються, при цьому поняття об'єкт управління переноситься з транспортного потоку на окремий транспортний засіб, окрему партію вантажу або окремого пасажера. Тобто можна стверджувати, що процес керування вимагає об'єктно-орієнтованих моделей керування у транспортній мережі, що формують оптимальні траєкторії переміщення окремих об'єктів.

2. Задача маршрутизації стає особливо актуальною при багатоваріантності і багатоаспектності (багатокритеріальності) розподілу вантажних потоків в умовах зовнішнього середовища, що динамічно змінюються. У цьому випадку задача оптимальної маршрутизації може бути вирішена тільки на основі розробки спеціалізованого математичного апарату як аналітичного інструменту прийняття ефективних рішень ПЗ на його основі.

3. Для вирішення цього завдання в зарубіжній практиці використовуються методи планування маршрутів інформаційних потоків в інформаційно-комунікаційних мережах, а термін «маршрутизація» спочатку ставитися до набору елементів для планування маршруту та передачі пакетів даних по Інтернету та з'єднані між собою через маршрутизатор.

4. Виконавши аналіз структури і стану рухомого складу Вінницької філії ТОВ «ЕЛІТ-Україна», можна зробити висновок, що структура рухомого складу останніми роками залишається не змінною. Автомобілі є ефективними, знаходяться в гарному технічному стані, проте за терміном експлуатації та пробігом слід рекомендувати підприємству планувати поступове оновлення рухомого складу.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ МАРШРУТІВ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВАНТАЖІВ В ГЕТЕРОГЕННИХ ДИНАМІЧНИХ АВТОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМАХ

2.1 Концепція розв'язання багатокритеріальних задач, що задовольняють динамічним умовам роботи транспортно-логістичних систем

Оскільки залежності між цільовою функцією та параметрами оперативного управління перевезеннями є складними та багатограними, доцільно застосовувати аналітичні (чисельні) методи розв'язання багатокритеріальних задач із використанням обчислювальної техніки. Розглянемо підходи до формування множини ефективних рішень (множини Парето), включаючи методи аналітичного розв'язання багатокритеріальних задач. Основою таких методів є алгоритми визначення вагових коефіцієнтів показників (ВКП) для параметрів задачі. Існують різні способи їх обчислення, серед яких основними вважаються: статистичний, вартісний, аналітичний та евристичний.

Статистичні методи знаходження ВКП можуть бути застосовані при досить великому досвіді напрацювань у процесі управління складних гетерогенних динамічних транспортних системах (ГДТС). В основі цих методів лежить припущення про те, що для будь-якого показника (x_j) завжди існує конкуруючий з ним (x'_j), взаємозв'язок визначається співвідношенням:

$$x_j \neq x_{j.em} \text{ ,} \quad (2.1)$$

при

$$x'_j = x'_{j.em} \text{ ,} \quad (2.2)$$

де $x_{j.em}$ і $x'_{j.em}$ - найкращі з можливих (еталонних) значень j -го показника.

Наближення значень кожного з потенційних показників до стандарту буде тим більшим, чим важливіші середні показники. Так, середнє значення наближення до еталона може розглядатися як оцінка важливості.

Якщо функція $f(x_j/x_{j.em})$ показує ступінь наближення значення j -го показника до еталона, можна вважати:

$$\psi_j = \theta \left[f(x_j/x_{j.em}) \right]. \quad (2.3)$$

Це значення обчислюється як середнє арифметичне для обробки досить великої кількості варіантів статистичних даних.

До аналітичних методів належать ті, що не потребують додаткових даних, окрім значень показників та допустимих областей їх застосування. Наприклад, метод еквівалентних відношень ґрунтується на визначенні зміни узагальненого показника оцінюваного варіанта (у відсотках) залежно від збільшення одиничних показників на один процент.

На жаль, у сучасних дослідженнях, що стосуються оптимізації процесів управління, переважають евристичні методи, які базуються на експертних оцінках та думках фахівців. Розроблено цілу низку раціональних процедур, що дозволяють математично обробляти дані евристичного походження. При цьому застосовуються різні підходи до визначення вагових коефіцієнтів, залежно від обраної методики.

Розглянемо найпоширеніші з них.

Перший підхід передбачає, що експерти виконують лише ранжування показників за ступенем важливості. Кожен експерт упорядковує всі показники відповідно до їхньої відносної значущості, починаючи з найменш важливого, якому присвоюється ранг $\tilde{\psi}_j = 1$, наступному що йде за ним – $\tilde{\psi}_j = 2$, і т. д. Ваговий коефіцієнт для j -го показника визначається на основі результатів ранжування, виконаного h експертами, за наступним принципом:

$$\psi_j = \frac{\sum_{t=1}^h \tilde{\psi}_{jt}}{\sum_{j=1}^m \sum_{t=1}^h \tilde{\psi}_{jt}}, \quad (2.4)$$

де $\tilde{\psi}_{jt}$ – ранг приписаний t -им експертом j -му показнику.

Така «спрощена процедура» передбачає рівномірні інтервали на шкалі відносних значень, що призводить до значного рівня суб'єктивності у прийнятті рішень.

Другий підхід передбачає виконання операції ранжування аналогічно першому випадку, але додатково експерти кількісно оцінюють важливість показників, присвоюючи їм числові бальні значення. У результаті формується зростаюча послідовність чисел P_j . Тоді вагові коефіцієнти можуть бути визначені за такими виразами:

$$\bar{P}_{jt} = \frac{P_{jt}}{\sum_{j=1}^m P_{jt}}, \quad (2.5)$$

$$\bar{\psi}_j = \frac{\sum_{t=1}^h \bar{P}_{jt}}{h}; \quad \sum_{j=1}^m \psi_j = 1, \quad (2.6)$$

таким чином, значення вагових коефіцієнтів визначаються шляхом нормування отриманих оцінок та усереднення експертних думок, що дозволяє мінімізувати суб'єктивність окремих оцінок.

Третій підхід передбачає виконання операцій, аналогічних першому та другому випадкам, після чого проведені оцінки уточнюються за принципом порівняння j -го показника з групою інших. Залежно від результату порівняння його значення коригується — збільшується або зменшується. Далі другий за важливістю показник порівнюється із сумою оцінок менш значущих показників, і його оцінка

також уточнюється. Процес триває доти, доки не будуть скориговані всі оцінки (крім останнього). Після фіксації «ваг» усіх показників виконується їх нормування:

$$\bar{\psi}_j = \frac{\psi_j}{\sum_{j=1}^m \psi_j}; \quad \sum_{j=1}^m \bar{\psi}_j = 1. \quad (2.7)$$

Усі наведені евристичні методи отримання керуючих рішень, окрім основного недоліку — високого рівня суб'єктивності, обумовленого людським фактором, мають ще один суттєвий мінус: неможливість алгоритмізації процесу та його реалізації у програмному забезпеченні. Тому для досягнення цілей дослідження доцільно застосовувати лише методи формування Парето-ефективних рішень. Далі розглянемо графоаналітичний метод визначення множини ефективних планів для задачі лінійного програмування з однією обмежувальною умовою та трьома критеріями ефективності.

Використовуючи графоаналітичний апарат для визначення множини ймовірних ефективних рішень у задачах лінійного програмування, можна сформулювати підмножини домінування окремих альтернатив у кількісних оцінках [14].

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \sum_{j=1}^n a_{1j} x_j \rightarrow \max(\min) \\ k_2 &= \sum_{j=1}^n a_{2j} x_j \rightarrow \max(\min) \\ k_3 &= \sum_{j=1}^n a_{3j} x_j \rightarrow \max(\min) \\ \sum_{j=1}^n x_j &= N; x_j \geq 0; j = \overline{1, n} \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

Для наочності наведемо приклад числового рішення. Наведемо умовну матрицю ефективностей:

$$\|A\| = \begin{pmatrix} 0,21 & 0,23 & 0,21 \\ 0,66 & 0,19 & 0,34 \\ 0,18 & 0,80 & 0,26 \\ 0,84 & 0,03 & 0,46 \end{pmatrix}.$$

У цьому разі $m=4$, $n=3$, а ефективність рішення визначено елементами матриці $A - a_{ij}$, де $i = \overline{1, m}$ – варіанти рішень, $j = \overline{1, n}$ – критерії ефективності.

Тоді ймовірність прояву j -го ефекту при i -му рішенні визначається з умови

$$\sum_{j=1}^n P_j = 1; P_j \geq 0. \quad (2.9)$$

Природно, що всі розв'язки системи (2.8) розташовані у трикутнику (P_1OP_2) , а також на межах цього трикутника – $[P_1O]$, $[OP_2]$ і $[P_1P_2]$, якщо розглядати розв'язок в системі декартових координат (рисунок 2.1).

Осі координат: ймовірність P_1 ; ймовірність P_2 .

Тоді з трикутника (P_1OP_2) можна визначити P_3 :

$$P_3 = 1 - (P_1 + P_2). \quad (2.10)$$

Розглянемо розв'язання задачі на максимум: Область, де переважає друга альтернатива, є мінімальною. Показники ефективності, отримані в цій зоні, практично не відрізняються від результатів, що забезпечує четвертий варіант. Тому другий варіант виключається, а його область об'єднується з домінуючою зоною четвертого рішення. У підсумку домінуючими залишаються третій та четвертий варіанти. Поле ефективних рішень розділене лише на дві підмножини, де межа рівноефективних рішень може бути визначена аналітичним шляхом.

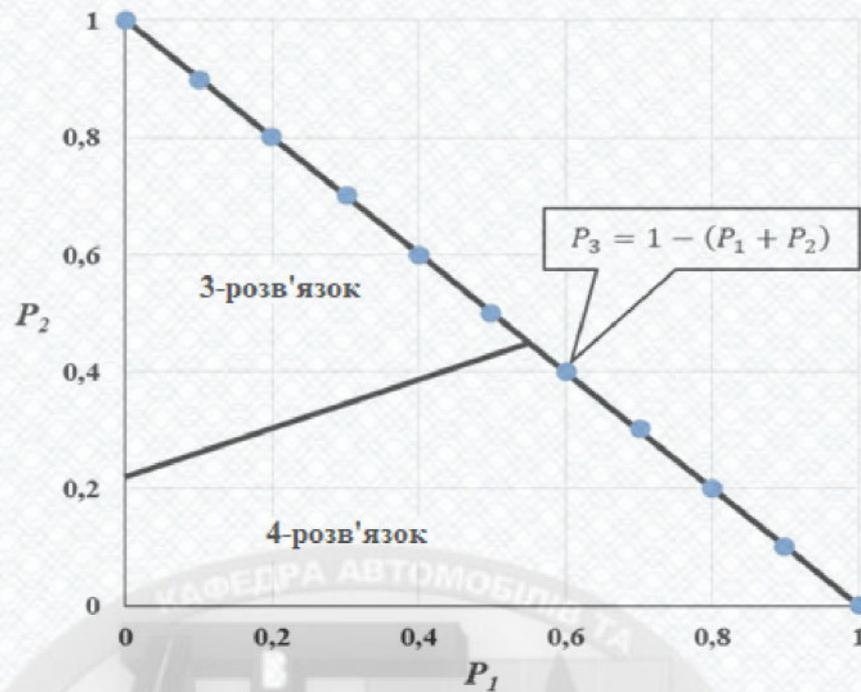


Рисунок 2.1 – Розв'язок умовного прикладу

$$P_1 = 0,378 + 1,86 * P_2.$$

Розв'язання задачі на мінімум: Областями домінування виступають перша та друга альтернатива. Як і у випадку задачі на максимум, через незначну площу домінування другої дії її область об'єднується з домінуючою зоною першої дії. Таким чином, єдиним оптимальним рішенням залишається реалізація першої дії. Графоаналітичні результати цього прикладу можна агрегувати у вигляді ілюстрації, що демонструє сукупність єдиноєфективних рішень серед усіх можливих (рисунок 2.2).

Таким чином, використання методу районування забезпечує класифікацію множини допустимих рішень на підмножини домінування, що відображають ефективність окремих альтернатив. У результаті багатокритеріальна задача пошуку Парето-оптимальних рішень трансформується у лінійну задачу векторної оптимізації. Ключовою перевагою запропонованого підходу є:

1) вдається уникнути недоліків евристичних методів одержання з урахуванням думки фахівців-експертів значень вагових коефіцієнтів;

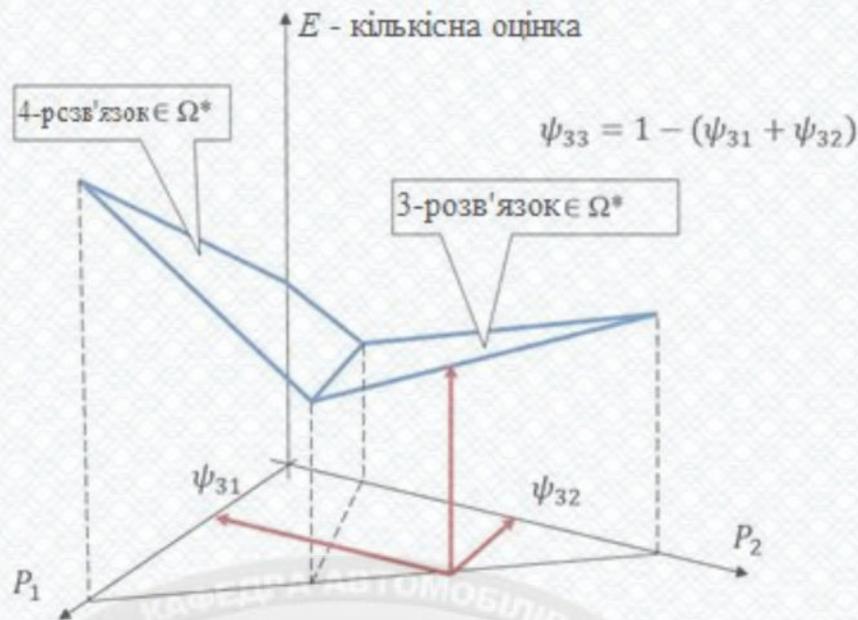


Рисунок 2.2 - Сукупність ефективних розв'язків (розв'язання задачі на мінімум)

2) процедура отримання ВКП є повністю формалізованою, що забезпечує її просту реалізацію у програмному забезпеченні. Метод може бути інтегрований у системи підтримки прийняття рішень для управління процесами вантажних автомобільних перевезень.

2.2 Математичне моделювання процедур прийняття рішень у соціально-технічних системах

Ще однією важливою умовою, що висувуються до методів вирішення завдань у ГДТС, є необхідність працювати з великою кількістю «входів». Розглянемо можливість обробки «великих даних» як інструментів, побудованих на математичних моделях не прогнозування ситуації, але на моделях теорії прийняття рішень. Прикладом цього підходу може бути широко використовуваний метод вимірювання формальної ефективності або аналізу середовища функціонування – Data Envelopment Analysis (DEA), заснований на побудові межі ефективності [14-16]. Цей метод було запропоновано 1978 року американськими вченими А. Charnes,

W. Cooper, E. Rhodes [11], які у свою чергу спиралися на ідеї M.J. Farrell [22]. Цей метод застосовується для визначення ефективності в соціально-організаційних системах для однорідних об'єктів. Сутність методу полягає у визначенні розбіжності між відношенням результатів та виробничих можливостей досліджуваного об'єкта. Межі виробничих можливостей, як правило, невідомі та їх визначення виконується або за допомогою методу DEA, або на підставі емпіричних даних, включених у вибірку дослідження [24].

Межі виробничих можливостей показують альтернативне (максимально можливе рішення) за наявних ресурсів досліджуваної системи. Метод DEA сьогодні активно вдосконалюється та розвивається.

Цей метод має низку беззаперечних переваг:

- 1) метод дозволяє одночасно обробляти досить багато «входів» та «виходів», при цьому кожен з яких може визначатися у різних одиницях виміру;
- 2) метод може враховувати вплив зовнішнього середовища на аналізовану складну систему, тобто змінні чинники, зокрема, зовнішнього середовища;
- 3) метод не вимагає апріорного визначення коефіцієнтів відносної важливості або вагових коефіцієнтів для змінних показників, що є «вхідними» та «вихідними» параметрами у задачах оптимізації;
- 4) метод дозволяє не накладати обмеження на функціональну форму залежностей між «виходами» та «входами»;
- 5) метод при необхідності дозволяє враховувати переваги або пріоритет щодо значущості тих чи інших вхідних або вихідних параметрів;
- 6) метод дозволяє проводити конкретну оцінку необхідних змін на входах та виходах, які дозволять наблизити неефективні об'єкти дослідження на певну межу ефективності;
- 7) метод дозволяє формувати Парето-оптимальну множину, яка відповідає ефективному стану об'єкта;
- 8) метод концентрується на виявленні "best practice" за допомогою об'єктивних аналітичних методів теорії прийняття рішень, а не на суб'єктивних

прогнозних тенденціях «трендах», які отримуються при застосуванні методів регресійного або кореляційного аналізу.

Важливою властивістю методу DEA є можливість визначення множини Парето або множини ефективних планів.

Недоліком методу DEA є процедура визначення меж виробничих можливостей об'єкта системи на підставі емпіричних даних. Розв'язання цього завдання лежить у галузі математичного прогнозування можливих максимально ефективних рішень. Як правило, це завдання є багатокритеріальною нелінійною багатовимірною задачею оптимізації, що вирішується наступним чином.

Вводиться параметр логарифмічної надійності :

$$P = \ln(P). \quad (2.11)$$

Визначається критерій оптимальності, який записується у лінійній формі:

$$P_{cp} \frac{\sum_l \left(\frac{\sum_{\mu_k} P_k + \sum_{\mu_j} P_j}{\sum_j r_j} \right)}{\ln \left(\sum_j r_j \right)} = \sum_l \beta_l x_l, \quad (2.12)$$

де β_l - Константи, що визначають структуру мережі.

Для розв'язання багатокритеріальної задачі в умовах стохастичної невизначеності знову ж таки будуватися лінійна згортка критеріїв оптимізації, недоліки застосування якої були розглянуті вище:

$$J_j(x) = K_1 C(x) - K_2 P_{cp}(x) - K_3 P_3(x), \quad (2.13)$$

де K_1 , K_2 та K_3 - вагові коефіцієнти.

Ще один метод розв'язання нелінійної задачі – метод рівномірного дискретного перебору значень мінімальної надійності в обмеженнях з

використанням розв'язків лінійної задачі, що є досить трудомістким для багатовимірних систем.

Вирішити цю задачу ефективніше можливо – застосовуючи аналітичні методи визначення значень, які входять у множину Парето, застосовуючи методи лінійного програмування, що було показано у попередньому пункті.

У дослідженнях [12, 17-19] встановлено, що при вирішенні завдань, пов'язаних з неточною інформацією, можливе застосування методів лінійного програмування на основі методу районування за принципом дотримання ієрархічного співвідношення ймовірностей можливих станів зовнішнього середовища. Розглянемо приклад розв'язання задачі з використанням методу районування за принципом дотримання ієрархічного співвідношення ймовірностей можливих станів зовнішнього середовища [25-28]:

Сформуємо матрицю ефективностей можливих дій при різних станах зовнішнього середовища, що характеризується трьома основними поняттями:

- m – число дій;
- n – кількість критеріїв;
- E_{ij} – ефективність i -ї дії для j -го критерію, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$.

Матриця ефективностей при різних станах зовнішнього середовища має вигляд:

$$\|E_{ij}\| = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & \dots & e_{1n} \\ e_{21} & e_{22} & \dots & e_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{m1} & e_{m2} & \dots & e_{mn} \end{pmatrix}. \quad (2.14)$$

Розподіл коефіцієнтів відносної важливості (КВВ) для окремих критеріїв визначається обмеженням:

$$0 \leq k_j \leq 1; \quad j = \overline{1, n}; \quad \sum_{j=1}^n k_j = 1, \quad (2.15)$$

або

$$\sum_{j=1}^{n-1} k_j = 1. \quad (2.16)$$

Нехай значення КВВ підпорядковуються послідовності:

$$k \geq k_2 \geq \dots \geq k_j \geq \dots \geq k_{n-1} \geq k_n. \quad (2.17)$$

При $n = 3$ поле розподілів КВВ – прямокутний трикутник з одиничними катетами (рис. 2.3), а при $n = 4$ (рис. 2.4) кількість підмножин, кожній з яких відповідає своє співвідношення КВВ, що дорівнює $P_4 = 4! = 24$.

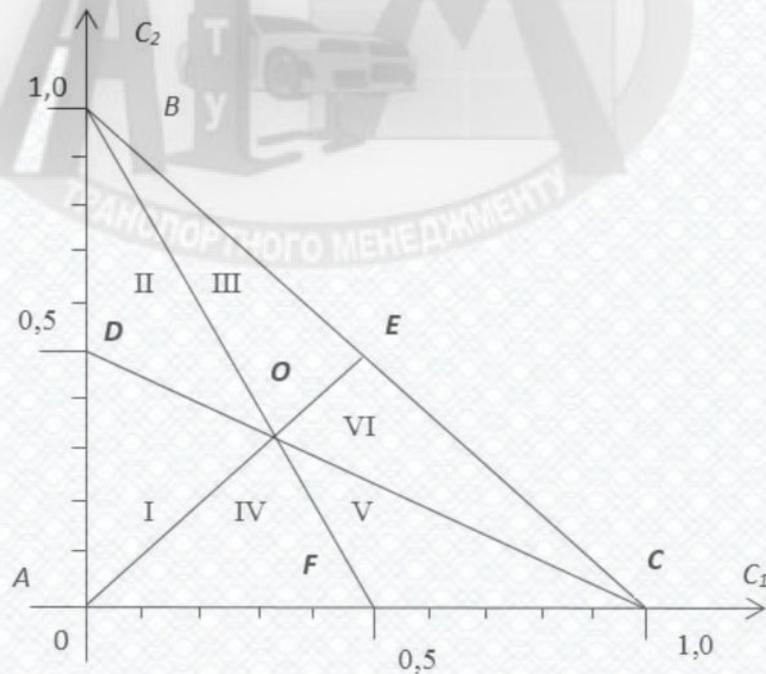


Рисунок 2.3 – Поле розподілів – $k_j \in C$, $P_3 = 3! = 6$

Згідно рис. 2.3 сформуємо таблицю 2.1 та таблицю 2.2.

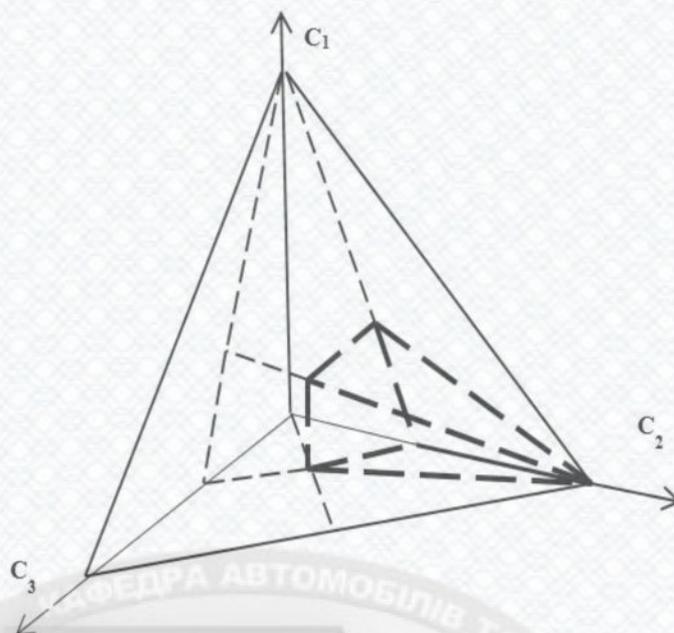


Рисунок 2.4 – Поле розподілів – $k_j \in C, P_4 = 4! = 24$

Таблиця 2.1 - Рівняння сторін та медіан трикутника ABC

	Рівняння відрізків
AB	$k_2 + k_3 = 1; k_1 = 0$
AC	$k_1 + k_3 = 1; k_2 = 0$
BC	$k_1 + k_2 = 1; k_3 = 0$
AE	$k_1 = k_2; k_1 + k_2 + k_3 = 1$
BF	$k_1 = k_3; k_1 + k_2 + k_3 = 1$
CD	$k_2 = k_3; k_1 + k_2 + k_3 = 1$

Таблиця 2.2 - Геометричне поле розподілу КВВ – k_j

Підмножина	Трикутник	Співвідношення КВВ
I	AOD	$k_1 < k_2 < k_3$
II	DOB	$k_1 < k_3 < k_2$
III	BOE	$k_3 < k_1 < k_2$
IV	EOC	$k_3 < k_2 < k_1$
V	COF	$k_2 < k_3 < k_1$
VI	FOA	$k_2 < k_1 < k_3$

З таблиці 2.2 видно, що всі можливі рішення системи

$$0 \leq k_j \leq 1; \quad k_3 \leq k_2 \leq k_1 \quad (2.18)$$

перебувають у підмножині IV.

Цей підхід дозволяє сформулювати алгоритм пошуку максимально ефективного рішення:

$$\left\{ \begin{array}{l} D_j = \sum_{j=1}^n e_j k_j \rightarrow \max, \\ \sum_{j=1}^n k_j = 1, \quad 0 \leq k_j \leq 1, \quad k_j \geq k_{j+1}, \quad j = \overline{1, n-1}, \end{array} \right. \quad (2.19)$$

де

$$k_j = \begin{cases} \frac{1}{c}, & \text{якщо } j = c \\ \frac{\lambda}{c}, & \text{якщо } j < c, \text{ де } \lambda = \frac{n-1}{n}, \\ \frac{1-\lambda}{n-c}, & \text{якщо } j > c \end{cases} \quad (2.20)$$

де індекс (c) визначається, як $e_{c,j} = \max_j e_{j,j}$.

Інтеграція в єдину аналітичну платформу задачі динамічного програмування та розглянутого вище методу районування за принципом ієрархічного співвідношення між ймовірностями дозволить:

1. Визначати формальну ефективність у ГДТС;
2. Виконувати обробку великих обсягів даних ГДТС;
3. Виконувати аналіз середовища функціонування ГДТС із застосуванням алгоритмів штучного інтелекту необмеженій кількості критеріїв або ознак ефективності.

2.3 Застосування методів динамічного програмування у задачах маршрутизації у складних транспортно-логістичних системах

Інтенсивне впровадження цифрових технологій у сучасні транспортні системи забезпечує можливість паралельної обробки значної кількості вхідних та вихідних потоків в інтелектуальних транспортних системах (ІТС), формуючи необхідний масив даних для оптимізаційних алгоритмів. У зв'язку з цим актуальним є розвиток методів маршрутизації в дорожньо-транспортних мережах з орієнтацією на їх реалізацію у програмних платформах, мобільних додатках та інших цифрових рішеннях.

На сьогодні не існує універсального рішення для задачі об'єктивного вибору маршруту через постійне зростання кількості критеріїв ефективності. Останнім часом домінуючим показником ефективності алгоритмів маршрутизації виступає критерій, що визначається обсягом необхідних обчислювальних процедур. Цей параметр формує компроміси між часом обробки запитів, попередньою підготовкою даних, використанням дискового простору, частотою запитів, а також стійкістю алгоритму при внесенні змін до маршрутів. Якщо раніше ключовим фактором була відстань, то сьогодні ця проблема вирішена – сучасні алгоритми гарантовано знаходять оптимальні найкоротші маршрути. Наразі актуальними залишаються такі питання:

1) наскільки можна використовувати як об'єктивну функцію єдиний критерій – витрати: найкоротша відстань та проекція цього критерію на комплексний показник?

2) наскільки раціональні алгоритми маршрутної оптимізації, що застосовуються, з позиції обсягу обчислювальних процедур?

Найбільш розповсюдженим класичним методом розв'язання задач маршрутизації є алгоритм Дейкстри, розроблений нідерландським дослідником Е. Дейкстрою у 1959 році. Він широко використовується у програмному забезпеченні для побудови маршрутних транспортних мереж [11,12]. Алгоритм дозволяє визначити найкоротший шлях від заданої вершини графа до всіх інших.

Ефективність його застосування та модифікації стали предметом численних зарубіжних досліджень [23-27]. Далі наведемо короткий опис принципу роботи. На рис. 2.5 показано нумерацію вершин та вагові коефіцієнти їхніх зв'язків.

Позначимо мінімальну вагу зв'язків (червона мітка) при першій дії як шлях з вершини 1 (рисунок 2.6). Мінімальну мітку має вершина 1. Її сусідами є вершини 2, 3 та 6. Перераховуємо сусідів по черзі та визначаємо найкоротшу відстань до вершини тощо (рисунок 2.7).

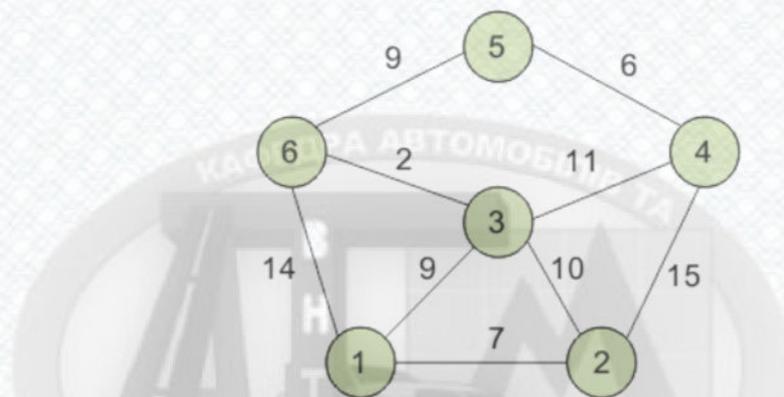


Рисунок 2.5 – Формування системи

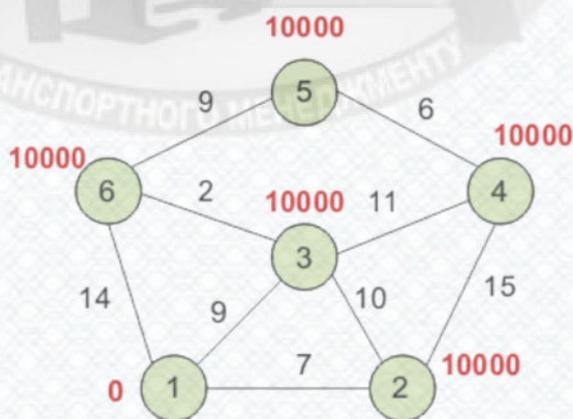


Рисунок 2.6 – Перша дія

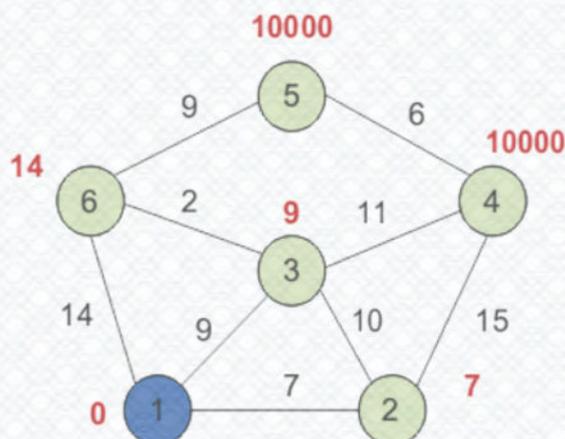


Рисунок 2.7 – Подальший розв'язок

Алгоритм Дейкстри легко реалізується у програмному забезпеченні, проте його ключовим недоліком є однокритеріальний підхід до розв'язання задачі. Паралельно з розвитком цього алгоритму досліджується альтернативний метод – алгоритм Беллмана–Форда [27]. Він базується на використанні черги без пріоритетів. Основна перевага полягає у циклічному характері роботи: алгоритм динамічно покращує поточний стан системи, виконуючи ітерації, під час яких сканує всі вершини з оновленими відстанями. Беллман–Форд реалізує дискретне управління в гнучких дорожньо-транспортних системах (Ω), застосовуючи покрокове оновлення після визначення ефективного рішення та його використання як одного з кінцевого набору можливих впливів.

У загальному вигляді дискретна керована дорожньо-транспортна мережа для однокритеріальної моделі визначається

$$\Omega = \{D; x_0; F; V(x); f(x, v); s(x, v)\}, \quad (2.21)$$

де D – множина можливих станів ГДТС;

F – множина станів параметрів ГДТС;

$V(x)$ – множина управлінь при виборі напрямку переміщення (варіантів дій у системі) – ($x \in D|F$);

$f(x, v)$ – функція переходів зі стану x при управлінні v ;

$s(x, v)$ – функція «втрат» на виробництво процесів переміщення.

Обчислення значень функції Беллмана за формулою (2.21) виконується поетапно, що дозволяє впорядкувати процес та суттєво зменшити кількість варіантів маршрутів для аналізу. Далі наведемо приклад розв'язання задачі оптимізації переміщень у системі на основі алгоритму Беллмана (умова на рис. 2.8).

Побудова маршруту, що базується на принципі Беллмана:

$$B(x) = \min_{v \in V(x)} \{s(x, v) + B(f(x, v))\}, \quad (x \in D|F), \quad (2.22)$$

де $B(x)$ - функція $B(x)$ у попередньому дискретному стані.

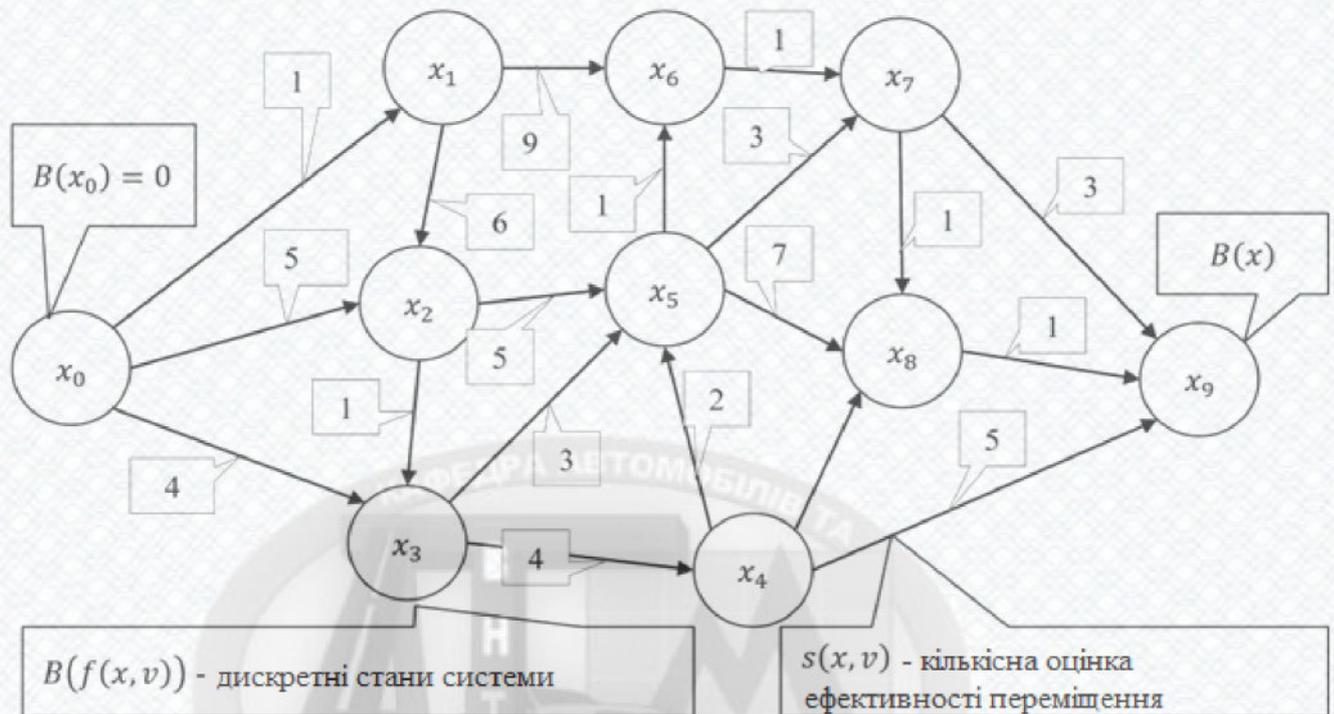


Рисунок - 2.8 Умовний граф можливих маршрутів у ГДТС із дискретними станами (Ω)

Для станів системи Ω_1 (вершин графа $G(\Omega_1)$) послідовно обчислюються значення функції Беллмана. Початково встановлюємо $B(9) = 0$. Далі, використовуючи формулу (2.22), отримуємо мінімальну «вартість» серед усіх можливих повних траєкторій, яка дорівнює 11.

Ключовим недоліком застосування методів динамічного програмування для маршрутизації в гетерогенних динамічних транспортних системах є орієнтація лише на один керований критерій. У реальних умовах ГДТС зазвичай потребує багатокритеріальних розрахунків. При цьому технологія синтезу повної множини ефективних рішень повинна включати визначення окремих оцінок, що відповідають принципу «Парето-оптимальності», що неминуче призводить до зростання обчислювальної складності та кількості процедур.

У таблиці 2.3 наведено інформацію про методи маршрутизації в ГДТС, що реалізують пошук рішень на основі множини Парето. До них належать: дві

модифікації алгоритму Дейкстри, два ієрархічні методи на його основі (CRP та CH), три алгоритми, що не використовують графові структури (TNR, HL, HLC), а також два комбіновані підходи (CHA та TNR+AF). Крім того, у таблицю включено метод «Прапори Дуг» та алгоритм із застосуванням сепараторів (CRP).

Суттєве скорочення кількості обчислювальних процедур можливе шляхом побудови математичних моделей та алгоритмів формування множини Парето на основі методів лінійного програмування [21].

2.4 Висновки

1. Застосування методів теорії прийняття рішень (метод районування дозволяє) дозволяє досягти зазначених завдань, при цьому вдається усунути недоліки евристичних методів, пов'язані з суб'єктивним визначенням вагових коефіцієнтів на основі експертних оцінок, оскільки процедура отримання векторного критерію Парето (ВКП) є повністю формалізованою та легко реалізується у програмному забезпеченні.

2. Необхідним інструментом маршрутизації перевезень є інтеграція в єдину аналітичну платформу задачі динамічного програмування та розглянутого методу районування за принципом ієрархічного співвідношення між ймовірностями.

3. Для створення методики визначення оптимальних маршрутів в умовах оперативного планування автомобільних вантажних перевезень, що динамічно змінюються, повинна бути виконана розробка оптимізаційної аналітичної моделі об'єктно-орієнтованого управління та алгоритмів на її основі.

3 МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ МАРШРУТІВ ПРИ ОПЕРАТИВНО-ВИРОБНИЧОМУ ПЛАНУВАННІ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В ДИНАМІЧНО ЗМІННИХ УМОВАХ

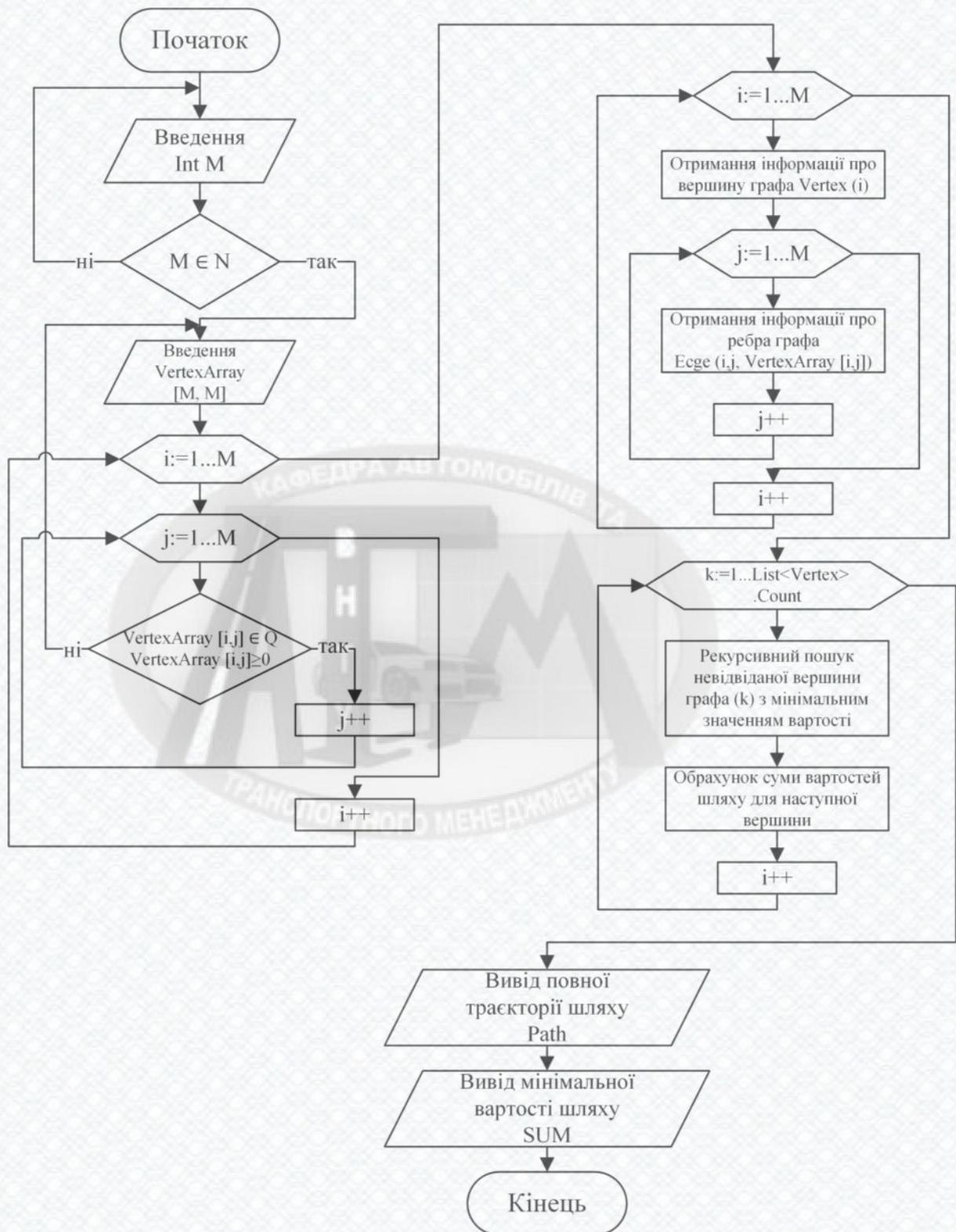
3.1 Розробка алгоритмів формування оптимальних маршрутів у транспортно-логістичних системах

Розробка алгоритмів та програмного забезпечення для розв'язання задач динамічного програмування на основі принципу Беллмана не становить значної складності. Схема алгоритму наведена на рис. 3.1.

При отриманні множини Парето-ефективних рішень основною складністю буде вибір методу прийняття рішень та необхідність тривалих розрахункових процедур. У більшості випадків процедури прийняття рішень, що базуються на відомих методах, забезпечують об'єктивні результати. Проте нерідко виникає суперечність: рекомендації різних методів можуть не збігатися. Цей недолік особливо проявляється при необхідності врахування великої кількості критеріїв із різноспрямованими цілями. У таких умовах виникає потреба застосування спеціального методу пошуку Парето-оптимальних рішень, який не лише об'єктивно вирішує поставлену задачу, а й легко реалізується у програмному забезпеченні.

Основне завдання маршрутизації в транспортно-логістичних системах можна розглядати як задачу динамічного програмування з необхідністю вибору ділянок маршруту за кількома критеріями ефективності. Критеріями можуть виступати показники перевізного процесу. У цьому випадку дискретний стан ГДТС визначається одиничними показниками вантажних перевезень, розподіленими за критеріями ефективності та представленими у вигляді матриці ефективностей.

У рамках магістерської кваліфікаційної роботи розроблено алгоритми, що забезпечують формування задачі пошуку Парето-оптимальних рішень (рисунки 3.2 та 3.3).



M – кількість вершин графа; $VertexArray [M, M]$ – масив значень вартості шляху між вершинами; $List<Vertex>$ - список вершин графа; $Edge (i, j, VertexArray [i, j])$ - ребро графа, r урахуванням багатокритеріальної оцінки; $path$ - повна траєкторія шляху мінімальної вартості з початкової точки в кінцеву; SUM – мінімальна вартість шляху у кількісній оцінці

Рисунок 3.1 – Алгоритм автоматизованого розрахунку задачі динамічного програмування



Рисунок 3.2 – Алгоритм формування матриць ефективності окремих дискретних станів

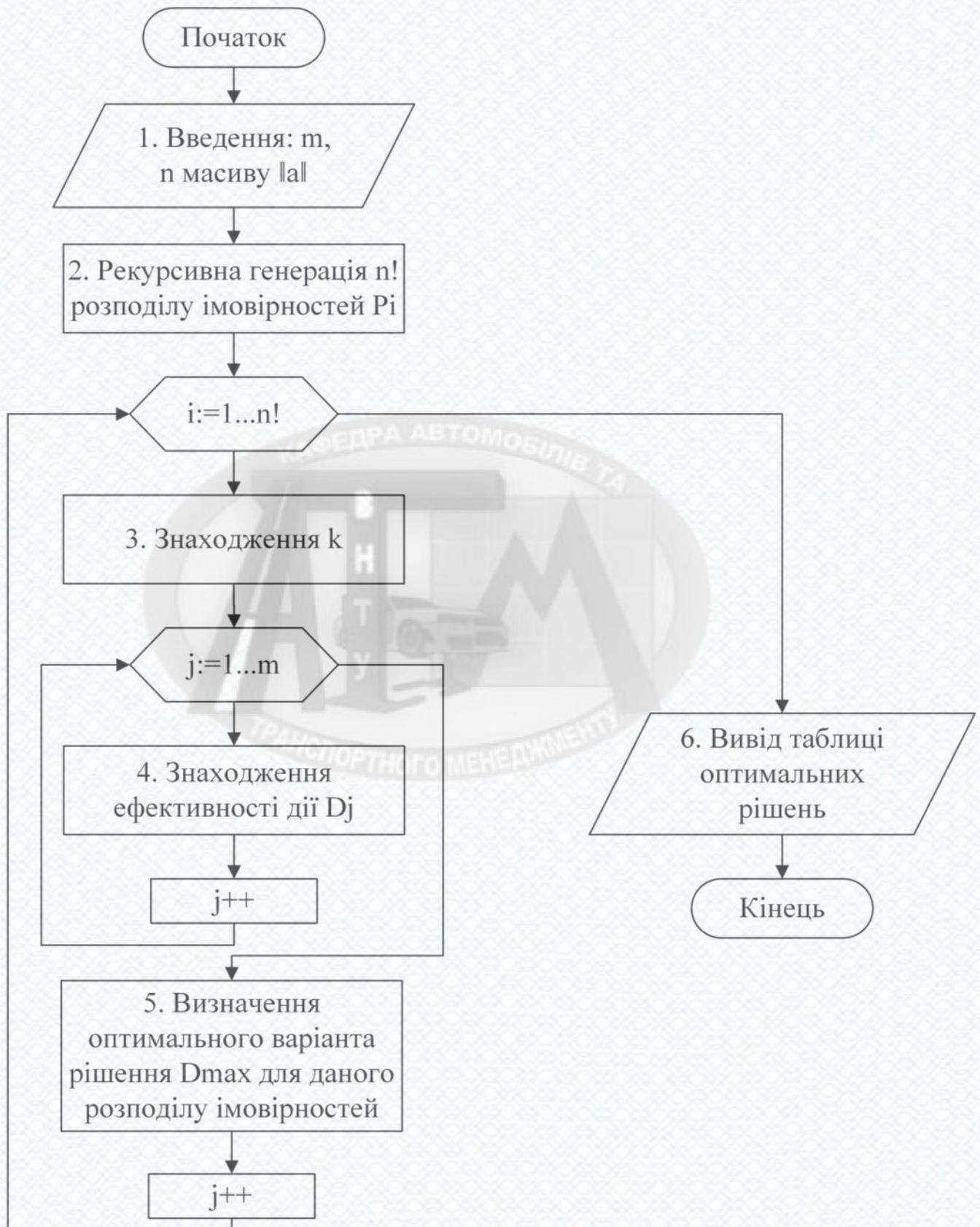


Рисунок 3.3 – Алгоритм розв’язку багатокритеріальної задачі пошуку Парето-оптимальних рішень

Для розв'язання задачі пошуку оптимальних маршрутів вантажних перевезень в роботі розроблено програмне забезпечення за наведеними алгоритмами.

Формування алгоритмів для розв'язання задач динамічного програмування та багатокритеріальної оптимізації

1) алгоритм і програмне забезпечення, що реалізують принцип динамічного програмування за Беллманом, забезпечують визначення оптимальної траєкторії переміщення вантажу (маршрут) в ГТДС;

2) алгоритм і програмне забезпечення для визначення Парето-оптимальних варіантів дій у багатокритеріальних системах створюють основу для переходу до ключового етапу — інтеграції розроблених методів у єдиний програмний комплекс.

3.2 Аналітична модель визначення оптимальних маршрутів у динамічно змінних умовах

Аналітична модель визначення оптимальних маршрутів в умовах динамічної зміни параметрів базується на інтеграції результатів багатокритеріальної оптимізації у задачу динамічного програмування. Для кожного дискретного стану системи здійснюється вибір керуючої дії з урахуванням множини критеріїв ефективності. При такому підході формула (2.22) модифікується з урахуванням співвідношень (2.19) та (2.20), утворюючи математичну модель з рекурентним співвідношенням:

$$B(x) = \underset{v \in V(x)}{\text{opt}} \{s(e, d_i) + B(f(d_i))\}, \quad (x \in D | F);$$

$$d_j = \sum_{j=1}^n e_j k_j, \quad \sum_{j=1}^n k_j = 1, \quad 0 \leq k_j \leq 1, \quad k_j \geq k_{j+1}, \quad j = \overline{1, n-1}; \quad (3.1)$$

$$k_j = \begin{cases} 1, & \text{якщо } j = c \\ c, & \\ \frac{\lambda}{c}, & \text{якщо } j < c, \text{ де } \lambda = \frac{n-1}{n}, \\ \frac{1-\lambda}{n-c}, & \text{якщо } j > c \end{cases}$$

де D - множина можливих станів або кількість зв'язків у ГДТС;

F - множина станів параметрів або кількість критеріїв оптимізації в ГДТС;

$d_i(e)$ - множина управлінь при виборі напрямку переміщення (варіантів дій у системі) – ($e \in D \mid F$);

$f(e, v)$ – функція переходів зі стану e при управлінні d_i ;

$s(e, v)$ – функція кількісної оцінки ефективності при виробництві процесів переміщення об'єкта в ГДТС.

Загальний підхід передбачає розгляд множини станів параметрів або кількості критеріїв оптимізації в ГДТС як руху матеріального потоку в просторово-часовій системі координат. При цьому транспортний потік описується трьома основними параметрами: обсягом, відстанню та часом переміщення, а також дискретними станами, що відповідають:

- вантажовідправниками;
- вантажоодержувачами;
- проміжними пунктами вантажопереробки – транспортно-складськими комплексами (ТСК).

Така система може бути побудована на базі трьох основних критеріїв:

$$Q \rightarrow \max : L \rightarrow \min : T \rightarrow \min, \quad (3.2)$$

де Q - обсяг перевезень, т;

L – відстань перевезення, км;

T – час перевезення, год.

У прикладних розрахунках багатокритеріальний підхід зазвичай трансформується в однокритеріальну модель, де цільовою функцією виступає сумарна тривалість транспортного циклу перевезення вантажу. Загальний час визначається як адитивна комбінація окремих складових, що характеризують етапи виконання процесу доставки.

Тривалість початку транспортування вантажу:

$$T_1 = T_1^n + T_1^o, \quad (3.3)$$

де T_1^n – час підготовки вантажу до відправки, год;

T_1^o – час початку переміщення вантажу, год.

Тривалість виконання вантажно-розвантажувальних робіт:

$$T_2 = t_1^n + t_2^n + t_3^n + t_4^n, \quad (3.4)$$

$$T_2 = t_1^p + t_2^p + t_3^p + t_4^p, \quad (3.5)$$

де t_1^n - час очікування завантаження або розвантаження, год;

t_2^n - час маневрування АТЗ, год;

t_3^n - час завантаження або розвантаження вантажу, год;

t_4^n – час на оформлення документів, год.

Тривалість транспортування визначається величиною технічної швидкості транспортного засобу:

$$T_3 = \frac{L_{iv}}{V_m}, \quad (3.6)$$

де L_{iv} - довжина їздки з вантажем, км;

V_m - технічна швидкість, км/год.

Враховуючи попередні складові тривалість процесу вантажних автомобільних перевезень за один транспортний цикл:

$$T = T_1^n + t_{m1} + t_1^n + t_2^n + t_3^n + t_4^n + \frac{L_{ie}}{V_m} + t_1^p + t_2^p + t_3^p + t_4^p + T_5. \quad (3.7)$$

Тривалість циклу вантажних перевезень формується як інтегральна сума операційних компонентів, кожен з яких у межах ГТДС характеризується власними параметрами багатофакторного середовища з високим рівнем стохастичної невизначеності. Така складність структури неминує призводить до значних похибок при аналітичних розрахунках ефективності транспортного процесу.

У роботі [26] вирішення цієї проблеми здійснюється шляхом визначення чотирьох критеріїв ефективності (рис. 3.4).

$$k_U \rightarrow \max; k_W \rightarrow \min; k_Q \rightarrow \max; k_P \rightarrow \min. \quad (3.8)$$

Усі отримані показники інтегруються в узагальнені критерії годинної та об'ємної продуктивності автомобільного парку та транспортно-складських комплексів.

До параметричного комплексу ГТДС включаються взаємозалежні показники, серед яких:

t_{n-p} – час простою в вантажно-розвантажувальних роботах;

l_{ie} – довжина їздки з вантажем, км;

V_m – середня технічна швидкість;

$Q_{m.нсрм}^3$ - нормативна місткість складу;

k_3 - коефіцієнт завантаження складу тощо.

Цілком обґрунтовано зазначається, що оперативне керування системою, яка містить десятки або сотні тисяч елементів, у режимі ручного управління є практично неможливим [26].

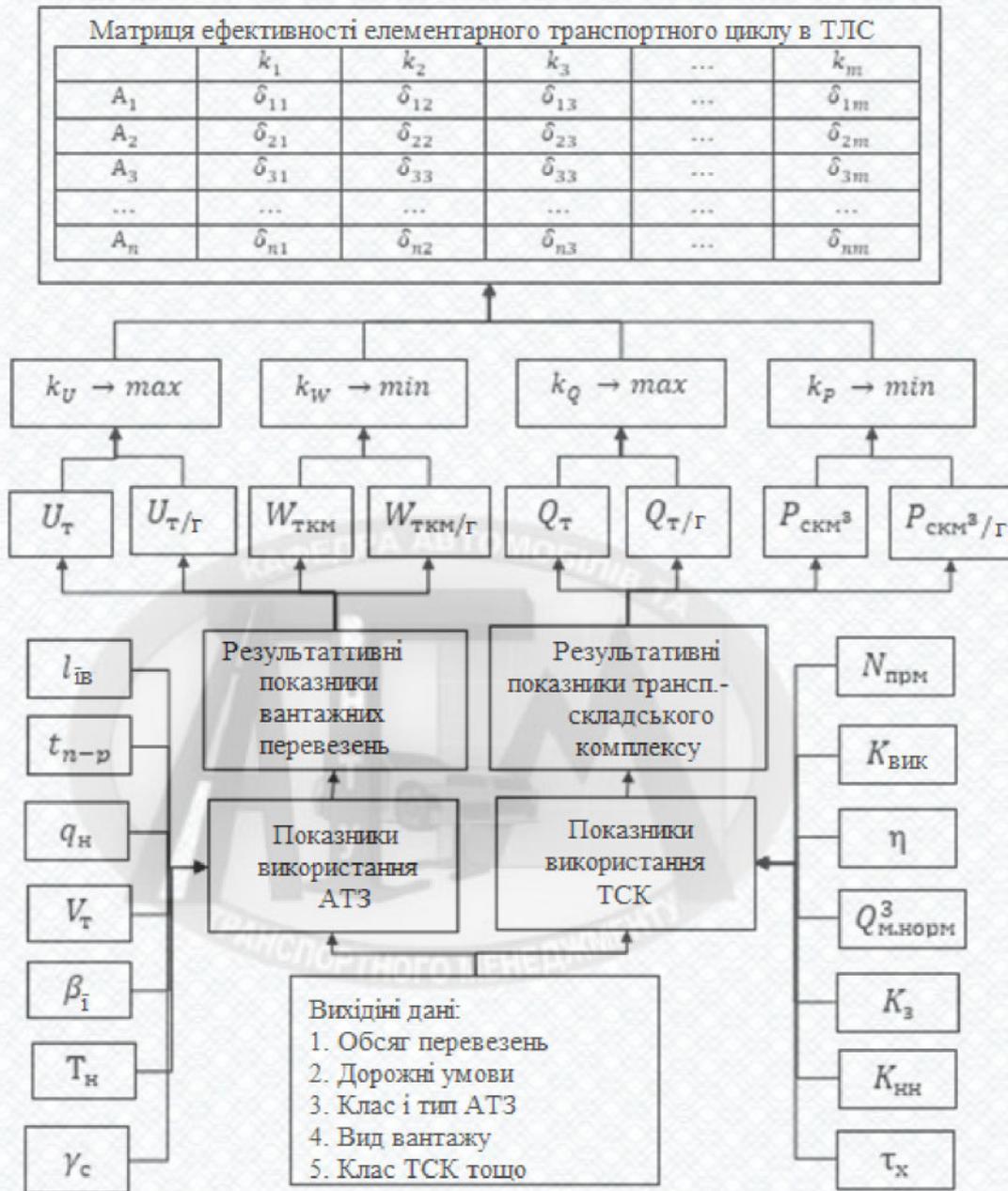


Рисунок 3.4 - Системи критеріїв управління у ГТДС

Аналітична модель (3.1) дозволяє вирішити цю проблему. У режимі ручного управління визначаються лише базові вихідні параметри, характерні для конкретної ГТДС, тоді як ефективність траєкторії руху вантажної партії або транспортного засобу розглядається як функція від потенційно необмеженої множини змінних:

$$E_{opt} = f(d_j, i=1..m, j=1..n), \quad (3.9)$$

де $i=1...m$ - кількість досліджуваних параметрів, що встановлюються підприємством, що застосовує «протокол маршрутизації»;
 $j=1...n$ – кількість варіантів переміщень із окремого вантажовідправника чи ТСК.

Термін «протокол маршрутизації» запозичено із зарубіжної практики. Як зазначалося вище, методи планування маршрутів для пошуку оптимальних рішень базуються на принципах теорії маршрутизації та передачі пакетів даних у мережах Інтернет. Відповідно, за аналогією можна сформулювати такі визначення:

- 1) Маршрутизатор – аналітична модель та методологія визначення оптимальних маршрутів, що лежать в основі алгоритмів їх побудови.
- 2) Протокол маршрутизації – програмний комплекс, орієнтований на вирішення завдань маршрутизації з урахуванням специфіки перевезень, географічних умов та інших параметрів.

Таким чином алгоритм «протоколу маршрутизації» по суті зводиться до зображеного на рис. 3.1.

3.3 Порядок роботи протоколу маршрутизації з урахуванням, розробленої методики визначення оптимальних маршрутів

Розглянемо алгоритмічну послідовність вирішення задачі оптимізації маршрутів автомобільного транспорту із застосуванням розробленого протоколу маршрутизації, що базується на методиці визначення оптимальних траєкторій у динамічно змінних умовах зовнішнього середовища перевезень. Додатково буде продемонстровано порядок розрахунку на умовному числовому прикладі.

На рисунку 3.5 наведено умову задачі, доповнену розширеним набором показників, представлених у вигляді матриці ефективності дій за різних сценаріїв зовнішнього середовища (формула 2.19). У цій матриці кожен стовпець відповідає окремому критерію оцінки ефективності.

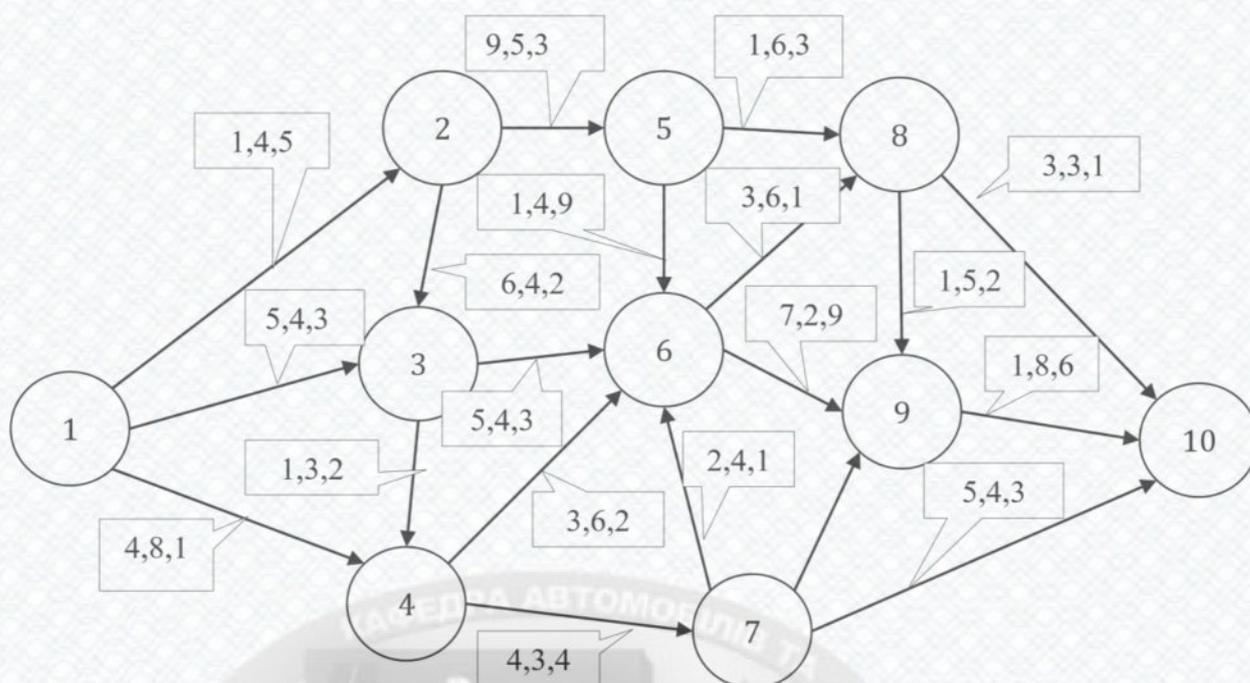


Рисунок 3.5 – Ініціалізація задачі визначення оптимального маршруту за необмеженої кількості досліджуваних факторів (на прикладі 3-х факторів)

Досліджувана транспортна мережа описується кількістю вершин, включених до її структури (наразі – 10), що визначає межі аналізованої системи.

Аналітична модель (3.1) забезпечує можливість роботи з великою, практично необмеженою кількістю критеріїв. Обмеження їх кількості означає формалізацію досліджуваного факторного простору лише за числовим параметром. Термін «зверху» вказує, що значимість або вага кожного фактора на цьому етапі визначається ймовірністю його прояву. Оскільки система функціонує в умовах невизначеного середовища, оцінка ймовірностей прояву факторів у задачі еквівалентна визначенню вагових коефіцієнтів k , які обчислюються аналітично за рекурентним співвідношенням (3.1).

На першому етапі виконується введення вихідних параметрів у протокол маршрутизатора, побудований на основі аналітичної моделі оптимізації маршрутів. Наступним кроком є введення даних щодо кожного логічного зв'язку в досліджуваній системі. Структура зв'язків може формуватися вручну або автоматизовано. Автоматизація процесу є доцільною для практичного

застосування, коли інформація імпортується з корпоративних баз даних через інтеграційні драйвери.

Після завершення визначення всіх зв'язків, на третьому етапі виконується процедура нормалізації параметрів досліджуваної системи відповідно до заданої цільової функції. Розрахунки здійснюються за аналітичними співвідношеннями, що забезпечують приведення показників до єдиної шкали:

$$\delta_j = \begin{cases} \frac{e_j}{\max_{1 \leq i \leq m} e_j}, & \text{якщо } i\text{-й показник максимізується,} \\ \frac{\min_{1 \leq i \leq m} e_j}{e_j}, & \text{якщо } i\text{-й показник мінімізується.} \end{cases} \quad (3.10)$$

$$b_j = \frac{\delta_j}{\sum_{k=1}^n \delta_{ik}}. \quad (3.11)$$

На четвертому етапі виконується перша оптимізаційна процедура – побудова вектора допустимих рішень, що містить кількісні оцінки ефективності для кожного зв'язку системи. Кожен параметр ефективності визначається як результат багатокритеріальної оптимізації за принципом Парето, відповідно до співвідношень (2.19) та (2.20). Сформований масив даних слугує аналітичною основою для наступного етапу – розв'язання задачі динамічного програмування.

Завершальний етап роботи протоколу маршрутизації передбачає розв'язання задачі динамічного програмування, що забезпечує визначення оптимальної траєкторії руху об'єкта в межах досліджуваної системи.

На рисунку 3.6 представлено схему траєкторії руху об'єкта в межах досліджуваної системи, отриману за допомогою розробленого протоколу маршрутизації.

Далі наведемо коментар щодо функціонування створеного протоколу маршрутизації:

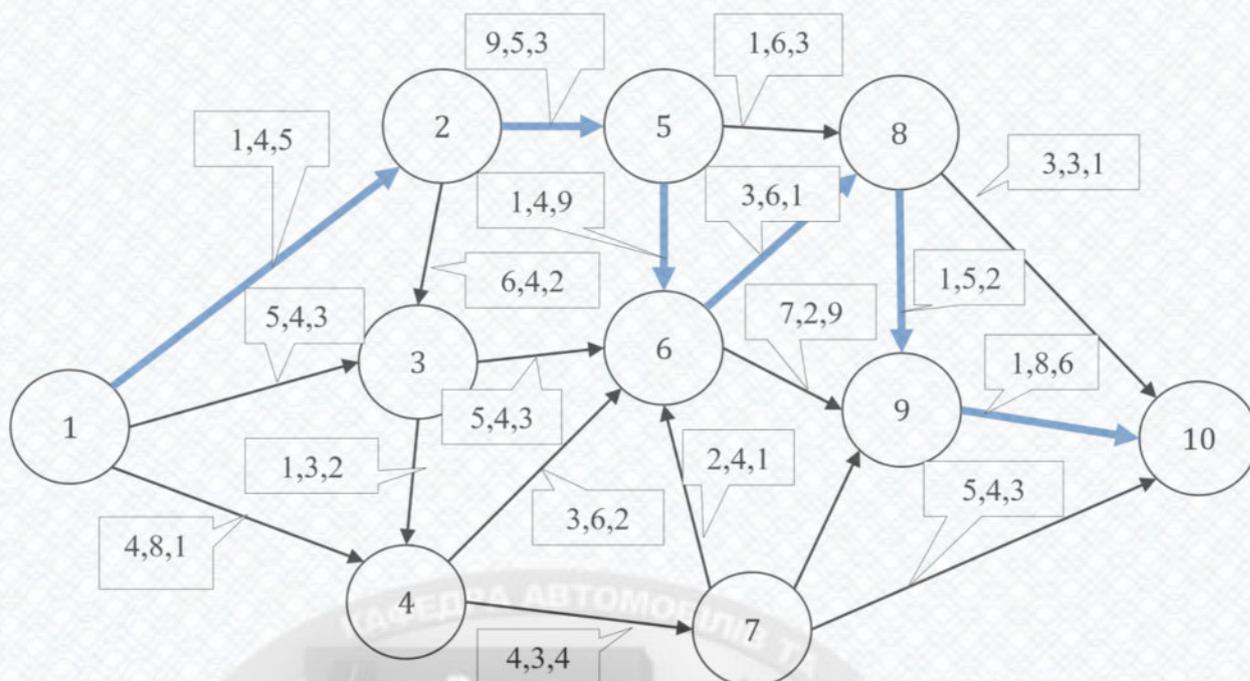


Рисунок 3.6 - Схема руху об'єкта в системі розрахована із застосуванням розробленого протоколу маршрутизації

1. Протокол маршрутизації підтримує роботу з довільною кількістю показників, агрегованих у критерії ефективності, обмеження яких визначається лише пріоритетами експлуатуючого підприємства.

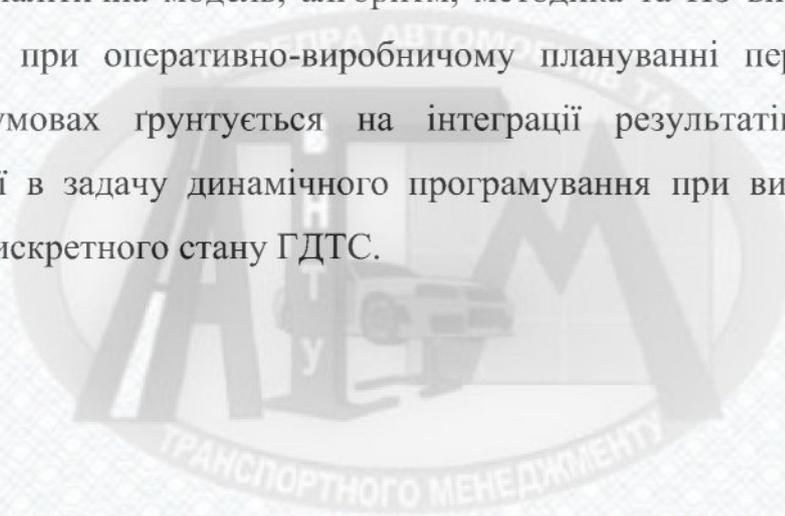
2. У процесі виконання першої оптимізаційної задачі протокол маршрутизації формує «цифровий двійник» системи – модель усіх можливих станів об'єкта при його переміщенні. Цей «цифровий двійник» являє собою повну сукупність ефективностей дій, виражених у кількісних показниках. Кожен елемент матриці отримано шляхом розв'язання багатокритеріальної задачі з визначенням Парето-оптимальних рішень.

3. Під час розв'язання другої оптимізаційної задачі – задачі динамічного програмування – визначається не лише одна оптимальна траєкторія, а повна множина можливих маршрутів, кількість яких становить $(n!)$. Кожне з n рішень ранжується відповідно до пріоритетів заданих критеріїв. Таким чином, математичний простір рішень включає $(n!+1)$ варіантів, що дозволяє підприємству-експлуатанту обрати рекомендоване рішення з урахуванням власних пріоритетів.

3.4 Висновки

1. Розроблено алгоритми та ПЗ, що дозволяють сформулювати задачу отримання Парето-оптимальних рішень. Вирішення даної задачі дозволить не тільки отримати шукані Парето-оптимальні рішення, а й значно скоротити кількість обчислювальних процедур, необхідних для їх пошуку. Алгоритм та ПЗ вирішення задачі динамічного програмування, що реалізує принцип Беллмана, дозволяє отримати оптимальний маршрут перевезення вантажу.

2. Аналітична модель, алгоритм, методика та ПЗ визначення оптимальних маршрутів при оперативно-виробничому плануванні перевезень у динамічно змінних умовах ґрунтується на інтеграції результатів багатокритеріальної оптимізації в задачу динамічного програмування при виборі керуючої дії для кожного дискретного стану ГДТС.



4 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ ЗА ЗАПРОПОНОВАНОЮ МЕТОДИКОЮ НА ПРИКЛАДІ ВІННИЦЬКОЇ ФІЛІЇ ТОВ «ЕЛІТ-УКРАЇНА»

4.1 Цифрова об'єктно-орієнтована модель розвізного маршруту під час оперативного планування вантажних перевезень

Зростання складності сучасних ТЛС призводить до неможливості повноцінно і достовірно відстежувати всі необхідні процедури для реалізації необхідних ефективних змін у «ручному» режимі. У цьому випадку процес розвитку системи перетворюється на погано керований або некерований. Процеси управління в сучасних складних ТЛС поєднує принципова спільність умов, яка визначається:

1. Динамічно змінними умовами зовнішнього середовища експлуатації системи.
2. Відсутністю достатнього ступеня визначеності необхідного інформаційного стану під час вирішення оптимізаційних завдань оперативного планування вантажних перевезень
3. Наявністю більшого числа критеріїв різноспрямованого цілепокладання та великої кількості можливих варіантів рішень.

Тому в сучасних моделях управління складними ГДТС визначилася тенденція переходу до «активного управління» (Active Traffic Management), коли кожен елемент (об'єкт) ГДТС повинен співвідносити свої дії із загальною концепцією управління, а не навпаки. Таким чином, поняття об'єкт управління переноситься з транспортного потоку на окремий транспортний засіб, окрему партію вантажу або окремого пасажера. Отже, принципово змінюється модель управління перевезеннями з предметно-орієнтованої структури на об'єктно-орієнтовану модель, яка передбачає застосування інтелектуальних протоколів маршрутизації (рис. 4.1). Схему об'єктно-суб'єктних зв'язків в аналітичній моделі розробленого маршрутизатора перевезень наведено на рис. 4.2.

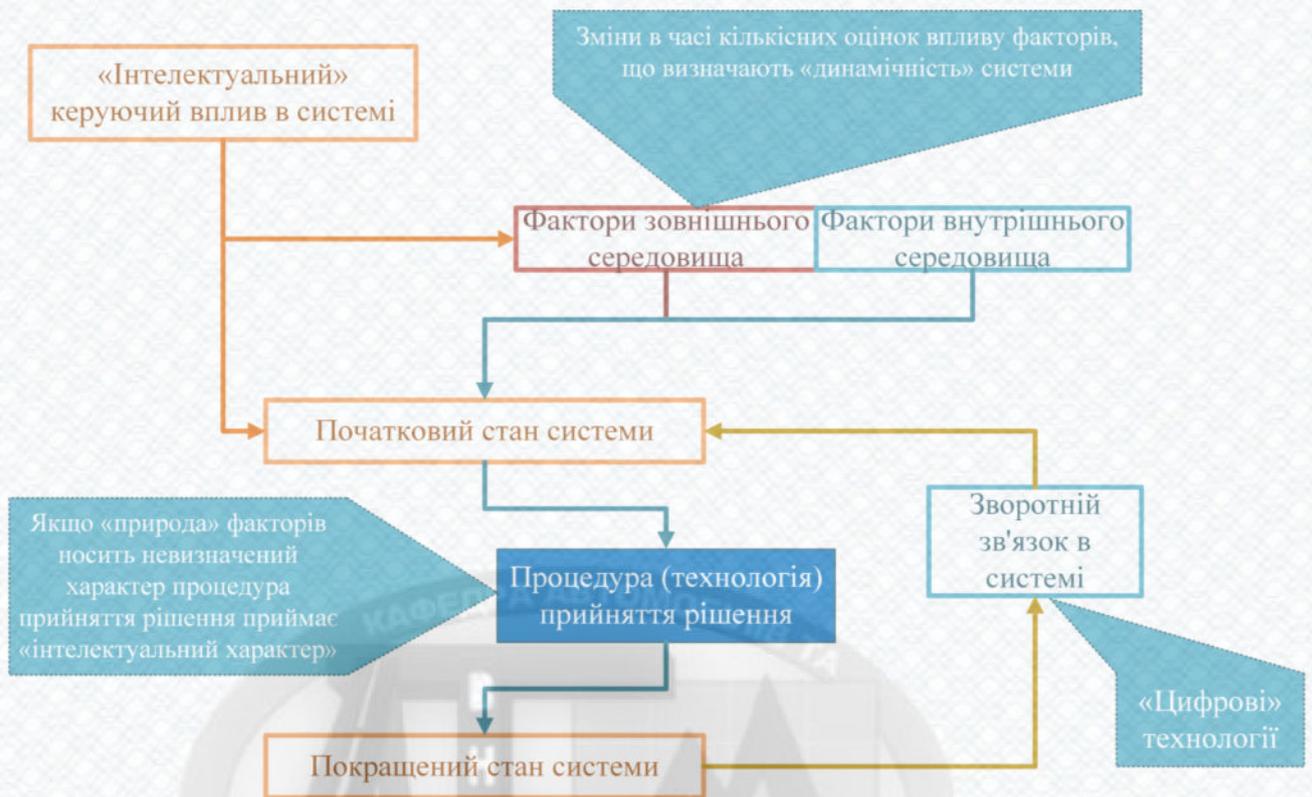


Рисунок 4.1 – Схема, яка визначає необхідність застосування інтелектуальних протоколів маршрутизації

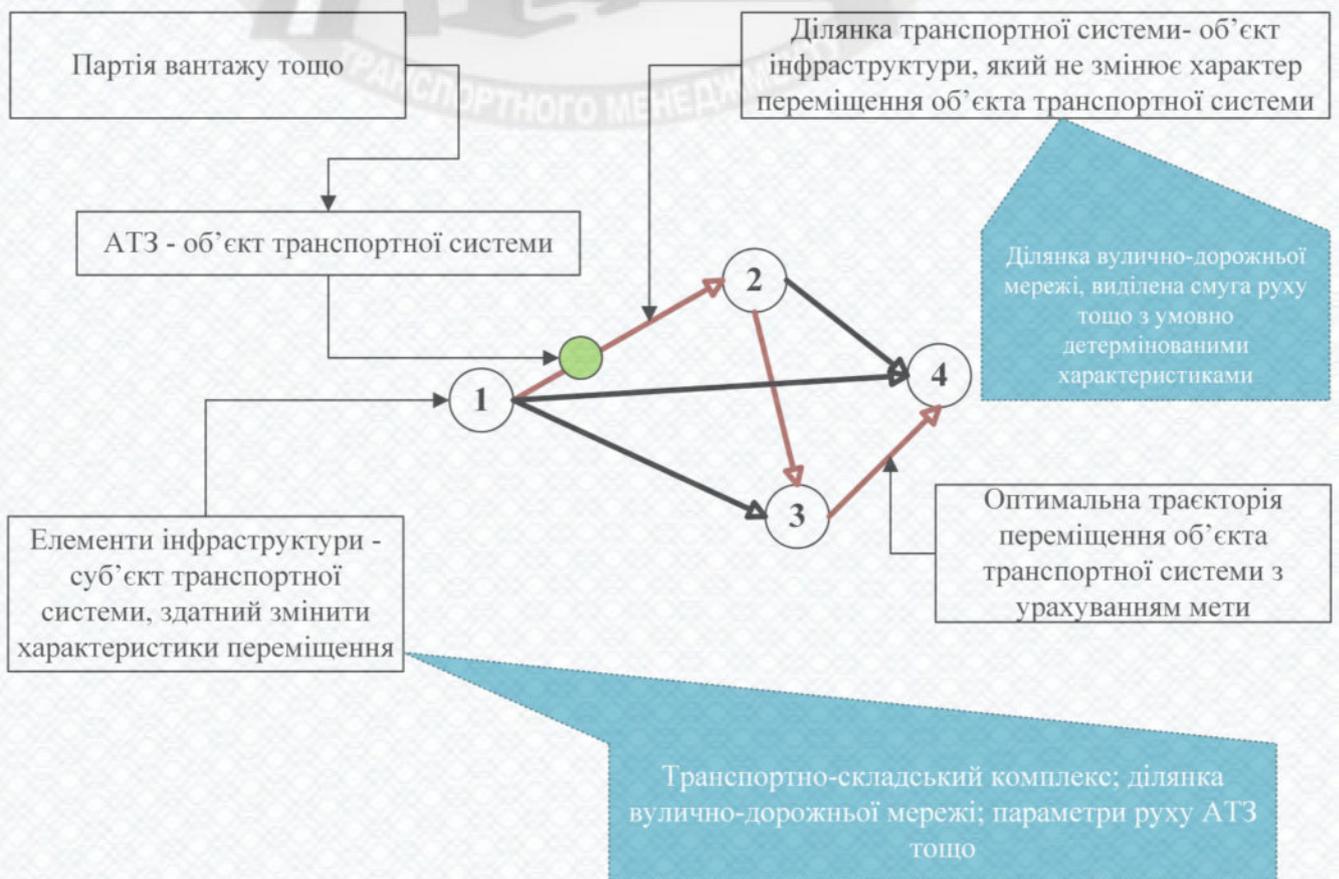


Рисунок 4.2 – Схема об'єктно-суб'єктних зв'язків у аналітичній моделі маршрутизатора перевезень

Як видно із схем, наведених на рисунках 4.1. та 4.2 принциповими відмінностями розробленої моделі маршрутизатора від існуючих є такі:

1. Аналітичний апарат маршрутизатора забезпечує вибір оптимальної дії в умовах стохастичної невизначеності, коли відсутні дані, що дозволяють коректно застосувати класичні закони розподілу випадкових величин (нормальний, логнормальний тощо).

2. При формуванні вихідного для розрахунків графа досліджуваної системи як дискретних станів можуть і повинні розглядатися тільки ділянки, де автомобіль припиняє рух у зв'язку з необхідними процедурами вантажопереробки, а не стану мережі, де відбувається різка зміна режимів руху автомобіля. Наприклад, через завантаженість «пробки» на тій чи іншій ділянці мережі, що особливо важливо в умовах великих міст.

3. Розроблена модель працює з необмеженою кількістю входів у систему (показників), тому до баз даних можуть і повинні бути включені не тільки результативні показники роботи транспортних засобів (пробіг, обсяг перевезення, вантажообіг тощо), а й результативні показники вантажопереробних пунктів (продуктивність вантажно-розвантажувальних робіт, час очікування при завантаженні та розвантаженні тощо).

Перераховані особливості розробленої моделі маршрутизатора дозволяють підвищити достовірність оперативно-виробничого планування вантажних перевезень, виключити суб'єктивні помилки, які визначаються наявністю «людського фактора» та створити автоматизовану «інтелектуалізовану» систему управління перевезеннями в автотранспортному підприємстві чи транспортно-логістичній компанії.

4.2 Аналіз результатів маршрутизації, яка виконується за допомогою запропонованого протоколу

Виконаємо оцінку роботи розробленого маршрутизатора та відповідного ПЗ на прикладі формування маршрута розвезення запчастин зі складу Вінницької філії ТОВ «ЕЛІТ-Україна» до замовників – СТО у м. Вінниця та Вінницькому районі. Замовлення здійснюються через он-лайн платформу, або за телефоном, а далі дані автоматично передаються в розроблений маршрутизатор для формування маршруту.

На основі даних Вінницької філії ТОВ «ЕЛІТ-Україна» виконаємо розробку кільцевого маршруту доставки запчастин замовникам. Застосування кільцевих маршрутів є найпоширенішою практикою в таких умовах доставки, понад 80% доставки вантажів зі складів у торговий мережі або безпосередньо до замовників здійснюється саме за такою схемою.

Організація кільцевих перевезень за традиційною методикою передбачає розробку раціональної послідовності об'їзду пунктів із мінімальним пробігом, а сам процес маршрутизації полягає в наступному:

1. Складається матриця відстаней між усіма пунктами розвантаження (таблиця 4.1).

2. На схемі дорожньої мережі пункти нумеруються з найвіддаленішого за найкоротшими відстанями.

3. Далі проводиться набір пунктів маршрути. Набір пунктів маршруту починається з включення до нього віддаленого від пункту навантаження А, який заносять у вихідну таблицю.

4. Потім розглядаються ланки дорожньої мережі, пов'язані з цим пунктом.

5. На наступному етапі визначається послідовність об'їзду пунктів маршруту починаючи з нульового А. Щоб визначити цю послідовність, необхідно знайти мінімально можливе збільшення довжини маршруту $P_{кр}$, обумовлене включенням чергового пункту маршрут. Величину приросту $P_{кр}$ (км) визначається за такою формулою:

Таблиця 4.1- Матриця відстаней на маршруті, що розробляється

	А	Б1	Б2	Б3	Б4	Б5	Б6	Б7	Б8	Б9	Б10	Б11	Б12	Б13	Б14	Б15
А	0	5	7,2	9,5	18,4	13,2	5,1	7,3	11,5	23,7	7,6	6	13,1	21	13	7,7
Б1	5	0	2	4,7	7,8	4,5	8	5,6	13	22	25	12	19,5	33	36	14,2
Б2	7,2	2	0	3	7,2	7	10	8,1	15,3	24,5	17	17	20,1	35,8	37,7	17,9
Б3	9,5	4,7	3	0	4	6	15	10,6	18,2	27,5	20	14	18,3	31,2	35,2	16
Б4	18,4	7,8	7,2	4	0	6	8	13,4	21	29,6	26	11	14	28	25	18
Б5	13,2	4,5	7	6	6	0	15,2	20,1	25,6	23,7	20,8	10,3	12,9	25,3	22,3	20,3
Б6	5,1	8	10	15	8	15,5	0	8	6,5	8,2	10	11	20,1	26	18	13,7
Б7	7,3	5,6	8,1	10,6	13,4	20,1	8	0	7	15	18	16	21,7	28,3	20,5	15
Б8	11,5	13	15,3	18,2	21	25,6	6,5	7	0	10	19	18	26,5	33	25	19,7
Б9	23,7	22	24,5	27,5	29,6	23,7	8,2	15	10	0	10,5	28	34,5	41,2	23,7	30,7
Б10	7,6	15	17	20	26	20,8	10	18	19	10,5	0	13,6	22,1	28,6	27,4	17
Б11	6	12	17	14	11	10,3	11	16	18	28	13,6	0	8,5	12	11	10
Б12	13,1	19,5	20,1	18,3	14	12,9	20,1	21,7	26,5	34,5	22,1	8,5	0	10	18	26
Б13	21	33	35,8	31,2	28	25,3	26	28,3	33	41,2	28,6	12	10	0	9	17,5
Б14	13	36	37,7	35,2	25	22,3	18	20,5	25	23,7	27,4	11	18	9	0	10
Б15	7,7	14,2	17,9	16	18	20,3	13,7	15	19,7	30,7	17	10	26	17,5	10	0

$$P_{kp} = l_{ki} + l_{ip} - l_{kp}, \quad (4.1)$$

де l – відстань, км;

k – перший сусідній пункт;

p – другий сусідній пункт;

i – пункт, що включається.

6. Визначаються довжини пробігів на сформованому маршруті (таблиця 4.2 та рисунок 4.3.

Використовуючи ці самі вихідні дані виконаємо розробку маршрута за допомогою розробленого протоколу маршрутизації, з урахуванням критеріїв, представлених на схемі рис. 3.4. Схема розробленого маршрута наведено на рис. 4.4)

Таблиця 4.2 - Довжини пробігів на досліджуваному розвізному маршруті

Найменування ділянки	Позначення	Відстань, км
A → Б15	l_1	7,7
Б15 → Б14	l_2	10
Б14 → Б13	l_3	9
Б13 → Б12	l_4	10
Б12 → Б11	l_5	8,5
Б11 → Б10	l_6	13,6
Б10 → Б9	l_7	10,5
Б9 → Б8	l_8	10
Б8 → Б7	l_9	7
Б7 → Б6	l_{10}	8
Б6 → Б5	l_{11}	15,5
Б5 → Б4	l_{12}	6
Б4 → Б3	l_{13}	4
Б3 → Б2	l_{14}	3
Б2 → Б1	l_{15}	2
Б1 → А	l_x	5
A → A	l_m	129,8

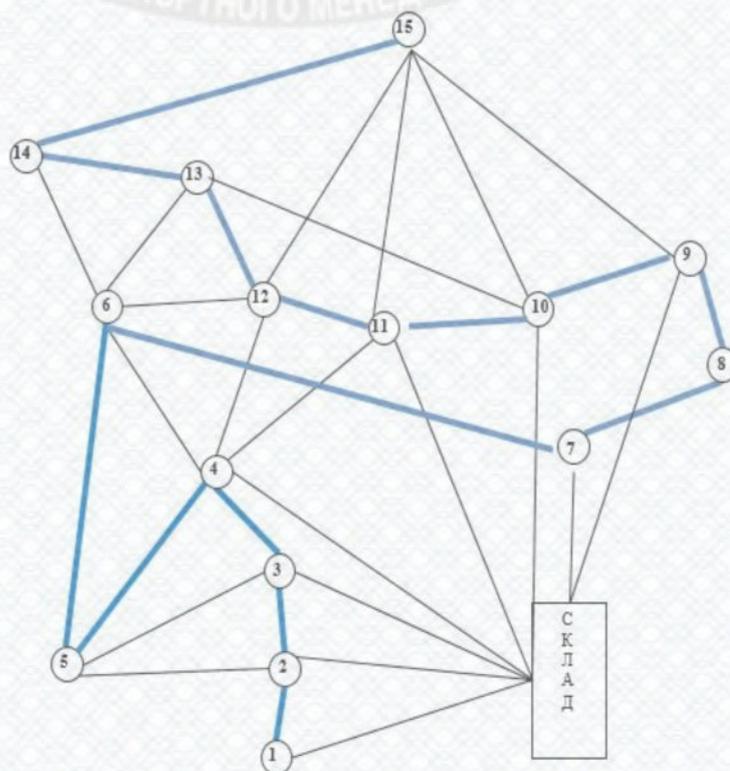


Рисунок 4.3 – Схема розробленого маршрута за традиційною методикою

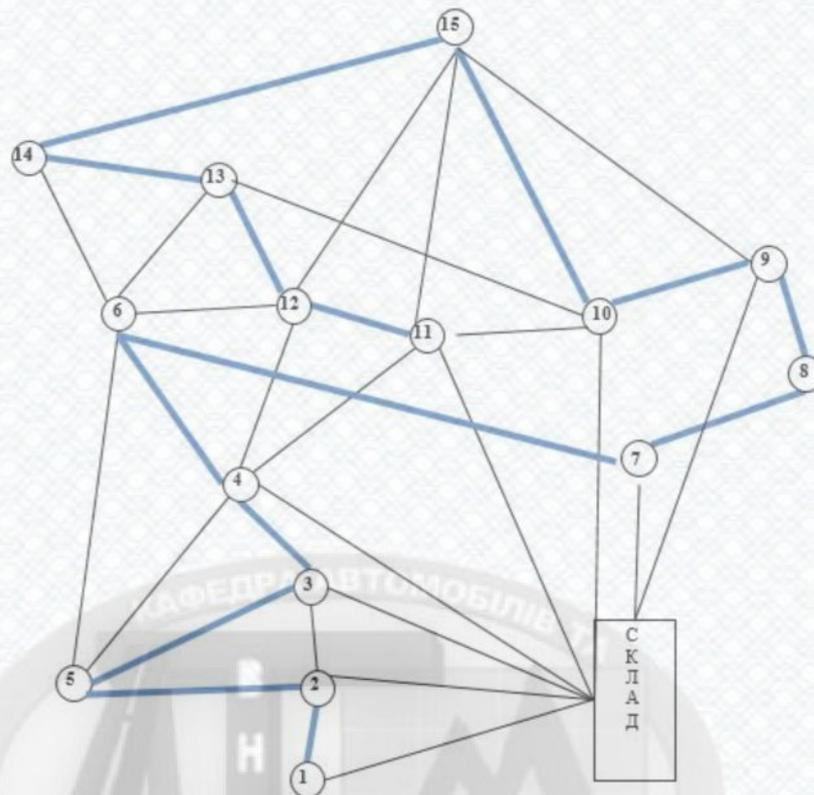


Рисунок 4.4 – Схема маршруту, отримана із застосуванням розробленого протоколу маршрутизації

За розробленими маршрутами розрахуємо виробничу програму та техніко-економічні показники (ТЕП) перевезень (для обох випадків) за відомими методиками [4-7]. Результати розрахунку ТЕП для двох випадків наведено у таблиці 4.3

Як видно з результатів розрахунків в табл. 4.3, розроблений протокол маршрутизації дозволяє скоротити час роботи автомобіля на маршруті та зменшити собівартість перевезень.

4.3 Застосування розробленого маршрутизатора в економічних умовах, що динамічно змінюються

Наведений у попередньому пункті розрахунок виробничої програми та економічної ефективності моделей маршрутизації вважатимуться орієнтовним,

Таблиця 4.3 - Результати розрахунку ТЕП

Показники	Значення показника		Зміна показника
	Традиційна методика	Маршрутизатор	
1. Кількість автомобілів, од	1	1	0
2. Час перебування на маршруті, год (час)	8,55	8,3	-0,25
3. Довжина маршрута, км	129,8	130	+0,2
4. Добова продуктивність одного автомобіля в тоннах	0,5	0,5	0
5. Добова продуктивність одного автомобіля в тонно-км	26,07	26,05	-0,02
6. Годинна продуктивність одного автомобіля в т/год.	0,058	0,060	+0,02
7. Годинна продуктивність одного автомобіля в т-км/год.	3,05	3,14	+0,11
8. Собівартість перевезення, грн/т-км	37,07	36,98	-0,09

оскільки він спирається на динамічно стійкі показники продуктивності експлуатації автомобілів. У реальній практиці підприємств, які здійснюють вантажні перевезення у сучасних умовах практично, неможливо отримати динамічно стабільні вхідні дані до системи економічної ефективності перевезень вантажів.

Економічна ефективність вантажних перевезень визначається низкою показників, як-от: рентабельність, доходи від перевезень; витрати на перевезення тощо. У результаті, перелічені показники спираються на тарифи, що визначаються ринковою кон'єктурою перевезень. При цьому в сучасних економічних умовах склалася складна структура тарифоутворення – застосовуються різні тарифи: залежно від відстані перевезень, обсягу перевезень, часу доставки, необхідного для здійснення перевезень тощо.

Особливістю існуючої економічної реальності динамічна нестабільність попиту на перевезення. У процесі роботи вантажних автомобілів у міських умовах

зафіксовано ситуації: варіювання кількості заявок відбувається в діапазоні від – 15 до + 15 %; варіювання обсягів перевезень за заявками варіюється від -25% до + 25%; відбувається регулярна зміна відстаней перевезень, а, відповідно, довжин вантажених і порожніх їздок автомобілів.

Природно, що подібні динамічні зміни у структурі «замовлення» перевезень в умовах застосування сьогодні «фіксованої» декомпозиції може призводити до неповноцінного використання провізних можливостей АТП та вантажопідйомності рухомого складу; перевантаження автомобілів; невчасному задоволенню попиту перевезення; неврівноваженому балансу потреби у рухомому складі; неефективне застосування автомобілів у часі; невідповідності планових та фактичних показників роботи АТП, неможливості обслужити за часом клієнтів, які подали заявки в останню чергу тощо. Причому за таких умов працюють, згідно зі статистичними даними, переважна кількість невеликих автопідприємств (близько 80 % від загального числа), які мають у своєму складі парк рухомого складу до 30 од. Весь обсяг замовлення перевезень можна умовно поділити три основні групи клієнтури.

Постійні замовлення, як правило, забезпечують стійкий попит як за обсягами, так і за номенклатурою та умовами перевезень.

Непостійну клієнтуру становлять споживачі транспортних послуг, які не мають постійної потреби у перевезеннях, але статистичні дані показують, що таких клієнтів досить багато і середній добовий обсяг сукупного попиту цієї клієнтури є порівняно стійкою величиною.

Епізодична клієнтура становить сегмент замовлень, коли середній добовий обсяг сукупного попиту цієї клієнтури перестав бути порівняно стійкою величиною.

Для АТП першочерговим є задоволення попиту на перевезення за постійними заявками. Провізні можливості досліджуваного підприємства (і багатьох інших) нижчі, ніж запропоновані ринком пропозиції на перевезення. Це пояснюється об'єктивним економічними аспектами: зниження економічного ризику за

відсутності попиту перевезення, нижчими витратами утримання рухомого складу і виробничо-технічної бази тощо.

Власним рухомим складом реалізується близько 80% заявок, 20%, що залишилися, реалізуються із залученням найманого рухомого складу. При цьому, як уже зазначалося вище, перевага надається заявкам, що носять постійний характер. Тим часом частка епізодичних заявок може становити від 20 до 50% у певні періоди часу (сезонні перевезення, тимчасові перевезення тощо).

Розроблений протокол маршрутизації дозволяє оцінювати ефективність окремих дій диференційовано для різних критеріїв ефективності. У цьому кожен із аналізованих критеріїв безпосередньо відбиває диференційовану тарифікацію вантажних перевезень. Отже, розроблений протокол маршрутизації дозволяє не тільки визначити оптимальний маршрут автомобіля, а й ефективно розподіляти рухомий склад за типами заявок з урахуванням актуальних тарифів на перевезення. Розроблений аналітичний апарат (маршрутизатор) та програмне забезпечення на його основі (протокол маршрутизації) дозволяють в автоматизованому режимі формувати оптимальні розвізні, збірні та розвізно-збірні маршрути в динамічно нестабільних зовнішніх умовах та з урахуванням необмеженої кількості критеріїв ефективності.

4.4 Висновки

1. Проведено дослідження застосування розробленого маршрутизатора при формуванні кільцевого маршруту доставки запасних частин зі складу Вінницької філії ТОВ «ЕЛІТ-Україна» до замовників.

2. Розроблене ПЗ маршрутизатора дозволило сформувати маршрут, який займає менше часу роботи автомобіля на маршруті (хоча довжина маршруту виявилась трішки більшою) та знизити собівартість перевезень.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи було вирішена проблема удосконалення маршрутизації вантажних перевезень в динамічно змінних умовах зовнішнього середовища.

1. Проведений аналіз існуючих моделей оптимізації маршрутів транспортних засобів показав, що існуючі методи не дозволяють отримувати ефективних рішень в умовах зовнішнього середовища, що динамічно змінюються. Для вирішення цього завдання в зарубіжній практиці використовуються методи планування маршрутів інформаційних потоків в інформаційно-комунікаційних мережах, а термін «маршрутизація» спочатку ставитися до набору елементів для планування маршруту та передачі пакетів даних по Інтернету та з'єднані між собою через маршрутизатор.

2. Аналіз структури і стану рухомого складу Вінницької філії ТОВ «ЕЛІТ-Україна» показав, що структура рухомого складу останніми роками залишається не змінною. Автомобілі є ефективними, знаходяться в гарному технічному стані, проте за терміном експлуатації та пробігом слід рекомендувати підприємству планувати поступове оновлення рухомого складу.

3. Встановлено, що необхідним інструментом маршрутизації перевезень є інтеграція в єдину аналітичну платформу задачі динамічного програмування та методу районування за принципом ієрархічного співвідношення між ймовірностями. Для створення методики визначення оптимальних маршрутів для оперативного планування автомобільних вантажних перевезень у динамічно змінних умовах, повинна бути виконана розробка оптимізаційної аналітичної моделі об'єктно-орієнтованого управління та алгоритмів на її основі.

4. Виконано розробку оптимізаційної аналітичної моделі, алгоритму та ПЗ розв'язання задачі динамічного програмування, що реалізує принцип Беллмана, для визначення оптимальної траєкторії (маршруту) перевезення вантажу;

5. Виконано розробку аналітичної моделі, алгоритму і ПЗ визначення оптимальних маршрутів при оперативно-виробничому плануванні перевезень в

умовах, що динамічно змінюються, яка базується на інтеграції в задачу динамічного програмування результатів розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації при виборі керуючої дії для кожного дискретного стану ГДТС.

6. Проведено дослідження застосування розробленого маршрутизатора при формуванні кільцевого маршруту доставки запасних частин зі складу Вінницької філії ТОВ «ЕЛІТ-Україна» до замовників. Розроблене ПЗ маршрутизатора дозволило сформувавши маршрут, який займає менше часу роботи автомобіля на маршруті (хоча довжина маршруту виявилась трішки більшою) та знизити собівартість перевезень.



СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Біліченко В. В., Крещенецький В. Л., Варчук В. В.. Автомобілі та автомобільне господарство. Дипломне проєктування : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2010. 171 с.
2. Босняк М.Г. Вантажні автомобільні перевезення: навчальний посібник для студентів спеціальності 7.100403 «Організація перевезень і управління на транспорті (автомобільний)».К.: Видавничий Дім "Слово", 2010. 408 с.
3. Зазімко Д.В., Смирнов Є.В. Застосування методів інформаційної маршрутизації для побудови маршрутів в транспортній логістиці // Матеріали міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2026)», [Електронний ресурс], Вінниця: ВНТУ, 2026, Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2026/schedConf/presentations>
4. Левковець П.Р. Управління автомобільним транспортом: Навчальний посібник / П.Р. Левковець, Д.В. Зеркалов, О.І. Мельниченко, О.Г. Казаченко. К.: Арістей, 2006. 416 с.
5. Нагорний Є.В. Комерційна робота на транспорті : Підручник / Є. В. Нагорний, Н. Ю. Шраменко, Г. І. Переста. Х.: Видавництво ХНАДУ. 2011. 298 с.
6. Оліскевич М. С. Організація автомобільних перевезень: у 2-х ч.: навч. посібник. Ч. 1: Вантажні перевезення. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2017. 336 с.
7. Планування діяльності автотранспортного підприємства : підручник / М. О. Турченко, М. Д. Швець, О. Г. Кірічок, М. Є. Кристопчук. Вид. 2-ге, перероб. та доповн. Рівне : НУВГП, 2017. 367 с.
8. Проєктування комп'ютерних систем та мереж : навч. посіб. Смирнов О.А., Коноплицька-Слободенюк О.К., Смирнов С.А., Буравченко К.О., Смирнова Т.В., Поліщук Л.І. Кропивницький: Видавець Лисенко В. Ф., 2019. 264 с.
9. Статистичний щорічник України за 2022 рік. / За редакцією Вернера І.Є. Київ: Державна служба статистики України, 2023. 385 с.

10. Сорока В. С. Транспортно-експедиційна робота : Навчальний посібник [За редакцією д-ра економ, наук, професора Е. А. Зіня] / В. С. Сорока, О. О. Гладковська. Рівне : НУВГП. 2013. 347 с.
11. Charnes, A. Measuring the Efficiency of Decision-Making Units / A. Charnes, W. W. Cooper, E. Rhodes // *European Journal of Operational Research*. – 1978. – Vol. 2. – P. 429–444.
12. Christian Sommer. Shortest-path queries in static networks. *ACM Computing Surveys*, 46(4), 2014.
13. Clark, G. Sheduling of vehicles from a central depot to a few delivery points [Text] / G. Clark, J. Wright // *Operational Research Quarterly*. – 1964. – Vol. 12, no. 4. – P. 568–581.
14. Cooper, W. W. *Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References, and DEA-Solver Software* / W. W. Cooper, L. M. Seiford, K. Tone. – Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000. – 318 p.
15. *Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology, and Application* / A. Charnes, W. W. Cooper, A. Y. Lewin, L. M. Seiford. – Boston: Kluwer Academic Publishers, 1994. – 513 pp.
16. *Data Envelopment Analysis and Regression Approaches to Efficiency Estimation and Evaluation* / W. F. Bowlin, A. Charnes, W. W. Cooper, H. D. Sherman // *Annals of Operations Research*. – 1985. – Vol. 2. – P. 113–138.p
17. Daniel Delling, Andrew V. Goldberg, Andreas Nowatzky, and Renato F. Werneck. PHAST: Hardware-accelerated shortest path trees. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 73(7):940–952, 2013
18. Daniel Delling, Andrew V. Goldberg, Thomas Pajor, and Renato F. Werneck. Customizable route planning in road networks. submitted for publication, 2013.
19. Daniel Delling, Andrew V. Goldberg, and Renato F. Werneck. Hub label compression. In *Proceedings of the 12th International Symposium on Experimental Algorithms (SEA'13)*, volume 7933 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 18–29. Springer, 2013.

20. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs // *Numerische mathematik*. 1959. T. 1. № 1. C. 269–271.
21. Evans, S.R. The impact of a decision-support system for vehicle routing in foodservice supply situation / S.R. Evans, J.P. Norback // *Operational Research Quarterly*. – 1985. – Vol. 36, no. 4. – P. 467–472.
22. Farrell, M. J. The Measurement of Productive Efficiency / M. J. Farrell // *Journal of The Royal Statistical Society, Series A (General), Part III*. – 1957. – Vol. 120. – P. 253–281.
23. Groes, G. A Method for Solving Travelling Salesman Problems [Text] / G. Groes // *Operations Research*. – 1958. – Vol. 6, no. 5. – P. 791–812. 18. Miller, C.E. Integer programming formulation of travelling salesman problems [Text] / C.E. Miller, A.W. Tucker, R.A. Zemlin // *J. Assoc. Comput. Mach.* – 1960. – No. 4. – P. 326–329.
24. Grossi, G. National Tourism Policy/ G. Grossi, A. Scappini//*Analytical Framework for the Evaluation of Efficiency and Effectiveness: The Case of Itali University della Svizzera Italiana* 2010. P.85.
25. Hiroki Sayama. Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems. Open SUNY Textbooks, Milne Library. State University of New York at Geneseo, 2015. - 498p.
26. Priority transfer management algorithm, based on interaction of the public transport dispatch systems information and traffic lights control. / V. Dyomin, D. Efimenko, V. Bogumil, V. Vlasov, A. Akhterov// *Transport and Telecommunication*, 2018, volume 19, no. 4, 315–324
27. Richard Bellman. On a routing problem. *Quarterly of Applied Mathematics*, 16:87– 90, 1958.
28. Robert Geisberger and Christian Vetter. Efficient routing in road networks with turn costs. In *Proceedings of the 10th International Symposium on Experimental Algorithms (SEA'11)*. Vol. 6630 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 100–111. Springer, 2011.
29. Reinhard Bauer, Daniel Delling, Peter Sanders, Dennis Schieferdecker, Dominik Schultes, and Dorothea Wagner. Combining hierarchical and goal-directed

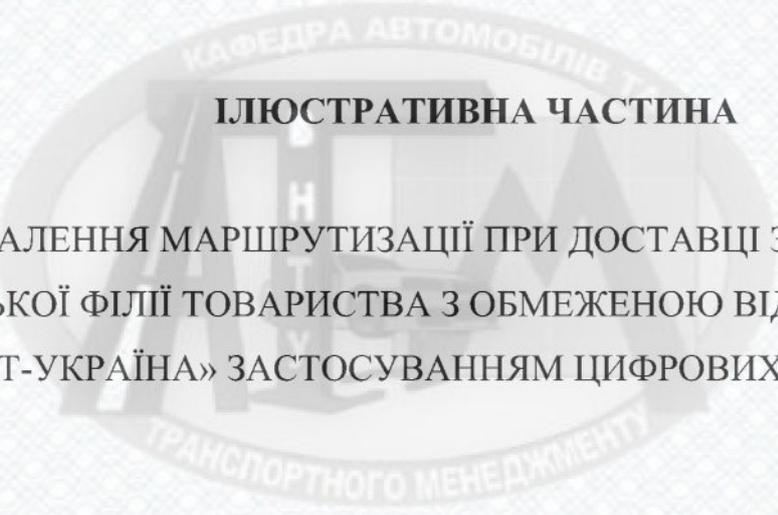
speedup techniques for Dijkstra's algorithm. ACM Journal of Experimental Algorithmics, 15(2.3):1–31, January 2010. Special Section devoted to WEA'08.

30. Arterial Control and Integration // WS DOT, 1990

31. History of Intelligent Transportation Systems // U.S. department of transportation, report FHWA-JPO-16-329, 2016.



Додаток А
(обов'язковий)



ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

УДОСКОНАЛЕННЯ МАРШРУТИЗАЦІЇ ПРИ ДОСТАВЦІ ЗАПАСНИХ ЧАСТИН
ВІННИЦЬКОЇ ФІЛІЇ ТОВАРИСТВА З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«ЕЛІТ-УКРАЇНА» ЗАСТОСУВАННЯМ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Вінницький національний технічний університет
Факультет машинобудування та транспорту
Кафедра автомобілів та транспортного менеджменту

Ілюстративний матеріал до
магістерської кваліфікаційної роботи
на тему:

**Удосконалення маршрутизації при доставці запасних частин
Вінницької філії товариства з обмеженою відповідальністю «ЕЛІТ-
Україна» застосуванням цифрових технологій**

Розробив: ст. гр. 1АТ-24м
Зазімко Д.В.
Керівник: к. т. н., доцент
Смирнов Є. В.

Мета роботи – удосконалення методики визначення оптимальних кільцевих розвізних (збірних) маршрутів при оперативно-виробничому плануванні перевезень вантажів у умовах роботи рухомого складу, що динамічно змінюються, з урахуванням декількох критеріїв ефективності.

Завдання дослідження

- провести аналіз існуючих моделей оптимізації маршрутів транспортних засобів;
- проаналізувати особливості роботи та стан рухомого складу Вінницької філії ТОВ «ЕЛІТ-Україна»;
- розробити концепцію системи визначення оптимальних маршрутів у умовах оперативного планування вантажними перевезеннями, що динамічно змінюються;
- розробити аналітичну модель, алгоритм та ПЗ для визначення оптимальних маршрутів при оперативно-виробничому плануванні перевезень в умовах, що динамічно змінюються;
- розробити методику визначення оптимальних кільцевих маршрутів при оперативно-виробничому плануванні вантажних перевезень;
- оцінити ефект від впровадження розробок в систему перевезення вантажів Вінницької філії ТОВ «ЕЛІТ-Україна».

Об'єкт дослідження – система оперативно-виробничого планування перевезень вантажів в умовах факторів середовища експлуатації транспортних засобів, що динамічно змінюються.

Предмет дослідження – моделі формування кільцевих маршрутів перевезень вантажів, які ґрунтуються на методах динамічного програмування та багатокритеріальної оптимізації.

Новизна отриманих результатів

- удосконалено методику визначення оптимальних маршрутів у динамічно змінних умовах оперативного планування автомобільних вантажних перевезень, що складається з двох основних елементів: теоретичного забезпечення (маршрутизатора) та реалізуючого його програмного забезпечення (протоколу маршрутизації), що має такі унікальні властивості;
- отримали подальший розвиток аналітичні моделі визначення оптимальних кільцевих маршрутів при оперативно-виробничому плануванні перевезень в умовах, що динамічно змінюються.

Практична цінність роботи полягає у можливості застосування в АТП розробленої методики та ПЗ маршрутизації вантажних автомобільних перевезень у складних гетерогенних динамічних транспортних системах (з максимальним ступенем ефективності. Розроблене ПЗ дозволяє в автоматизованому режимі формувати оптимальні розвізні, збірні та розвізно-збірні маршрути у динамічних нестабільних зовнішніх умовах та з урахуванням необмеженої кількості критеріїв ефективності.

Методи розв'язання задачі маршрутизації в транспортно-логістичних системах

Зведена таблиця методів розв'язання задач оптимізації у ТЛС

Метод	Короткий опис методу
Метод «гілок та меж» (1965)	В основі даного методу лежить ідея послідовного розбиття множини можливих рішень на окремі підмножини, подальшою перевіркою – чи конкретне підмножина містить оптимальне рішення чи ні
Метод локальної оптимізації (1958)	Даний метод призначений для вирішення дискретних завдань, що будуються за наступним принципом. Спочатку визначається вихідне допустиме рішення та призначається околиця цього рішення із знаходженням локального оптимуму. Далі процедура повторюється багаторазово з вибором локального екстремуму, виходячи із встановленого мети, як наближеного рішення.
Методи випадкового пошуку	Цей метод містить ідеї теорії ігор автоматів. Метод випадкового пошуку використовує виявлення кращих станів, пробні зміщення від поточної точки у випадкових напрямках.
Метод теорії розкладів (1968)	Теорія розкладів – це розділ дослідження операцій, у якому будуються та аналізуються математичні моделі календарного планування (тобто упорядкування у часі) різних цілеспрямованих дій з урахуванням цільової функції та різних обмежень.
Метод імітаційного моделювання (1989)	Застосування цього методу обумовлено наступними факторами: необхідністю дослідження динаміки змін у процесі функціонування системи вантажних перевезень, складна структура маршрутів, постійні зміни їх у часі та просторі.
Евристичні методи	Евристичні методи ґрунтуються на підсвідомому мисленні, не допускають алгоритмізації та характеризуються неусвідомленим (інтуїтивним) способом дій для досягнення усвідомлених цілей. Евристичні методи називають методами інженерної творчості.

Більшість досліджень зосереджено на поглибленому аналізі методу Кларка–Райта, задачі комівояжера та їх адаптації до конкретних випадків, проте підхід залишається традиційним – статичні методи недостатньо точні для умов роботи, що динамічно змінюються, і тому, як правило, не застосовуються на практиці в АТП.

Закордонний досвід маршрутизації вантажних перевезень у динамічно змінних умовах

1. Аналіз протоколів інформаційної маршрутизації в комп'ютерних мережах дозволив транспортним компаніям провести аналогію з процесами формування розкладів та планування маршрутів у логістичних системах.
2. Розроблено протокол маршрутизації **DLRP** (Distributed Logistics Routing Protocol) – це адаптація для логістики протоколів інформаційної маршрутизації. Протокол DLRP орієнтований на вирішення динамічних задач маршрутизації.



Рисунок 1 – Технологія оновлення даних у маршрутній мережі

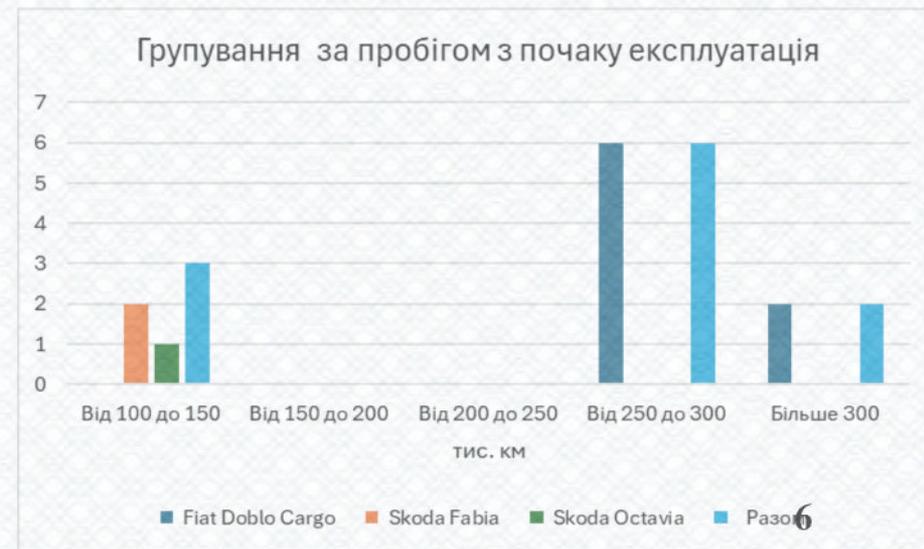
Характеристика рухомого складу Вінницької філії ТОВ «ЕЛІТ-Україна»



Рухомий склад:

- Fiat Doblo Cargo – 8 автомобілів
- Skoda Fabia – 2 автомобілі
- Skoda Octavia – 1 автомобіль

Вінницька філія ТОВ «ЕЛІТ-Україна»



Модель розв'язання задачі маршрутизації в динамічних умовах

1. Розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації - формування множини Парето-оптимальних рішень, застосовуючи методи лінійного програмування

Матриця ефективностей при різних станах зовнішнього середовища

$$\|E_j\| = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & \dots & e_{1n} \\ e_{21} & e_{22} & \dots & e_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{m1} & e_{m2} & \dots & e_{mn} \end{pmatrix}$$

Алгоритм пошуку максимально ефективного рішення:

$$\begin{cases} D_j = \sum_{j=1}^n e_j k_j \rightarrow \max, \\ \sum_{j=1}^n k_j = 1, \quad 0 \leq k_j \leq 1, \quad k_j \geq k_{j+1}, \quad j = \overline{1, n-1}, \end{cases}$$

$$k_j = \begin{cases} \frac{1}{c}, & \text{якщо } j = c \\ \frac{\lambda}{c}, & \text{якщо } j < c, \text{ де } \lambda = \frac{n-1}{n} \\ \frac{1-\lambda}{n-c}, & \text{якщо } j > c \end{cases}$$

2. Застосування методів динамічного програмування для розв'язання задачі маршрутизації

Побудова маршруту, що базується на принципі Беллмана:

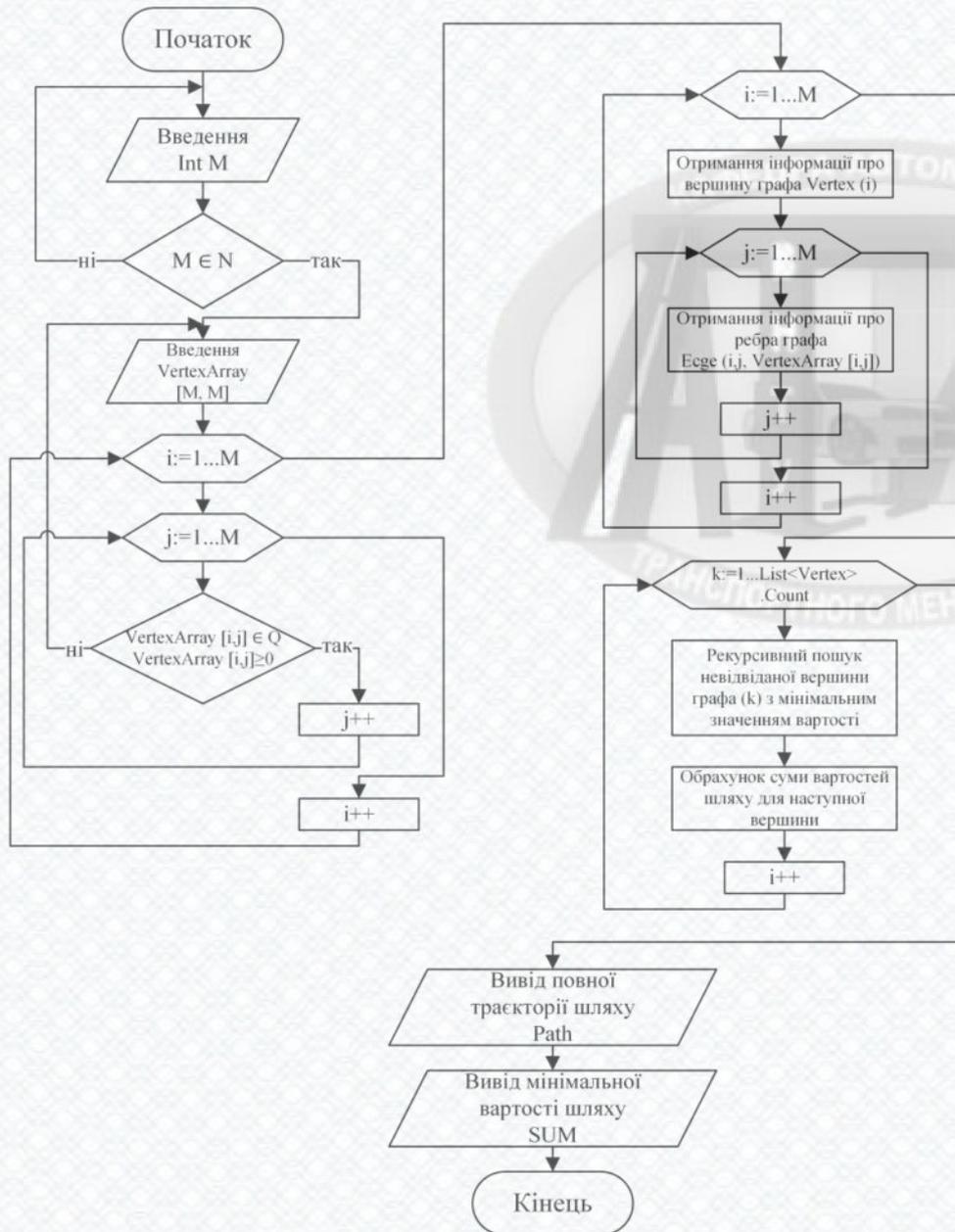
$$B(x) = \min_{v \in V(x)} \{s(x, v) + B(f(x, v))\}, \quad (x \in D | F) \quad \text{де } B(x) - \text{функція } B(x) \text{ у попередньому дискретному стані.}$$

Аналітична модель визначення оптимальних маршрутів у динамічно змінних умовах:

$$B(x) = \mathit{opt}_{v \in V(x)} \{s(e, d_i) + B(f(d_i))\}, \quad (x \in D | F)$$

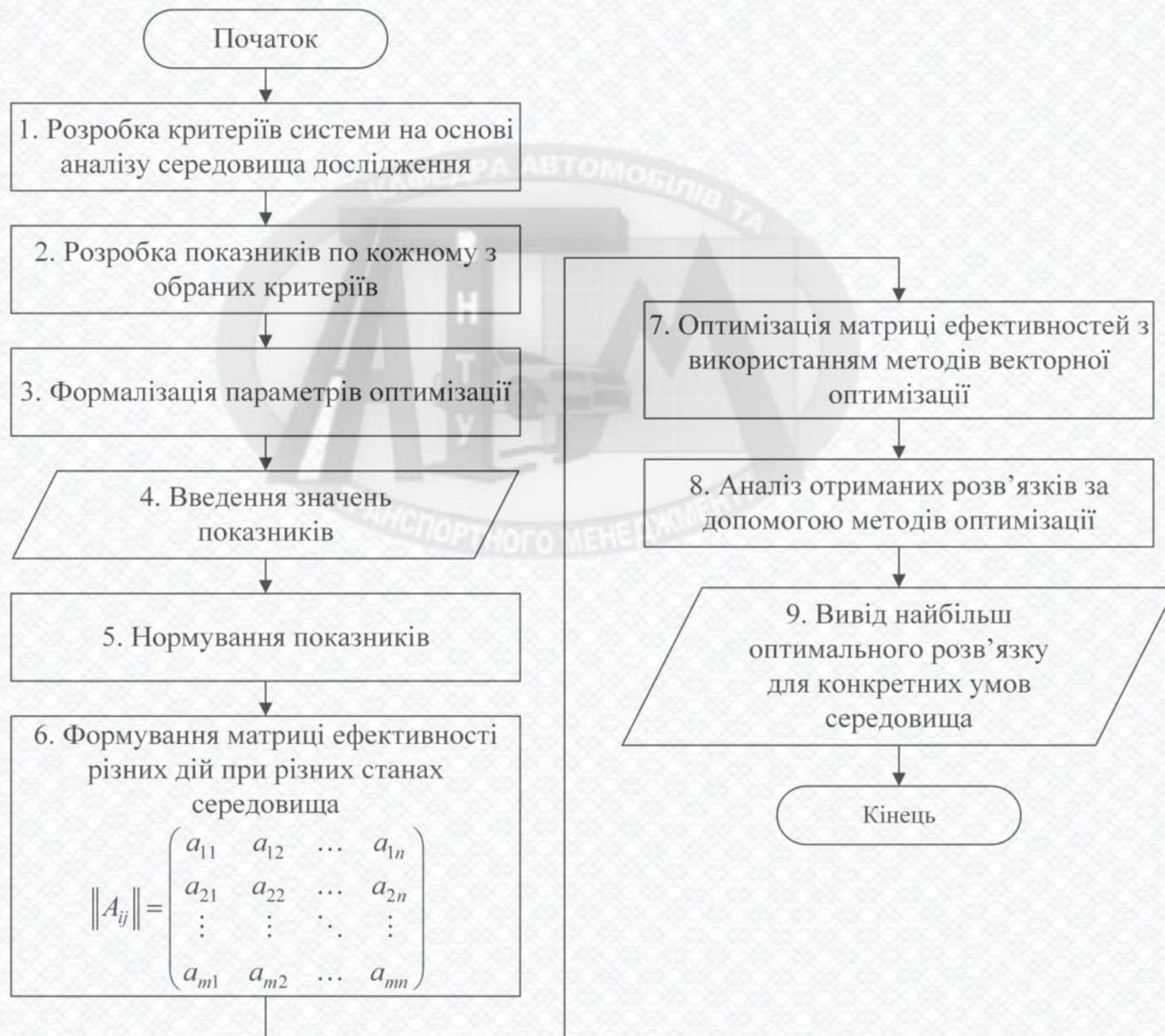
де D - множина можливих станів або кількість зв'язків у ГДТС;
 F - множина станів параметрів або кількість критеріїв оптимізації в ГДТС;
 $d_i(e)$ - множина управлінь при виборі напрямку переміщення (варіантів дій у системі) - $(e \in D | F)$;
 $f(e, v)$ - функція переходів зі стану e при управлінні d_i ;
 $s(e, v)$ - функція кількісної оцінки ефективності при виробництві процесів переміщення об'єкта в ГДТС.

Алгоритм автоматизованого розрахунку задачі динамічного програмування

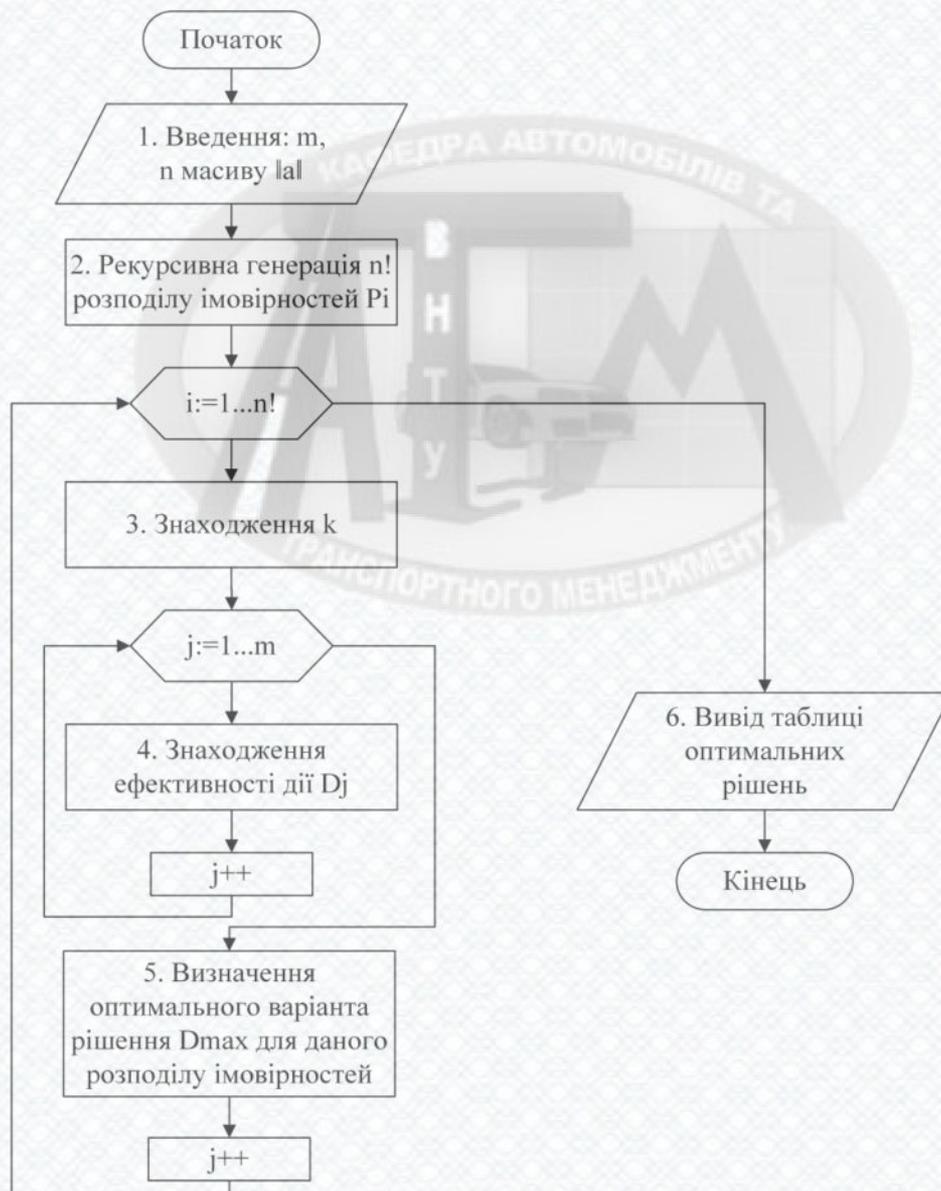


M – кількість вершин графа; $VertexArray [M, M]$ – масив значень вартості шляху між вершинами; $List<Vertex>$ - список вершин графа; $Edge (i, j, VertexArray [i, j])$ - ребро графа, p урахуванням багатокритеріальної оцінки; $path$ - повна траєкторія шляху мінімальної вартості з початкової точки в кінцеву; SUM – мінімальна вартість шляху у кількісній оцінці

Алгоритм формування матриць ефективності окремих дискретних станів



Алгоритм розв'язку багатокритеріальної задачі пошуку Парето-оптимальних рішень



Цифрова об'єктно-орієнтована модель розвізного маршруту (1)

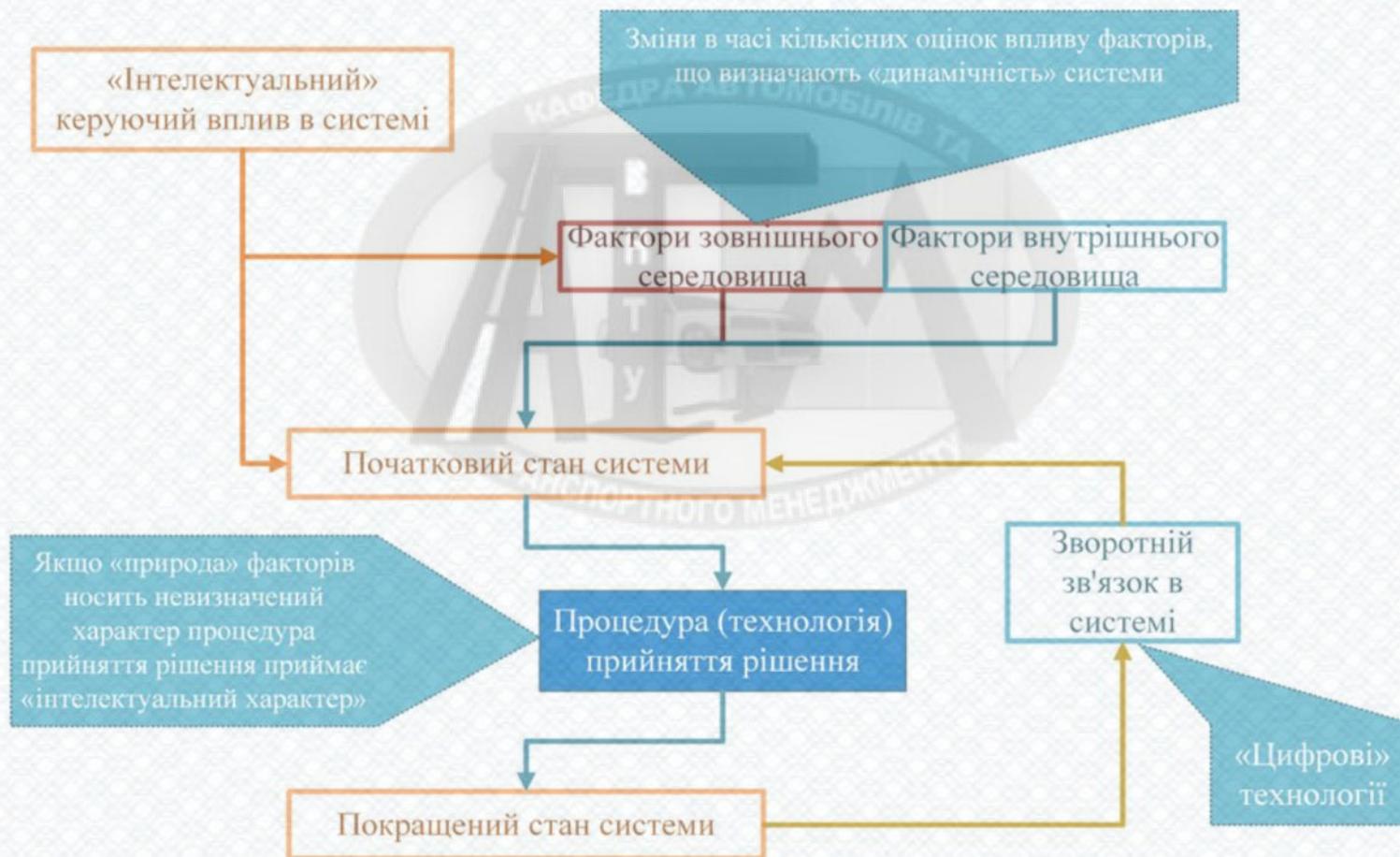


Рисунок 1 – Схема, яка визначає необхідність застосування інтелектуальних протоколів маршрутизації

Цифрова об'єктно-орієнтована модель розвізного маршруту (2)

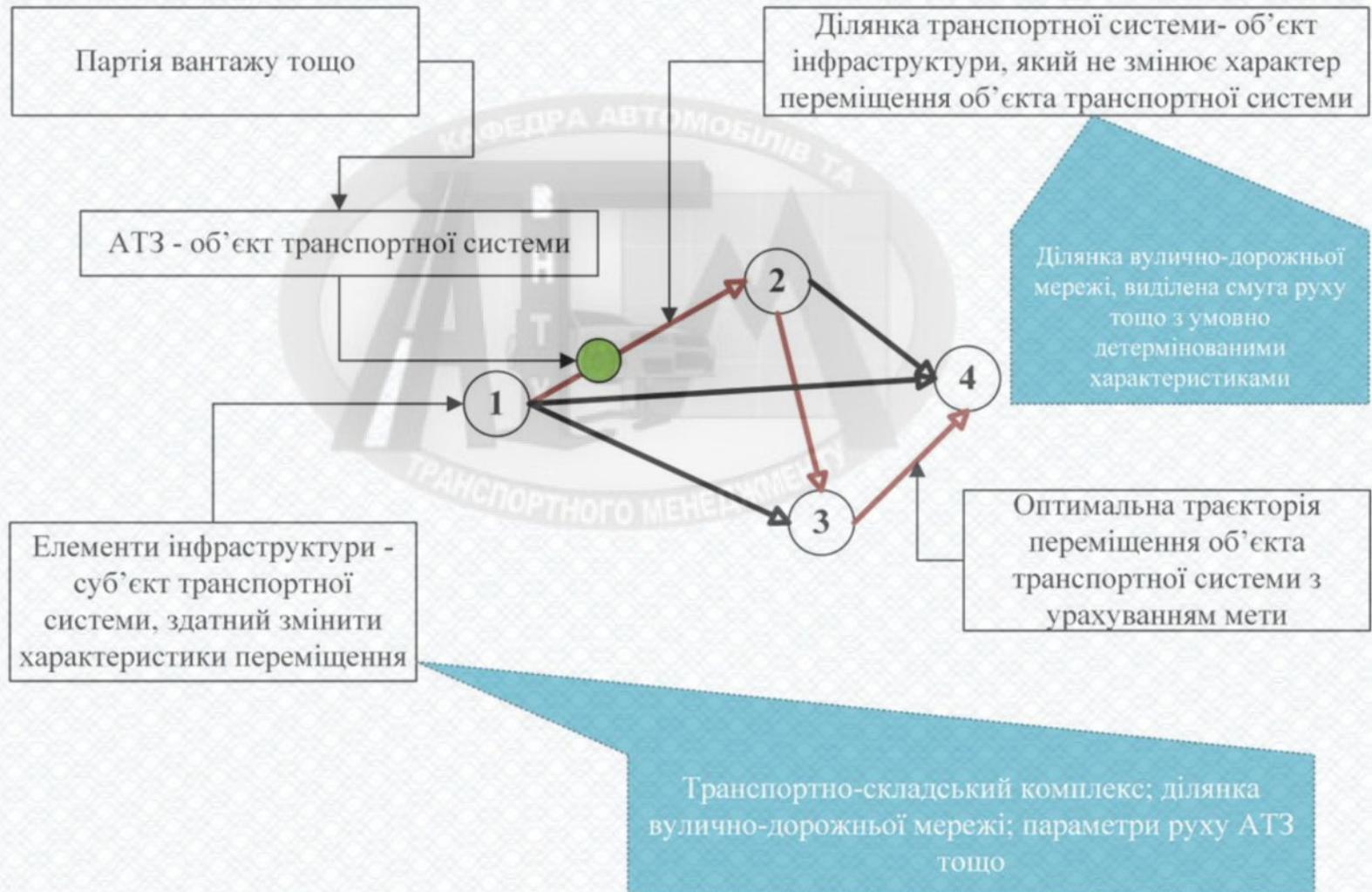


Рисунок 2 – Схема об'єктно-суб'єктних зв'язків у аналітичній моделі маршрутизатора перевезень

Результати маршрутизації, яка виконується за допомогою запропонованого протоколу (1)

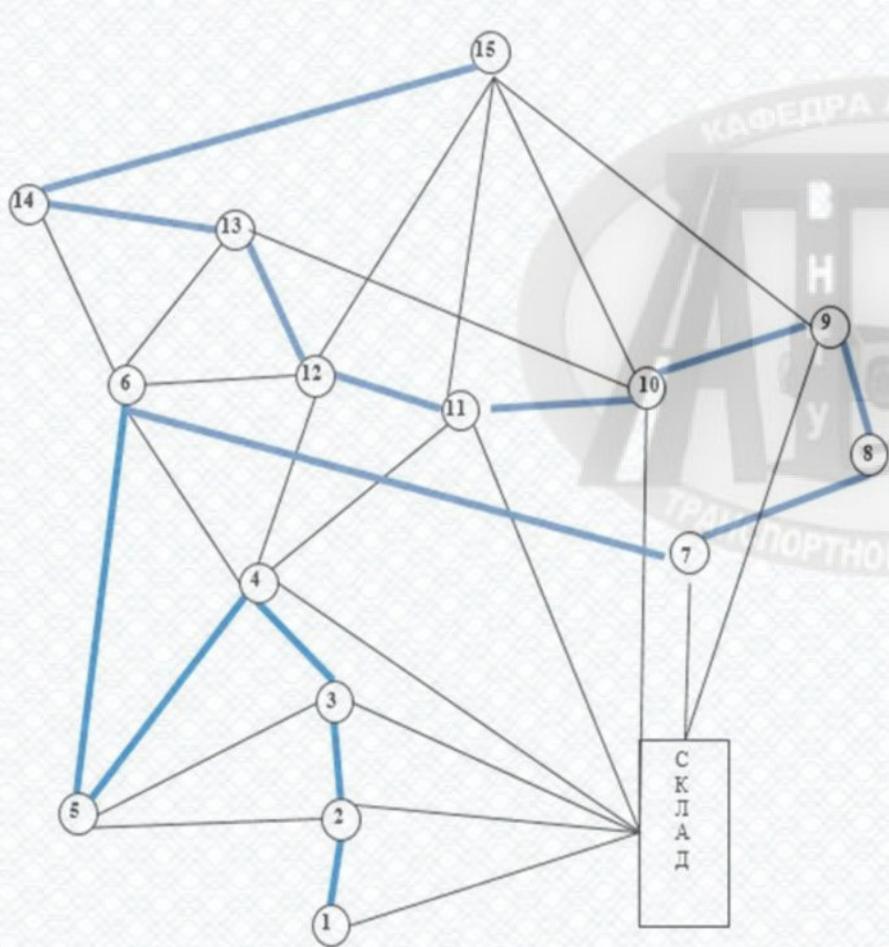


Рисунок 1 – Схема розробленого маршрута за традиційною методикою

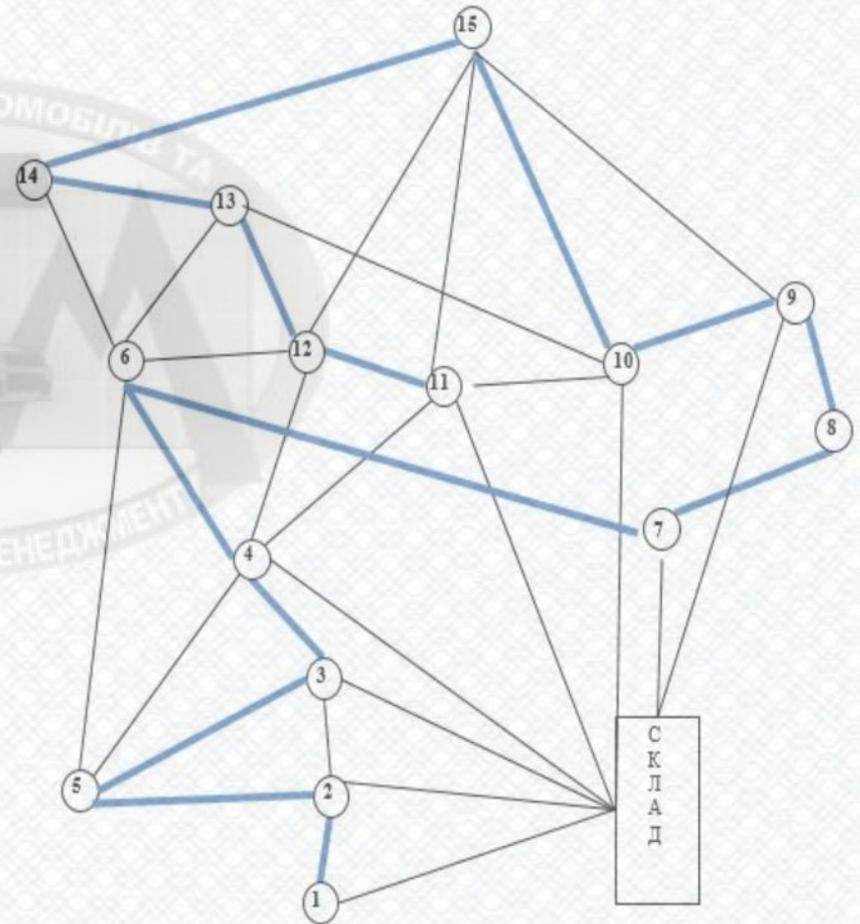


Рисунок 2 – Схема маршруту, отримана із застосуванням розробленого протоколу маршрутизації

Результати маршрутизації, яка виконується за допомогою запропонованого протоколу (2)

Результати розрахунку ТЕП

Показники	Значення показника		Зміна показника
	Традиційна методика	Маршрутизатор	
1. Кількість автомобілів, од	1	1	0
2. Час перебування на маршруті, год (час)	8,55	8,3	-0,25
3. Довжина маршрута, км	129,8	130	+0,2
4. Добова продуктивність одного автомобіля в тоннах	0,5	0,5	0
5. Добова продуктивність одного автомобіля в тонно-км	26,07	26,05	-0,02
6. Годинна продуктивність одного автомобіля в т/год.	0,058	0,060	+0,02
7. Годинна продуктивність одного автомобіля в т-км/год.	3,05	3,14	+0,11
8. Собівартість перевезення, грн/т-км	37,07	36,98	-0,09

Висновки

В результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи було вирішена проблема удосконалення маршрутизації вантажних перевезень в динамічно змінних умовах зовнішнього середовища.

1. Проведений аналіз існуючих моделей оптимізації маршрутів транспортних засобів показав, що існуючі методи не дозволяють отримувати ефективних рішень в умовах зовнішнього середовища, що динамічно змінюються. Для вирішення цього завдання в зарубіжній практиці використовуються методи планування маршрутів інформаційних потоків в інформаційно-комунікаційних мережах, а термін «маршрутизація» спочатку ставитися до набору елементів для планування маршруту та передачі пакетів даних по Інтернету та з'єднані між собою через маршрутизатор.

2. Аналіз структури і стану рухомого складу Вінницької філії ТОВ «ЕЛІТ-Україна» показав, що структура рухомого складу останніми роками залишається не змінною. Автомобілі є ефективними, знаходяться в гарному технічному стані, проте за терміном експлуатації та пробігом слід рекомендувати підприємству планувати поступове оновлення рухомого складу.

3. Встановлено, що необхідним інструментом маршрутизації перевезень є інтеграція в єдину аналітичну платформу задачі динамічного програмування та методу районування за принципом ієрархічного співвідношення між ймовірностями. Для створення методики визначення оптимальних маршрутів для оперативного планування автомобільних вантажних перевезень у динамічно змінних умовах, повинна бути виконана розробка оптимізаційної аналітичної моделі об'єктно-орієнтованого управління та алгоритмів на її основі.

4. Виконано розробку оптимізаційної аналітичної моделі, алгоритму та ПЗ розв'язання задачі динамічного програмування, що реалізує принцип Беллмана, для визначення оптимальної траєкторії (маршруту) перевезення вантажу;

5. Виконано розробку аналітичної моделі, алгоритму і ПЗ визначення оптимальних маршрутів при оперативно-виробничому плануванні перевезень в умовах, що динамічно змінюються, яка базується на інтеграції в задачу динамічного програмування результатів розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації при виборі керуючої дії для кожного дискретного стану ГДТС.

6. Проведено дослідження застосування розробленого маршрутизатора при формуванні кільцевого маршруту доставки запасних частин зі складу Вінницької філії ТОВ «ЕЛІТ-Україна» до замовників. Розроблене ПЗ маршрутизатора дозволило сформувати маршрут, який займає менше часу роботи автомобіля на маршруті (хоча довжина маршруту виявилась трішки більшою) та знизити собівартість перевезень.

Додаток Б
(обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ
ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ**



ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Удосконалення маршрутизації при доставці запасних частин
Вінницької філії товариства з обмеженою відповідальністю «ЕЛІТ-Україна»
застосуванням цифрових технологій

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ кафедра автомобілів та транспортного менеджменту

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі
системою StrikePlagiarism (КПІ) 16,3 %

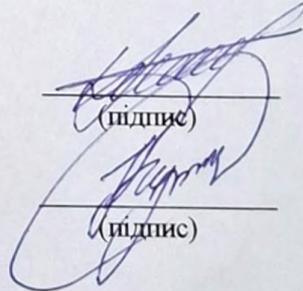
Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- У роботі виявлено ознаки академічного плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

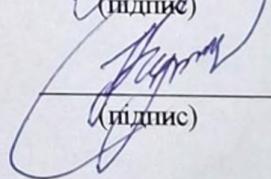
Цимбал С.В., завідувач кафедри АТМ

(прізвище, ініціали, посада)

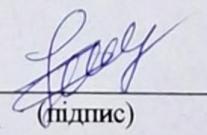

(підпис)

Кужель В.П., доцент кафедри АТМ

(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

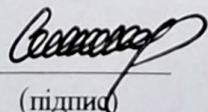

(підпис)

Цимбал О.В.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

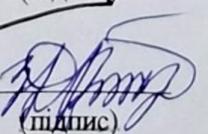
Керівник


(підпис)

Смирнов Є.В., доцент кафедри АТМ

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач


(підпис)

Зазімко Д.В.

(прізвище, ініціали)