

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СВАТКО ВІТАЛІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 004.942

ДИСЕРТАЦІЯ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МЕТОДИ ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ
ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ
У ВЕЛИКИХ МІСТАХ

05.13.06 – інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших
Авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ В. В. Сватко

Науковий керівник –
Данчук Віктор Дмитрович,
доктор фізико-математичних наук,
професор

Ідентичність усіх примірників дисертації
Засвідчую
Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 26.059.01
_____ О.І. Мельниченко

КИЇВ – 2021

АНОТАЦІЯ

Сватко В.В. Інтелектуальні методи та інформаційна технологія оптимізації процесів доставки вантажів у великих містах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 «Інформаційні технології» Національний транспортний університет Міністерства освіти і науки України, Київ, 2021.

Дисертація присвячена розв'язанню актуальної науково-технічної задачі розробки методів та інформаційних технологій оптимізації процесів доставки вантажів дрібних партій у великих містах з урахуванням реальної динаміки транспортних потоків.

У вступі розкрито сутність та стан наукової проблеми, обґрунтовано актуальність досліджень, сформульовано мету, предмет, об'єкт та наукові задачі дослідження; описано основні методи дослідження; показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами; викладено наукову новизну, практичне значення отриманих результатів та відомості про публікацію і апробацію результатів дисертаційного дослідження.

У першому розділі показано, що вирішення проблем різкого зменшення ефективності транспортної інфраструктури та забруднення навколишнього середовища на ВДМ міст, що спостерігається в останні роки, може бути пов'язане із застосуванням інтелектуальних транспортних систем, де велику роль відіграє ефективне використання сучасних інформаційних технологій.

Наведено критичний аналіз існуючих на сьогоднішній день науково-методичних уявлень та інформаційних технологій щодо оптимізації процесів доставки вантажів, визначені відповідні проблеми та шляхи їх вирішення.

Визначено, що використання інформаційних технологій в організації, оптимізації та управлінні логістичними процесами здійснення вантажних і пасажирських перевезень, а також управлінні дорожнім рухом у містах в умовах великої завантаженості ВДМ у теперішній час є епізодичним і недосконалим. Також потребують подальшого розвитку інформаційні технології вирішення задач з динамічної маршрутизації перевезень в реальному режимі часу в умовах

реальної динаміки транспортних потоків на ВДМ міст, які є вельми актуальними для підвищення ефективності функціонування ІТС.

Поряд з цим, показано, що існуючі на сьогоднішній день методи та моделі оптимізації маршруту транспортних перевезень та відповідні програмно-технічні комплекси в основному вирішують задачі маршрутизації для стаціонарних станів транспортної мережі, коли швидкості на ділянках таких мереж не змінюються

Окрім того, показана актуальність питань теоретичного розвитку синергетичних уявлень про динаміку транспортного потоку для щільних його станів, вирішення яких дозволить розробляти інформаційні технології динамічної маршрутизації доставки вантажів з коректним урахуванням нестаціонарної динаміки транспортних потоків, що базуватиметься на відповідних розроблених інтелектуальних методах дискретної оптимізації.

У другому розділі наведено результати розвитку синергетичних уявлень про динаміку транспортного потоку в області фазового переходу від вільного до синхронізованого стану, а також в області щільного транспортного потоку.

Тут, з метою удосконалення мікроскопічного (синергетичного) підходу для опису динаміки транспортного потоку на певних ділянках ВДМ або автомагістралі, отримала подальший розвиток концепція ефективного автомобіля. Зокрема, в роботі розвинуто понятійно-категоріальний апарат теорії транспортних потоків шляхом розгляду ефективного автомобіля як модельного елементу системи, що описує транспортний рух в рамках певної мікроскопічної моделі, який має такі техніко-експлуатаційні характеристики ТЗ, що є найбільш репрезентативним для транспортного потоку, який формується на певній ділянці ВДМ або автомагістралі протягом певного проміжку часу.

В рамках розвинутої концепції ефективного автомобіля з використанням методу аналізу ієрархій Сааті розглянуто процедуру знаходження ефективного автомобіля як характеристики транспортного потоку, що формується в реальних умовах функціонування ВДМ або автомагістралей. На прикладі фрагменту ВДМ м. Києва проведено кількісні дослідження щодо визначення найбільш значущих техніко-експлуатаційних характеристик ефективного автомобіля як найбільш репрезентативного для транспортного потоку з відповідним складом транспортних засобів на досліджуваних ділянках ВДМ. Крім того, виявлено, що

отримані в рамках цієї концепції оцінки рівня завантаження проїзної частини досліджуваної ділянки ВДМ м. Києва, на відміну від таких оцінок за методикою ДБН, у більшій мірі відповідають експериментальним даним в області граничного насичення транспортного потоку (затору).

Вперше проведено синергетичну інтерпретацію експериментальної фазової діаграми Кернера переходу від вільного до синхронізованого транспортного потоку, а також в області щільного транспортного потоку. Тут теоретичні дослідження базуються на аналізі функціональних залежностей характеристик руху ефективного автомобіля при різних фазах динаміки транспортного потоку в рамках синергетичної моделі Лоренца в адіабатичному наближенні. В рамках цієї мікроскопічної моделі розглядається трипараметрична система нелінійно взаємопов'язаних параметрів η , ν , τ , що мають фізичний сенс відхилення від оптимального значення відповідно інтервалу між транспортними засобами (динамічні габарити), оптимальної швидкості та оптимального часу розгону-гальмування ефективного автомобіля, як модельної характеристики транспортного потоку, що формується на ділянках в реальних умовах функціонування ВДМ.

За результатами проведених досліджень теоретично підтверджено наявність трьох фаз динаміки транспортного потоку (вільного, синхронізованого та широкого кластеру, що рухається), експериментально виявлених в дослідженнях Б. Кернера. Отримані функціональні залежності швидкості руху транспортного потоку ν від характерного часу розгону-гальмування τ_0 ефективного автомобіля та щільності транспортного потоку ρ вказують на наявність відповідних границь переходів між фазами динаміки транспортного потоку.

У третьому розділі представлено результати розробки інтелектуального методу оптимізації маршрутів доставки вантажів у великих містах, який, на відміну від існуючих, враховує нестационарну динаміку транспортних потоків на певних ділянках ВДМ. Цей метод базується на використанні модифікованого мурашиного алгоритму дискретної оптимізації та результатах синергетичної інтерпретації функціональної залежності швидкості руху транспортного потоку від його щільності. Принциповою відмінністю запропонованої модифікації від існуючих на сьогоднішній день модифікацій мурашиного алгоритму є те, що

циклічний синхронний рух колонії мурах, що рухаються із однаковими сталими швидкостями, замінено на асинхронний рух кожної мурахи колонії з певними, різними у загальному випадку швидкостями. Це дозволяє проводити імітаційне моделювання оптимізації маршруту в умовах реальної динаміки транспортних потоків на ділянках мережі, де мурашині агенти, як аналоги ТЗ, рухаються із відповідними швидкостями. Крім того, в запропонованій модифікації існує можливість фіксації результатів оптимізації частково пройденого шляху для розрахунку подальшого маршруту при зміні швидкості мурах під час руху. Відповідні тестові обчислення показали, що внесені в алгоритм модифікації, дозволили значно скоротити час пошуку та побудови оптимального маршруту, збільшити точність обчислень.

З використанням розробленого методу в рамках задачі комівояжера проведено імітаційне моделювання оптимізації за часом маршруту в умовах, наближених до реальної динаміки транспортних потоків на прикладі ВДМ м. Києва та м. Кіто (Quito), столиці Еквадору.

На підставі аналізу результатів імітаційних досліджень доведена можливість використання методу та створеної на його основі інформаційної технології для ефективного управління процесом перевезень в мегаполісах, зокрема, при вирішенні задач динамічної маршрутизації доставки вантажів в реальному режимі часу з урахуванням реального стану руху транспорту на відповідних ділянках ВДМ.

У четвертому розділі запропоновано інтелектуальний метод визначення оптимального розташування розподільчих об'єктів транспортно-логістичних систем, що має важливе значення для ефективного управління логістичними процесами при вантажних перевезеннях. Цей метод розроблений на основі методу планування променевої терапії злоякісних пухлин. Апробація методу здійснювалась на прикладі фрагменту ВДМ м. Києва, де розглядалась оптимізаційна задача визначення за кількістю та місцем розташування розподільчих центрів (складів) заданої місткості при доставці вантажів дрібних партій заданого обсягу від складу виробника до заданої кількості супермаркетів.

Для перевірки коректності застосування запропонованого методу оптимізації розташування складських приміщень в задачах транспортної

логістики, в роботі використано метод самоорганізації мурашиної колонії, за допомогою якого в рамках задачі комівояжера будувались оптимальні маршрути доставки товару від складу до споживачів.

Проведені розрахунки вказують на ряд переваг запропонованого методу визначення оптимальної кількості та місця розташування розподільчих центрів. Зокрема, такими перевагами є можливість вирішення відповідних задач оптимізації достатньо великої розмірності, висока точність знайдених результатів, швидкість розрахунків, можливість застосування запропонованого методу для вирішення подібного класу задач, що описують процеси іншої фізичної природи.

У п'ятому розділі представлені результати розробки інформаційної технології динамічної маршрутизації вантажних перевезень, що базується на використанні розроблених інтелектуальних методів оптимізації процесів доставки вантажів дрібних партій на ВДМ великих міст, які дозволяють враховувати нестационарну (реальну) динаміку транспортних потоків високої щільності в реальному режимі часу при проведенні оптимізації маршрутів доставки, а також визначати оптимальне розташування розподільчих об'єктів доставки вантажів на таких ВДМ.

Така інформаційна технологія реалізується в запропонованій моделі інформаційної системи підтримки прийняття рішень.

У відповідності до логічної архітектури та алгоритму функціонування представленої моделі ІСППР основними модулями розробленої інформаційної технології, відповідно, є модуль динамічної маршрутизації вантажних перевезень та модуль моделювання та управління динамікою ТП. В модулі динамічної маршрутизації здійснюється обробка даних моніторингу поточних характеристик динаміки ТП на ділянках ВДМ та вхідної інформації про кількість, місця розташування замовників та обсяги їх потреб у товарах; вибір найбільш оптимальних сценаріїв маршруту доставки вантажів за результатами експериментальних даних та результатами розробки сценаріїв прогнозування динаміки ТП і адаптації моделей вибору маршруту до реальних умов; внесення в модель умов початку застосування інформаційної технології динамічної маршрутизації і скасування її застосування на основі детектування відповідних поточних даних динамічного стану ТП на ділянках ВДМ. Відповідно в модулі

моделювання та управління динамікою ТП на основі даних про поточний стан динаміки ТП на ділянках ВДМ, отриманих з модулю динамічної маршрутизації, та результатах імітаційного моделювання з використанням модифікованого мурашиного алгоритму здійснюється розробка сценаріїв прогнозування динаміки ТП і адаптація отриманих моделей вибору маршруту до реальних умов.

Крім того, використання такої інформаційної технології, що реалізується за допомогою трьох модулів (динамічної маршрутизації, моделювання та управління динамікою ТП, оптимізації розташування об'єктів), дозволяє здійснювати оптимізацію процесу розташування розподільчих об'єктів транспортно-логістичних систем з подальшою оптимізацією маршрутів доставки вантажів при урахуванні нестационарної (реальної) динаміки транспортних потоків на ВДМ міста. Тут користувач має можливість при наявності вхідної інформації про кількість та обсяги потреб у товарах замовників, а також про динамічний стан ВДМ міста в певний момент часу отримати вихідну інформацію про оптимальні кількість та місця розташування розподільчих центрів (складів) заданої місткості при доставці вантажів дрібних партій заданого обсягу від складу виробника до заданої кількості супермаркетів, як замовників відповідних видів товарів.

Важливо, що кожен із модулів можна використовувати окремо для вирішення відповідних задач, або ж комплексно для пошуку та визначення оптимальних рішень при логістичному управлінні доставки вантажів у великих містах.

Проведено апробацію запропонованої моделі ІСППР процесів доставки вантажів у великих містах на прикладі підприємства ТОВ «Фрозен Фрут», що здійснює доставку замороженої продукції дрібними партіями до споживачів у м. Києві. Отримані результати вказують на те, що застосування запропонованої моделі ІСППР та відповідних інформаційних технологій дозволяє суттєво підвищувати ефективність функціонування транспортно-логістичних систем доставки вантажів у великих містах.

Практичне значення отриманих результаті полягає в тому, що на основі запропонованих інтелектуальних методів та узагальнення існуючих результатів, закладається сучасний науково-практичний базис інтелектуалізації транспортно-логістичних систем доставки вантажів у великих містах шляхом реалізації

розробленої інтелектуальної інформаційної технології динамічної маршрутизації вантажних перевезень в реальному режимі часу з урахуванням нестаціонарної (реальної) динаміки транспортних потоків на ділянках ВДМ.

Розвинута в дисертаційному дослідженні концепція ефективного автомобіля дозволяє коректно описувати склад та характеристики транспортного потоку, що формується на певних ділянках ВДМ міст, і може бути корисною, зокрема, при описі транспортних процесів в рамках широкого класу мікроскопічних моделей.

Запропоновані в роботі методи та інформаційні технології оптимізації процесів доставки вантажів мають універсальний характер і можуть знайти своє застосування при створенні ефективних інтелектуальних транспортних систем міст для вирішенні задач оперативного (в онлайн режимі) управління процесом перевезень на ВДМ міст, а також на підприємствах-перевізників та в органах державної влади (Державне агентство автомобільних доріг України, Департаменти транспортної інфраструктури міських та обласних державних адміністрацій України) при вирішенні задач транспортної логістики для систем різної розмірності (місто, регіон, перевезення при міжнародному сполученні).

Ключові слова: інформаційна технологія, мурашиний алгоритм, динамічна маршрутизація, транспортний потік, інтелектуальна інформаційна система підтримки прийняття рішень, методи оптимізації маршрутів.

СПИСОК РОБІТ, ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз

1. Svatko V., Danchuk V., Bakulich O. An improvement in ant algorithm method for optimizing a transport route with regard to traffic flow. *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 187. – P. 425 – 434.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.396>

2. Svatko V., Danchuk V., Bakulich O. Identifying warehouse location using the radiation therapy method in logistic distribution system. *Transport Problems*. 2018. Vol. 13. Issue 4. P. 143 – 155. DOI: <https://doi.org/10.20858/tp.2018.13.4.13>

3. Svatko V., Danchuk V., Bakulich O. Identifying optimal location and necessary quantity of warehouses in logistic system using a radiation therapy method. *Transport*. 2019. Vol. 34, Issue 2. P. 175-186.

DOI: <https://doi.org/10.3846/transport.2019.8546>

4. Svatko V., Danchuk V., Bakulich O. Building optimal routes for cargo delivery in megacities. *Transport and Telecommunication*. 2019. Vol. 20, Issue 2. P. 142-152. DOI: <https://doi.org/10.2478/ttj-2019-0013>

Публікації у фахових виданнях України:

5. Сватко В.В., Данчук В.Д., Олійник Р.В. Визначення ефективних засобів вантажних перевезень в транспортних задачах методом аналізу ієрархій. *Вісник Національного транспортного університету*. Київ, 2011. № 22. С. 127-136.

6. Сватко В.В., Данчук В.Д. Застосування модифікованого методу самоорганізації мурашиної колонії для визначення оптимального маршруту вантажних перевезень в транспортних задачах. *Вісник Національного транспортного університету*. Київ, 2011. № 24 (2). С. 147-153.

7. Сватко В.В., Данчук В.Д. Модифікований мурашиний метод оптимізації маршруту в динамічній задачі комівояжера. *Вісник Національного транспортного університету*. Київ, 2012. № 25. С. 378-382.

8. Сватко В.В., Данчук В.Д. Оптимізація пошуку шляхів по графу в динамічній задачі комівояжера методом модифікованого мурашиного алгоритму. *Системні дослідження та інформаційні технології*. Київ, 2012. №2. С. 78-86.

9. Сватко В.В., Данчук В.Д., Бакуліч О.О. Визначення ефективного автомобіля як характеристики транспортного потоку за допомогою методу аналізу ієрархій. *Вісник Національного транспортного університету*. Київ, 2012. № 26 (2). С. 123-127.

10. Сватко В.В., Данчук В.Д., Бакуліч О.О. Синергетична інтерпретація фазового переходу між режимами вільного та синхронізованого транспортного потоку. *Вісник Національного транспортного університету*. Київ, 2014. № 29. С. 109-115.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

11. Сватко В.В., Данчук В.Д. Оптимізація пошуку шляхів по графу в задачах логістики методом модифікованого мурашиного алгоритму. *XII Міжнародна науково-технічна конференція Системний аналіз та інформаційні технології САІТ-2010*: тези доповідей. Київ: НТУУ «КПІ», 2010. С. 72.

12. Сватко В.В., Данчук В.Д. Оптимізація транспортних перевезень в динамічній задачі комівояжера. *XVI Міжнародна науково-практична конференція*: тези доповідей. Київ: Європейський університет, 2010. С.148-150.

13. Сватко В.В., Данчук В.Д., Позивай М.І. Оптимізація маршруту транспортних перевезень модифікованим методом самоорганізації мурашиної колонії. *Системний аналіз та інформаційні технології САІТ-2011*: тези доповідей. Київ: НТУУ «КПІ», 2011. С. 78.

14. Сватко В.В., Данчук В.Д. Оптимізація маршруту вантажних перевезень в умовах реальної динаміки транспортних потоків. *LXVIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*: тези доповідей. Київ: НТУ, 2012. С. 74.

15. Сватко В.В. Методика визначення коефіцієнтів приведення до легкового автомобіля з використанням моделі ефективного транспортного засобу. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції: Сучасні напрямки теоретичних і прикладних досліджень*: тези доповідей. Одеса: Sworld, 2013. С. 16-24.

16. Сватко В.В., Данчук В.Д. Визначення ефективного транспортного засобу на основі даних спостереження стану транспортної мережі міста за допомогою методу аналізу ієрархій Сааті. *LXIX наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*: тези доповідей. Київ: НТУ, 2013. С. 73.

17. Сватко В.В. Використання моделі ефективного транспортного засобу для визначення коефіцієнтів приведення до легкового автомобіля. *XV Міжнародна конференція «Системний аналіз та інформаційні технології САІТ-2013»*: тези доповідей. Київ: НТУУ «КПІ», 2013. С. 185.

18. Сватко В.В., Данчук В.Д., Бакуліч О.О. Синергетична інтерпретація фазового переходу між станами вільного та синхронізованого транспортного потоку. *Системний аналіз та інформаційні технології САІТ-2014*: тези доповідей. Київ: НТУУ «КПІ», 2014. С. 79.

19. Сватко В.В., Данчук В.Д. Оптимізація розташування складських приміщень в задачах транспортної логістики за допомогою методу оптимального планування променевої терапії злоякісних новоутворень. *LXXIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*: тези доповідей. Київ: НТУ, 2017. С. 88.

20. Сватко В.В., Данчук В.Д. Розробка інформаційної керуючої системи для побудови оптимальних маршрутів доставки вантажів. *LXXIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*: тези доповідей. Київ: НТУ, 2017. С. 89.

21. Svatko V., Danchuk V., Bakulich O. An improvement in ant algorithm method for optimizing a transport route with regard to traffic flow. *X International Scientific Conference: TRANSBALTICA 2017: Transportation Science and Technology*. Vilnius, Lithuania: Vilnius Gediminas Technical University, 2017.

22. Svatko V., Danchuk V., Bakulich O. Applying the radiation therapy method for solving the problems of the optimal location of warehouses in logistics distribution system. *IX International conference: Transport Problems*. Katowice, Poland: University of Silesia in Katowice, 2017. P. 104-115.

23. Сватко В.В., Данчук В.Д. Використання методу променевої терапії для вирішення задач оптимізації розташування складів у логістичній розподільчій системі. *Міжнародна науково-практична конференція «Перспективні напрями розвитку регіональних транспортних та логістичних систем»*. Харків, 2018. С.177-181.

24. Svatko V., Danchuk V., Bakulich O. Building optimal routes for cargo delivery taking into account the dynamics of traffic flows. *6th International Conference on Traffic and Logistic Engineering*. Bangkok, Thailand, 2018. Vol. 259. - P. 1-6.

DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925901001>

25. Svatko V., Danchuk V., Talal Ameen, Bakulich O. Simulation Processes of Construction of Optimal Routes for the Delivery of Goods by Road Transport on Urban Road Network in Mountainous Cities. *XI International Scientific Conference: TRANSBALTICA 2019: Transportation Science and Technology*. Vilnius, [Lithuania: Vilnius Gediminas Technical University](#), 2019.

Свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір:

26. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №38692 науковий твір «Оптимізація маршруту транспортних перевезень в динамічній задачі комівояжера модифікованим методом самоорганізації мурашиної колонії» / В.Д. Данчук, В.В. Сватко, М.І. Позивай (Україна). – №39100; заявл. 19.04.2011; зареєстр. 21.06.2011.

27. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №38693 комп'ютерна програма «Оптимізація маршруту транспортних перевезень в динамічній задачі комівояжера модифікованим методом самоорганізації мурашиної колонії» / В.Д. Данчук, В.В. Сватко, М.І. Позивай (Україна). – №39101; заявл. 19.04.2011; зареєстр. 21.06.2011.

28. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №97439 науковий твір «Імітаційне моделювання процесів оптимізації розподілу пунктів доставки вантажів за допомогою методу променевої терапії» / В.Д. Данчук, В.В. Сватко (Україна). – №97439; зареєстровано 05.05.2020.

ABSTRACT

Svatko V., Intellectual methods and information technology of optimization of cargo delivery processes in large cities.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences (Doctor of Philosophy) in specialty 05.13.06 "Information Technologies" - National Transport University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the solution of the actual scientific and technical problem of development of methods and information technologies of optimization of processes of delivery of cargoes of small parties in the large cities taking into account the real dynamics of traffic flows.

The introduction reveals the essence and state of the scientific problem, substantiates the relevance of research, formulates the purpose, subject, object and scientific objectives of the study; the main research methods are described; the connection of work with scientific programs, plans and themes is shown; the scientific novelty, practical value of the received results and the information on the publication and approbation of results of dissertation research are stated.

The first chapter shows that the solution to the problems of a sharp decline in transport infrastructure efficiency and environmental pollution on URN, which has been observed in recent years, may be associated with the use of intelligent transport systems, where the effective use of modern information technology.

The critical analysis of the existing scientific and methodical representations and information technologies concerning optimization of processes of delivery of cargoes is resulted, the corresponding problems and ways of their decision are defined.

It is determined that the use of information technology in the organization, optimization and management of logistics processes of freight and passenger traffic, as well as traffic management in cities with heavy traffic is currently episodic and imperfect. Also need further development of information technology to solve problems of dynamic routing of traffic in real time in terms of real dynamics of traffic flows on the URN cities, which are very relevant to improve the efficiency of ITS.

In addition, it is shown that the existing methods and models of route optimization of transport traffic and the corresponding software and hardware mainly solve routing problems for stationary states of the transport network, when speeds on sections of such networks do not change.

In addition, the relevance of the theoretical development of synergetic ideas about the dynamics of traffic for its dense states, the solution of which will develop information technology for dynamic routing of cargo delivery with the correct consideration of non-stationary dynamics of traffic, based on appropriate intelligent methods of discrete.

The second chapter presents the results of the development of synergetic ideas about the dynamics of traffic flow in the phase transition from free to synchronized state, as well as in the section of dense traffic flow.

Here, in order to improve the microscopic (synergetic) approach to describe the dynamics of traffic flow on certain sections of the URN or highway, the concept of an efficient car was further developed. In particular, the paper develops the conceptual and categorical apparatus of the theory of traffic flows by considering an efficient car as a model element of the system describing traffic flow within a certain microscopic model, which has such technical and operational characteristics of the vehicle that is most representative of the formed traffic flow on a certain section on URN or highway for a certain period of time.

Within the framework of the developed concept of an efficient car using the method of analysis of Saati hierarchies is considered the procedure of finding an efficient car as a characteristic of the traffic flow, which is formed in real conditions of operation on URN or highways. On the example of a fragment on URN of Kyiv, quantitative research was conducted to determine the most significant technical and operational characteristics of an efficient car as the most representative for the traffic flow with the appropriate composition of vehicles in the studied areas on URN. In addition, it was found that the estimates obtained within this concept of the level of loading of the carriageway of the investigated section on URN in Kyiv, in contrast to such estimates by the DBN method, are more consistent with experimental data in the field of traffic congestion.

For the first time, a synergetic interpretation of the experimental phase diagram of the Kerner transition from free to synchronized transport flow, as well as in the region of dense traffic flow. Here, theoretical research is based on the analysis of functional dependences of the motion characteristics of an efficient car at different phases of traffic flow dynamics within the framework of the Lorentz synergetic model in the adiabatic approximation. Within the framework of this microscopic model, a three-parameter system of nonlinear interconnected parameters η , v , τ is considered, which have a physical meaning of deviation from the optimal value according to the interval between vehicles (dynamic dimensions), optimal speed and optimal acceleration-braking time of an efficient car which characteristics of the traffic flow formed on sites in real conditions of functioning on URN.

According to the results of the research, the existence of three phases of traffic flow dynamics (free, synchronized and wide moving cluster) is theoretically confirmed

experimentally revealed in B. Kerner's research. The obtained functional dependences of the traffic flow velocity v on the characteristic acceleration-deceleration time of the efficient vehicle and the traffic flow density ρ indicate the presence of corresponding transition boundaries between the phases of the traffic flow dynamics.

The third chapter presents the results of the development of an intelligent method for optimizing cargo delivery routes in large cities, which, in contrast to existing ones, takes into account the non-stationary dynamics of traffic flows in certain areas on URN. This method is based on the use of a modified ant algorithm of discrete optimization and the results of synergetic interpretation of the functional dependence of the speed of the traffic flow on its density. The main difference between the proposed modification and the existing modifications of the ant algorithm is that the cyclic synchronous motion of the ant colony moving at the same constant speeds is replaced by the asynchronous motion of each ant colony with certain, generally different speeds. This allows simulation of route optimization in terms of real dynamics of traffic flows in areas of the network, where ant agents, as analogs of vehicles, move at appropriate speeds. In addition, in the proposed modification, it is possible to record the results of the optimization of the partially traveled path to calculate the subsequent route when changing the speed of the ants during movement. Relevant test calculations showed that the modifications made to the algorithm allowed to significantly reduce the search time and build the optimal route, increase the accuracy of calculations.

Using the developed method, the salesman simulated the route time optimization in the conditions close to the real dynamics of traffic flows on the example on URN Kyiv and Quito, the capital of Ecuador.

Based on the analysis of simulation research results, the possibility of using the method and information technology created on its basis for effective management of transportation in megacities, in particular, in solving problems of dynamic routing of goods in real time, taking into account the real state of traffic on the URN.

The fourth chapter proposes an intelligent method for determining the optimal location of distribution facilities of transport and logistics systems, which is important for effective management of logistics processes in freight. This method is based on the method of planning radiation therapy for malignant tumors. Approbation of the method was carried out on the example of a fragment on URN of Kyiv, where the optimization

problem of determining the number and location of distribution centers (warehouses) of a given capacity when delivering small lots of a given volume from the manufacturer to a given number of supermarkets.

To verify the correctness of the proposed method of optimizing the location of warehouses in the problems of transport logistics, the method of self-organization of an ant colony is used, with which the optimal route of delivery of goods from the warehouse to consumers was built within the salesman's task.

The calculations indicate a number of advantages of the proposed method of determining the optimal number and location of distribution centers. In particular, such advantages are the ability to solve the corresponding optimization problems of large enough dimension, high accuracy of the results, speed of calculations, the ability to apply the proposed method to solve a similar class of problems describing the processes of another physical nature.

The fifth section presents the results of the development of information technology for dynamic routing of freight, based on the use of developed intelligent methods for optimizing the delivery of small-lot consignments on URN large cities, which allow to take into account non-stationary (real) dynamics of high-density traffic flows in real time optimization of delivery routes, as well as to determine the optimal location of distribution facilities for cargo delivery on such URN.

Such information technology is implemented in the proposed model of decision support information system.

In accordance with the logical architecture and algorithm of functioning of the presented model of SDM the basic modules of the developed information technology, accordingly, are the module of dynamic routing of freight transportations and the module of modeling and management of dynamics of traffic flows. The dynamic routing module processes data monitoring of the current characteristics of traffic flow dynamics in the areas on URN and input information about the number, location of customers and the volume of their needs in goods; selection of the most optimal scenarios of cargo delivery route based on the results of experimental data and the results of development of scenarios for forecasting the traffic flow dynamics and adaptation of route selection models to real conditions; introduction into the model of the conditions of the beginning of application of information technology of dynamic

routing and cancellation of its application on the basis of detection of the corresponding current data of a dynamic condition of traffic flow on sites on URN. Accordingly, in the module of modeling and control of traffic flow dynamics on the basis of data on the current state of traffic flow dynamics on URN areas obtained from the dynamic routing module and the results of simulation using a modified ant algorithm, scenarios of traffic flow dynamics forecasting are developed.

In addition, the use of such information technology, which is implemented using three modules (dynamic routing, modeling and control of traffic flow dynamics, optimization of the location of objects), allows to optimize the process of location of distribution facilities of transport and logistics systems with further optimization of delivery routes taking into account the non-stationary (real) dynamics of traffic flows on the city's URN. Here the user has the opportunity in the presence of input information on the number and volume of needs in the goods of customers, as well as the dynamic state of the city at a certain point in time to obtain initial information on the optimal number and location of distribution centers (warehouses). volume from the manufacturer's warehouse to a given number of supermarkets, as customers of the relevant types of goods.

It is important that each of the modules can be used separately to solve relevant problems, or comprehensively to find and determine the optimal solutions for logistics management of cargo delivery in large cities.

The proposed model of SDM of cargo delivery processes in large cities was tested on the example of the company Frozen Fruit, LLC, which delivers frozen products in small lot to consumers in Kyiv. The obtained results indicate that the application of the proposed model of SDM and relevant information technologies can significantly increase the efficiency of transport and logistics systems of cargo delivery in large cities.

The practical significance of the obtained results is that on the basis of the proposed intelligent methods and generalization of existing results, a modern scientific and practical basis for the intellectualization of transport and logistics delivery systems in large cities by implementing the developed intelligent information technology dynamic routing of goods in real time. taking into account the non-stationary (real) dynamics of traffic flows in the areas of URN.

The concept of an efficient car developed in the dissertation research allows to correctly describe the composition and characteristics of the traffic flow formed in certain areas of URN, and can be useful, in particular, in describing transport processes within a wide class of microscopic models.

The methods and information technology proposed in the work of optimization of cargo delivery processes are universal and can find their application in creating effective intelligent transport systems of cities to solve problems of operational (online) management of the process of transportation of cities, as well as carriers and carriers. public authorities (State Agency of Motor Roads of Ukraine, Departments of Transport Infrastructure of City and Regional State Administrations of Ukraine) in solving problems of transport logistics for systems of different dimensions (city, region, transportation in international traffic).

Key words: information technology, ant algorithm, dynamic routing, traffic flow, intelligent information support system for decision making, methods of route optimization.

List of publisher publications

Publications in editions included in international science-computer bases

1. Svatko V., Danchuk V., Bakulich O. An improvement in ant algorithm method for optimizing a transport route with regard to traffic flow. *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 187. – P. 425 – 434. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.396>
2. Svatko V., Danchuk V., Bakulich O. Identifying warehouse location using the radiation therapy method in logistic distribution system. *Transport Problems*. 2018. Vol. 13. Issue 4. P. 143 – 155. DOI: <https://doi.org/10.20858/tp.2018.13.4.13>
3. Svatko V., Danchuk V., Bakulich O. Identifying optimal location and necessary quantity of warehouses in logistic system using a radiation therapy method. *Transport*. 2019. Vol. 34, Issue 2. P. 175-186.
DOI: <https://doi.org/10.3846/transport.2019.8546>
4. Svatko V., Danchuk V., Bakulich O. Building optimal routes for cargo delivery in megacities. *Transport and Telecommunication*. 2019. Vol. 20, Issue 2. P. 142-152. DOI: <https://doi.org/10.2478/ttj-2019-0013>

Publications in professional editions

5. Svatko V.V., Danchuk V.D., Oliinyk R.V. Vyznachennia efektyvnykh zasobiv vantazhnykh perevezen v transportnykh zadachakh metodom analizu iierarkhii. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu*. Kyiv. 2011. № 22. P. 127-136.

6. Svatko V.V., Danchuk V.D. Zastosuvannia modyfikovanoho metodu samoorhanizatsii murashynoi kolonii dlia vyznachennia optimalnogo marshrutu vantazhnykh perevezen v transportnykh zadachakh. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu*. Kyiv. 2011. № 24 (2). P. 147-153.

7. Svatko V.V., Danchuk V.D. Modyfikovanyi murashynyi metod optymizatsii marshrutu v dynamichnii zadachi komivoiazhera. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu*. Kyiv. 2012. № 25. P. 378-382.

8. Svatko V.V., Danchuk V.D. Optymizatsiia poshuku shliakhiv po hrafu v dynamichnii zadachi komivoiazhera metodom modyfikovanoho murashynoho alhorytmu. *Systemni doslidzhennia ta informatsiini tekhnolohii*. Kyiv. 2012. №2. P. 78-86.

9. Svatko V.V., Danchuk V.D., Bakulich O.O. Vyznachennia efektyvnoho avtomobilia yak kharakterystyky transportnoho potoku za dopomohoiu metodu analizu iierarkhii. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu*. Kyiv. 2012. № 26 (2). P. 123-127.

10. Svatko V.V., Danchuk V.D., Bakulich O.O. Synerhetychna interpretatsiia fazovoho perekhodu mizh rezhymamy vilnoho ta synkhronizovanoho transportnoho potoku. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu*. Kyiv. 2014. № 29. P. 109-115.

Materials of the conferences, where the testing of work is carried out

11. Svatko V.V., Danchuk V.D. Optymizatsiia poshuku shliakhiv po hrafu v zadachakh lohistyky metodom modyfikovanoho murashynoho alhorytmu. *XII Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia Systemnyi analiz ta informatsiini tekhnolohii SAIT-2010: tezy dopovidei*. Kyiv: NTUU «KPI», 2010. P. 72.

12. Svatko V.V., Danchuk V.D. Optymizatsiia transportnykh perevezen v dynamichnii zadachi komivoiazhera. *XVI Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia: tezy dopovidei*. Kyiv: Yevropeyskyi universytet, 2010. P.148-150.

13. Svatko V.V., Danchuk V.D., Pozyvai M.I. Optyimizatsiia marshrutu transportnykh perevezen modyfikovanyim metodom samoorhanizatsii murashynoi kolonii. *Systemnyi analiz ta informatsiini tekhnolohii SAIT-2011: tezy dopovidei*. Kyiv: NTUU «KPI», 2011. P. 78.

14. Svatko V.V., Danchuk V.D. Optyimizatsiia marshrutu vantazhnykh perevezen v umovakh realnoi dynamiky transportnykh potokiv. *LXVIII naukova konferentsiia profesorsko-vykladatskoho skladu, aspirantiv, studentiv ta spivrobitnykiv vidokremenykh strukturnykh pidrozdiliv universytetu: tezy dopovidei*. Kyiv: NTU, 2012. P. 74.

15. Svatko V.V. Metodyka vyznachennia koefitsientiv pryvedennia do lehkovoho avtomobilia z vykorystanniam modeli efektyvnoho transportnoho zasobu. *Materialy mizhnarodnoi naukovy-praktychnoi konferentsii: Suchasni napriamky teoretychnykh i prykladnykh doslidzhen: tezy dopovidei*. Odesa: Sworld, 2013. P. 16-24.

16. Svatko V.V., Danchuk V.D. Vyznachennia efektyvnoho transportnoho zasobu na osnovi danykh sposterezhennia stanu transportnoi merezhi mista za dopomohoiu metodu analizu iierarkhii Saati. *LXIK naukova konferentsiia profesorsko-vykladatskoho skladu, aspirantiv, studentiv ta spivrobitnykiv vidokremenykh strukturnykh pidrozdiliv universytetu: tezy dopovidei*. Kyiv: NTU, 2013. P. 73.

17. Svatko V.V. Vykorystannia modeli efektyvnoho transportnoho zasobu dlia vyznachennia koefitsientiv pryvedennia do lehkovoho avtomobilia. *XV Mizhnarodna konferentsiia «Systemnyi analiz ta informatsiini tekhnolohii SAIT-2013»: tezy dopovidei*. Kyiv: NTUU «KPI», 2013. P. 185.

18. Svatko V.V., Danchuk V.D., Bakulich O.O. Synerhetychna interpretatsiia fazovoho perekhodu mizh stanamy vilnoho ta synkhronizovanoho transportnoho potoku. *Systemnyi analiz ta informatsiini tekhnolohii SAIT-2014: tezy dopovidei*. Kyiv: NTUU «KPI», 2014. P. 79.

19. Svatko V.V., Danchuk V.D. Optyimizatsiia roztashuvannia skladskykh prymishchen v zadachakh transportnoi lohistyky za dopomohoiu metodu optimalnoho planuvannia promenevoi terapii zloiakisnykh novoutvoren. *LXXIII naukova konferentsiia profesorsko-vykladatskoho skladu, aspirantiv, studentiv ta spivrobitnykiv vidokremenykh strukturnykh pidrozdiliv universytetu: tezy dopovidei*. Kyiv: NTU, 2017. P. 88.

20. Svatko V.V., Danchuk V.D. Rozrobka informatsiinoi keruiuchoi systemy dlia pobudovy optymalnykh marshrutiv dostavky vantazhiv. *LXXIII naukova konferentsiia profesorsko-vykladatskoho skladu, aspirantiv, studentiv ta spivrobitnykiv vidokremlyenykh strukturnykh pidrozdiliv universytetu: tezy dopovidei*. Kyiv: NTU, 2017. P. 89.

21. Svatko V., Danchuk V., Bakulich O. An improvement in ant algorithm method for optimizing a transport route with regard to traffic flow. *X International Scientific Conference: TRANSBALTICA 2017: Transportation Science and Technology*. Vilnius, Lithuania: Vilnius Gediminas Technical University, 2017.

22. Svatko V., Danchuk V., Bakulich O. Applying the radiation therapy method for solving the problems of the optimal location of warehouses in logistics distribution system. *IX International conference: Transport Problems*. Katowice, Poland: University of Silesia in Katowice, 2017. P. 104-115.

23. Svatko V.V., Danchuk V.D. Vykorystannia metodu promenevoi terapii dlia vyrishennia zadach optymizatsii roztashuvannia skladiv u lohistrychnii rozpodilchii systemi. *Mizhnarodna nauково-praktychna konferentsiia «Perspektyvni napriamy rozvytku rehionalnykh transportnykh ta lohistrychnykh system»*. Kharkiv, 2018. P.177-181.

24. Svatko V., Danchuk V., Bakulich O. Building optimal routes for cargo delivery taking into account the dynamics of traffic flows. *6th International Conference on Traffic and Logistic Engineering*. Bangkok, Thailand, 2018. Vol. 259. - P. 1-6.

DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925901001>

25. Svatko V., Danchuk V., Talal Ameen, Bakulich O. Simulation Processes of Construction of Optimal Routes for the Delivery of Goods by Road Transport on Urban Road Network in Mountainous Cities. *XI International Scientific Conference: TRANSBALTICA 2019: Transportation Science and Technology*. Vilnius, Lithuania: Vilnius Gediminas Technical University, 2019.

Certificates of registration of copyright to the work

26. Svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskoho prava na tvir №38692 naukovyi tvir «Optymizatsiia marshrutu transportnykh perevezen v dynamichnii zadachi komivoiazhera modyfikovanyim metodom samoorhanizatsii murashynoi kolonii» / V.D.

Danchuk, V.V. Svatko, M.I. Pozyvai (Ukraina). – №39100; zaiavl. 19.04.2011; zareiestr. 21.06.2011.

27. Svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskoho prava na tvir №38693 kompiuterna prohrama «Optymizatsiia marshrutu transportnykh perevezen v dynamichnii zadachi komivoiazhera modyfikovanyim metodom samoorhanizatsii murashynoi kolonii» / V.D. Danchuk, V.V. Svatko, M.I. Pozyvai (Ukraina). – №39101; zaiavl. 19.04.2011; zareiestr. 21.06.2011.

28. Svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskoho prava na tvir №97439 naukovyi tvir «Imitatsiine modeliuвання protsesiv optymizatsii rozpodilu punktiv dostavky vantazhiv za dopomohoiu metodu promenevoi terapii» / V.D. Danchuk, V.V. Svatko (Ukraina). – №97439; zareiestr. 05.05.2020.

ЗМІСТ

ВСТУП	27
РОЗДІЛ 1. НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ ТА ШЛЯХИ ЇХ УДОСКОНАЛЕННЯ	36
1.1. Аналіз сучасного стану застосування інформаційних технологій в транспортних системах	36
1.2. Аналіз методів оптимального розташування розподільчих об'єктів транспортно-логістичних систем	44
1.3. Методи оптимізації маршрутів доставки вантажів в транспортних системах.....	50
1.3.1. Класичні методи вирішення задач маршрутизації	50
1.3.2. Інтелектуальні методи вирішення задач маршрутизації транспортних засобів	56
1.4. Методи та моделі опису динаміки транспортних потоків на вулично- дорожній мережі міст	62
1.4.1. Моделювання транспортних потоків на ВДМ великих міст	62
1.4.2. Теорія Кернера трьох фаз в транспортному потоці: вільний потік, синхронізований потік, широкий кластер автомобілів, що рухається	66
Висновки до Розділу 1	68
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ В РАМКАХ СИНЕРГЕТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЛОРЕНЦА	72
2.1. Визначення ефективного транспортного засобу як характеристики транспортного потоку методом аналізу ієрархій Сааті	72
2.2. Методика визначення коефіцієнтів приведення до легкового автомобіля з використанням моделі ефективного транспортного засобу	83
2.3. Синергетична інтерпретація фазових переходів в області щільних транспортних потоків	93

Висновки до Розділу 2	100
РОЗДІЛ 3. ОПТИМІЗАЦІЯ МАРШРУТІВ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДИФІКОВАНОГО МЕТОДУ САМООРГАНІЗАЦІЇ МУРАШИНОЇ КОЛОНІЇ	103
3.1. Модифікація мурашиного алгоритму дискретної оптимізації маршруту у мережі з урахуванням впливу зовнішнього нестационарного середовища	103
3.2. Застосування модифікованого мурашиного алгоритму для оптимізації маршруту в статичній задачі комівояжера на прикладі ВДМ м. Києва	111
3.3. Метод оптимізації маршруту доставки вантажів з урахуванням нестационарної (реальної) динаміки ТП, що базується на модифікованому алгоритмі самоорганізації мурашиної колонії	116
Висновки до розділу 3	127
РОЗДІЛ 4. МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО РОЗТАШУВАННЯ РОЗПОДІЛЬЧИХ ОБ'ЄКТІВ НА ТРАНСПОРТНІЙ МЕРЕЖІ	130
4.1. Метод оптимізації розташування розподільчих об'єктів (складів), що базується на методі планування променевої терапії злоякісних новоутворень	130
4.1.1. Математичний алгоритм методу планування променевої терапії злоякісних новоутворень	130
4.1.2. Математичний опис методу оптимізації розташування розподільчих об'єктів (складів), що базується на методі планування променевої терапії злоякісних новоутворень	131
4.1.3. Вирішення задачі оптимального розташування розподільчих об'єктів (складів) на ВДМ на прикладі м. Києва	133
Висновки до Розділу 4	147
РОЗДІЛ 5. ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ ОПТИМАЛЬНИХ РІШЕНЬ ЩОДО ЛОГІСТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ У ВЕЛИКИХ МІСТАХ	148
5.1. Програмна реалізація моделі інформаційної системи підтримки прийняття рішень при логістичному управлінні доставки вантажів у великих містах	148

5.2. Апробація інформаційної системи підтримки прийняття рішень «Логістичне управління доставки вантажів у великих містах»	164
Висновки до розділу 5	169
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	171
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	175
ДОДАТКИ	196
Свідоцтва про реєстрацію авторського права	197
Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження	201
Список публікацій здобувача за темою дисертаційного дослідження	207
Фрагмент коду реалізованого програмного продукту	213
Результати спостереження за ділянками ВДМ м. Києва	222

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- ВДМ — вулично-дорожня мережа;
ГІС — геоінформаційна система;
ДТП — дорожньо-транспортна пригода;
ІС — інформаційна система;
ІТ — інформаційна технологія;
ІТС — інтелектуальна транспортна система;
ІСППР — інформаційна система підтримки та прийняття рішень;
ПЗ — програмне забезпечення;
ТЗ — транспортний засіб;
ТП — транспортний потік;
ТС — транспортна система;
CVIS — cooperative vehicle-infrastructure system — кооперативна система взаємодії транспортний засіб-інфраструктура;
CTS — connected transportation system – об'єднана транспортна система;
URN — urban road network – вулично-дорожня мережа;
SDM — system of decision-making – система підтримки прийняття рішень;
WLP — warehouse location problem – задача розташування.

ВСТУП

Актуальність теми. Об'єктивне зростання та глобалізація сучасної світової економіки, якісні зміни у вітчизняній економіці, збільшення інтенсивності та обігу потоків товарів, різка зміна масштабів комп'ютеризації систем управління і моніторингу найрізноманітніших економічних та інших процесів об'єктивно вимагає інтелектуальної підтримки управління цими процесами в реальному режимі часу.

Поряд з цим, прискорена автомобілізація в умовах відставання розвитку вулично-дорожніх мереж (ВДМ) великих міст, яка спостерігається у світі, в тому числі і в нашій державі, супроводжується проявом низки негативних наслідків, серед яких можна виділити такі основні, як різке зменшення ефективності транспортної інфраструктури (значна нерівномірність транспортного навантаження, зменшення швидкості руху транспортних потоків (ТП), затори, ДТП тощо), а також підвищення рівня забруднення навколишнього середовища. Це, зокрема, обумовлює виникнення значних затримок у транспортуванні вантажів, що призводить не тільки до часових, але й до суттєвих економічних втрат. Особливо гострим це питання є для підприємств, які доставляють власний товар, наприклад товар дрібних партій, до споживачів без посередників, тобто власним транспортом. У більшості сегментів ринку доставка товару додає до його собівартості суму витрат, яка у деяких випадках наближається до вартості самого товару.

Тому, у більшій мірі ефективність функціонування таких підприємств визначається ефективністю застосування транспортної логістики, що пов'язано з оптимальним розташуванням об'єктів доставки вантажів, управлінням процесами оптимальної маршрутизації з урахуванням динаміки ТП в реальному режимі часу, тощо.

Аналіз показує, що найбільш ефективно вирішення цих проблем в сучасних умовах пов'язують із розробкою, впровадженням та застосуванням інтелектуальних транспортних систем, де велику роль відіграє ефективне використання сучасних інформаційних технологій.

Теоретичні та методологічні основи організації процесів доставки вантажів, розробки інформаційних технологій оптимізації цих процесів представлено у наукових працях Андропова С.А., Алексієва В.О., Волкова В.П., Іванова А.М., Зибіна С.В., Матейчика В.П., Мигаля В.Д., Онищука В.П., Прокудіна Г.С., , Arango M.D., Archetti C., Benjelloun, A., Clarke G., Colorni A., Cordeau J.F., Dantzig G. B., Dimitrakopoulos G., Dorigo M., Dror M., Gendreau M., Glover F., Hertz F., Jarasuniene A. Kerner B., Langevin A., Laporte G., Maniezzo V., Nobert Y., Ramser J.H., Reimann M., Riopel D., Schmid V., Solomon M., Speranza M.G., Taniguchi E., Toth P., Trudeau P. та інших.

Існуючі на сьогоднішній день класичні методи дискретної оптимізації маршрутів транспортних перевезень не є досконалими, у своїй більшості вирішують задачі оптимізації малої розмірності та застосовуються для стаціонарних станів транспортної мережі.

Останнім часом отримали широке застосування для вирішення транспортних задач оптимізації інтелектуальні методи, зокрема, такі як, метод нейронних мереж, метод теорії адаптивного резонансу, методи теорії нечітких множин, алгоритм імітації відпалу, генетичні алгоритми тощо. Вони дозволяють вирішувати складні задачі дискретної оптимізації та суттєво скоротити час пошуку оптимального рішення. Проте необхідною умовою їх ефективного застосування повинна бути наявність великих масивів даних, що обробляються під час проведення оптимізації.

Між тим, у випадку процесів доставки вантажів дрібних партій у великих містах, кількість об'єктів доставки може бути як малою, так і великою.

Поряд з цим, на підставі аналізу відповідних експериментальних даних, отриманих на швидкісних автомагістралях в Німеччині, Англії і США, Б. Кернером запропонована теорія трьох фаз динаміки ТП (вільний потік, синхронізований потік, широко рухомий кластер або затор). Ця теорія дозволяє пояснити і передбачити емпіричні просторово-часові залежності фазових переходів від вільного до щільного (синхронізованого) потоку та між результатуючими структурами автомобільних транспортних потоків в

синхронізованому стані, що часто спостерігаються на ВДМ великих міст. В рамках цієї теорії вважається, що спостережувані ефекти фазових переходів між різними станами, обумовлені проявом синергетичних ефектів (ефектів самоорганізації) внаслідок нерівноважної нестационарної динаміки ТП в області їх високої щільності. Тому одним з перспективних напрямків для опису таких процесів, є синергетичний підхід, який базується на принципах самоорганізації.

У зв'язку з цим, для вирішення проблем оптимізації процесів, що відбуваються в транспортних системах у таких динамічних нестационарних станах, може бути, зокрема, застосований інтелектуальний метод, пов'язаний з мурашиним алгоритмом, який базується на використанні ефектів самоорганізації мурашиних колоній.

Залишається актуальним також розробка методів оптимізації розташування об'єктів доставки вантажів з урахуванням реальної структури ВДМ великих міст.

Отже, актуальність дисертаційного дослідження обумовлена необхідністю розробки, впровадження та застосування відповідних універсальних інтелектуальних методів, а на їх основі інформаційних технологій оптимізації та управління процесом доставки вантажів дрібних партій в умовах нестационарної (реальної) динаміки транспортних потоків на ВДМ, що базуються на синергетичному підході. Використання таких методів та технологій може знайти своє застосування при створенні та впровадженні ефективних інтелектуальних транспортних систем, що дозволить, відповідно, підвищувати ефективність транспортування вантажів в межах великих міст.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами та грантами.

Наведені в дисертації основні результати і рекомендації розроблено на основі виконання в рамках державних бюджетних тем науково-дослідних робіт кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки Національного транспортного університету - «Розробка наукових основ застосування сучасних інформаційних технологій у створенні новітніх технологій навчання» (номер державної реєстрації 0110U006953), «Інформаційне і алгоритмічне забезпечення в процесах управління системами організаційного

типу» (номер державної реєстрації 0117U002069) та «Розробка науково-технічних основ інтелектуальних інтегрованих інформаційних систем управління проектами» (номер державної реєстрації 0118U001106).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка нових та удосконалення існуючих інтелектуальних методів, а також інформаційної технології оптимізації процесів доставки вантажів дрібних партій автомобільним транспортом у великих містах.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі задачі:

- провести аналіз існуючих методів, моделей та інформаційних технологій оптимізації процесів доставки вантажів у містах;
- розвинути теоретичні уявлення про динаміку транспортних потоків в області високої щільності в рамках синергетичного підходу;
- удосконалити існуючий класичний мурашиний алгоритм оптимізації задач маршрутизації інформаційних потоків різної природи, з метою зменшення часу пошуку оптимальних рішень та реалізації можливості урахування впливу зовнішнього нестационарного середовища на швидкість передачі інформації по ланцюгах інформаційної мережі;
- розробити інтелектуальний метод оптимізації маршрутів доставки вантажів з урахуванням нестационарної (реальної) динаміки транспортних потоків на ВДМ міста на основі модифікованого мурашиного алгоритму;
- розробити інтелектуальний метод оптимального розташування розподільчих об'єктів доставки вантажів на ВДМ на базі інтелектуального методу планування променевої терапії злоякісних новоутворень та модифікованого мурашиного алгоритму;
- в рамках запропонованої інформаційної системи підтримки прийняття рішень (ІСППР) при логістичному управлінні доставки вантажів у великих містах розробити інтелектуальну інформаційну технологію динамічної маршрутизації вантажних перевезень, яка враховує нестационарну динаміку ТП в області великої щільності, що формуються на ділянках ВДМ;

- надати рекомендації щодо подальшого впровадження розроблених алгоритмів і програмних засобів забезпечення ефективної інформаційної підтримки управління процесами оптимізації доставки вантажів у транспортно-логістичних системах міст.

Об'єктом дослідження є процеси обробки інформації для прийняття рішень при доставці вантажів автомобільним транспортом в умовах впливу нестаціонарного середовища на ділянках ВДМ міст.

Предметом дослідження є методи, моделі та інформаційні технології оптимізації процесів доставки вантажів дрібних партій автомобільним транспортом у великих містах в умовах нестаціонарної динаміки транспортних потоків на ВДМ.

Гіпотеза роботи. Інтелектуальні методи опису нестаціонарних процесів в системах різної фізичної природи, які базуються на принципах синергетики (самоорганізації), дозволяють коректно описувати нестаціонарні процеси динаміки транспортних потоків високої щільності на ВДМ міст.

Методи дослідження. При вирішенні задач дисертаційного дослідження використовувались такі підходи та методи: синергетичний підхід опису нелінійних нерівноважних дисипативних систем для синергетичної інтерпретації нестаціонарної динаміки ТП в області фазових переходів; методи штучного інтелекту, теорії графів та програмної інженерії при створенні інтелектуальних методів оптимізації процесів доставки вантажів; базових положень теорії управління та експертних методів теорії прийняття рішень при створенні інформаційної технології динамічної маршрутизації вантажних перевезень на ВДМ міст; метод аналізу ієрархій Сааті - для визначення ефективного транспортного засобу, як характеристики транспортного потоку; методи натурних спостережень – для одержання якісних статистичних даних щодо існуючої структури транспортних потоків на ВДМ міста Києва, інтенсивності руху автотранспортних потоків тощо; чисельні методи імітаційного моделювання для дослідження процесів доставки вантажів в межах великих міст; методи системного аналізу для дослідження структури розподільчих систем; методи

теорії ймовірностей та математичної статистики для аналітичного опису процесів, що відбуваються у різних фазах транспортних потоків; методи організації автомобільних перевезень для опису моделей маршрутів доставки вантажів.

Оцінка достовірності та ефективності запропонованих методів у більшості випадків здійснювалась за допомогою кількісних імітаційних експериментів на відомих прикладах, а також порівнювалась з результатами, отриманими іншими авторами.

Наукова новизна одержаних результатів дисертаційної роботи полягає в наступному:

- *вперше* розроблено інтелектуальні методи оптимізації процесів доставки вантажів дрібних партій на ВДМ великих міст, які на відміну від існуючих, дозволяють враховувати нестационарну (реальну) динаміку транспортних потоків високої щільності в реальному режимі часу при проведенні оптимізації маршрутів доставки, а також визначати оптимальне розташування розподільчих об'єктів доставки вантажів на таких ВДМ;

- *вперше* в рамках запропонованої моделі ІСППР при логістичному управлінні доставки вантажів у великих містах розроблено інтелектуальну інформаційну технологію динамічної маршрутизації вантажних перевезень, яка на відміну від існуючих, враховує нестационарну динаміку транспортних потоків в області великої щільності, що формуються на ділянках ВДМ;

- *удосконалено* метод дискретної оптимізації маршрутів інформаційних потоків різної природи, що базується на модифікованому методі мурашиного алгоритму, який, на відміну від існуючих, дозволяє враховувати вплив зовнішнього нестационарного середовища на швидкість передачі інформації по ланцюгах інформаційної мережі;

- *дістали подальшого розвитку:*

- концепція ефективного автомобіля, як характеристики ТП, що враховує техніко-експлуатаційні властивості ТЗ, які формують ТП у певні проміжки часу на певних ділянках ВДМ міста;

- синергетична інтерпретація нестационарної динаміки ТП в області фазових переходів, яка на відміну від існуючих мікромоделей опису поведінки ТП, враховує техніко-експлуатаційні властивості ТЗ, що формують ТП у певні проміжки часу на певних ділянках ВДМ міста, а також дозволяє знаходити функціональні залежності зміни швидкості потоку руху від характерного часу зміни режиму динаміки транспортного потоку та щільності навантаження на ділянках мережі.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що на основі запропонованих інтелектуальних методів та узагальнення існуючих результатів, закладається сучасний науково-практичний базис інтелектуалізації транспортно-логістичних систем доставки вантажів у великих містах шляхом реалізації розробленої інтелектуальної інформаційної технології динамічної маршрутизації вантажних перевезень в реальному режимі часу з урахуванням нестационарної (реальної) динаміки транспортних потоків на ділянках ВДМ.

Розвинута в дисертаційному дослідженні концепція ефективного автомобіля дозволяє коректно описувати склад та характеристики транспортного потоку, що формується на певних ділянках ВДМ міст, і може бути корисною, зокрема, при описі транспортних процесів в рамках широкого класу мікроскопічних моделей.

Запропоновані в роботі методи та інформаційна технологія оптимізації процесів доставки вантажів мають універсальний характер і можуть знайти своє застосування при створенні ефективних інтелектуальних транспортних систем міст для вирішенні задач оперативного (в онлайн режимі) управління процесом перевезень на ВДМ міст, а також на підприємствах-перевізників та в органах державної влади (Державне агентство автомобільних доріг України, Департаменти транспортної інфраструктури міських та обласних державних адміністрацій України) при вирішенні задач транспортної логістики для систем різної розмірності (місто, регіон, перевезення при міжнародному сполученні).

Результати досліджень знайшли своє впровадження у практичну діяльність перевізників у формі пропозицій та методичних рекомендацій, а саме: ТОВ «Фрозен Фрут», ТОВ «Ландгут Бройлер», СТОВ «ППР Зугреський». Розроблені

теоретичні та науково-методичні положення дисертаційного дослідження використані при розробці освітніх програм з дисциплін «Основи функціонування інтелектуальних транспортних систем», «Інтелектуальний аналіз даних» при підготовці бакалаврів та магістрів на кафедрі інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки та кафедрі інформаційних систем і технологій Національного транспортного університету.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є самостійно виконаним дослідженням, що має теоретичне та практичне значення для оптимізації процесів доставки вантажів у великих містах. Наукові результати, отримані в дисертації, ґрунтуються на дослідженнях автора і відображають його внесок у розвиток процесів вантажних перевезень у межах міста. У роботах, які опубліковані у співавторстві, особистий внесок автора полягає у наступному: [1, 4, 6, 7, 8] – розроблено модифікацію методу мурашиної колонії для визначення оптимальних маршрутів з урахуванням реального стану динаміки транспортних потоків на ВДМ та проведено відповідні імітаційні моделювання на прикладі ВДМ м. Києва та м. Кіто (столиця Еквадору); [2, 3] – розроблено алгоритм методу оптимального розташування об'єктів доставки вантажів на ВДМ міст, що базується на методі планування променевої терапії злоякісних новоутворень та проведено відповідні імітаційні моделювання на прикладі ВДМ м. Києва; [5, 9] – розвинуто уявлення про ефективний автомобіль, що характеризує транспортні засоби, які входять до складу транспортного потоку, та проведено розрахунки його характеристик, з використанням методу аналізу ієрархій Сааті; [10] – якісна інтерпретація динаміки транспортних потоків в області високої щільності в рамках синергетичної моделі Лоренца.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи представлено на таких конференціях: LXV, LXVII-LXIX, LXXII-LXXIV щорічних наукових конференціях професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету (м. Київ, 2009р., 2011-2013рр., 2016-2019 рр.); XII-XIII, XV-XVI міжнародних науково-технічних

конференціях «Системний аналіз та інформаційні технології» (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, 2010-2011pp., 2013-2014 pp.); XVI Міжнародній науково-практичній конференції (Європейський університет, м. Київ, 2010p.); 13 Міжнародній науково-практичній конференції «Ринок послуг комплексних транспортних систем та прикладні проблеми логістики» (м. Київ, 2011p.); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні напрямки теоретичних і прикладних досліджень» (м. Одеса, 2013p.); IX International conference: Transport Problems (Політехнічний Сілезький Університет, м. Катовіце, Польща, 2017p.), 10 International Scientific Conference: TRANSBALTICA 2017: Transportation Science and Technology (Вільнюський технічний університет Гедиміна, м. Вільнюс, Литва, 2017p.); Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективні напрями розвитку регіональних транспортних та логістичних систем» (Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, 2018p.); 2nd International Conference on Intelligent Traffic and Transportation (м. Стокгольм, Швеція, 2018p.), 11 International Scientific Conference: TRANSBALTICA 2019: Transportation Science and Technology (Вільнюський технічний університет Гедиміна, м. Вільнюс, Литва, 2019p.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 6 статей у фахових виданнях України, 4 статті у виданнях іноземних держав, що включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science, а також 15 тез доповідей наукових конференцій, отримано 3 свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір.

Обсяг і структура дисертації. Дисертація складається із вступу, 5-ти розділів, висновків, списку літературних джерел і додатків. Повний обсяг роботи складає 225 сторінок, з них 146 сторінок основного тексту, 21 сторінка списку літературних джерел і 29 сторінок додатків. Робота містить 25 рисунків і 23 таблиці. Список літературних джерел складається з 195 найменувань.

РОЗДІЛ 1. НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ ТА ШЛЯХИ ЇХ УДОСКОНАЛЕННЯ

1.1. Аналіз сучасного стану застосування інформаційних технологій в транспортних системах

Об'єктивне зростання та глобалізація світової економіки, якісні зміни у вітчизняній економіці, збільшення інтенсивності та обігу потоків товарів, різка зміна масштабів комп'ютеризації систем управління і моніторингу найрізноманітніших економічних та інших процесів об'єктивно вимагає інтелектуальної підтримки управління цими процесами в реальному режимі часу.

Крім того, бурхлива автомобілізація та різке збільшення використання всіх видів транспорту, яке спостерігається останні роки у світі, в тому числі і в нашій країні, повсюдно супроводжується проявом низки негативних наслідків, серед яких можна виділити такі основні:

1. Різке зменшення ефективності транспортної інфраструктури, що обумовлене значними затримками транспортування вантажів і людей на всіх видах транспорту, а саме: значна нерівномірність транспортного навантаження; затори; ДТП, пов'язані з порушенням встановленого швидкісного режиму, інші інциденти, тощо. Це призводить до значних економічних втрат, загибелі людей.

2. Слабка інформованість учасників руху про умови руху на дорожній мережі агломерацій та можливості зміни маршруту руху транспортних засобів (ТЗ).

3. Забруднення навколишнього середовища (викиди вуглекислого газу, зараження середовища важкими металами і т.д.).

Аналіз показує [1], що вирішення цих проблем за рахунок розробки і впровадження об'єктів інфраструктури, не завжди або часто економічно не вигідно. Світовим транспортним співтовариством запропоновано вихід із

зазначеної ситуації в сучасних умовах, який полягає у розробці, впровадженні, застосуванні та розвитку інтелектуальних транспортних систем (ІТС).

У відповідності до [2] ІТС – це системи управління, що інтегрують сучасні транспортні, інформаційні та інформаційно-комунікаційні технології, елементи транспортної інфраструктури, використовуються при здійсненні вантажних і пасажирських перевезень, а також управлінні дорожнім рухом, і призначені для автоматизованого (та/або автоматичного) пошуку та прийняття до реалізації максимально ефективних сценаріїв управління транспортними системами, транспортними процесами, конкретним транспортним засобом або групою транспортних засобів з метою забезпечення заданої мобільності населення, максимізації показників використання транспортної мережі, підвищення безпеки та ефективності транспортного процесу, комфортності для водіїв і користувачів транспорту.

Слід зазначити велику роль ІТС для управління логістичними процесами, в тому числі з використанням декількох видів транспорту [2]. Реалізація таких логістичних концепцій, як «точно в строк», QR («швидкого реагування» на транспортний попит) та ін., вимагає максимального зниження впливу ролі людського фактору, що передбачає впровадження сучасних інформаційних технологій та транспортно-телематичних систем, включаючи системи з елементами штучного інтелекту [2]. Коли завантаження транспортних комунікацій досить велика, рішення задачі оптимізації та безпеки транспортного процесу має на увазі моніторинг ТП, ТС, вантажів, пасажирів, а також формування на цій базі інтелектуальних систем контролю і управління транспортно-логістичними процесами. ІТС набувають актуальності особливо в умовах розвитку уніфікованого способу транспортування вантажів - розвитку контейнерних перевезень [2].

З точки зору конкурентоспроможності, компанії та міста виконують логістичні операції менш ефективно завдяки перевезенням, що передбачає більші витрати та нижчий рівень обслуговування, що призводить до згаданої втрати конкурентоспроможності [2].

В контексті аналізу сучасного стану застосування інформаційних технологій в транспортних системах, слід зазначити, що в даний час існують певні стратегії, що спрямовані на пом'якшення негативного впливу вантажного транспорту в містах [3,4]. Логістика міст базується на зменшенні кількості вантажних ТЗ, що переміщуються по містах та вирішується за допомогою належної стратегії інтеграції, яка в свою чергу, дозволяє оптимізувати транспортні потоки та зменшити кількість їздок [4-7].

Taniguchi [8] визначають міську логістику як процес, який спрямований на оптимізацію транспортної діяльності, використовуючи сучасні інформаційні технології у міських районах, беручи до уваги набір ініціатив, що дозволяють пом'якшити негативні наслідки від транспортних засобів, що використовуються для перевезення вантажів [8-10].

За даними Crainic [6] та Arango [4], міські логістичні стратегії повинні бути пов'язані з інформаційними системами, які дозволяють ефективно здійснювати управлінський процес, спрямований на збір, обробку, передачу та управління цією інформацією. Це призвело до розробки спеціальних комп'ютерних інструментів управління транспортом, таких як інтелектуальні транспортні системи (ІТС) та до інтеграції адміністративних інструментів для управління операціями та прийняття рішень [4, 5].

За даними Pillas [5], протягом останнього десятиліття відбувся значний розвиток «розумних» інформаційних технологій для управління маршрутом транспортних засобів, які базуються на технологічній перевазі більш точних геоінформаційних систем (ГІС), комп'ютерах нового покоління з розширеними можливостями обробки.

У [11] Jarasuniene зазначає, що інтеграція ІТС дозволяє обмінюватися та координувати інформацію між ТЗ та дорожньою інфраструктурою, обмінюватися інформацією з приватним сектором (постачальниками логістичних послуг).

З точки зору розвитку ІТС для управління логістичними процесами, докладаються великі зусилля з підвищення їх ефективності, засновані на розробці

апаратних, програмних засобів для оптимізації маршрутів та транспортних потоків [11].

Авторами Perego та ін. [12] класифікують інформаційні технології для логістики та вантажних перевезень, використовуючи чотири напрями:

- програмне забезпечення (ПЗ) для управління перевезеннями;
- ПЗ для виконання ланцюга поставок;
- ПЗ для інтеграції між віддаленими елементами та бізнес-процесами;
- ПЗ для управління автопарками та вантажними перевезеннями.

Програмне забезпечення для управління перевезення [13,14] дозволяє планувати, оптимізувати та виконувати транспортну діяльність. Як правило, вони включають модулі пропозиції вантажів, маршрутів, планування маршруту, відстеження руху, оплати вантажу та системи аудиту. Програмне забезпечення для виконання ланцюга поставок [15] керує обміном інформацією та виконанням графіку розподілу поставок в реальному часі. Програмне забезпечення для інтеграції між віддаленими елементами та бізнес-процесами реалізовано у формі мобільних технологій та забезпечує інтеграцію між віддаленими елементами та бізнес-процесами [16]. Програмне забезпечення для управління автопарками та вантажними перевезеннями використовується для звітності про транспортні засоби та інформацію про вантажні перевезення, а також для отримання інформації в режимі реального часу для більш динамічного та ефективного управління операціями розподілу [12].

Авторами у [17] запропоновано наступну класифікацію інформаційних технологій, що застосовуються в ІТС для перевезень на автомобільних дорогах:

- системи управління дорожнім рухом;
- системи управління громадським транспортом;
- електронні платіжні системи;
- системи експлуатації приватних транспортних засобів;
- системи управління надзвичайними ситуаціями;
- удосконалені системи для транспортних засобів;

За Jarasuniene у [11], ці системи інтегровані через інформаційний ланцюг, що включає збір, передачу, обробку, розподіл та використання інформації користувачами (для управління та прийняття рішень). Ці користувачі можуть бути регулюючими органами (як керівники маршрутів) або можуть бути водіями, що перевозять пасажирів або вантажі.

Ключовим елементом управління транспортом за допомогою ІТС в сучасних умовах є отримання первинної інформації про ТЗ, яке, згідно Jarasuniene [11], можна отримати трьома основними способами:

- Індуктивні детектори - це пристрої, встановлені на дорожньому покритті, які дозволяють проводити фіксацію транспортних засобів. Ці детектори можуть визначати кількість транспортних засобів, їх швидкість та рух на ВДМ.
- Ультразвукові, інфрачервоні та радіолокаційні детектори - це датчики розміщені на вежах. Вони можуть виявляти транспортні засоби за допомогою хвиль та визначати кількість транспортних засобів та їх швидкість. Перевагою цієї системи перед індуктивними детекторами є проста установка та обслуговування, але за несприятливих погодних умов їх продуктивність є менш ефективною, ніж інші.
- Детектори відеовізуалізації – детектори, які можуть розпізнавати присутність транспортного засобу та його швидкість, завантаженість колії, рух транспорту, виявлення номерного знака державної реєстрації тощо за допомогою обробки зображень на основі оптичного розпізнавання символів [18].

На додаток до цих елементів, важливо створювати центри управління для моніторингу та прийняття рішень щодо поліпшення дорожнього руху в місті. Отже, необхідно мати систему підтримки та прийняття рішень як доповнення до пристроїв виявлення транспортного засобу. Іншим важливим елементом при отриманні інформації про дорожній рух є підтримка належного зв'язку з установами, пов'язаними з транспортною системою, такими як транспортні підприємства, служби контролю дорожнього руху, система технічного обслуговування доріг, компанії таксі, система інформування про погодні умови та навіть навігаційні програми, що використовуються в мобільних телефонах [11].

Щоб зрозуміти поведінку системи дорожнього руху, важливо визначити, як вона працює. Для цього існують інструменти моделювання, які стали дуже практичними та простими у використанні. Вони можуть наслідувати поведінку характеристик системи дорожнього руху та приймати рішення на її основі [19].

Крім того, існує кілька додатків, які обробляють інформацію, спрямовану на створення звітів про систему трафіків для менеджерів та користувачів [19]. На думку Jarasuniene [11], для отримання цієї інформації необхідно «зливати» інформацію як із державних, так і з приватних джерел. Ця інформація може передаватися між всіма учасниками за допомогою динамічних сигналів, приладам, що знаходяться в транспортному засобі, або портативним пристроям.

Інші системи та інформаційні технології для моделювання та прогнозування транспортного руху, запропоновані іншими авторами можна розділити на групи [11, 20]:

Автоматичне виявлення аварій - ці системи зменшують час виявлення аварій та час реакції на них. Вони також дозволяють визначити ймовірність того, що аварія могла статися або може статися, відстежуючи схему руху. Ці системи призначені не для заміни центрів моніторингу, а для сприяння їх управлінню [11].

Зважування в русі - ці системи призначені для визначення ваги транспортних засобів, що рухаються. Вони можуть допомогти контролювати догляд за дорогами, оскільки транспортний засіб із надмірною вагою є фактором їх передчасного погіршення. Ці системи працюють завдяки розташуванню тензодатчиків, п'єзоелектричних систем або гнучких смуг [20].

Розширені системи управління дорожнім рухом - ці системи відповідають за отримання інформації в режимі реального часу про стан дорожнього руху, аналіз даних, прогнозування часу подорожі, управління аварійними ситуаціями та надання цієї інформації користувачам через інформаційні системи управління міським рухом або іншими засобами, такими як передові інформаційні системи для мандрівників. Вони відповідають за надання інформації про дорожній рух, яку користувачі можуть використовувати для поліпшення вибору режиму

транспорту, маршрутів та прийняття рішень загалом. Ці системи дозволяють зменшити відстань, споживання палива та забруднення [20].

Електронна оплата та автоматизована ідентифікація транспортних засобів - ці системи дозволяють дізнатись реальний попит та поточну кількість вантажівок, що циркулюють у реальному часі, що дозволяє контролювати транспортний потік у межах міста [20].

Розширені системи управління парком транспортних засобів - ці системи дозволяють планувати позиціонування та використання вантажу, в результаті чого система оптимізується та контролюється в режимі реального часу. За словами Benjelloun та ін. [3] "Розширені системи управління парком транспортних засобів можуть суттєво сприяти ефективності та остаточному успіху логістичних систем міст".

Зв'язок між транспортними засобами та інфраструктурою є ключовим елементом інтелектуальних транспортних систем, оскільки вони дозволяють двосторонній зв'язок, який використовується міськими менеджерами для отримання інформації для управління транспортом та передачі її користувачам. Зв'язок транспортного засобу з транспортним засобом - V2V та зв'язок між інфраструктурою та транспортним засобом - I2V [18] включені до цих систем зв'язку.

За даними Barrero та ін. [18], існує велика кількість пристроїв, які дозволяють спілкуватися через Інтернет у будь-якому місці та в будь-який час. Таким чином, транспортний засіб, обладнаний власною IP-адресою та підключенням до Інтернету, можна підключити до центру управління (I2V) та / або до інших транспортних засобів (V2V). Інші способи з'єднання здійснюються через Bluetooth [18] та за допомогою телефонних ліній, розташованих серед транспортних засобів. Зв'язок між транспортними засобами може зменшити ймовірність зіткнення та покращити рух через обмін інформацією про затори та аварії.

Це спілкування породило розвиток кооперативних систем між транспортними засобами та інфраструктурою CVIS (Cooperative Vehicle-

Infrastructure Systems), які дозволяють взаємодіяти між сусідніми транспортними засобами та інфраструктурою, розташованою на дорогах, пропонуючи краще управління дорожнім рухом та транспортом. Системи CVIS базуються на багатоканальному терміналі, здатному підключати широкий спектр пристроїв через WLAN / Wi-Fi, стільникові мережі (GPRS / UMTS) короткочастотного мікрохвильового та інфрачервоного та супутникового зв'язку [21].

Цей зв'язок призводить до нової концепції під назвою Connected Transportation System (CTS), що є спробою з'єднати транспортні засоби за допомогою певних комунікаційних технологій, що дозволяє поліпшити безпеку та управління надзвичайними ситуаціями, а також управління транспортом та вплив на навколишнє середовище. На думку Dimitrakopoulos [22], найбільш здійсненою комунікаційною технологією є інфраструктура на основі інформаційної системи (IC).

Розвиток цих систем дозволяє передавати відповідну інформацію для користувачів, таких як:

- Маршрутизація
- Управління дорожнім рухом та уникнення заторів
- Координація дорожнього сигналу
- Моніторинг вантажівок
- Управління паркомісцем
- Інформація про безпеку та попередження
- Інформація про погоду

Отже представлений аналіз вказує на велику роль використання сучасних інформаційних технологій та технологічних інструментів у вирішенні низки задач для здійснення вантажних і пасажирських перевезень, а також управлінні дорожнім рухом на ВДМ міст.

Між тим, використання інформаційних технологій в організації, оптимізації та управлінні логістичними процесами у великих містах в умовах великої завантаженості ВДМ є епізодичним і недосконалим.

Потребують подальшого розвитку інформаційні технології вирішення задач з динамічної маршрутизації перевезень в реальному режимі часу в умовах реальної динаміки транспортних потоків на ВДМ міст, які є надзвичайно актуальними для підвищення ефективності функціонування ІТС.

Залишаються актуальними створення та застосування сучасних інтелектуальних транспортних технологій в кооперативних транспортних системах типу CVIS, V2V, CTS тощо, що базуються на використанні сучасних інтелектуальних методів та інформаційних технологіях.

1.2. Аналіз методів оптимального розташування розподільчих об'єктів транспортно-логістичних систем

Питанням знаходження оптимального розміщення об'єктів транспортної інфраструктури приділена значна частина наукових робіт. Розташування об'єкта, корпорації або будь-якої організації є важливим та фактично стратегічним рішенням, на яке впливають кількісні та якісні фактори. Фактичне розташування об'єкта впливає на загальні витрати та доходи підприємства. Зрозуміло, що після вибору місця розташування об'єкта, такі види витрат як сировина, транспорт, витрати на робочу силу не будуть змінюватись протягом тривалого часу.

У сьогоденнішньому бізнес-середовищі розташування складських приміщень і розподільних об'єктів може дати фірмі істотну конкурентну перевагу. Фактично, стратегічне позиціонування дистриб'юторських центрів сприяє розробці фізичних систем розподілу, які можуть забезпечити високий рівень обслуговування клієнтів при відносно низьких загальних витратах.

Важливим завданням в межах логістичних систем є обґрунтування територіального розміщення складського об'єкта.

За традиційною класифікацією [23], існує три принципові стратегії розташування складських об'єктів: поблизу від ринків збуту, поблизу від виробництва, проміжне розташування. Розміщення складських об'єктів поблизу ринків збуту полегшує поповнення запасів клієнтів. Географічні розміри ринку,

який обслуговується таким складом, залежить від бажаної швидкості постачань, середнього розміру замовлення й величини питомих витрат на місцеве транспортування. Головними критеріями роботи таких складів є забезпечення належної якості обслуговування або мінімізація логістичних витрат.

Розташування складів поблизу ринків збуту полегшує поповнення запасів клієнтів [23]. Однак, розміщення поблизу ринків збуту характерне для багатьох галузей. Така стратегія економічно виправдана, оскільки це найдешевший спосіб швидкого поповнення запасів. Розташування складських об'єктів поблизу виробництв полегшує нагромадження потрібного для постачання споживачів асортименту продукції. Таке розміщення складів дозволяє відправляти споживачам змішані вантажі за консолідованими тарифами. Перевага такого розміщення складів полягає в тому, що підвищений рівень сервісу поширюється на весь асортимент продукції, яка постачається. Цей виробник має можливість стати кращим за інших постачальником.

У випадку проміжного розташування між виробництвом і споживанням складські об'єкти працюють за тією ж схемою, що і склади, розташовані поблизу виробництв. Вони накопичують повний асортимент продукції й відправляють замовникам змішані партії товарів за пільговими тарифами. Кількість, потужності, розташування та функції розподільчих центрів залежать від розмірів матеріальних потоків, стратегії й фінансового стану підприємства, яке проектує мережу розподільчих центрів. При цьому важливим є урахування наступних факторів: вартість транспортування, складської переробки вантажів, складування вантажів, оформлення замовлень і системи управління, рівень обслуговування клієнтів.

Одним із основних завдань під час проектування розподільчих систем є вибір варіанту розміщення складських об'єктів [23]. Задача розміщення складських центрів може бути сформульована як пошук оптимального рішення з мінімальними витратами [23]. Вибір ділянки для розміщення складського приміщення відбувається за наступними критеріями:

- розмір та конфігурація ділянки в залежності від необхідного для обслуговування парку рухомого складу;
- транспортна доступність місцевості. При виборі ділянки необхідно оцінити наявність автомобільних або інших шляхів;
- оцінка наявних на ділянці приміщень та необхідність додаткових фінансових інвестицій.

Групу задач розміщення (Facility location problem, FLP) можна класифікувати згідно типів задач [24], які вони вирішують. Згідно [24] класифікація основних задач розміщення може бути розділена на наступні типи:

- Задачі розміщення одного об'єкта (Single Facility Location Problem, SFLP) [25, 26];
- Задачі розміщення декількох об'єктів (Multi facility Location Problem, MFLP) [27-29];
- Квадратична задача про призначення (Quadratic Assignment Problem, QAP) [30-32];
- Задача покриття (Covering Problem) [33,34];
- Задачі знаходження середнього розміщення (Median Location Problem, MLP) [35-37];
- Задачі ієрархічного розташування об'єктів (Hierarchical Location Problem, HLP) [38-41];
- Задачі конкурентного місцерозташування (Competitive Location Problem, CLP) [42];
- Задачі розташування складських приміщень (Warehouse Location Problem, WLP) [43-48];
- Задачі з розташування «неприємних» об'єктів (Obnoxious Facility Location, OFL) [49,50];
- Задачі з розміщення динамічних об'єктів (Dynamic Facility Location Problem, DFLP) [51,52];
- Багатокритеріальні задачі розташування (Multi-Criteria Location Problem, MCPL) [53-56];

- Задачі розташування об'єктів в ланцюгу постачання (Facility Location in Supply Chain, FLSC) [57-60].

Згідно [61], задачі знаходження оптимального розміщення об'єктів, що називають задачами розміщення, розділяються на наступні два типи:

- задачі розміщення без обмеження на місткість джерела обслуговування (uncapacitated facility location problem, UFLP);
- задачі розміщення з обмеженням на місткість джерела обслуговування (capacitated facility location problem, CFLP).

В свою чергу, задачі розміщення з обмеженням на місткість джерела обслуговування розділяються на наступні підтипи [61]:

- задачі CFLP з одним джерелом обслуговування (single-source capacitated facility location problem, SSCFLP);
- задачі CFLP з декількома джерелами обслуговування (multi-source capacitated facility location problem, MSCFLP).

Огляд основних методів оптимального розміщення об'єктів запропоновано в [62-67]. Тут представлена класифікація методів оптимального розташування об'єктів на мережі, які найбільш використовуються. Наведено короткий опис, взаємозв'язок між методами, переваги та недоліки, а також вказані межі застосування. Перевагами даних методів є їх спрямованість на певну групу задач, що дозволяє в свою чергу отримати результати високої точності. Серед недоліків запропонованих методів є те, що жоден з них не є універсальним та не відповідає всім вимогам та запитам ринку. Крім того, в цих методах при розрахунках необхідно враховувати велику кількість факторів.

В роботі [68] запропоновано метод оптимального розташування базового контейнерного терміналу, заснований на методі дихотомії. Даний метод пропонується використовувати і для оптимального розташування складу. У роботі [69] пропонується вирішувати задачі оптимального розміщення за допомогою «хвильового» методу, заснованого на аналогії між знаходженням глобального екстремуму інтегрального функціоналу і розповсюдженням світла в оптичному неоднорідному середовищі.

В [70] вирішується задача оптимального планування променевої терапії злоякісних новоутворень, в якій необхідно розподілити задану кількість джерел опромінення всередині ушкодженої області так, щоб сукупний ефект дії джерел був якомога одноріднішим. В [71] з використанням елементів теорії неперервних задач оптимального розбиття множин, згідно [72], запропоновано модифікацію моделі [70].

Відомо, що задачі оптимального розміщення об'єктів та ресурсів мають характерні особливості, які необхідно врахувати при формалізації таких задач та при розробці алгоритмів їх розв'язання. В [73-74] наведено огляд основних моделей, методів та алгоритмів для вирішення задач оптимального розміщення будь-яких об'єктів. Наведена їх класифікація, переваги та недоліки. У роботі [75] представлено глобальний аналіз існуючих на даний момент алгоритмів вирішення задач оптимального розміщення об'єктів на мережі, запропоновано їх класифікацію та алгоритми розв'язання. В [75] авторами також запропоновано модель оптимального розташування об'єктів, місце розташування яких може змінюватись при зміні заданих умов. Модель дозволяє змінювати розташування об'єктів в майбутньому, відмовившись від раніше визначених та знаходячи нові оптимальні розташування без збільшення заданих затрат.

В роботах [76-77] розглядаються способи та методи вирішення задачі оптимального розміщення підприємств для надання профілактичних послуг з охорони здоров'я, так звані громадські центри здоров'я. Так, в [76] запропоновано нову методологію знаходження оптимального розташування центра надання профілактичних послуг з охорони здоров'я населенню, що вирішується за допомогою алгоритму Interchange. Серед факторів, які враховуються при розрахунках виділяють: відстань між пацієнтами та центром з надання послуг, кількістю пацієнтів та звернень за медичною допомогою, їх захворюваннями та ін.

В [77] запропоновано модель оптимізації, яка розроблена для визначення найкращого розташування та кількості центрів з надання медичних послуг населенню, набором послуг з охорони здоров'я, які будуть надаватись, а також

пропускної здатності цих підприємств. Так при визначенні розташування таких об'єктів, автори мінімізують постійні та змінні витрати на обслуговування та утримання таких центрів. Запропонована в [77] модель оптимізації розміщення таких центрів дозволяє зменшити витрати та збільшити якість обслуговування в середньому на 20%.

Для вирішення задач вибору оптимального місця розташування складських об'єктів, наукою та практикою вироблені певні підходи [78-80], які наведено на рис. 1.1, серед яких виділяють метод повного перебору, евристичний метод, метод визначення центру ваги та метод пробної точки.

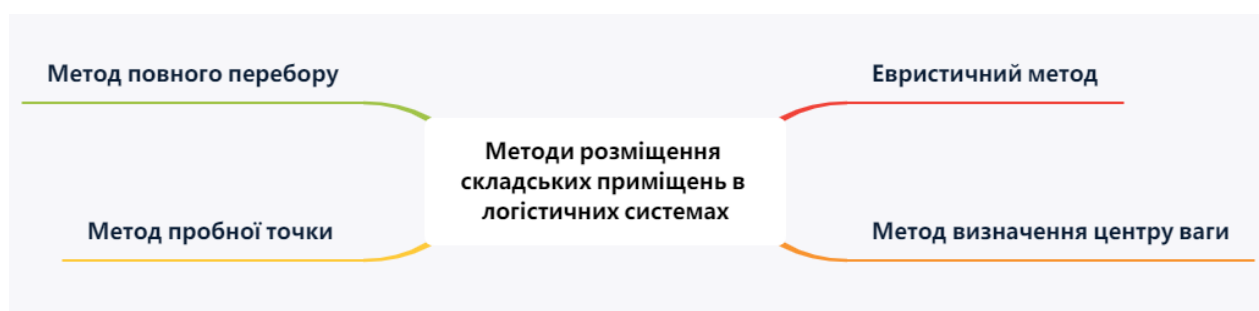


Рисунок 1.1 – Методи розміщення складських приміщень в логістичних системах

У методі повного перебору [80] оптимальне місце розміщення знаходиться шляхом перебору й оцінювання всіх можливих варіантів і виконується на ЕОМ методами математичного програмування. На практиці в умовах розгалужених транспортних мереж метод може виявитися непридатним, тому що число можливих варіантів зі збільшенням масштабів мережі, а з ними і трудомісткість вирішення, зростають за експонентою. У зв'язку з цим, застосування вказаного методу для вирішення реальних задач розміщення складських приміщень не вважається можливим.

В основі евристичного методу [81] знаходиться людський досвід та інтуїція. Вони засновані на правилі Паретто, тобто на попередній відмові від великої кількості очевидно неприйнятних варіантів. Таким чином, проблема скорочується до керованих розмірів із погляду кількості альтернатив, які необхідно оцінити. Для цих варіантів ЕОМ виконує розрахунки. Очевидно, що застосування даного

методу можливе лише при наявності висококваліфікованих та досвідчених спеціалістів з логістики.

Метод визначення центру ваги [81] використовується для визначення місця розташування одного складського об'єкта. Для цього використовується метод накладення мережі координат на карту потенційних місць розташування. Система мережі дає можливість оцінити вартість доставки від постачальника до ймовірного складу і від складу до кінцевого споживача. Обирають варіант, який визначається як центр маси.

Метод пробної точки [81] дозволяє визначити оптимальне місце розташування складського об'єкта у випадку прямокутної конфігурації мережі автомобільних доріг на ділянці, яка обслуговується. Суть методу полягає в послідовній перевірці кожного відрізка ділянки, яка обслуговується. Пробною точкою відрізка називається будь-яка точка, розташована на цьому відрізку й не належить до його кінців.

1.3. Методи оптимізації маршрутів доставки вантажів в транспортних системах

1.3.1. Класичні методи вирішення задач маршрутизації

У сучасних умовах переходу людства до інформаційного суспільства характерною особливістю є надзвичайно швидкі трансформаційні зміни поколінь технологій, споживчих стандартів, ринків виробництва та збуту товарів. Тому в сучасних умовах підприємства, які займають те або інше місце на економічному ринку праці, уявляють собою динамічні, не стаціонарні системи.

На даний час ефективність функціонування більшості підприємств визначається рівнем застосування логістики. Логістика займає значне місце при перебудові механізмів господарювання в сучасних ринкових умовах.

Останні дослідження [82] свідчать про стійке зростання ринку транспортно-логістичних послуг у всіх країнах. Особливо відмічається зростання частки вантажних перевезень автомобільним транспортом та скорочення перевезень

залізничним та водним транспортом. Крім того міжнародні консалтингові компанії, що надають послуги з оптимізації транспортно-логістичних процесів, свідчать про те, що використання спеціалізованого програмного забезпечення допомагає зменшити транспортні витрати на 15% [82].

Відомо [82,83], що у більшості сегментів ринку доставка товару додає до його вартості суму, яка прирівнюється до вартості самого товару. Слід також відмітити, що найбільш затратними з економічної точки зору являються перевезення вантажів у транспортній мережі міст.

Проте до теперішнього часу існуючі методи розв'язання задач оптимізації транспортних перевезень, що відбуваються у логістичних системах, не є досконалими і не дають однозначних рішень [83,84]. Зокрема, автоматизація задачі комівояжера на сьогоднішній день вирішена не повністю, у зв'язку з тим, що методи, які застосовуються для її розв'язку в загальному випадку не ефективні.

В останні роки дослідження проблем маршрутизації транспортних засобів [82] суттєво прискорились. Фактично для багатьох модифікацій вказаної проблеми відбувся значний інтелектуальний розвиток. В сучасній літературі представлена велика кількість документів та робіт, які демонструють нові моделі, методи вирішення та використання нових алгоритмів оптимізації, які, в свою чергу, є більш ефективними та дозволяють отримати хороші результати за порівняно короткий час обчислень.

Авторами у [85,86] показано, що задача маршрутизації транспортних засобів - це складна проблема комбінаторної оптимізації типу NP. Це означає, що рішення не може бути знайдено в поліноміальний час.

Для знаходження оптимального методу вирішення задачі маршрутизації транспортних засобів авторами Verblegia та ін. у [87] запропоновано загальну класифікаційну схему таких задач з їх характеристиками, що складається з трьох груп.

Перша група «багато до багатьох», де будь-яка вершина може бути як відправником так і отримувачем [87]. Структура задач вказаної групи схожа на

проблему маршрутизації транспортного засобу при одночасному завантаженні та доставці вантажу (VRPSPD).

До другої групи належать задачі «один до багатьох». Прикладом застосування вказаного випадку є доставка повних пляшок та збір порожніх у відповідних галузях [87]. Структура вказаної групи задач є еквівалентом змішаної проблеми маршрутизації транспортного засобу (MVRP).

Третя група складається з задач маршрутизації «один до одного», де кожен продукт вважається запитом, який надходить від постачальника та має визначене призначення [87]. Ця задача подібна до задачі комівояжера зі змішаним типом доставки.

Інший підхід до класифікації задач маршрутизації транспортних засобів запропоновано авторами Verbeglia та інші у [87]. Статичні задачі маршрутизації транспортних засобів характеризуються тим, що всі вхідні дані задачі відомі ще до початку процесу побудови чи проектування маршрутів. Інша група задач маршрутизації називають динамічними, оскільки деякі вхідні дані відомі або оновлюються протягом періоду, в якому операції виконують доставку та перевезення вантажів. Більшість рішень задач маршрутизації доставки товарів вантажним транспортом зосереджено на вирішенні статичних задач, у яких вхідні дані для побудови оптимального маршруту відомі до початку його виконання. На противагу, вирішенню динамічних задач маршрутизації доставки вантажів авторами приділено мало уваги.

У [88-91] представлена класифікація задачі маршрутизації транспортних засобів з урахуванням формулювання математичних моделей та застосованих методів рішення. Всі методи рішення задач маршрутизації можна розділити на наступні 4 групи [88-91]:

- точні методи (Exact methods);
- евристичні методи (Heuristics methods);
- метаевристичні методи (Metaheuristics methods);
- гібридні (Hybrid methods).

Kris Braeckers та інші у [92] було проведено аналіз наукових публікацій за період з 2009 по 2015 роки з метою визначення найбільш популярних методів вирішення задач маршрутизації. Результати дослідження наведено у таблиці 1.

Таблиця 1.1 - Огляд застосовуваних методів вирішення задачі маршрутизації [92]

Метод	К-сть моделей	Середнє значення	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Метаевристичний	233	71.25%	65%	63%	65%	77%	80%	76%	65%
Точний	56	17.13%	17%	20%	26%	10%	13%	17%	19%
Евристичний	32	9.79%	11%	15%	15%	17%	4%	5%	10%
Методи рішення в режимі реального часу	11	3.36%	6%	-	6%	4%	5%	2%	-
Моделювання	7	2.14%	4%	4%	6%	-	2%	-	-

До точних методів вирішення задач маршрутизації відносять [93-102]:

- Метод повного перебору (Brute Force)[93,94];
- Жадібний алгоритм (Greedy)[95];
- Метод гілок та меж з усіма можливими модифікаціями [96-98];
- Метод динамічного програмування [99-101];
- Метод заснований на класичній теорії програмування та теорії графів [102].

Метод повного перебору (метод грубої сили) [93,94] здійснює пошук рішень шляхом перебору всіх можливих варіантів у кількості $N!$ вершин. Основною перевагою даного методу є те, що це єдиний метод, який дозволяє отримати точне рішення задачі. Крім того, він передбачає можливість розпаралелювання процесу пошуку рішень. Головним недоліком цього методу є великі часові затрати. У зв'язку з цим, якщо число N є достатньо великим, застосування даного методу є неефективним.

Всі інші відомі методи лише скорочують повний перебір пошуку оптимальних рішень, та як результат, не завжди дають точні значення. За допомогою цих методів можна отримати лише наближені рішення задачі, при цьому неможливо гарантувати малу похибку проведених розрахунків.

При використанні жадібного алгоритму (Greedy) пошук оптимального маршруту починається з випадкової вершини [95]. Після цього на кожній ітерації здійснюється перехід в ту точку, що знаходиться найближче до поточної. Пошук в такому випадку достатньо швидкий, проте похибка може бути значною.

Принцип роботи методу гілок та меж полягає в додаванні перевірки критерію обмежуючої функції, згідно з яким на певній ітерації можна зупинити побудову гілок дерева перестановок [96-98]. Даний метод є модифікацією методу повного перебору та зберігає всі його переваги. Проте при досить великих значення N його використання є неефективним.

Особливістю методу динамічного програмування є те, що для знаходження оптимального рішення завдання розбивається на етапи (кроки) і оптимальна рішення відшукується поступово крок за кроком [99-101].

Метод заснований на класичній теорії програмування та теорії графів запропонований авторами у [102] використовується для виконання завдань у лікарнях, максимально скорочуючи час обслуговування та очікування та витрат на пацієнтів.

В загальному до переваг запропонованих методів вирішення задач маршрутизації можна віднести високу точність отриманих результатів для порівняно невеликої розмірності задачі. Суттєвим недоліком запропонованих методів є неможливість їх застосування до задач великої розмірності, оскільки в такому випадку запропоновані методи або не знаходять взагалі оптимального рішення, або витрачають на це неприйнятно велику кількість часу.

Евристичні методи вирішення задачі маршрутизації пропонують процедури, які зазвичай показують хорошу якість через дослідження простору пошуку. Евристика пов'язана з винаходом або створенням, і вона використовується для опису методів, які замість використання класичного підходу до оптимізації

здійснюють поетапний процес побудови, оцінюючи та підбираючи різні варіанти з або без допомоги користувача для виконання локальних пошуків під керівництвом правил та/або логічних або емпіричних можливостей. Дані методи вирішення задач маршрутизації застосовуються для розв'язку таких задач: задача комівояжера (Traveling Salesman Problem TSP) [103]; динамічної маршрутизації (dynamic routing) [104]; розподілених маршрутів (split routes) [105]; пошуку найкоротшого шляху (search shortest path) [106]; з часовими вікнами та часом очікування (time windows and waiting time) [107-109]; пошук найближчого сусіда (Nearest neighbor search) [110,111]; гібридної евристики (hybrid heuristics) [112] та інші.

Метаевристичні методи вирішення задач маршрутизації визначаються як методи або наближені ітераційні процедури загального призначення, розроблені для управління евристичними методами в досягненні можливих рішень, де проблеми, що виникають - є складними. Зазвичай застосовується для вирішення складних NP задач, пов'язаних з комбінаторною оптимізацією.

На основі проведеного аналізу літературних джерел [113-147], метаевристичні методи вирішення задач маршрутизації можна розділити на наступні групи:

- табу пошук (Tabu search) [113-117] та його різновиди: реактивний табу пошук (Reactive tabu search) [118]; локальний табу пошук (Local search and tabu search) [119,120];
- імітація відпалу (Simulated annealing) [121,122] та покращена імітація відпалу (Improved simulated annealing) [123,124];
- гібрид метаевристик (Hybrid metaheuristics) [125-127];
- метаевристичні методи маршрутизації (Metaheuristics for routing) [128];
- метод мурашиної колонії (Ant colony) [129-131];
- локальний пошук (Local search) [132] та ітераційний локальний пошук (Iterative local search) [133];
- генетичний алгоритм (Genetic algorithm) [134-136] та гібридний генетичний алгоритм (Hybrid genetic algorithm) [137,138];

- ройова оптимізація (Swarm optimization) [139-141];
- алгоритм коефіцієнта (Coevolution algorithm) [142,143];
- еволюційний алгоритм (Evolutionary algorithm) [144,145] та диференціальний еволюційний алгоритм (Differential evolutionary algorithm) [146];
- еволюційний пошук заснований на адаптивній пам'яті (Evolutionary procedure based on adaptive memory) [147].

Гібридні методи вирішення задач маршрутизації, як правило, поєднують метаевристику та точні методи для отримання кращих рішень проблеми. Серед тих, що зустрічаються в сучасній літературі можна виділити наступні [148-150]:

- гібридний алгоритм з процедурою пакування (Hybrid algorithm and a packing procedure) [148];
- генетичний алгоритм та табу пошук (Genetic algorithm and tabu search) [113-117,134-136];
- алгоритм мурашиної колонії, що базується на евристичному алгоритмі (Ant colony system based on heuristic algorithm) [149];
- локальний пошук з точними алгоритмами та евристикою (Local search and exact algorithms and heuristic) [150];
- найдешевша процедура вставки та табу пошук (Cheapest insertion procedure and tabu search) [113-117] та інші.

Як видно з наведеного аналізу літературних джерел, при гібридному методі вирішення задач маршрутизації можливі поєднання декількох різних методів, наприклад, евристичних та метаевристичних, точних та евристичних, точних та метаевристичних.

1.3.2. Інтелектуальні методи вирішення задач маршрутизації транспортних засобів

Як було вказано у підрозділі 1.2.1. більшість методів, що відносяться до групи метаевристичних, являються інтелектуальними методами вирішення задач маршрутизації. Сучасні публікації вказують на те, що останнім часом інтенсивно

розвивається науковий напрям з розробки інтелектуальних методів аналізу процесів різної фізичної природи, в тому числі транспортних процесів, що отримав назву «Природні обчислення» (Natural Computing) [134]. Цей напрям об'єднує математичні методи, в яких закладені принципи дії природних механізмів прийняття рішень. Формування таких механізмів різними видами флори та фауни здійснювалось протягом декількох мільйонів років, що врешті решт забезпечує ефективну адаптацію цих видів до впливу різних чинників навколишнього середовища.

Серед так званих “Soft computing techniques”, що відносяться до інтелектуальних методів і розроблені за останні десять років задля вирішення складних задач дискретної оптимізації, можна виділити:

- генетичні алгоритми, що засновані на природному відборі та генетики [134-136];
- методи нейронних мереж [151-152];
- методи теорії адаптивного резонансу [153];
- методи теорії нечітких множин [154];
- алгоритм імітації відпалу [121,122]
- мурашині алгоритми, що засновані на моделюванні поведінки мурашника [129-131] та інші.

Метод імітації відпалу [121,122], який відноситься до категорії природних обчислень (Natural Computing), заснований на процесі кристалізації металів. Мета застосування даного методу – привести метал у стан з найменшою енергією. Метал в процесі нагрівається до певної температури, після цього відбувається процес поступового контрольованого охолодження. Метод визначає три функції: функція енергії, яку необхідно оптимізувати, спадну функцію температури та функцію, що визначає новий стан. При використанні методу імітації відпаду для вирішення задачі комівояжера, функцією стану є всі можливі маршрути, функцією енергії є найкоротший маршрут. Функцією температури тут є механізм вибору двох довільних міст та інверсії шляхів між ними.

Алгоритм імітації відпалу має імовірнісну природу, тому може знайти некоректний результат при знаходженні локального мінімуму. Перевагою даного методу є ефективність розрахунків, що суттєво перевищує можливості методу повного перебору [121,122]. Крім того, перевагою даного методу є можливість його модифікації, що дає можливість досягнення більшого ефекту при розрахунках.

Метод генетичного алгоритму [134-136] полягає у пошуку оптимального рішення шляхом комбінування та варіації параметрів, що імітують біологічну еволюцію. Відмінною рисою алгоритму є використання 10 операторів схрещування та мутації, що виконують рекомбінацію рішень-кандидатів, які аналогічні ролі процесу схрещування в живій природі. Даний метод є одним із найбільш ефективних алгоритмів, які часто використовуються для вирішення практичних задач.

Мурашиний алгоритм (Ant Colony Optimization (ACO) - алгоритм оптимізації мурашиної колонії) [129-131] — один з ефективних поліноміальних алгоритмів для знаходження наближених рішень задачі комівояжера, а також аналогічних завдань пошуку маршрутів на графах. Підхід запропонований бельгійським дослідником Марко Доріго (англ. Marco Dorigo). Дослідження у цій сфері розпочались ще у 90-х роках XX ст. [129].

Сутність методу полягає в аналізі та використанні моделі поведінки мурах, що шукають шлях від мурашника до джерела їжі [129]. Мурахи відносяться до соціальних комах. У біології колектив мурах називають колонією, яка може налічувати до кількох мільйонів мурах.

Основою поведінки мурашиної колонії є самоорганізація, що забезпечує досягнення спільної цілі усієї колонії за рахунок низькорівневої взаємодії. Колонія немає централізованого управління [129]. Її особливостями є обмін локальною інформацією лише між окремими особинами (прямий обмін – їжа, візуальні та хімічні контакти) і наявність непрямого обміну, котрий використовується у мурашиних алгоритмах.

Непрямий обмін – це рознесена у часі взаємодія, при якій одна особина змінює деяку область навколишнього середовища, а інші використовують дану інформацію пізніше, в момент, коли вони у неї потрапляють. Біологи пояснюють дану взаємодію за рахунок спеціальної хімічної речовини – феромону. Феромони (грец. *φέρω* — «нести» + *ορμόνη* — «спонукати, викликати») — біологічно активні речовини, продукти зовнішньої секреції, які виділяють тварини. Феромони — біологічні маркери певного біологічного виду [129].

Головним засобом, що використовується мурахами для забезпечення комунікації, успішного повернення до колонії, переміщення по важкодоступних місцевостях – є слід феромону. Мурахи наносять певну кількість феромону, і кожна мураха визначить шлях з більш інтенсивним вмістом феромону. Саме ця елементарна поведінка мурах пояснює, як їм вдається відшукати найоптимальніший маршрут, який містить найінтенсивніший слід [129].

Отже, в основі мурашиного алгоритму лежить поведінка мурашиної колонії — маркування вдалих ділянок дороги великою кількістю феромону.

Реалізацію мурашиного алгоритму у природі можна зобразити наступним чином:

1. Мурахи рухаються у напрямку від мурашиної колонії (мурашника) до джерела їжі.



Рисунок 1.2 - Рух мурах у природі

2. На їх шляху виникає перешкода.

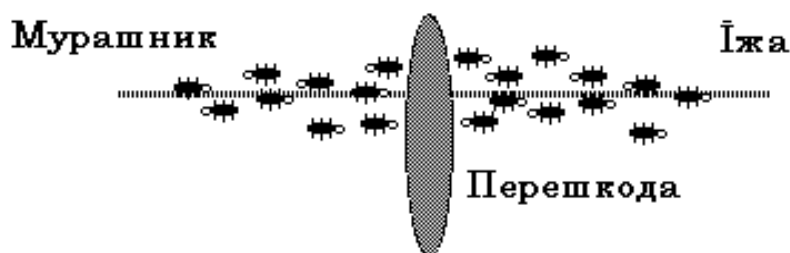


Рисунок 1.3 - Початкова конфігурація

3. При інших рівних умовах мурахи обирають свій шлях. Так, як нижній шлях довший верхнього, мурахи затратять більше часу на його подолання (мурахи, що обрали верхній шлях подолають його у два рази швидше за мурах на нижньому шляху).

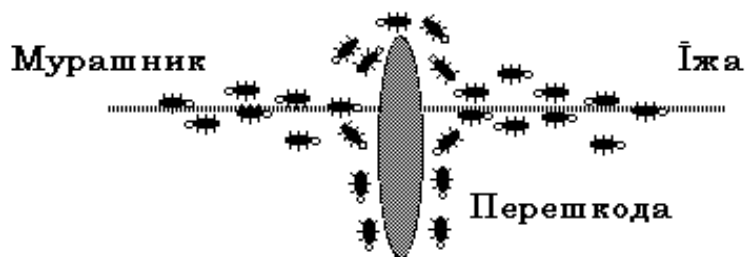


Рисунок 1.4 - Пройшов один період часу

4. Коли мурахи дійдуть до їжі, вони будуть проходити зворотній шлях тією ж самою дорогою. Оскільки верхній шлях коротший – мурахи, що обрали його проходилимуть його швидше, а отже, кількість «турів» буде більша, що свідчить про більшу концентрацію залишеного феромону на шляху. Спираючись на природні інстинкти, мурахи оберуть верхній шлях, це і є оптимізацією руху шляхом непрямого зв'язку.

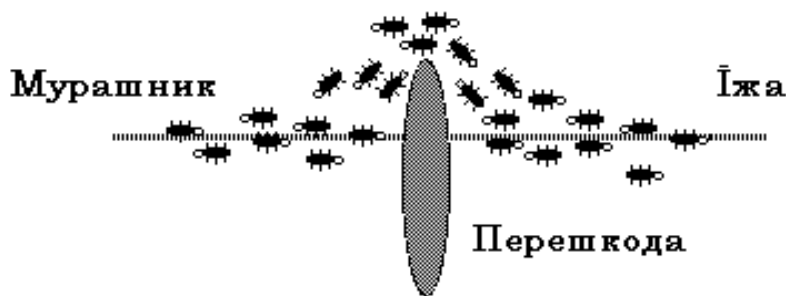


Рисунок 1.4 - Пройшло два періоди часу

Згідно [129] основні локальні правила поведінки мурах при виборі маршруту описуються наступним чином:

1. Мурахи мають власну «пам'ять». Оскільки кожне місто може бути відвідане лише один раз, то у кожної мурахи є список вже відвіданих міст – список заборон. Позначимо через $J_{i,k}$ список міст, які необхідно відвідати мурасі k , що знаходиться у місті i .

2. Мурахи мають «зір» - видимість є евристичним бажанням відвідати місто j , якщо мураха знаходиться у місті i . Вважатимемо, що видимість зворотно пропорційна відстані між містами $\eta_{ij} = 1/D_{ij}$.

3. Мурахи наділені здатністю розпізнавати запахи. Вони можуть відчувати слід феромону, що підтверджує бажання відвідати місто j з міста i на основі досвіду інших мурах. Кількість феромону на ребрі (i, j) в момент часу t позначимо через $\tau_{ij}(t)$.

4. На основі цього можна сформулювати ймовірісно-пропорційне правило, що визначає ймовірність переходу k -ої мурахи з міста i у місто j :

$$\begin{cases} P_{ij,k}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in J_{i,k}} [\tau_{il}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{il}]^\beta}, j \in J_{i,k}; \\ P_{ij,k}(t) = 0, j \notin J_{i,k}; \end{cases} \quad (1.1)$$

де α, β - параметри, що задають ваги сліду феромону; при $\alpha = 0$ алгоритм вироджується до жадібного алгоритму (буде обране найближче місто). Ці параметри визначаються експериментальним шляхом. В наших розрахунках використовувались значення $\alpha = 1, \beta = 5$, які були визначені у [155].

Відмітимо, що вибір міста є ймовірним, правило (1.1) лише визначає ширину зони міста j ; в загальну зону всіх міст $J_{i,k}$ вкидається випадкове число, що i визначає вибір мурахи. Правило (1.1) не змінюється під час виконання алгоритму, проте у двох різних мурах значення ймовірності переходу будуть відрізнятися, тому що вони мають різний список дозволених міст.

5. Пройшовши ребро (i, j) , мураха відкладає на ньому деяку кількість феромону, яка повинно бути пов'язана з оптимальністю зробленого вибору.

Нехай $T_k(t)$ - шлях, що пройдений мурахою k до моменту часу t , $L_k(t)$ - довжина цього шляху, а Q – параметр, що має значення порядку довжини оптимального шляху. У цьому випадку кількість відкладеного феромону може бути задано у вигляді

$$\Delta \tau_{ij,k}(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k(t)}, (i, j) \in T_k(t); \\ 0, (i, j) \notin T_k(t); \end{cases} \quad (1.2)$$

Правила навколишнього середовища визначають, в першу чергу, випаровування феромону. Нехай $p \in [0,1]$, є коефіцієнтом випаровування, тоді правило випаровування матиме вигляд

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-p) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t); \Delta \tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij,k}(t), \quad (1.3)$$

де m – кількість мурах в колонії.

На початку алгоритму кількість феромону на ребрах приймається рівною невеликій додатній кількості. Загальна кількість мурах залишається постійною і рівною кількості міст, кожна мураха починає маршрут зі свого міста [129].

1.4. Методи та моделі опису динаміки транспортних потоків на вулично-дорожній мережі міст

1.4.1. Моделювання транспортних потоків на ВДМ великих міст

Перевантаження вулично-дорожньої мережі міст автомобільним транспортом є проблемою, з якою стикаються у всьому світі. Це негативно впливає на якість життя людей через затримки, аварії та забруднення навколишнього середовища.

Сучасна ВДМ великого міста – це складна розгалужена комбінована структура, яка складається з елементів (вулиць і доріг) різних типів систем планування міста (радіальної, радіально-кільцевої, прямокутної та ін. [156]).

Транспортний потік, що рухається по вулично-дорожній мережі, складається з великої кількості транспортних засобів, що мають різні початкові та кінцеві пункти руху [157].

Відомо [156,157], що у кожному транспортному потоці відбувається взаємодія між транспортними засобами:

- встановлюються інтервали між автомобілями, величина яких залежить від швидкості руху, індивідуальних особливостей водія та дорожніх умов;
- виконуються обгони транспортних засобів, які їдуть з меншою швидкістю, транспортними засобами, що рухаються з більшою швидкістю;
- виконується гальмування транспортних засобів та їх зупинка при виникненні заторів на дорозі.

Все це створює перешкоди руху, знижує пропускну здатність, збільшує час, який необхідний для здійснення запланованого рейсу, збільшує витрати пального та інше [157].

Одним із способів усунення таких проблем є збільшення пропускну здатності існуючих доріг шляхом додавання смуг руху. Проте це не завжди є можливим через брак вільного місця, високу щільність міської забудови, екологічні проблеми тощо. У зв'язку з цим єдиним варіантом вирішення питання перевантаження ВДМ є застосовування кращих стратегій управління дорожнім рухом. Для ефективного управління та контролю дорожнього руху необхідне належне розуміння заторів. Відомо, що затори спостерігаються у просторі та часі у вигляді просторово-часових перевантажених елементів руху, що поширюються в межах проїжджих частин. Емпіричні спостереження вказують на те, що затори в дорожній мережі є наслідком розриву в вільному потоці руху [158]. Збій дорожнього руху - це різке зниження швидкості від високих значень вільного потоку до нижчих значень при перевантаженому русі, і зазвичай це відбувається на вузьких місцях на ділянках, таких як виїзд на автомагістраль та з'їзд з дороги, звуження смуги руху, аварії тощо.

Знаючи причини виникнення заторів на ВДМ, важливо адекватно описати математичну модель динаміки зміни стану транспортного потоку. Це вимагає розуміння теорій та моделей потоків руху, метою яких є точний математичний опис взаємодії між різними транспортними засобами та взаємодії між транспортними засобами та інфраструктурою. Однією з таких теорій є трифазна теорія транспортного потоку, оскільки вона була розроблена для пояснення розбиття потоку та наслідків просторово-часових особливостей перевантаженого

транспортного потоку [159]. Автор вказаної теорії Кернер проілюстрував у [159], що попередні теорії транспортного потоку не можуть пояснити справжню причину перевантажень та багато наслідків просторово-часових перевантажених моделей руху. Цей збій пояснюється тим, що ці теорії та моделі транспортного потоку базуються на фундаментальній діаграмі потоку руху, яка стверджує, що існує відповідність між заданим значенням щільності руху та швидкістю потоку для всіх значень щільності в межах $[0, \rho_{\max}]$, де $\rho_{\max}$ - максимальна щільність. Огляд основних математичних моделей, засновані на фундаментальній діаграмі руху транспорту, представлено в [159]. Ці моделі можна класифікувати як мікроскопічні, макроскопічні та мезоскопічні моделі руху транспорту. Мікроскопічні моделі передбачають відстеження кожного транспортного засобу для опису його поведінки та взаємодії з іншими транспортними засобами в потоці руху. Макроскопічні моделі описують динаміку потоку руху в сукупності, використовуючи такі характеристики, як щільність, інтенсивність та швидкість потоку. Мезоскопічна модель (кінетична модель) описує транспортний потік менш сукупно, ніж макроскопічні моделі, і в імовірнісних термінах. Мікроскопічні моделі транспортного потоку, засновані на трифазній теорії руху представлено в [156-160].

Історичний огляд розвитку моделей транспортних потоків показує, що вивчення цього напрямку розпочалося в 1930-х роках. Попередні огляди зосереджуються на сучасному стані та оглядають моделі на їх поточну цінність (Papageorgiou, 1998; Brackstone & McDonald, 1999; Zhang, 2001; Hoogendoorn & Bovy, 2001b; Helbing, 2001; Kerner, 2009; Treiber & Kesting, 2010; Treiber et al., 2010; Orosz et al., 2010; Wilson & Ward, 2011; Bellomo & Dogbe, 2011). Пропонуємо зробити ще один крок назад і дати історичний огляд основних моментів моделювання потоку руху. Цей підхід краще показує, як розробилися моделі потоку руху та як різні типи моделей пов'язані між собою. Крім того, це формує основу нашого наступного кроку в моделюванні потоку руху, використовуючи мультикласовий підхід. Щоб продемонструвати історичний

розвиток моделей транспортних потоків, авторами у [158] введено дерево моделей.

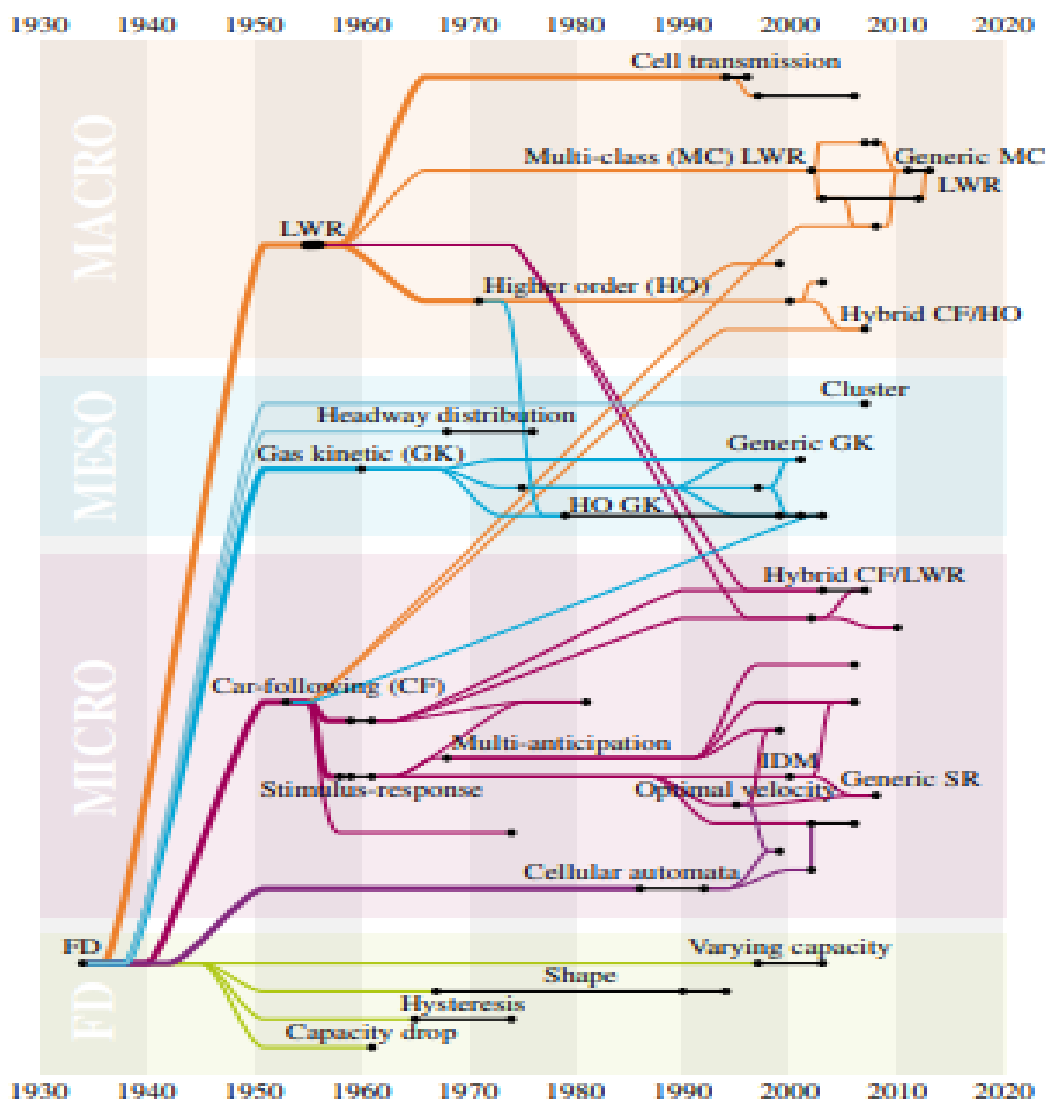


Рисунок 1.5 – Дерево історичного розвитку моделей транспортних потоків [158]

В даний час однією з головних проблем, з якою стикаються великі мегаполіси, є затори на дорогах. Для вирішення цієї проблеми належний контроль дорожнього руху може принести багато переваг, включаючи зменшення викидів забруднюючих речовин та скорочення часу поїздки. Якби можна було охарактеризувати стан дорожнього руху, передбачивши майбутні умови руху для оптимізації маршруту руху автоматизованих транспортних засобів, і якби ці заходи можна було вжити для попереджувального пом'якшення наслідків заторів

та пов'язаних з цим проблем, загальний транспортний потік можна було б покращити.

У зв'язку з швидким розвитком мегаполісів у всьому світі широко застосовуються інтелектуальні транспортні системи (ІТС) для вирішення або полегшення проблем, пов'язаних з дорожнім рухом. В більшості ІТС система управління міським рухом збирає дані про стан транспортного потоку на вулично-дорожній мережі всього наземного транспорту, включаючи швидкість транспортного потоку, кількість транспортних засобів, щільність завантаження ВДМ, за допомогою різних засобів, таких як GPS, ультразвукові, інфрачервоні та радіолокаційні детектори. Як один з основних елементів ІТС та ключової технології для вдосконалення управління дорожнім рухом та інформаційних послуг для подорожей, прогнозування потоку руху використовує ці дані для отримання точних та своєчасних короткострокових станів руху, таких як потік руху, час у дорозі та щільність транспортних засобів.

1.4.2. Теорія Кернера трьох фаз в транспортному потоці: вільний потік, синхронізований потік, широкий кластер автомобілів, що рухається

Більшість математичних моделей не можуть коректно описати ні фізику переходу від вільного до щільного потоку, ні основних властивостей його структур, що виникають в результаті [161,162]. Відомо, що зрозуміти фізичну сутність транспортних процесів такого роду можна лише виходячи з аналізу емпіричних даних. З розвитком інформаційних технологій це стає дедалі реальнішим – починаючи з середини 90-х років в США, Німеччині виникають альтернативні теорії транспортного потоку [163], серед яких особливої уваги заслуговує "теорія трьох фаз", розроблена німецьким вченим Борисом Кернером, що здатна пояснити властивості і трансформації просторово-часових структур в щільних транспортних потоках. Слід підкреслити, що враховуючи подальше завдання дослідження, авторів цікавить перш за все питання утворення та існування заторів в транспортному потоці.

Відповідно Б. Кернеру [164] існують три фази транспортного потоку (фазою називають певний стан транспортного потоку, що розглядається у часі і просторі):

- 1) вільний потік (*free flow* – фаза *F*);
- 2) синхронізований потік (*synchronized flow* – фаза *S*);
- 3) широкий рухомий кластер (*wide moving jams* – фаза *J*) – локальний рухомий затор.

Теорія трьох фаз Кернера описує динаміку транспортного потоку на підставі аналізу великого масиву експериментальних даних. В рамках цієї теорії визначається природа виникнення різних фаз динаміки транспортного потоку, причини переходу з однієї фази в іншу і т.д.

Фундаментальні емпіричні властивості переходу до щільного транспортного потоку наступні [163]:

1. Перехід до щільного транспортного потоку (traffic breakdown) є $F \Rightarrow S$ переходом (*F* відповідає стану “free flow”, тобто вільному транспортному потоку, *S* означає фазу синхронізованого потоку, тобто “synchronized flow”).
2. Ймовірність спонтанного $F \Rightarrow S$ переходу є зростаючою функцією величини потоку автомобілів.
3. Може бути як спонтанний так і індукційний $F \Rightarrow S$ перехід біля одного і того ж самого вузького місця на дорозі (bottleneck).

Фундаментальні емпіричні властивості фазових переходів в транспортному потоці наступні [163]:

- згідно з пунктами 1-3, що вказані вище, перехід від вільного до щільного транспортного потоку (traffic breakdown) є $F \Rightarrow S$ фазовим переходом I роду;
- широкі кластери автомобілів, що рухаються (wide moving jams (*J*)) виникають спонтанно тільки в синхронізованому транспортному потоці, тобто в результаті послідовності $F \Rightarrow S \Rightarrow J$ фазових переходів;
- $S \Rightarrow J$ фазовий перехід відбувається пізніше та часто зовсім в іншому місці, ніж $F \Rightarrow S$ фазовий перехід.

Теорія трьох фаз, заснована Кернером, фокусується головним чином на фізиці щільного транспортного потоку на швидкісних автомагістралях. Кернер описує три фази транспортного потоку, в той час як класичні теорії, що базуються на фундаментальній діаграмі транспортного потоку, розглядають дві фази: вільний потік та щільний потік (congested traffic). Згідно теорії Кернера в щільному потоці виділяється дві фази, відповідно існує три фази транспортного потоку:

- вільний потік – фаза F;
- синхронізований потік – фаза S;
- широкий кластер, що рухається (локальний затор, що рухається (wide moving jam)) – фаза J.

Теорія Кернера надає принципову можливість оцінювати стійкість транспортного потоку на базі співвідношень макрохарактеристик ТП (q, ρ, v), підпорядкованих вимірюванням та дозволяє прогнозувати можливість утворення рухомих черг (кластерів) в усіх трьох фазах стану транспортного потоку. Основні положення теорії Кернера, уявляються більш зручними з точки зору ідентифікації стану щільних потоків порівняно, наприклад, з висновками [162].

Висновки до Розділу 1

Підсумовуючи, можна зробити такі висновки.

1. За результатами проведеного аналізу показано, що вирішення проблем різкого зменшення ефективності транспортної інфраструктури та забруднення навколишнього середовища на ВДМ міст, що обумовлене процесами бурхливої автомобілізації та різкого збільшення використання всіх видів транспорту, які спостерігаються в останні роки у світі і в нашій країні, може бути пов'язане із застосуванням ІТС, де велику роль відіграє ефективне використання сучасних інформаційних технологій.

Між тим, використання інформаційних технологій в організації, оптимізації та управлінні логістичними процесами здійснення вантажних і пасажирських

перевезень, а також управлінні дорожнім рухом у містах в умовах великої завантаженості ВДМ є епізодичним і недосконалим.

Також потребують подальшого розвитку інформаційні технології вирішення задач з динамічної маршрутизації перевезень в реальному режимі часу в умовах реальної динаміки транспортних потоків на ВДМ міст, які є надзвичайно актуальними для підвищення ефективності функціонування ІТС.

Залишаються актуальними створення та застосування сучасних інтелектуальних транспортних технологій в кооперативних транспортних системах типу CVIS, V2V, CTS тощо, що базуються на використанні сучасних інтелектуальних методів та інформаційних технологій.

2. Проведений аналіз існуючих методів оптимального розташування розподільчих об'єктів транспортно-логістичних систем свідчить про великий інтерес науковців до вирішення цієї проблеми. Виявлено, що використання більшості з цих методів спрямоване на розв'язок певного класу задач, що дозволяє в свою чергу отримати результати високої точності. Проте жоден з них не є універсальним, не відповідає всім вимогам та запитам ринку та достатньо часто потребує використання великих обсягів обчислень.

3. У розділі 1.3 наведено критичний аналіз існуючих методів оптимізації маршрутів доставки вантажів у транспортних системах. Показано, що традиційні методи маршрутизації ТЗ дозволяють вирішувати задачі з високою точністю досліджень для невеликої розмірності в рамках використання обмежених ресурсів комп'ютерних обчислень.

В останні роки, більш перспективними для вирішення задач маршрутизації різної фізичної природи можна вважати застосування інтелектуальних методів Natural Computing, в яких закладені принципи дії природних механізмів прийняття рішень, наприклад, для еволюційного програмування. Порівняльний аналіз цих методів вказує на ряд обмежень при використанні більшості цих алгоритмів. Так, застосування, наприклад, генетичного алгоритму, методу нейронних мереж, призводить до отримання більш коректних результатів у випадку розв'язку задач маршрутизації високої розмірності. Це не завжди є

застосовним для вирішення транспортних проблем міста. Так, наприклад, задача доставки дрібно серійного вантажу в межах мегаполіса часто містить 10-50 пунктів призначення. Відповідно, як показує аналіз, класичний мурашиний алгоритм є більш універсальним, що дозволяє розв'язувати задачі маршрутизації на ВДМ міст необхідної розмірності.

Поряд з цим, слід зазначити, що існуючі на сьогоднішній день методи та моделі оптимізації маршруту транспортних перевезень та відповідні програмно-технічні комплекси в основному вирішують задачі маршрутизації для стаціонарних станів транспортної мережі, коли швидкості на ділянках таких мереж не змінюються.

Однак, відомо, що ВДМ великих міст в великій мірі характеризуються нестаціонарними станами, високою динамічним навантаженням на її ділянках, значними (різкими) змінами швидкостей транспортних потоків, появою заторів і т.д. Таким чином, є актуальним розробка інтелектуальних методів побудови оптимального маршруту доставки вантажів з урахуванням реальної динаміки транспортних потоків на ВДМ великих міст.

4. Адекватний опис реальної динаміки транспортних потоків на ВДМ міст залежить від коректного вибору методів та моделей, що описують таку динаміку при різних умовах завантаженості ділянок ВДМ. Аналіз показав, що найбільш прийнятним для проведення імітаційного моделювання динаміки транспортних потоків є теорія трьох фаз Б. Кернера (вільний потік, синхронізований потік, широкий кластер автомобілів, що рухаються).

Ця теорія, на відміну від усіх попередніх теорій, дозволяє коректно пояснити і передбачити емпіричні просторово-часові залежності фазових переходів від вільного потоку до щільного (синхронізованому) потоку і між результируючими структурами в щільному транспортному потоці. В рамках цієї теорії вважається, що спостережувані ефекти фазових переходів, гістерезис змін швидкості при цих переходах та інші нелінійні ефекти обумовлені проявом синергетичних ефектів внаслідок нерівноважної нестаціонарної динаміки транспортних потоків.

Між тим, питання коректного синергетичного опису динаміки транспортного потоку для щільних його станів, визначення теоретичної залежності швидкості транспортного потоку від щільності завантаження ВДМ у великій мірі залишаються відкритими. Вирішення цих питань дозволить розробляти інформаційні технології динамічної маршрутизації доставки вантажів з урахуванням нестаціонарної динаміки транспортних потоків, що базуються на відповідних розроблених інтелектуальних методах дискретної оптимізації.

Результати досліджень даного розділу викладено у публікаціях [155].

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ В РАМКАХ СИНЕРГЕТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЛОРЕНЦА

2.1. Визначення ефективного транспортного засобу як характеристики транспортного потоку методом аналізу ієрархій Сааті

Математичному моделюванню динаміки автотранспортних потоків на ВДМ великих міст та магістралях присвячено велику кількість праць (див. підрозділ 1.3). Як показує аналіз, на сьогоднішній день тут в основному існує три підходи. Перший з них – макроскопічний, який базується на макромоделях, що орієнтовані на описі загальної поведінки системи (частіше за все це аналоги гідродинамічної) та вимагають знання макроскопічних вхідних даних. Макромоделі мають суттєві недоліки, оскільки вони не враховують характеристики окремих транспортних засобів, а також не є придатними при описі просторово-часових характеристик динаміки транспортних потоків особливо в області синхронізованого режиму руху [163].

Протилежністю зазначеному підходу є мікроскопічний підхід, що базується на мікромоделях, які детально описують поведінку окремих елементів моделі. Для транспортних систем в цьому випадку є достатньо коректним мультиагентний підхід, при якому кожна модель складається із великої кількості об'єктів з автономними характеристиками або поведінкою (наприклад, автомобіль, водій, ділянка ВДМ тощо) і враховує в тій або іншій мірі особливості цих об'єктів при їх взаємодії, формуючи макрохарактеристики функціонування транспортного потоку на ВДМ або автомагістралях. Між цими двома існує третій підхід – мезоскопічний, поєднуючий в собі певні елементи макро- і мікромоделей.

Як вже було зазначено (див. підрозділ 1.3), в даний час найбільш коректним є мікроскопічний (і до певної міри мезоскопічний) підхід. Він дозволяє якісно описати основні особливості динаміки транспортних потоків на ВДМ та автомагістралях при всіх режимах транспортного руху (вільний, синхронізований, рух кластерів тощо) [163,164]. Найбільш розвинутими тут є моделі слідування за

лідером, кінетичні моделі, моделі клітинних автоматів [165]. Імітаційне моделювання в рамках цих моделей дає можливість до певної міри оцінити макрохарактеристики динаміки транспортних потоків (щільність, інтенсивність, швидкість транспортного потоку тощо) [156], які достатньо легко вимірюються на експерименті. Проте, в силу громіздкості та складності опису поведінки транспортної системи за допомогою такого підходу, часто результати імітаційного моделювання не збігаються з результатами експерименту в реальних умовах функціонування ВДМ. Однією з важливих причин такої невідповідності є необхідність вимушеного спрощення складних мікромоделей шляхом розгляду модельних параметрів, які суттєво відрізняються від таких, що характеризують реальну поведінку транспортних систем. Відомо, що у більшості мікромоделей слідування за лідером та клітинних автоматів [165] автомобіль розглядається як об'єкт (елемент системи), що не відрізняється за своїми параметрами (динамічні габаритні розміри, гальмівний шлях, потужність двигуна та інші техніко-експлуатаційні характеристики) від інших автомобілів, які формують транспортний потік на певній ділянці ВДМ в певний момент часу. У подальшому для отримання модельних значень макрохарактеристик транспортного потоку здійснюється інтегрування (усереднення) за ансамблем однорідних (або однакових) мікропараметрів об'єктів системи. Це, врешті речт, призводить з одного боку, до спрощення, проте з іншого, до певної неадекватності такого опису реальної динаміки транспортного потоку.

Для удосконалення мікроскопічного підходу аналізу процесів функціонування транспортних систем в даній роботі пропонується в рамках відповідних мікромоделей розглядати, як елемент модельної системи, ефективний автомобіль. За своєю суттю ефективний автомобіль – це модельний елемент системи, який описує транспортний рух в рамках певної мікроскопічної моделі, що має техніко-експлуатаційні параметри ТЗ, які є характерними (найбільш репрезентативним або значущим) для ТП, що формується на певній ділянці ВДМ у певному проміжку часу, з урахуванням його взаємодії з іншими транспортними засобами, учасниками формування цього ТП.

Концепція ефективного автомобіля, як характеристики транспортного потоку, що формується в реальних умовах функціонування ВДМ, має аналогію з концепцією ефективної маси електрона, що використовується у фізиці, наприклад, для опису руху елементарних частинок у періодичному потенціалі кристалу [161].

На наш погляд, пошук ефективного автомобіля, як характеристики транспортного потоку, що формується на певній ділянці ВДМ за певний проміжок часу, можна здійснювати, зокрема, за допомогою достатньо розвинутих на сьогоднішній день методів кластерного аналізу або методу аналізу ієрархій Сааті [166,167].

Ці методи дозволяють здійснювати багатовимірну статистичну процедуру упорядкування сукупності різнорідних об'єктів у порівняно однорідні групи об'єктів, що є репрезентативними для даної сукупності.

Поряд з цим, зазначені методи статистичної обробки можуть бути застосовані для пошуку транспортних засобів, які є найбільш ефективними для доставки вантажу у певні пункти призначення. У цьому випадку вибір ефективного автомобіля обумовлений необхідністю мінімізації витрат вантажних перевезень. Тут ефективний автомобіль можна розглядати, як транспортний засіб, вибір якого пов'язаний з мінімізацією таких витрат.

Таким чином, в сучасних умовах при оптимізації транспортних перевезень актуальним є, окрім оптимізації маршруту, також вибір транспортного засобу, що задовольняє певним техніко-експлуатаційним характеристикам. Поєднання процесів оптимізації маршруту доставки товару та визначення ефективного транспортного засобу дає можливість отримати більший економічний ефект, суттєво зменшити фінансові витрати та час на доставку продукції від виробника до споживача. Отже, в залежності від постановки задачі, ефективний автомобіль можна розглядати або як модельний транспортний засіб, який є найбільш репрезентативним для певного транспортного потоку, що формується на певній ділянці ВДМ у певний проміжок часу, або транспортний засіб, вибір якого за

своїми техніко-експлуатаційними характеристиками призводить до зменшення витрат на перевезення вантажу.

Процесу ефективного пошуку модельного транспортного засобу, як характеристики транспортного потоку, що формується на певній ділянці в реальних умовах функціонування ВДМ, в теперішній час приділяється мало уваги. Тому є доцільним розробка кількісної процедури виявлення необхідного транспортного засобу для автомобільних перевезень будь-якого типу. При цьому в роботі використовується процедура пошуку автомобіля з ефективними техніко-експлуатаційними характеристиками для здійснення перевезень певного виду товару, що базується на основі методу аналізу ієрархій Сааті [166,167].

В рамках методу [166,167] розглянемо n об'єктів (факторів), які необхідно порівняти між собою групі експертів. Головною метою проведення аналізу даною групою експертів є визначення відносної важливості цих об'єктів.

Нехай $A_1, A_2, \dots, A_n$ - сукупність об'єктів. В рамках експертного оцінювання ці об'єкти характеризуються за допомогою позитивних чисел, відповідно $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$, на наявність і ступінь прояву деякої властивості, відміченою експертизою. Наприклад, число ω_i відображає ступінь прояву (інтенсивність) розглянутої властивості у об'єкта A_i . Числа ω_i , залежно від контексту, називають «вагою» або «інтенсивністю» об'єктів A_i . Для зручності оперують нормованими величинами ω_z , які характеризуються наступною властивістю:

$$\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n = 1$$

Таким чином, використовують нормовані величини ($\omega_i * 100\%$), що являють собою вагу об'єкту A_i , вираженого у відсотках. Порівнюючи вагу кожного об'єкту з вагою інших об'єктів, можна утворити матрицю відносних ваг

$$A = (a_{ij}) = \begin{pmatrix} \frac{\omega_1}{\omega_1} & \frac{\omega_1}{\omega_2} & \dots & \frac{\omega_1}{\omega_n} \\ \frac{\omega_2}{\omega_1} & \frac{\omega_2}{\omega_2} & \dots & \frac{\omega_2}{\omega_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\omega_n}{\omega_1} & \frac{\omega_n}{\omega_2} & \dots & \frac{\omega_n}{\omega_n} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Матриці відносних ваг характерні наступні властивості: $a_{ij} = \frac{\omega_i}{\omega_j} > 0$ для всіх i й j , тому що всі $\omega_i > 0, \omega_j > 0$. $a_{ij} = \frac{\omega_i}{\omega_i} = 1$ для всіх $i = 1, 2, \dots, n$. Матриця A обернено симетрична, а саме $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$. Матриця A має властивість спільності, а саме $a_{ij}a_{jk} = \frac{\omega_i}{\omega_j} \frac{\omega_j}{\omega_k} = \frac{\omega_i}{\omega_k} = a_{ik}$ для всіх i, j й k .

Якщо з ваг $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ утворити вектор-стовпець ω :

$$\omega = \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \dots \\ \omega_n \end{pmatrix}, \quad (2.2)$$

то неважко переконатися, що має місце рівність $A^* \omega = n^* \omega$. Звідки

$$(a_{i1}a_{i2} \dots a_{in})^* \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \dots \\ \omega_n \end{pmatrix} = a_{i1}\omega_1 + a_{i2}\omega_2 + \dots + a_{in}\omega_n = \frac{\omega_i}{\omega_1}\omega_1 + \frac{\omega_i}{\omega_2}\omega_2 + \dots + \frac{\omega_i}{\omega_n}\omega_n = n^* \omega_i, \text{ що збігається}$$

з i -им компонентом вектора, розташованого в правій частині співвідношення. Виконання рівності означає, що число n є власним значенням матриці відносних ваг A , у той час як ω є власним вектором, що відповідає цьому власному значенню. В лінійній алгебрі число λ називають власним значенням матриці A , а ненульовий вектор-стовпець x – власним вектором, що відповідає власному значенню λ , якщо має місце рівність

$$A^* x = \lambda^* x \quad (2.3)$$

Власне значення матриці A знаходять з, так званого, характеристичного рівняння

$$|A - \lambda^* E| = 0, \quad (2.4)$$

де, $|A - \lambda^* E|$ – визначник відповідного матричного виразу, а E – одинична матриця. Характеристичне рівняння (2.3) для матриці n -го порядку являє собою

алгебраїчне рівняння n -го ступеню. Звідси випливає, що матриця A порядку n має n комплексних власних чисел, які є коренями відповідного характеристичного рівняння. Для матриці відносних ваг, що має відповідні чотири розглянуті вище властивості, можна довести наступне положення. Матриця відносних ваг $A = (\omega_i / \omega_j)$ має лише два дійсних власних значення: n та 0 . Якщо позначити $\lambda_{\max} = n = \max\{n; 0\}$, то відповідно (2.3) можна представити у вигляді

$$A\omega = \lambda_{\max}\omega \quad (2.5)$$

Рівність (2.5) є основою для подальшої математичної обробки й інтерпретації експертних оцінок у рамках методу аналізу ієрархій.

На практиці, при проведенні експертного оцінювання, дуже важко одночасно порівняти властивості всієї групи об'єктів $A_1, A_2, \dots, A_n$, яких може бути досить багато, і надати їм відповідні ваги $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$. Набагато легше порівнювати об'єкти попарно, характеризуючи їх за допомогою якої-небудь шкали оцінок ступеня переваг одного об'єкта над іншим. Схема попарного порівняння об'єктів широко використовується в різних методах експертного оцінювання й приводить до побудови матриці парних порівнянь

$$A^* = (a_{ij}) = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}. \quad (2.6)$$

Заповнюючи елементи цієї матриці, при парному порівнянні, експерти ще не знають всього набору чисел $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$, як ваг об'єктів. Їх завдання саме й полягає в тому, щоб визначити їх згодом. При парному порівнянні матриця заповнюється числами $a_{ij} = \omega_i / \omega_j$, які характеризують відносну перевагу (важливість, вагу) об'єкта A_i над об'єктом A_j , у той час як власна вага цих об'єктів ω_i, ω_j поки що не визначена. Для визначення чисел a_{ij} необхідно утворити шкалу, за якою буде оцінюватися перевага одного об'єкта над іншим при їхньому попарному порівнянні. Для експертного оцінювання прийнята 9-бальна шкала, запропонована автором методу аналізу ієрархій Т.Сааті [166, 167].

Матриця парних порівнянь заповнюється у такий спосіб. Об'єкт A_1 порівнюють з усіма іншими $A_2, \dots, A_n$, заповнюючи послідовно перший рядок матриці. Потім об'єкт A_2 порівнюють з усіма іншими, заповнюючи другий рядок числами a_{ij} , визначеними за шкалою відносної ваги й так далі.

Якщо вага об'єкта A_i дорівнює вазі об'єкта A_j , то згідно шкали $a_{ij} = 1$. Якщо вага об'єкта A_i більша ніж вага об'єкта A_j , то у відповідності зі шкалою експерти визначають ступінь переваги, що виражається в балах, причому $a_{ij} > 1$. Якщо навпаки, вага об'єкта A_i менша ніж вага об'єкта A_j , то за шкалою задається оцінка $a_{ij} < 1$.

За правилами заповнення матриць парних порівнянь повинні виконуватись умови:

1. $a_{ij} = \omega_i / \omega_j > 0$ для всіх i й j , тому що всі оцінки позитивні (більше нуля).
2. $a_{ii} = \omega_i / \omega_i = 1$ для всіх $i = 1, 2, \dots, n$.
3. Елементи матриці A^* мають зворотну симетрію, а саме $a_{ij} = 1/a_{ji}$ інакше кажучи, якщо перевага об'єкта A_i над об'єктом A_j оцінюється за шкалою, наприклад, в 5 балів і $a_{ij} = 5$, то зворотне співставлення об'єкта A_i з A_j повинне автоматично давати оцінку $a_{ji} = 1/5$.

Очевидно, що при заповненні матриці парних порівнянь зручно визначати тільки ті елементи, що стоять вище діагоналі. Діагональні елементи дорівнюють одиниці, а елементи під діагоналлю, в силу наведених умов, визначаються автоматично. Необхідно звернути увагу на те, що матриця парних порівнянь має всі властивості матриці відносних ваг у схемі ідеального порівняння, крім четвертого. Таким чином, вона не має, в загальному випадку, властивістю спільності $a_{ij}a_{jk} = a_{ik}$. Це відбувається через те, що експерти не знають точно вагу об'єктів $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$, а оперують лише їхніми відносними значеннями a_{ij} .

Для визначення в нашому випадку відносної важливості техніко-експлуатаційних характеристик ТЗ, що утворюють транспортний потік на певній

ділянці транспортної мережі, було обрано одне з перехресть міста Києва на вулиці Московській, 31/33 (біля кінотеатру «Зоряний») у напрямку від станції метро «Арсенальна» до станції метро «Печерська» [168,169]. Оскільки інтенсивність транспортного потоку на міській мережі не є однаковою протягом доби, то задля більшої об'єктивності було обрано три проміжки часу для моніторингу, що характерні для інтенсивностей щільного транспортного потоку. Відомо, що найбільше скупчення транспортних засобів спостерігається у так звані години «пік», тому саме ці проміжки часу і було обрано для проведення дослідження. Таким чином, підрахунок транспортних засобів проводився в періоди з 8.30 до 9.30, 12.35 до 13.35 та 16.35 до 17.35. При цьому, для більшої точності кожен часовий період був розділений на 4 рівні частини по п'ятнадцять хвилин, після яких фіксувались дані про кількість ТЗ. Крім того, всі ТЗ, що утворювали досліджуваний транспортний потік у відповідні проміжки часу, розділялись на наступні групи: легкові автомобілі, позашляховики, мікроавтобуси, автобуси (малі та середні, великі, зчеплені), вантажні автомобілі (легкі та середні, важкі).

Моніторинг інтенсивності руху транспортного потоку на вказаній ділянці транспортної мережі здійснювався за допомогою інтернет-ресурсу videoprobki.ua, який дає можливість спостерігати вказану ділянку дороги за допомогою встановленої веб-камери в режимі реального часу. Результати спостереження наведені у таблиці 2.1.

Для визначення ефективного автомобіля в рамках кожної групи ТЗ обирались реальні марки автомобілів, що представлені в теперішній час на ринку та дорогах України [170,171]. Відповідно, для легкових автомобілів було обрано 30 моделей; позашляховиків – 15 найбільш поширених моделей; мікроавтобусів – 10 моделей; автобусів (малі, середні) – 6 моделей, автобусів (великі) – 4 моделі, автобусів (зчеплених) – 2 моделі; вантажних автомобілів – 20 моделей.

Також для всіх вибраних таким чином марок автомобілів було визначено їх 15 техніко-експлуатаційних характеристик, а саме: довжина, ширина та висота транспортного засобу, кліренс, витрати палива при міському та заміському циклі руху, середній розхід палива, марка палива, екологічний стандарт, розгін з місця

до 100 км/год, максимальна швидкість, споряджена маса, допустима повна маса, об'єм паливного баку та колісна база.

Таблиця 2.1. - Результати спостереження транспортної мережі на ділянці дороги (перехрестя вулиці Московської м. Києва)

Час	Легкові автомобілі	Поза- шляховики	Мікро- автобуси	Автобуси			Вантажні автомобілі		Всього
				малі, середні	великі	зчепле- ні	легкі, середні	важкі	
Вранці									
8.30÷8.45	119	39	5	5	7	2	-	-	177
8.45÷9.00	132	44	10	7	4	-	-	1	198
9.00÷9.15	116	39	9	6	3	4	1	-	178
9.15÷9.30	116	38	14	3	8	1	1	1	182
Всього	483	160	38	21	22	7	2	2	735
%	65,71	21,77	5,17	2,86	2,99	0,96	0,27	0,27	
Обідня перерва									
12.35÷12.50	84	28	13	8	4	2	8	1	148
12.50÷13.05	113	37	16	7	6	3	8	1	191
13.05÷13.20	135	45	8	8	6	1	4	2	209
13.20÷13.35	132	44	11	8	6	2	4	1	208
Всього	464	154	48	31	22	8	24	5	756
%	61,38	20,37	6,35	4,10	2,91	1,06	3,17	0,66	
Ввечері									
16.35÷16.50	121	40	14	6	2	1	2	2	188
16.50÷17.05	111	36	15	8	4	1	2	-	177
17.05÷17.20	133	44	10	6	3	1	2	1	200
17.20÷17.35	124	41	20	4	5	1	3	1	199
Всього	489	161	59	24	14	4	9	4	764
%	64,01	21,07	7,72	3,14	1,83	0,52	1,19	0,52	

Далі, за допомогою методу аналізу ієрархій Сааті згідно з процедурою [166] серед вказаних характеристик ТЗ були визначені найбільш значущі, які найбільше впливають на швидкість та щільність транспортного потоку в межах міста. Виявлено, що таким показником є розміри ТЗ, а саме їх довжина. Крім того важливим є час розгону транспортного засобу, оскільки весь рух автомобіля в

режимі міста описується схемою рух-гальмування-зупинка-розгін-рух та екологічні характеристики.

Після цього, також використовуючи метод аналізу ієрархій за допомогою парних порівнянь знаходились відносні ступені взаємодії елементів (характеристик транспортних засобів) на кожному ієрархічному рівні (перевага одних елементів відносно інших). Цим порівнянням була надана чисельна оцінка. Слід відмітити, що при розгляді та порівнянні техніко-експлуатаційних характеристик необхідно прагнути того, щоб декомпозиція була доведена до такого рівня, на якому парні порівняння виконувались компетентними у даній області фахівцями. Оскільки обрані характеристики ТЗ характеризують автомобіль з різних сторін, а саме технічної, екологічної, економічної, то до складу експертної комісії були залучені саме фахівці з даних галузей. На основі отриманих експертних оцінок вищевказаних фахівців і було побудовано матриці порівняння техніко-експлуатаційних характеристик кожної групи транспортних засобів.

Після отримання відповідних даних, знову використовуючи відповідну процедуру згідно з [166], для кожної групи ТЗ визначався модельний ефективний автомобіль, техніко-експлуатаційні показники кожного з яких, характеризували досліджуваний транспортний потік на обраній ділянці транспортної мережі міста Києва. Результати отриманих розрахунків наведено у таблиці 2.2.

Часто для опису динаміки транспортного потоку в рамках відповідних макромоделей [172-174] використовують техніко-експлуатаційні параметри ТЗ, які достатньо грубо описують конкретний стан транспортної мережі в цілому. Запропонована в даній роботі концепція ефективного автомобіля дозволяє в певній мірі вирішувати цю проблему. Так, використовуючи отримані значення показників ефективних автомобілів кожної групи в транспортному потоці (див. табл.2.2), а також експериментальні дані щодо відносної ваги кожної групи ТЗ у цьому транспортному потоці (див табл.2.1), можна визначити усереднені техніко-експлуатаційні показники модельного ефективного автомобіля, який

характеризує динаміку транспортного потоку в цілому на певній ділянці транспортної мережі.

Таблиця 2.2. – Техніко-експлуатаційні характеристики знайдених для кожної групи ефективних транспортних засобів

№ п/п	Характеристика/Модель автомобіля	Hyundai Getz	Nissan Qashqai	Mercedes-Benz Viano	Богдан А 06922	Богдан А 701	ЛАЗ А292 (CityLAZ-20)	Iveco Stralis	Ефективний транспортний засіб
1.	Довжина, мм	3825	4330	4763	6690	11960	18800	9848	4731
2.	Ширина, мм	1665	1780	1901	2180	2550	2550	2550	1794
3.	Висота, мм	1490	1615	1875	2880	3200	3060	3000	1721
4.	Кліренс, мм	140	200	180	160	180	160	240	161
	Витрати палива:								
5.	міський цикл, л/100 км	9,2	10,1	9	X	X	X	X	X
6.	заміський цикл, л/100 км	5,3	6,2	6,6	X	X	X	X	X
7.	середній, л/100 км	6,7	7,6	7,4	17,5	X	X	X	X
8.	Марка палива	AI-95	AI-95	ДП	ДП	ДП	ДП	ДП	ДП
9.	Екологічний стандарт, Євро	IV	IV	IV	III	V	III	III	IV
10.	Розгін з місця до 100 км/год, с	12	10,7	14,1	17	20	25	27	13
11.	Максимальна швидкість, км/год	170	183	174	90	70	87	90	163
12.	Споряджена маса, кг	1057	1378	2030	4290	11400	17200	13300	2258
13.	Допустима повна маса, кг	1540	1960	2800	6825	18800	28300	26000	3645
14.	Об'єм паливного баку, л	45	65	75	90	180	180	300	68
15.	Колісна база, мм	2455	2630	3200	3350	5860	5030	4880	2794

Тут, значення i -ої відповідної техніко-експлуатаційної характеристики такого ефективного автомобіля визначається за формулою:

$$P_i = \sum_j N_{ij} k_j, \quad (2.7)$$

де P_i – значення техніко-експлуатаційної характеристики ефективного автомобіля;

N_{ij} – значення i -ої техніко-експлуатаційної характеристики ефективного автомобіля для j -ої групи (див. табл.2.2);

k_j – відносний ваговий коефіцієнт j -ої групи транспортних засобів (див. табл. 2.2).

Розрахунки за допомогою (2.7) дають наступні величини техніко-експлуатаційних характеристик ефективного автомобіля, які наведено у таблиці 2.2.

Також, на наш погляд, використання концепції ефективного автомобіля може бути корисним для розробки методики визначення коефіцієнтів приведення до легкового автомобіля, що є достатньо поширеними при проведенні оцінок пропускної здатності та завантаженості транспортних мереж з урахуванням складу ТП [175,176]. При цьому, як показує аналіз [175,176], існуючі на сьогодні методики є недосконалими, що призводить до суттєвих неточностей та розбіжностей у визначенні характеристик ТП на ВДМ.

2.2. Методика визначення коефіцієнтів приведення до легкового автомобіля з використанням моделі ефективного транспортного засобу

Питання оптимізації транспортного процесу має велике значення в сучасних ринкових умовах. Своєчасність та оперативність доставки пасажирів та вантажів на сьогодні відіграють одну з найважливіших ролей при перевезеннях. Однією з актуальних проблем є перевантаження транспортної мережі великих міст транспортними потоками, особливо у їх центральній частині. Це, в свою чергу, суттєво впливає на зниження пропускної здатності та ефективності руху транспортних потоків. Крім того, дана проблема сприяє збільшенню аварійних ситуацій на дорогах, підвищує негативний вплив транспортних потоків на екологічний стан навколишнього середовища, збільшує термін доставки товарів та витрати часу на доставку пасажирів громадським транспортом.

Це дало поштовх бурхливому розвитку значної кількості досліджень [175,176], спрямованих на визначення впливу різних типів транспортних засобів

на завантаженість транспортної мережі, пропускну здатності регульованих перехресть та ступеню використання пропускну здатності дороги.

На сьогоднішній день питанням розробки методів визначення коефіцієнтів приведення до легкового автомобіля приділяється значна увага, зокрема такими науковцями, як Webster F.V., Miller A. J., Branston D., Врубель Ю.А., Sosin J., Kockelman K.M., Raheel A.S., Левашов О.Г. Проте однозначних підходів для вирішення цієї проблеми до цих пір не існує.

Так, Webster F.V. в [177], визначав коефіцієнти приведення вантажних транспортних засобів великої та середньої вантажопідйомності до легкового автомобіля. Отримане в [177] при розрахунках значення величини коефіцієнта приведення складає 1,75 для вказаних груп транспортних засобів.

В свою чергу Miller A. J. в [178] для тих самих груп автомобілів отримав значення коефіцієнтів приведення рівними 1,85. Згідно [178], дослідження базувалися на визначені різниці часу необхідного для перетину перехрестя вказаними групами транспортних засобів, в порівнянні з легковими автомобілями.

У роботах Branston D. [179,180] знаходить коефіцієнти приведення для автомобілів середньої та великої вантажопідйомності. Згідно отриманих розрахунків вони рівні 1,35 та 1,68 відповідно. Відомо [179,180], що величину коефіцієнтів приведення Branston D. визначає методом регресійного аналізу при прямо направленому русі транспортного потоку.

Врубель Ю.А. та Sosin J. в [181,182], використовуючи абсолютно різні вихідні теоретичні дані та методики проведення досліджень, отримали близькі значення коефіцієнтів приведення. Для автомобілів середньої вантажопідйомності значення коефіцієнтів приведення становить 1,4 та 1,6 відповідно.

У [183,184] авторами запропоновано методику визначення коефіцієнтів приведення до легкового автомобіля для регульованих перехресть, засновану на використанні регресійної моделі. Згідно проведених розрахунків, коефіцієнти приведення для вантажних автомобілів малої, середньої та великої вантажопідйомності становлять 1,179; 1,460 та 1,647 відповідно.

Також слід відмітити, що протягом останнього часу суттєво змінюється склад транспортних засобів у загальному транспортному потоці. Підтвердженням цього можуть бути дослідження, які проводили Kockelman K.M. і Raheel A.S. [185]. Авторами визначались коефіцієнти приведення для автомобілів, що несуттєво відрізняються за габаритами від легкових автомобілів. Таку групу транспортних засобів було запропоновано називати «Позашляховик». Отримані розрахункові коефіцієнти приведення для вказаної групи транспортних засобів становлять в межах 1,07-1,41 в залежності від довжини автомобіля.

Як видно з проведеного аналізу літературних джерел, на сьогоднішній день існує велика кількість методик визначення коефіцієнтів приведення до легкового автомобіля. Кожна з них дає можливість знаходження в загальному цих коефіцієнтів та не враховує склад транспортного потоку, для якого вони визначаються. У зв'язку з цим, розрахункові значення пропускної здатності, інтенсивності, щільності та складу транспортного потоку не завжди відповідають реальним обставинам цього потоку на вулично-дорожній мережі.

Однією із основних причин виникнення відхилення при розрахунку пропускної здатності та завантаженості транспортної мережі, згідно [175,176] є неточність застосовуваних значень коефіцієнтів приведення до легкового автомобіля. Вважаємо, що існує необхідність в розробці методики уточнення існуючих коефіцієнтів приведення, враховуючи реальні дані.

Оскільки в основі значення коефіцієнтів приведення покладено співвідношення динамічних габаритів, то важливо при розрахунку використовувати актуальні дані техніко-експлуатаційних характеристик транспортних засобів, особливо таких як розміри автомобіля.

Виходячи з вищенаведеного, вважаємо актуальною розробку методики визначення коефіцієнтів приведення до легкового автомобіля, використовуючи техніко-експлуатаційні характеристики ефективного транспортного засобу. При цьому процедура пошуку автомобіля з ефективними техніко-експлуатаційними характеристиками розглядається на базі методу аналізу ієрархій Сааті [166,167], що наведено у розділі 2.1.

Згідно [186] інтенсивність руху транспортного потоку визначається кількістю транспортних засобів, що проходять через перетин проїзної частини в одиницю часу в одному або двох напрямках. За одиницю визначення інтенсивності прийняті натуральні та приведені одиниці. Натуральними одиницями є кількість різних груп транспортних засобів: легкові та вантажні автомобілі, позашляховики, мікроавтобуси, автобуси різної місткості та інше. За приведену одиницю виміру прийнятий легковий автомобіль, решта груп транспортних засобів приводяться до легкового автомобіля за допомогою коефіцієнтів приведення за формулою [186]:

$$N_{np} = \sum_i^n k_i N_{inat} \quad (2.8)$$

де N_{np} – інтенсивність руху транспорту в приведених одиницях, авт./год;

k_i – коефіцієнт приведення i -го виду транспорту до легкового автомобіля, що приймається відповідно до рекомендацій ДБН;

N_{inat} – інтенсивність руху i -го виду транспорту в натуральних одиницях, авт./год.

Пропускна здатність транспортної мережі, згідно [186] визначається кількістю смуг руху та пропускною здатністю кожної з них, характером руху на дорозі (безперервний чи регульований) та інше.

Теоретична пропускна здатність однієї полоси руху визначається за формулою [186]:

$$N = \frac{3600V}{L} \quad (2.9)$$

де N – теоретична пропускна здатність однієї смуги дороги, авт./год;

V – швидкість руху потоку, м/с;

L – величина динамічного габариту, м.

Згідно [186] під динамічним габаритом розуміється мінімальна відстань між передніми бамперами транспортних засобів, що рухаються один за одним, що забезпечує безпеку руху.

Пропускна здатність багато смугової дороги визначається з урахуванням розподілу транспортних засобів по смугам за формулою [186]:

$$N_M = N\gamma\alpha \quad (2.10)$$

де N_M – пропускна здатність багато смугової дороги, авт./год;

N - теоретична пропускна здатність однієї смуги дороги, авт./год;

γ – коефіцієнт багатополосності, що приймається в залежності від кількості полос руху в одному напрямі;

α – коефіцієнт, що враховує зменшення пропускної здатності за рахунок світлофорного регулювання.

Ступінь використання пропускної здатності дороги характеризується відношенням інтенсивності потоку N_{np} до пропускної здатності проїзної частини N_M

$$Z = \frac{N_{np}}{N_M} \quad (2.11)$$

Дане співвідношення називається рівнем завантаження проїзної частини та знаходиться в межах $0 \leq Z \leq 1$. При рівні завантаження $Z = 0.3 - 0.45$ спостерігається найбільш стійкий рух транспортного потоку. Чим ближче значення Z до 1, тим більша щільність транспортного потоку, менша швидкість руху, складні умови руху. При рівневі завантаження $Z \geq 0.8$ спостерігається граничне насичення потоку, рух транспортного потоку не стійкий, постійно утворюються затори, зміна смуг руху суттєво ускладнена, середня швидкість становить 10-12 км/год. При $Z = 1$ утворюється затор. У зв'язку з цим, можна зробити висновок, що при рівні завантаження $Z \geq 0.8$ пропускна здатність транспортної мережі практично вичерпана.

Як було зазначено вище, будь-який транспортний потік являє собою сукупність різних груп транспортних засобів. Відомо [186], що інтенсивність руху транспортного потоку суттєво залежить від його складу, який в свою чергу визначається співвідношенням у ньому різних груп транспортних засобів. Згідно проведених досліджень [169] транспортної мережі міста Києва на певній ділянці було визначено, що структура транспортного потоку складається: легкові автомобілі - 64%, позашляховики - 21%, мікроавтобуси - 6%, автобуси (малі та

середні) - 3%, автобуси (великі) - 3%, зчеплені автобуси - 1%, вантажні автомобілі - 2%. Відомо [186], що склад транспортного потоку впливає на рівень завантаження транспортної мережі, що пояснюється істотною різницею в габаритних розмірах транспортних засобів. При русі транспортного засобу в транспортному потоці важлива різниця не лише в статичному, але й динамічному габариті автомобіля. Тому існує проблема у визначенні коефіцієнтів приведення до легкового автомобіля, так як даний параметр суттєво впливає на визначення інтенсивності транспортного потоку.

На сьогоднішній день в Україні при визначенні інтенсивності руху транспортного потоку використовуються коефіцієнти приведення до легкового автомобіля згідно документу ДБН В.2.3-4:2007 «Споруди транспорту. Автомобільні дороги». В свою чергу, як показують результати проведених розрахунків [186], відхилення при визначенні інтенсивності руху транспортного потоку, пропускної здатності та завантаженості транспортної мережі зумовлені неточністю значень коефіцієнтів приведення до легкового автомобіля. В основі значення коефіцієнтів приведення покладено співвідношення динамічних габаритів транспортних засобів.

Оскільки в загальному об'ємі транспортних засобів група автомобілів «Позашляховики» становить близько 21%, що є фактично другою по значимості групою у всьому транспортному потоці, вважаємо за необхідне при розрахунках виділення в окрему групу даних автомобілів.

Ділянка дороги, на якій проводилося спостереження за інтенсивністю руху транспортного потоку розташована у центрі міста Києва, де зосереджена велика кількість офісів та урядових установ, що в свою чергу впливає на завантаженість. Обмеження швидкості руху по вказаній ділянці дороги обумовлене лише дотриманням швидкісного режиму при руху транспортного засобу в межах міст (швидкість руху не повинна перевищувати 60 км/год) та світлофорним регулюванням на самому перехресті. Крім того, особливим є визначення кількості смуг руху транспортних засобів. На вказаній ділянці дороги передбачено дві смуги руху, рух транспортних засобів односторонній. Особливістю на даній

ділянці дороги є те, що незважаючи на односторонній рух в зустрічному напрямку передбачено рух маршрутних транспортних засобів, а також громадського транспорту (автобусів та тролейбусів). У зв'язку з цим, на вказаній ділянці дороги часто виникає утруднення руху транспортних засобів. Також суттєво впливає на швидкість руху транспортного потоку щільне паркування транспортних засобів на проїзній частині дороги. Виходячи з характеристики досліджуваної ділянки дороги, обираємо для розрахунків завантаження транспортної мережі коефіцієнт, що враховує зменшення пропускної здатності за рахунок світлофорного регулювання рівним 0,66. Враховуючи специфіку даної ділянки дороги, що стосується кількості смуг руху в одному напрямку, обираємо коефіцієнт багатосмуговості рівним 1,5, що є фактично середнім значенням між одно та двох смуговою дорогою.

Так як при визначенні інтенсивності руху транспортного потоку використовуються коефіцієнти приведення до легкового автомобіля, які в свою чергу залежать від габаритів транспортного засобу, вважаємо доцільним при їх розрахунку використовувати реальні дані про транспортні засоби, отримані на основі моніторингу транспортного потоку на обраній ділянці транспортної мережі.

Моніторинг інтенсивності руху транспортного потоку на вказаній ділянці транспортної мережі та складу реального транспортного потоку здійснювався за допомогою інтернет-ресурсу videoprobki.ua, який дає можливість спостерігати вказану ділянку дороги в режимі реального часу. Результати спостереження наведені у розділі 2.1. Всі транспортні засоби було поділено на наступні групи: легкові автомобілі, позашляховики, мікроавтобуси, автобуси (малі та середні, великі, зчеплені), вантажні автомобілі (легкі та середні, важкі). У розділі 2.1 для кожної групи було знайдено ефективний транспортний засіб з реальними техніко-експлуатаційними характеристиками. Використовуючи отримані дані, а також відсотковий вміст кожної групи автомобілів у загальному об'ємі транспортного потоку, було визначено показники модельного ефективного транспортного

засобу, який характеризує динаміку транспортного потоку в цілому на певній ділянці транспортної мережі.

Використовуючи дані про знайдені показники ефективного автомобіля для кожної групи транспортних засобів, що базуються на результатах проведеного моніторингу, які наведені у розділі 2.1 (див.табл. 2.1), можна знайти коефіцієнти приведення до легкового автомобіля як співвідношення динамічних габаритів вказаних транспортних засобів. Результати отриманих розрахунків приведених коефіцієнтів наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3. - Коефіцієнти приведення до легкового автомобіля по даним різних авторів

Тип транспортного засобу	Коефіцієнти приведення до легкового автомобіля по даним різних авторів						Авторські розрахунки
	ДБН В.2.3 -4: 2007 [186]	Branston, [179,180]	Sosin, [182]	Webster, [177]	Врубель, [181]	Левашов, [183]	
Мотоцикли	0,5-0,75	0,15	0,6	0,33	0,7	-	-
Легковий автомобіль	1	1	1	1	1	1	1
Позашляховик	-	-	-	-	-	-	1,13
Мікроавтобус	-	-	-	-	-	1,093	1,25
Вантажні автомобілі: до 2 т.	1,5	-	-	-	-	1,179	-
2 – 6 т.	2	1,35	1,6	1,75	1,4	1,460	-
> 6 т.	2,5-3,5	1,68	-	1,75	-	1,647	2,57
Автопоїзди	3,5-6	-	2,8	-	2,3	2,231	-
Автобуси (малі, середні)	3	-	-	-	-	1,367	1,75
Автобуси (великі)		1,65	1,7	2,25	2,0	1,839	3,13
Тролейбуси	-	-	-	-	2,0	-	-
Зчеплені автобуси або тролейбуси	5	-	2,8	-	2,6	2,362	4,92

Як видно з отриманих даних, цілком логічно виділяти в окрему групу автомобілі типу «Позашляховик». В такому випадку коефіцієнт приведення до легкового автомобіля буде рівним 1,13, що відрізняється від 1 та дасть можливість отримання більш точних розрахунків. Варто також відмітити, що більшість авторів не виділяють в окрему групу такий тип ТЗ як «Мікроавтобус». В нашому випадку, коефіцієнт приведення становить 1,25, а наприклад, у Левашова, що наведено у [183] – 1,093. Крім того, отримані приведені коефіцієнти для частини транспортних засобів збігаються з даними отриманими іншими дослідниками. Також необхідно відмітити, що отримані приведені коефіцієнти відрізняються від запропонованих у нормативному документі ДБН В.2.3-4:2007 «Споруди транспорту. Автомобільні дороги».

Таблиця 2.4. - Результати спостереження завантаження транспортної мережі на ділянці дороги (перехрестя вулиці Московської м. Києва)

Час	Легкові автомобілі	Позашляховик и	Мікроавтобуси	Автобуси			Вантажні автомобілі		Всього
				малі, середні	великі	зчеплені	легкі, середні	важкі	
Година «пік»									
12.35÷13.35	464	154	48	31	22	8	24	5	756
Звичайний режим									
10.30÷11.30	394	140	52	18	19	7	20	4	654

Використовуючи формулу (2.8) розраховуємо фактичну інтенсивність руху транспорту в приведених одиницях для двох режимів руху (години «пік» та звичайного режиму). Для розрахунку використовуємо як рекомендовані згідно [186] приведені коефіцієнти так і отримані нами для ефективних транспортних засобів (див. таблиця 2.3). Крім того, за допомогою формули (2.10) визначалась пропускна здатність багатосмугової дороги. При визначенні застосовувався

коефіцієнт зменшення пропускної здатності за рахунок світлофорного регулювання рівним 0,66, а також коефіцієнт багатосмуговості рівним 1,5. Таким чином розрахункова пропускна здатність багато смугової дороги становить 999 авт/год. Також визначався рівень завантаження транспортної мережі для кожного періоду. Для першого періоду з 12.35 до 13.35 даний коефіцієнт становив 0,93 та 0,94 в залежності від використання коефіцієнтів приведення відповідно за ДБН та авторськими розрахунками (формулами) відповідно. Для другого періоду з 10.30 до 11.30 ступінь використання транспортної мережі становив за розрахунками 0,78 та 0,81 відповідно. Це свідчить про те, що оцінки рівня завантаженості за методикою ДБН, що відповідає стійкому руху транспортного потоку. Оцінки за методикою (2.8 - 2.11), що пропонуються в даній роботі, дають значення рівня завантаженості 0,81, що відповідає граничному насиченню потоку (затору). При проведенні моніторингу даної транспортної мережі спостерігався постійний затор на вказаній ділянці дороги незалежно від періоду спостереження. Таким чином, отримані розрахунки за методикою (2.8 - 2.11) у більшій мірі відповідають реальній ситуації на дорозі, ніж розрахунки за методикою ДБН [186]. Результати проведених розрахунків пропускної здатності транспортної мережі та ступеню використання пропускної здатності дороги наведено у таблиці 2.5.

Таблиця 2.5. – Результати розрахунку пропускної здатності дороги та коефіцієнту завантаження транспортної мережі

	Період спостереження	
	12.35÷13.35	10.30÷11.30
Всього автомобілів, авт.	756	654
Інтенсивність потоку в приведених одиницях N_{np} за ДБН, авт./год	926	782
Інтенсивність потоку в приведених одиницях N_{np} за авторськими розрахунками, авт./год	935	804
Пропускна здатність N_m , авт./год	999	
Ступінь завантаження транспортної мережі Z за ДБН	0,93	0,78
Ступінь завантаження транспортної мережі Z за авторськими розрахунками	0,94	0,81

Запропонована методика визначення коефіцієнтів приведення, що базується на концепції використання ефективного автомобіля, на наш погляд, дає більш коректні результати для опису динаміки транспортних потоків. В рамках цієї методики уявляється отримання таких значень параметрів транспортних потоків (інтенсивності руху, пропускної здатності, завантаженості проїзної частини), які більш адекватно описують реальний стан транспортної мережі. Вважаємо, що запропонована методика знайде широке використання при вивченні динаміки транспортних потоків на різних ділянках транспортних мереж міст.

2.3. Синергетична інтерпретація фазового переходу між станами вільного та синхронізованого транспортного потоку

Згідно аналізу, наведеному у підрозділі 1.3 [162,163], в рамках сучасних уявлень виділяють три фази динаміки транспортного потоку: вільний потік, синхронізований потік, широкий кластер автомобілів, що рухається. При цьому, у щільному потоці виділяються дві фази, синхронізований потік і широкий кластер автомобілів, що рухається. У [164] також експериментально показано, що формування просторово-часових характеристик транспортних потоків у щільному режимі обумовлено синергетичним характером динаміки транспортного потоку в цьому режимі.

Важливим є аналітичний опис фазового переходу до щільного режиму руху в результаті самоорганізації системи. Для цього використовується синергетична концепція фазового переходу, який проявляється в результаті узгодженої поведінки трьох ступенів свободи: параметра порядку, спряженого поля та управляючого параметра [162]. На відміну від [162], будемо розглядати в рамках моделі слідування за лідером мікроскопічну систему, що складається із сукупності ефективних автомобілів як характеристичних транспортних засобів, що формують транспортний потік на певній ділянці ВДМ. При цьому оптимальні значення відстані між транспортними засобами в транспортному потоці h та часу розгону-гальмування автомобіля τ_{oc} відповідають динамічним габаритам та

оптимальному часу розгону-гальмування техніко-експлуатаційним параметрам ефективного автомобіля, що є репрезентативною характеристикою транспортного потоку на певній ділянці ВДМ.

В рамках адіабатичного наближення [161,162] перехід між станами транспортного потоку уявляється як фазовий перехід першого роду, характер якого визначається відстанню між автомобілями $\Delta x(t)$, що відіграє роль об'єму чи щільності та оберненим часом затримки (часом розгону/гальмування) $1/\tau$, що відповідає температурі. Для опису використовується рівняння руху n -го автомобіля [163]:

$$dx_n / d(t + \tau) = V(\Delta x_n(t)) \quad (2.12)$$

Тут задається оптимальна швидкість $V(\Delta x_n(t))$, яка задовольняє наступним вимогам [163]:

- $V(\Delta x_n)$ - монотонно зростаюча функція;
- має верхню межу;
- при інтервалі між автомобілями, що рівний критичному значенню h_c має точку налаштування.

В процесі досліджень даної моделі отримано умову стійкості, згідно якої при появі незначного впливу в однорідному потоці автомобілів, він залишається стабільним, якщо час затримки відповідає нерівності [163]

$$1/\tau > 2V'(h), \quad (2.13)$$

де $V'(h) = dV(\Delta x_n) / d\Delta x_n |_{\Delta x_n = h}$

Для найпростішої моделі автомобілів, що рухаються один за одним величини

$$\eta = h - \Delta x, \Delta x = h - \eta \quad (2.14)$$

де η - відхилення від оптимального значення інтервалу між транспортними засобами;

Δx - реальне значення відстані між транспортними засобами;

h - оптимальне значення інтервалу між транспортними засобами (динамічні габарити ефективного автомобіля як характеристики транспортного потоку).

$$v = \dot{\Delta x} = h/t_0 - v_0, \quad v = \dot{\Delta x} = -\dot{\eta} \quad (2.15)$$

де v - швидкість відхилення від оптимального значення інтервалу між транспортними засобами;

$\dot{\Delta x}$ - реальне значення швидкості відхилення від оптимального значення інтервалу між транспортними засобами.

Відхилення інтервалу між транспортними засобами та швидкості його зміни від відповідних оптимальних значень h та $h/t_0 - v_0$ (t_0 - характерний часовий інтервал, v_0 - швидкість автомобіля) відіграють роль параметру порядку та спряженого поля відповідно. Таким чином, поведінка транспортного потоку характеризується величинами η , v та часом розгону/гальмування τ , що зводиться до управляючого параметру. Нехай вказані величини є дисипативними, і їх релаксація до рівноважних значень описується рівнянням Дебая. Основою синергетичного підходу є те, що позитивний зворотній зв'язок між змінними η і τ може призвести до самоорганізації системи, яка є причиною переходу між станами транспортного потоку. Для забезпечення стабільності системи введемо від'ємний зворотній зв'язок між η та v . Отримані в результаті рівняння, що визначають часові залежності $\eta(t)$, $v(t)$ та $\tau(t)$, формально співпадають з системою Лоренца, яка описує систему, що самоорганізовується [162]:

$$\begin{cases} \dot{\eta} = -\eta/t_\eta + v, \\ \dot{v} = -v/t_v + g_v \eta \tau, \\ \dot{\tau} = (\tau_0 - \tau)/t_\tau - g_\tau \eta v \end{cases} \quad (2.16-2.18)$$

Тут крапка означає диференціювання по часу; t_η, t_v, t_τ - відповідно часи релаксації; g_v, g_τ - додаткові константи зв'язку між динамічними змінними. Рівняння (2.16) – (2.18) є основою самоузгодженого опису моделі автомобілів, що рухаються один за одним. Суттєвою особливістю даної моделі є те, що у (2.17) – (2.18) входять нелінійні складові з різними знаками, в той час як рівняння (2.16) – лінійне. Останнє обумовлено тим, що відхилення швидкості v є похідною відхилення інтервалу η по часу. Друга складова в правій частині (2.17) описує

додатній зворотній зв'язок між відхиленням інтервалу та часу розгону/гальмування, в результаті чого збільшується значення v , що є причиною виникнення транспортного затору. Кінетичне рівняння для величини τ відрізняється тим, що релаксація відбувається не до нуля, а до кінцевого значення τ_0 , що визначає час, необхідний автомобілю для досягнення характерної швидкості (техніко-експлуатаційна характеристика транспортного засобу). Знак мінус перед останнім елементом в правій частині рівняння (2.18) можна розглядати як виникнення принципу Ле-Шательє, оскільки збільшення часу розгону/гальмування τ призводить до виникнення потоку машин, при чому ріст величин η і v заважає збільшенню τ .

Стационарне значення відхилення інтервалу η має вигляд [162]:

$$\eta_e^m = \eta_{00} \left\{ 1 \mp \left[1 + \eta_0^2 \eta_{00}^{-4} (\tau_0 - \tau_c) \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.19)$$

$$2\eta_{00}^2 = (\tau_0 - 1) - \tau_c \eta_0^2, \quad \tau_c = 1 + k$$

Верхній знак в правій частині рівняння (2.19) відповідає значенню η^m для нестійкого стану, а нижній знак відповідає стійкому стану η_e . Відповідне значення стаціонарного часу розгону/гальмування [162]

$$\tau^m = \frac{1 + \eta_{00}^2 + \sqrt{(1 + \eta_{00}^2)^2 - (1 - \eta_0^2)^2 \tau_0}}{1 - \eta_0^2} \quad (2.20)$$

що плавно зростає від значення

$$\tau_m = 1 + \eta_0 \sqrt{k / (1 - \eta_0^2)} \quad (2.21)$$

при

$$\tau_0 = \tau_{c0} = (1 - \eta_0^2) \tau_m^2 \quad (2.22)$$

до граничного значення $\tau_c = 1 + k$ при $\tau_0 = \tau_c$. Тут τ_c - граничне (критичне) значення часу розгону/гальмування автомобіля, τ_{c0} - час розгону/гальмування, характерний для однорідного потоку машин у вільному режимі транспортного потоку.

Згідно (2.15) легко знайти швидкість автомобіля V у синхронізованому режимі, коли існує взаємодія між транспортними засобами, що призводить до

формування транспортного затору. При цьому значення швидкості обумовлене проявом синергетичних ефектів, які описуються системою рівнянь (2.16-2.18).

$$V = \dot{\eta}_e^m = \frac{1}{4\sqrt{\eta_{00}^2 \mp \sqrt{\eta_{00}^4 + \eta_0^2(\tau_0 - \tau_c)}}} \cdot (1 \mp \frac{\eta_0^2 - \eta_{00}^2}{\sqrt{\eta_{00}^4 + \eta_0^2(\tau_0 - \tau_c)}}) \quad (2.23)$$

Верхній знак в правій частині рівняння (2.23) відповідає значенню для нестійкого стану, а нижній знак відповідає стійкому стану.

На основі отриманих розрахунків побудуємо залежності стаціонарного значення відхилення від оптимального значення інтервалу між транспортними засобами η_e^m та швидкості V від значення τ_0 , що визначає час, необхідний автомобілю для досягнення характерної швидкості. Значення η_e^m, V, τ_0 наведені у відносних одиницях.

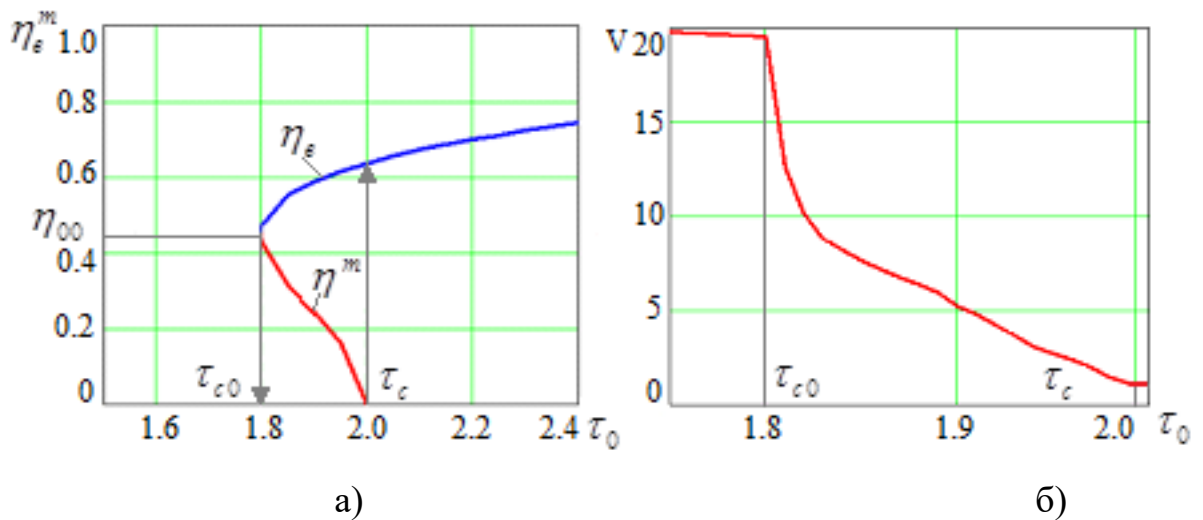


Рисунок 2.1 - Залежності стаціонарних значень відхилення інтервалу між автомобілями η_e, η^m (а) та швидкості автомобіля V від характерного часу τ_0 (б)

Як показано на рис. 2.1 а при повільному збільшенні параметру τ_0 в інтервалі від 0 до τ_{c0} виникнення транспортного затору неможливе. В точці $\tau_0 = \tau_c$ відхилення інтервалу η_e спричиняє стрибок до значення $\sqrt{2}\eta_{00}$, а потім плавно зростає згідно (2.19). При зменшенні параметру τ_0 величина η_e неперервно зменшується до точки $\tau_0 = \tau_{c0}$, $\eta_e = \eta_{00}$, а потім різко спадає до нуля.

Як показано на рис. 2.1б, повільне збільшення параметру τ_0 в інтервалі від 0 до τ_{c0} , що дорівнює 1.8, швидкість руху транспортного потоку практично незмінна, як результат - транспортний затор виникнути не може. На даному проміжку транспортні засоби рухаються у вільному транспортному потоці. На даній ділянці швидкість руху транспортних засобів обмежується лише правилами дорожнього руху, технічними характеристиками автомобіля та кваліфікацією водія.

На проміжку від τ_{c0} до τ_c , що на рисунку відповідає діапазону від 1.8 до 2.0 спостерігається різке зменшення величини швидкості, яке стрімко наближається до нуля. Такий стан транспортного потоку характеризується як синхронізований потік (згідно класифікації Кернера). Для даного стану характерне різке зменшення швидкості потоку. В синхронізованому транспортному потоці, швидкість автомобілів менша, ніж мінімально можлива швидкість транспортних засобів у вільному потоці. На даній ділянці спостерігається суттєва взаємодія між транспортними засобами в потоці, швидкість руху транспортного засобу залежить від загальної швидкості потоку і не може бути більшою за неї.

На проміжку від τ_c , що на рисунку відповідає діапазону від 2.0 спостерігається практично незмінна в часі швидкість руху автомобілів в транспортному потоці. Величина швидкості на даній ділянці фактично наближається до нуля, рух транспортних засобів фактично зупинено. Такий стан транспортного потоку відповідає транспортному затору. Для такого стану характерна повна взаємодія між усіма учасниками дорожнього руху, маневри, перестроювання та інші дії можливі лише при узгодженні з іншими учасниками. Згідно класифікації Кернера такий стан транспортного потоку називається широкий кластер автомобілів, що рухаються.

Одним з найголовніших показників, що характеризує завантаженість транспортної мережі є щільність дороги ρ , яка визначається як кількість транспортних засобів, що знаходяться в даний момент часу на одиницю заданої ділянки дороги. Максимальне значення щільності $\rho_{\max}$ відповідає кількості

нерухомих транспортних засобів розташованих впритул один до одного на одиницю заданої ділянки дороги. Виходячи з цього, можна визначити залежність між щільністю та реальною відстанню між транспортними засобами за наступною формулою:

$$\rho \sim \frac{1}{\Delta x}, \quad (2.24)$$

де ρ – щільність потоку транспортної мережі;

Δx – реальна відстань між транспортними засобами.

Оскільки, згідно (2.24) $\Delta x = h - \eta$ маємо:

$$\rho \sim \frac{1}{h - \eta} \quad (2.25)$$

Крім того, розглядаючи згідно [168,169] модель ефективного автомобіля як ефективну характеристику транспортного засобу реального транспортного потоку, можна описувати динаміку фазових переходів транспортного потоку в теорії Кернера в рамках синергетичного підходу, розвинутого в даній роботі.

Тоді, використовуючи формулу (2.25), можна побудувати залежність швидкості руху транспортного потоку V від показників завантаженості дорожньо-транспортної мережі ρ .

Як показано на рис. 2.1, швидкість транспортного потоку залишається незмінною високою до досягнення певного значення насиченості дорожньо-транспортної мережі (в нашому випадку до значення $\rho = 0,655$). Після цього швидкість транспортного потоку різко зменшується при збільшенні насиченості дороги. При досягненні критичного значення завантаженості транспортно-дорожньої мережі (в нашому випадку до значення $\rho = 0,731$) значення швидкості транспортного потоку наближається до нуля. Після цього величини щільності завантаження дороги та швидкості руху транспортного потоку залишаються незмінними.

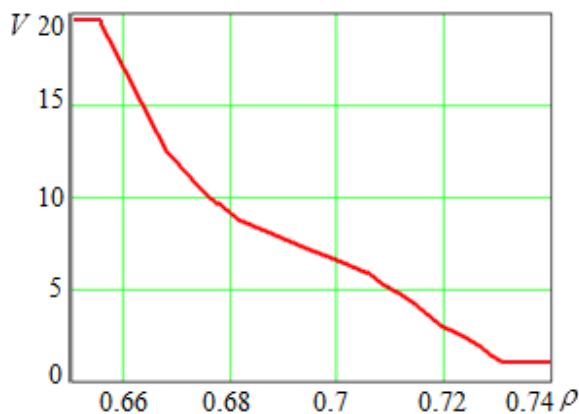


Рисунок 2.2 - Залежність швидкості руху V від щільності завантаження дорожньо-транспортної мережі ρ

Таким чином, отриманий графік залежності швидкості руху транспортного потоку від завантаженості дорожньо-транспортної мережі відображає реальну ситуацію на дорозі, яку можна спостерігати в реальному часі.

Висновки до Розділу 2

1. З метою удосконалення мікроскопічного підходу для опису динаміки транспортного потоку на певних ділянках ВДМ або автомагістралях отримала подальшого розвитку концепція ефективного автомобіля. Зокрема, в роботі розвинуто понятійно-категоріальний апарат теорії транспортних потоків шляхом розгляду поняття ефективного автомобіля як модельного елементу системи, який описує транспортний рух в рамках певної мікроскопічної моделі, що має техніко-експлуатаційні характеристики транспортного засобу, який є найбільш репрезентативним для транспортного потоку, що формується на певній ділянці ВДМ або автомагістралі, з урахуванням його взаємодії з іншими транспортними засобами – учасниками формування цього транспортного потоку.

В рамках концепції ефективного автомобіля з використанням методу аналізу ієрархій Сааті розвинуто процедуру знаходження ефективного автомобіля як характеристики транспортного потоку, що формується в реальних умовах функціонування ВДМ або автомагістралей. На прикладі фрагменту ВДМ м. Києва

проведено кількісні дослідження щодо визначення найбільш значущих техніко-експлуатаційних характеристик ефективного автомобіля (габарити, кліренс, середні витрати палива, витрати палива при міському та заміському циклі руху, марка палива, максимальна швидкість, розгін з місця до 100 км/год, об'єм паливного баку, колісна база, споряджена маса, допустима повна маса, екологічний стандарт), що є найбільш репрезентативним для транспортного потоку з відповідним складом транспортних засобів на досліджуваній ділянці ВДМ.

2. Запропоновано методику визначення коефіцієнтів приведення до легкового автомобіля, що базується на використанні концепції ефективного автомобіля. В рамках цієї методики, на відміну від існуючих, уявляється можливим отримання таких теоретичних значень параметрів транспортних потоків (інтенсивності, пропускної здатності, щільності, завантаженості проїзної частини), які більш адекватно описують реальний стан функціонування транспортної мережі. Зокрема, оцінки рівня завантаження проїзної частини досліджуваної ділянки ВДМ м. Києва відповідають, на відміну від таких оцінок за методикою ДБН, граничному насиченню транспортного потоку (затору), що збігається з експериментальними даними.

3. Вперше проведено синергетичну інтерпретацію експериментальної фазової діаграми Кернера переходу від вільного до синхронізованого транспортного потоку, а також в області щільного транспортного потоку. Тут теоретичні дослідження базуються на аналізі функціональних залежностей характеристик руху ефективного автомобіля при різних фазах динаміки транспортного потоку в рамках синергетичної моделі Лоренца в адіабатичному наближенні. В рамках цієї мікроскопічної моделі розглядається трипараметрична система нелінійно взаємопов'язаних параметрів η , v , τ , що мають фізичний сенс відхилення від оптимального значення інтервалу між транспортними засобами (динамічні габарити), оптимальної швидкості та оптимального часу розгону-гальмування ефективного автомобіля, як модельної характеристики

транспортного потоку, що формується на ділянках в реальних умовах функціонування ВДМ.

За результатами проведених досліджень теоретично підтверджено наявність трьох фаз динаміки транспортного потоку (вільного, синхронізованого та широкого кластеру, що рухається), експериментально виявлених в дослідженням Б. Кернера. Отримані функціональні залежності швидкості руху транспортного потоку v від характерного часу розгону-гальмування τ_0 ефективного автомобіля та щільності транспортного потоку ρ вказують на наявність відповідних границь переходів між фазами динаміки транспортного потоку.

Результати теоретичних досліджень характеристик динаміки транспортного потоку при різних режимах в рамках наведеної синергетичної моделі можуть знайти своє застосування при вирішенні задач імітаційного моделювання процесів оптимізації маршрутів та управління дорожнім рухом в режимі реального часу в умовах реальної (не стаціонарної) динаміки транспортних потоків на ВДМ міст.

Результати досліджень даного розділу викладено у публікаціях [168,169,187].

РОЗДІЛ 3. ОПТИМІЗАЦІЯ МАРШРУТІВ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДИФІКОВАНОГО МЕТОДУ САМООРГАНІЗАЦІЇ МУРАШИНОЇ КОЛОНІЇ

3.1. Модифікація мурашиного алгоритму дискретної оптимізації маршруту у мережі з урахуванням впливу зовнішнього нестационарного середовища

Як зазначалося вище (див. підрозділ 1.3), застосування класичного мурашиного алгоритму та існуючих його модифікацій для вирішення задач дискретної оптимізації маршруту в мережі в основному здійснювалось для статичних задач в представленні мережі у вигляді відповідного графу [188]. Під статичним графом ми розуміємо граф, відстань між вузлами у якому, не змінюється з часом.

При цьому, проведені тестові дослідження показали [189], що при збільшенні кількості вузлів графу, відповідно збільшується час знаходження оптимального розв'язку. Для вирішення задачі, у якій граф містить більше 100 вершин, час побудови оптимального маршруту за допомогою класичного алгоритму складає близько 60 секунд. Також слід відмітити, що точність знайденого оптимального маршруту та час його побудови залежить від параметрів α, β, ρ , які визначаються експериментальним (дослідним) шляхом [190].

Крім того слід зазначити, що в сучасних умовах функціонування транспортної галузі є надзвичайно актуальним розробка та удосконалення методів та моделей управління процесами оптимізації маршрутів транспортних перевезень з урахуванням реальної динаміки транспортних потоків у вулично-дорожніх мережах. Це в першу чергу стосується мегаполісів, функціонування ВДМ яких характеризується великою динамічністю завантаженості, суттєвими змінами швидкості руху транспортних засобів, виникненням заторів тощо.

У зв'язку з цим, пропонується метод побудови оптимального маршруту доставки вантажів з урахуванням реальної динаміки транспортних потоків на ВДМ великих міст, що базується на використанні розробленої автором модифікації мурашиного алгоритму, який може бути застосовним для мереж будь-якої фізичної природи.

У відповідності до постановки задачі щодо вирішення проблем маршрутизації з урахуванням процесів динаміки транспортного потоку, вулично-дорожня мережа представляється у вигляді двонаправлено орієнтованого зваженого графа. У вузлах такого графа розташовані пункти доставки товару (склади, супермаркети, тощо) з певного розподільчого центру (складу відправника) за допомогою транспортного засобу, що рухається у ВДМ міста. Ваги ребер, які з'єднують певну пару вузлів графа, визначаються в залежності від характеру розв'язуваної задачі. Це можуть бути відстані між пунктами, середні швидкості або середній час, вартість проїзду транспортного засобу в транспортному потоці на певних ділянках мережі.

Виходячи з вищенаведеного, в рамках математичного формулювання у загальному випадку кожному j -му ребру графу відповідає сукупність n_j ділянок вулично-дорожньої мережі, кожна i -та з яких характеризується певною довжиною l_{ij} , середньою швидкістю проїзду v_{ij} та середнім часом проїзду t_{ij} .

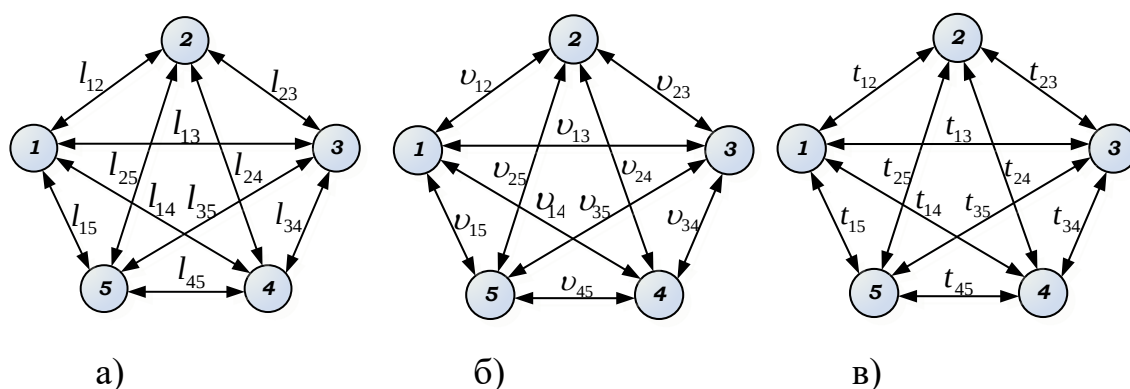


Рисунок 3.1 - Двонаправлено орієнтовані графи: а – відстаней між об'єктами; б – середніх швидкостей між об'єктами; в – часових затрат між об'єктами.

Як приклад, на рисунку 3.1 показані відповідно графи відстаней (рис.3.1а), середніх швидкостей (рис.3.1б) та часових затрат (рис.3.1в) між вузлами, які характеризують склади підприємства та супермаркети. При цьому відстані між об'єктами в загальному випадку можуть змінюватись з часом. Граф середніх швидкостей містить інформацію про середню швидкість між двома пунктами призначення. Сам рух з однієї точки у іншу складається з декількох частин різної довжини та різної швидкості. Таким чином на основі цих даних можна визначити середню швидкість між пунктами призначення.

Середні швидкості між двома пунктами доставки товару є змінною величиною, яка враховує реальну ситуацію на певних ділянках автомобільних шляхів (рис. 3.2).

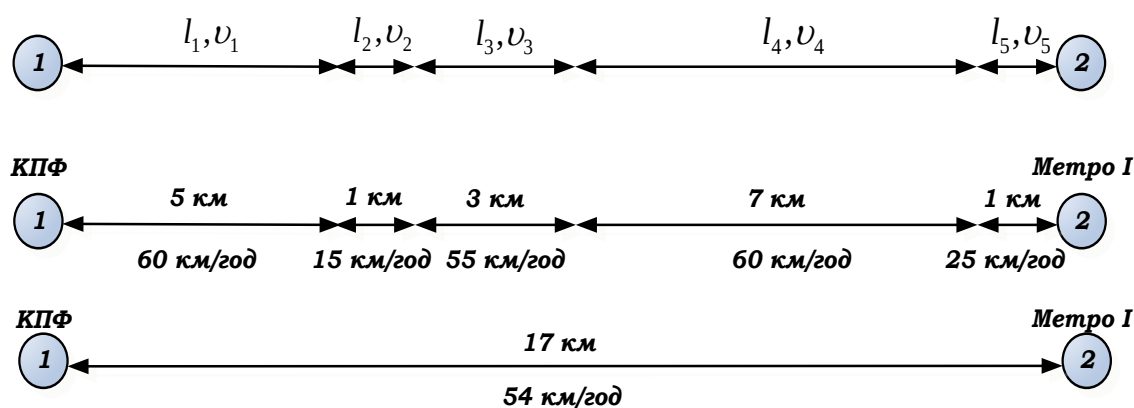


Рисунок 3.2 – Приклад визначення середніх швидкостей між двома точками графу

Як приклад, на рисунку 3.2 показано визначення середніх швидкостей між складом ТОВ «Птахофабрика Київська» та супермаркетом МЕТРОІ [190]. Тут шлях, що сполучає ці пункти, розбивається на п'ять ділянок різної довжини, на яких транспортний потік має різні значення швидкостей. При цьому треба зауважити, що середні значення швидкостей руху транспортних потоків вибирались реальними на основі даних, отриманих за допомогою інтернет-ресурсу www.google.com.ua/maps.

Оптимізація маршрутів руху транспортного засобу здійснюється в рамках задачі комівояжера. При цьому, параметрами оптимізації можуть бути довжина

маршруту, середня швидкість або середній час, вартість проїзду за маршрутом. Для зручності вважається, що місце виїзду та повернення транспортного засобу може відбуватись з будь-якого вузла графа.

Для вирішення задач маршрутизації, що мають умови реального стану динаміки транспортного потоку (виникнення заторів, ремонту доріг, аварійних ситуацій тощо) в класичний алгоритм мурашиної колонії вносяться такі зміни [191]:

1) синхронний, циклічний рух колонії замінюється на асинхронний рух кожної мурахи з певною швидкістю;

2) існує можливість фіксувати результати оптимізації частково пройденого шляху для розрахунку подальшого маршруту при зміні довжини ребер графу під час руху;

3) на відміну від (1.1), імовірісно-пропорційне правило, що визначає ймовірність переходу k -ої мурахи з вершини i у вершину j з урахуванням динаміки транспортного потоку на ділянці ij , формулюється наступним чином:

$$\begin{cases} P_{ij,k}(t) = \frac{\mu_{ij}[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in J_{i,k}} \mu_{il}(t) [\tau_{il}(t)]^\alpha [\eta_{il}(t)]^\beta}, j \in J_{i,k}, \\ P_{ij,k}(t) = 0, j \notin J_{i,k} \end{cases} \quad (3.1)$$

де μ_{ij} - функція завантаженості ділянки ВДМ між вузлами i та j , яка визначається наступним чином:

$$\mu_{ij} = \frac{a}{Z_{ij}}, \quad (3.2)$$

де a – нормуючий множник, Z_{ij} – коефіцієнт завантаженості ділянки ВДМ між вершинами i та j , який в свою чергу залежить від коефіцієнта швидкості руху транспортного потоку C_{ij} (відношення швидкостей $\vartheta_{ij\,nom}$ та $\vartheta_{ij\,fact}$). Тут $\vartheta_{ij\,nom}$ – номінальне (максимально припустиме без порушення правил дорожнього руху) значення швидкості руху транспортного потоку на ділянці ВДМ між точками i та j , км/год; $\vartheta_{ij\,fact}$ – фактичне значення швидкості руху транспортного потоку на ділянці ВДМ між точками i та j , км/год.

Використовуючи значення коефіцієнта швидкості руху транспортного потоку C_{ij} на ділянці ВДМ знаходимо відповідне значення Z_{ij} коефіцієнта завантаженості відповідної ділянки ВДМ, згідно [191]. Для цього попередньо виконуємо нормування значення коефіцієнта Z до значення Z_{norm} . Дані про відповідність значень коефіцієнта швидкості руху транспортного потоку до коефіцієнта завантаженості ділянки ВДМ наведено у [164].

Застосування такого модифікованого методу мурашиного алгоритму здійснюється при наступних припущеннях [191]:

- тип маршруту доставки вантажу - кільцевий, з поступовим розвезенням товару;
- на всіх ділянках ВДМ рух виділеного транспортного засобу здійснюється в рамках двосмугового двостороннього транспортного потоку;
- у кожній сукупності n_j ділянок ВДМ, що відповідає j -му ребру графу, завжди знайдуться альтернативні варіанти проїзду;
- будь-яка ділянка ВДМ між точками i та j є двонаправлено орієнтованою, тобто відстань між точками i та j дорівнює відстані між точками j та i $l_{ij} = l_{ji}$;
- вага вантажу, що перевозиться від виробника до кожного споживача (супермаркета) не враховується при оптимізації маршруту доставки;
- зміна середнього часу проїзду та середньої швидкості проїзду в основному залежать від змін режимів динаміки транспортного потоку, які не включають в себе зупинки або затримки через дії регулюючих сигналів світлофорів.

Оптимізація маршруту транспортних засобів на ВДМ зводиться до мінімізації маршруту вздовж ребер двонаправлено орієнтованого графу. При цьому довжини ребер відповідають часу проходження між вузлами мурашиних агентів. Відповідно, довжина маршруту по графу є мінімальний час t маршруту транспортного засобу на ВДМ.

$$t \rightarrow \min \quad (3.3)$$

Оскільки значення завантаженості на кожній ділянці дорожньо-транспортної мережі може змінюватись, то, відповідно, значення часу

проходження шляху відповідних ділянок ВДМ також є змінною величиною. Таким чином, при побудові оптимального за часом маршруту доставки вантажів враховується інформація про реальний стан ВДМ на момент побудови маршруту. При цьому, зрозуміло, що при деяких граничних значеннях швидкості руху транспортного потоку на певних ділянках ВДМ, що відповідають певним рівням завантаженості ділянок ВДМ, можлива перебудова оптимального за часом маршруту руху на ВДМ транспортного засобу для доставки товару у пункти призначення.

Запропонована модифікація мурашиного алгоритму дозволяє, на наш погляд, проводити імітаційні моделювання оптимізації маршруту в умовах реальної динаміки транспортних потоків на ВДМ (рух високої щільності, затори тощо), де мурашині агенти, як аналоги транспортних засобів, рухаються із відповідними швидкостями. У зв'язку з цим, застосування такої модифікації при проведенні оптимізації маршруту може призводити до врахування додаткових елементів інтелектуалізації, що пов'язані з виключенням з розгляду тих ділянок шляху, на яких час руху транспорту є за відповідним критерієм невиправдано великим.

На рис. 3.3 наведено блок-схему функціонування модифікованого мурашиного алгоритму. Тут m – кількість програмних агентів (мурах) у колонії, $life$ – час життя колонії, Tk – шлях k -того програмного агента, Lk – його довжина,

T^* – індивідуальний поточний маршрут, L^* – його довжина.

Перед початком запуску роботи алгоритму приймаються наступні умови [188,189]:

- кількість вершин графу дорівнює кількості мурах;
- кожна мураха починає свій шлях з іншої вершини;
- інтенсивність феромону, відкладеного на кожному ребрі до початку руху мурах однаковий;
- вибір першої вершини для кожної мурахи визначається за правилом «йди у найближчу»;
- кожен наступний крок переміщення мурах визначається за імовірнісним рівнянням.

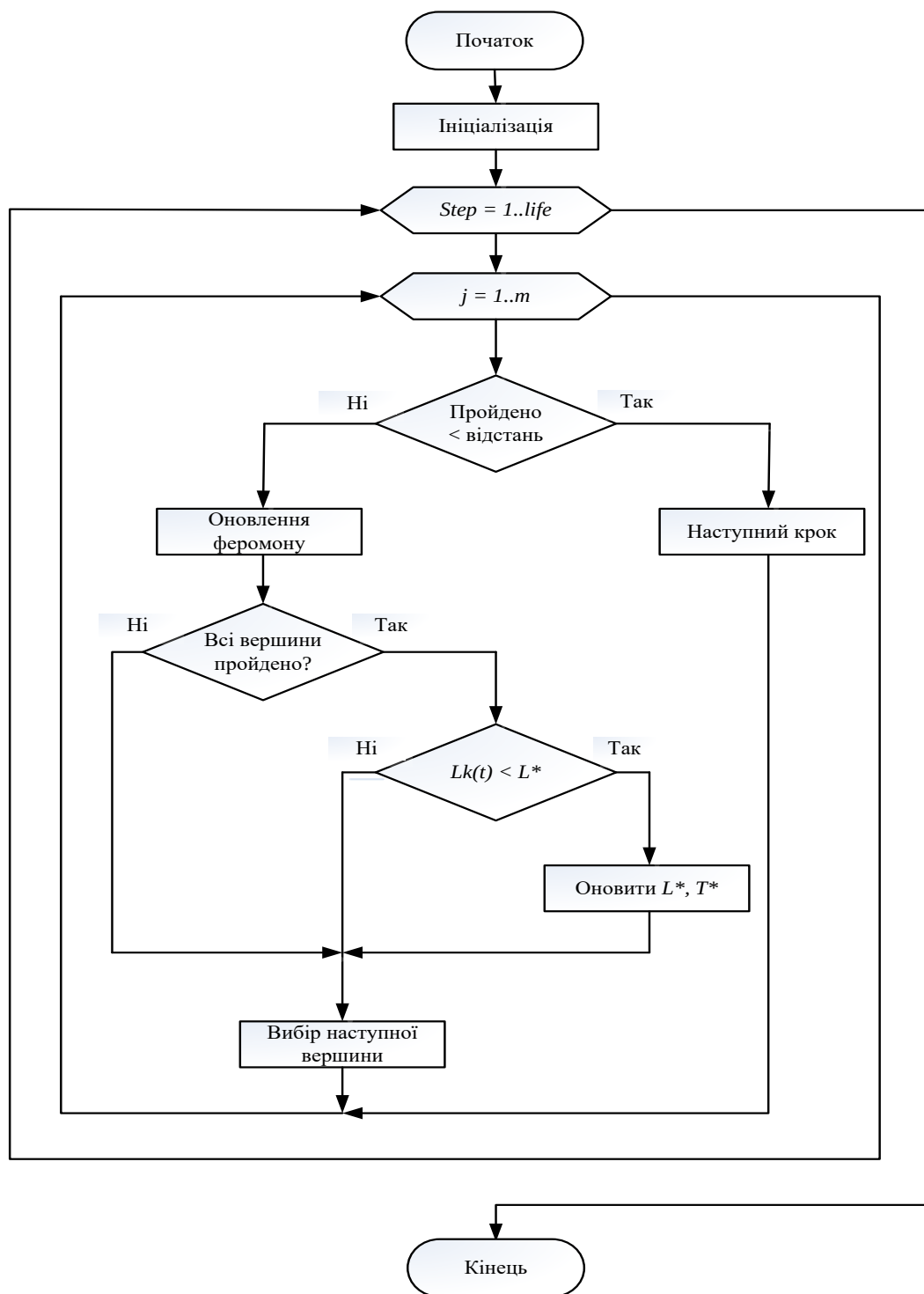


Рисунок 3.3 - Блок-схема функціонування модифікованого мурашиного алгоритму

Послідовність роботи алгоритму:

1. Введення (завантаження) матриці відстаней.
2. Ініціалізація параметрів алгоритму.
3. Ініціалізація ребер – присвоєння видимості і початкової концентрації феромону.

4. Розміщення програмних агентів у випадково обрані вершини без співпадінь.

5. Основний цикл життя колонії.

В даному циклі виконуються наступні дії:

- на основі введених даних будується оптимальний (найкоротший) маршрут;
- під час проходження раніше побудованого маршруту виникають ситуації, які впливають на подальше слідування саме по цьому маршруту. Тут мова йде про те, що при проходженні декількох вершин виникає реальна ситуація на дорозі (виникнення заторів, ремонту доріг, аварійних ситуацій тощо), яка не дає можливості далі слідувати по раніше побудованому маршруту. В таких ситуаціях виникає необхідність оперативно, враховуючи дану ситуацію на дорозі, перебудувати раніше створений маршрут. Причому перебудова маршруту відбувається лише тієї частини маршруту, яка залишилась не пройденою.

6. Виведення найкоротшого маршруту T^* та його довжини L^* .

Таблиця 3.1 – Порівняння тестових досліджень класичного та модифікованого мурашиного алгоритму [192]

Назва задачі	Кількість вершин	Найкраще відоме значення	Класичний мурашиний алгоритм		Модифікований мурашиний алгоритм		Відхилення, %
			Отримане значення	Час, сек	Отримане значення	Час, сек	
Oliver30	30	420	420	0,40	420	0,40	0
Eilon50	50	425	427,4	1,50	427,4	1,40	7
Eil51	51	426	428,1	1,70	426	1,50	12
Berlin52	52	7542	7542	2,10	7542	1,80	14
St70	70	675	679,1	3,90	679,1	3,30	15
Eilon75	75	535	547,4	4,50	541,2	3,80	16
Eil76	76	538	548,1	5,10	545,8	4,40	14
KroA100	100	21282	21445,3	10,60	21388,6	9,10	14
Eil101	101	629	646,4	13,10	633,2	11,10	15
Pr107	107	44303	44793,8	12,10	44428	10,20	16
Pr124	124	59030	59412,1	18,50	59122,5	15,50	16
Pr136	136	96772	99351,2	23,40	97541,3	19,70	16
Pr144	144	58537	58876,2	30,30	58712	25,60	16
Pr152	152	73682	74676,9	31,00	74231,5	26,10	16

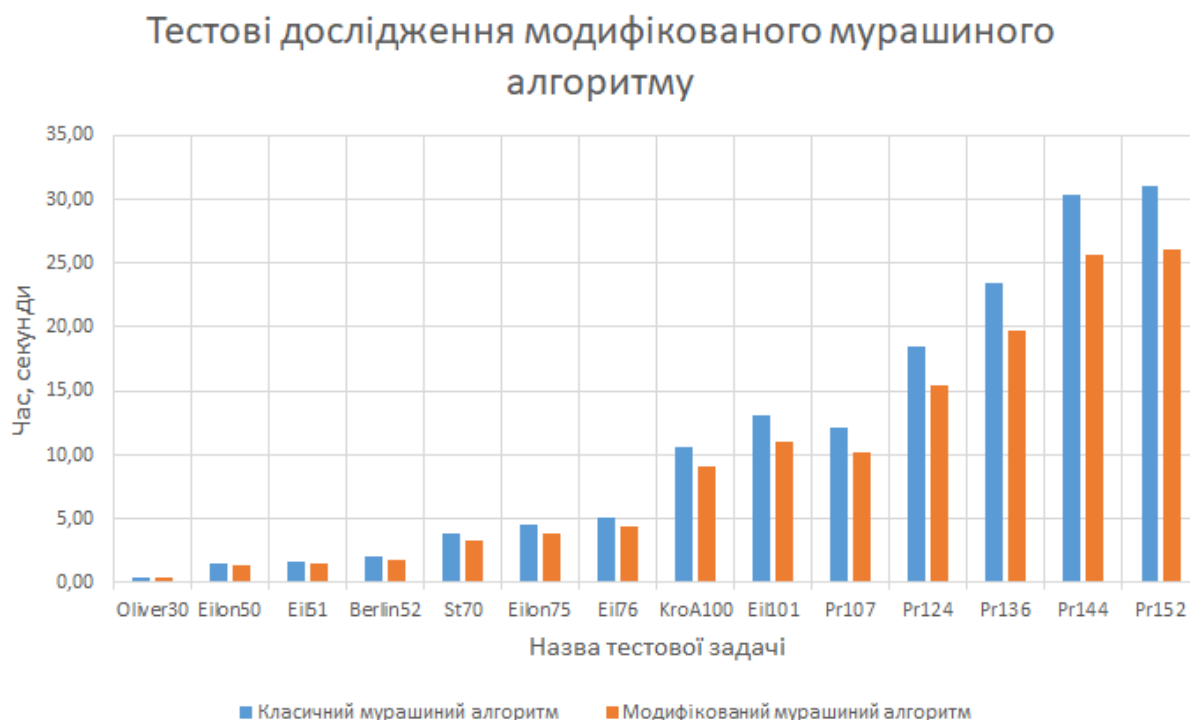


Рисунок 3.4 – Результати тестових досліджень витрат часу при знаходженні оптимального рішення класичним та модифікованим мурашиним алгоритмом

Відповідні тестові обчислення показали, що зміни, які були внесені в алгоритм, дозволили скоротити час пошуку оптимального рішення в середньому на 15% та збільшити точність обчислень.

3.2. Застосування модифікованого мурашиного алгоритму для оптимізації маршруту в статичній задачі комівояжера на прикладі ВДМ м. Києва

Ефективність процесу доставки вантажів залежить від багатьох факторів. Велика їх кількість суттєво ускладнює визначення в загальному вигляді критерію оптимальності. Більшість науковців за критерій оптимізації приймають мінімальні витрати [81,82], в інших випадках критерієм оптимізації є збільшення обсягів перевезень вантажів або розміру отриманого прибутку [83].

До основних критеріїв оптимізації згідно [81] відносять:

- мінімальні витрати на транспортування вантажу;
- час доставки вантажу;
- безпека та надійність доставки вантажу;

- мінімальні витрати, пов'язані із запасами в дорозі;
- потужність і доступність виду транспорту.

Як правило, визначальне значення при визначенні критерію оптимізації доставки вантажу має мінімізація витрат на транспортування вантажу. Окрім того, час доставки вантажу є також пріоритетним критерієм в процесі оптимізації. Критерій часу відіграє важливу роль при доставці вантажу у мережі супермаркетів, де для кожного постачальника вказуються часові рамки. Також, оскільки вантаж доставляється спеціальними транспортними засобами, що забезпечують певний температурний режим, то простої автомобілів (наприклад, в заторах, в черзі на завантаження/розвантаження вантажу та інше) призводять до збільшення загальних витрат на доставку вантажу. Тому в процесі оптимізації важливо врахувати не лише довжину маршруту доставки вантажу, а також і час його доставки.

Для проведення імітаційних досліджень запропонованої модифікації мурашиного алгоритму було обрано підприємство, що виробляє власну продукцію та здійснює її доставку до споживачів за допомогою власних транспортних засобів. Таким підприємством було визначено Товариство з обмеженою відповідальністю «Птахофабрика Київська». Основним видом діяльності підприємства є виробництво товарного яйця.

Пунктами доставки товару у нашому випадку було обрано мережу супермаркетів, що розташовані на території міста Києва. Згідно даних на сьогоднішній день мережа супермаркетів у місті Києві налічує 135 відділень (див. розд. 3.1).

Доставка товару дрібними партіями здійснюється за допомогою власних транспортних засобів від виробника ТОВ «Птахофабрика Київська» до споживачів, якими у нашому випадку виступають супермаркети.

Для апробації застосування модифікованого мурашиного алгоритму (див. розд.3.1) для оптимізації пошуку шляхів по графу в статичній задачі комівояжера будемо використовувати інформацію про доставку вантажів зі складу ТОВ «Птахофабрика Київська» до мережі супермаркетів в границях міста Києва.

Вихідними даними в цьому випадку у нас будуть відстані між всіма точками, а також значення швидкостей між ними. Це дасть можливість оптимізації маршрутів доставки вантажу за двома параметрами: часу та довжини. При цьому μ_{ij} в (3.2) у всіх випадках вибиралось рівними 1.

Також відомо, що при розрахунку витрат палива для транспортних засобів враховується велика кількість параметрів, що залежать від пройденого шляху. Тут при розрахунку використання палива ключову роль відіграє кілометраж. Проте для деяких видів товару головним є час його доставки. У таких випадках цільовою функцією є мінімізація відповідних витрат часу. Окрім того, зменшення часу роботи транспорту зменшує витрати палива. Також важливе значення відіграє реальна ситуація на дорогах (аварії, затори тощо), яка може суттєво впливати на швидкість переміщення транспорту, а значить і на час доставки товару. Отже, тут ми можемо сформулювати задачу щодо оптимізації пошуку відстаней по графу, де роль довжин ребер графу відіграє час проходження від одного вузла до іншого. При цьому для статичного графу параметр часу є незмінною величиною, яка залежить від швидкості руху транспортного потоку на певній ділянці в момент проведення оптимізації.

Для проведення порівняльного аналізу визначеної задачі у роботі використовувались реальні дані про місця розташування складів, транспортні засоби, відстані між цими об'єктами, а також середні швидкості. Алгоритм мурашиної колонії був застосований для пошуку найкоротшого шляху, а також для пошуку найшвидшого шляху при доставці товарів до покупців.

Матриця відстаней між складами та супермаркетами ТОВ «Птахофабрика Київська» наведені у таблиці 3.2.

Використовуючи отримані дані за допомогою інтернет-ресурсу www.google.com.ua/maps будувалась матриця середніх швидкостей між складом ТОВ «Птахофабрика Київська» та мережею супермаркетів, які наведені у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 - Матриця середніх швидкостей між складом ТОВ «Птахофабрика Київська» та супермаркетами мережі АТБ

	Птахофабрика	Метро І	Метро ІІ	Метро ІІІ	О'кей	Караван	Ашан	Край І	Край ІІ	Край ІІІ	Білла І	Білла ІІ	Білла ІІІ	Рейнфорд І	Рейнфорд ІІ
Птахофабрика	0	54	49	44	47	44	45	25	15	32	45	44	36	25	30
Метро І	54	0	38	55	51	52	53	48	46	55	58	58	51	44	40
Метро ІІ	49	38	0	49	56	38	45	58	38	36	39	42	45	56	45
Метро ІІІ	44	55	49	0	52	49	53	55	43	57	46	51	55	58	48
О'кей	47	51	56	52	0	55	58	50	41	43	43	51	47	59	58
Караван	44	52	38	49	55	0	42	49	47	57	45	52	56	45	51
Ашан	45	53	45	53	58	42	0	55	59	54	54	55	55	43	51
Край І	25	48	58	55	50	49	55	0	44	49	45	50	40	41	45
Край ІІ	15	46	38	43	41	47	59	44	0	53	54	43	51	56	57
Край ІІІ	32	55	36	57	43	57	54	49	53	0	45	45	47	52	53
Білла І	45	58	39	46	43	45	54	45	54	45	0	56	54	43	45
Білла ІІ	44	58	42	51	51	52	55	50	43	45	56	0	56	59	60
Білла ІІІ	36	51	45	55	47	56	55	40	51	47	54	56	0	33	45
Рейнфорд І	25	44	56	58	59	45	43	41	56	52	43	59	33	0	57
Рейнфорд ІІ	30	40	45	48	58	51	51	45	57	53	45	60	45	57	0

У випадку мінімізації часових витрат на доставку вантажу цільовою функцією буде мінімум витрат часу при проходженні визначеного маршруту (3.3). Тому, маючи дані про довжини шляхів, що сполучають склади підприємства, а також середні швидкості руху по цих ділянках, ми можемо побудувати відповідну матрицю часових витрат.

Визначення часових витрат виконано за наступною формулою:

$$t = \frac{l}{v} * 60, \quad (3.4)$$

де t - час, затрачений на проходження маршруту, хв.; l - довжина маршруту, км; v - середня швидкість руху транспортного засобу, км/год. Для більшої наочності час приведено у хвилинах.

У таблиці 3.5 наведено часові затрати між складом ТОВ «Птахофабрика Київська» та супермаркетами.

Таблиця 3.5 - Матриця часових затрат між складом ТОВ «Птахофабрика Київська» та супермаркетами

	Птахофабрика	Метро І	Метро ІІ	Метро ІІІ	О'кей	Караван	Ашан	Край І	Край ІІ	Край ІІІ	Білла І	Білла ІІ	Білла ІІІ	Рейнфорд І	Рейнфорд ІІ
Птахофабрика	0	19	20	38	22	31	25	60	60	60	21	46	25	60	60
Метро І	19	0	24	22	6	7	2	29	10	16	16	17	12	12	23
Метро ІІ	20	24	0	20	11	33	23	14	21	37	2	34	20	18	27
Метро ІІІ	38	22	20	0	29	26	20	2	39	6	21	9	33	13	10
О'кей	22	6	11	29	0	12	7	34	4	28	14	25	6	14	21
Караван	31	7	33	26	12	0	4	29	18	17	28	20	17	13	19
Ашан	25	2	23	20	7	4	0	23	10	14	19	15	13	10	15
Край І	60	29	14	2	34	29	23	0	42	9	19	11	48	22	12
Край ІІ	60	10	21	39	4	18	10	42	0	26	14	33	9	11	16
Край ІІІ	60	16	37	6	28	17	14	9	26	0	29	3	32	10	5
Білла І	21	16	2	21	14	28	19	19	14	29	0	26	11	22	28
Білла ІІ	46	17	34	9	25	20	15	11	33	3	26	0	27	7	3
Білла ІІІ	25	12	20	33	6	17	13	48	9	32	11	27	0	33	32
Рейнфорд І	60	12	18	13	14	13	10	22	11	10	22	7	33	0	6
Рейнфорд ІІ	60	23	27	10	21	19	15	12	16	5	28	3	32	6	0

У таблиці 3.6 наведені результати проведених нами тестових досліджень застосування модифікованого мурашиного алгоритму для розв'язку задачі комівояжера в рамках статичного графу щодо пошуку мінімальних витрат на доставку вантажу за критерієм відстаней та часів руху транспорту між вузлами, в залежності від загальної кількості вузлів.

Проведені тестові обчислення вказують на те, що при мінімізації відстані між об'єктами час обходу їх може бути досить великим. Як результат збільшуються витрати на доставку вантажу. Тому вважаємо доцільним здійснювати також пошук шляху за критерієм мінімізації часових витрат на доставку вантажу (див. табл.3.6). Слід відмітити, що при мінімізації часових витрат, довжина отриманого маршруту дещо більша за довжину маршруту при мінімізації самої довжини маршруту.

Таблиця 3.6 - Порівняльний аналіз пошуку мінімальних затрат при розв'язку задачі комівояжера для статичного графу

Мінімізація маршруту за часом				Мінімізація маршруту за довжиною		
К-сть вершин	Затрачений час, хв	Довжина, км	Маршрут	Затрачений час, хв	Довжина, км	Маршрут
5	90	74	5=>1=>3=>4=>2=>5	90	74	5=>1=>3=>4=>2=>5
7	99	81	6=>7=>4=>3=>1=>5=>2=>6	100	80	7=>2=>5=>1=>3=>4=>6=>7
10	101	87	3=>1=>5=>9=>2=>7=>6=>10=>4=>	135	82	9=>5=>2=>7=>6=>10=>4=>8=>
			=>8=>3			=>3=>1=>9
13	118	95	6=>2=>5=>9=>13=>1=>11=>3=>8=>	119	95	4=>12=>10=>6=>7=>2=>9=>5=>
			4=>10=>12=>7=>6			=>13=>1=>11=>3=>8=>4
15	133	127	1=>2=>7=>6=>13=>5=>9=>14=>15=>	140	108	10=>12=>14=>2=>6=>7=>9=>5=>
			10=>12=>8=>4=>11=>3=>1			13=>1=>11=>3=>4=>8=>15=>10

Таким чином, аналіз результатів розрахунків показує (див. табл.3.6), що в залежності від обраного параметра оптимізації, в загальному випадку для одних і тих самих початкових даних формуються відмінні за своїми характеристиками оптимальні маршрути доставки. Отже, це обумовлює, при прийнятті управлінського рішення щодо доставки вантажу до пунктів його призначення, необхідність коректного вибору параметра оптимізації, в залежності від поставленої мети (мінімальний час або мінімальний шлях доставки).

3.3. Метод оптимізації маршруту доставки вантажів з урахуванням нестационарної (реальної) динаміки ТП, що базується на модифікованому алгоритмі самоорганізації мурашиної колонії

Метод, що пропонується, базується на модифікованому алгоритмі самоорганізації мурашиної колонії, який представлено в підрозділі 3.1.

Для проведення процесу моделювання процесів оптимізації маршруту доставки товарів було обрано місто Київ. Такий вибір обумовлений декількома факторами:

- велика кількість торгових точок (покупців, магазинів тощо);
- наявність розгалуженої дорожньо-транспортної мережі;
- висока інтенсивність та щільність ТП на більшості ділянок ВДМ;
- висока ймовірність виникнення заторів на ділянках з великою щільністю ТП;
- наявність засобів фіксації ТП (камер відеоспостереження в режимі реального часу) та відкритий доступ до них;
- можливість порівнювати результати моделювання з експериментальними даними.

Було визначено 20 пунктів доставки вантажів, що розташовані у декількох районах міста Києва. Цими районами є Дарницький, Деснянський та Печерський райони. Інформацію про торгові точки та адреси їх розташування наведено у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 - Назви торгових пунктів та адреси їх розташування в м. Києві для обраного фрагменту ВДМ

№ п/п	Назва торгової точки	Адреса розташування
1	АТБ-Маркет	вул. Малишка, 25/1
2	Сільпо	Дарницький бул., 8А
3	Фуршет	вул. Братиславська, 14Б
4	АТБ-Маркет	вул. Шолом-Алейхема, 4
5	Бджілка	вул. Шолом-Алейхема, 10А
6	АТБ-Маркет	вул. Академіка Курчатова, 8а
7	АТБ-Маркет	вул. Шолом-Алейхема, 17
8	Фора	вул. Академіка Курчатова, 19
9	АТБ-Маркет	Лісовий проспект, 28
10	Сільпо	Лісовий проспект, 39
11	Novus	Броварський пр-кт, 17
12	Фора	Перова бул., 20
13	АТБ-Маркет	вул. Райдужна, 49
14	Фуршет	вул. Петра Вершигори, 1
15	Сільпо	вул. Райдужна, 8
16	Novus	бул. Дружби Народів, 16А
17	Сільпо	вул. М.Драгомирова, 16
18	FOZZY	пр-кт С.Бандери, 23
19	АШАН	пр-кт С.Бандери, 15-А
20	METRO	пр-кт С.Бандери, 26-В

Вважаємо, що послідовність проходження вказаних точок визначається часом їх обходу. Середній час руху на кожній ділянці мережі визначався згідно (3.4). Побудова оптимального маршруту обходу всіх 20 пунктів доставки з врахуванням реальної динаміки транспортних потоків в певний момент часу здійснювалась згідно методу, що описаний у підрозділі 3.1.

Вихідними даними для моделювання є відстані між пунктами та час руху транспортного потоку на кожній ділянці ВДМ, що отримано для вільного руху транспортних засобів на цих ділянках. При цьому швидкості на ділянках обрано максимальними, які відповідають значенням дорожніх знаків обмеження швидкості (50 км/год.). Ці дані наведені в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 - Початкові значення швидкості руху транспортних засобів та відстані між торговими точками на обраній ділянці ВДМ м. Києва

Точки між об'єктами		Значення швидкості між відповідними точками (км/год)																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Значення відстаней між відповідними точками (км)	1		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	2	1.3		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	3	2	3.3		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	4	2.3	1.8	0.95		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	5	2.9	2.3	1.5	0.6		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	6	2.7	2.3	1.5	1.8	3.1		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	7	3.8	3.2	2.4	1.5	1.9	2.3		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	8	4	3.4	2.5	1.6	2.6	1.2	1.2		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	9	4.2	3.9	2.9	2.1	2.7	1.7	1.3	1.3		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	10	4.9	4.8	3.5	2.5	2.9	2.2	1.6	1.5	0.55		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	11	2.5	2.8	5.5	5	6.2	5.7	5	5.5	6	6.6		50	50	50	50	50	50	50	50	50
	12	3.8	2.7	3.4	3.7	5	4.4	3.7	4.2	4.7	5.3	4.4		50	50	50	50	50	50	50	50
	13	5.1	4	4.7	5	6.3	4.3	5	5.1	4.6	5.2	5.8	1.4		50	50	50	50	50	50	50
	14	6.6	5.5	6.1	6.4	7.8	5.8	6.4	6.6	6.2	6.7	7.3	2.8	2.4		50	50	50	50	50	50
	15	5.9	4.8	5.5	5.8	7.1	5.2	5.8	5.9	5.1	6	6.6	2.2	1.5	1.1		50	50	50	50	50
	16	13	13.3	14.4	14.9	16.2	15.5	14.8	15.3	15.8	16.4	11.3	14.5	15.2	17.2	16.3		50	50	50	50
	17	10.7	11.1	11.9	12.3	13.7	13	12.3	12.8	13.3	13.9	8.4	12.2	12.9	15	14	1.3		50	50	50
	18	12.7	11.5	11.9	12.3	13.6	11	12.2	11.7	11.3	11.8	13.3	8.8	8.5	7.4	8	14.6	15.1		50	50
	19	13.2	12.5	12.5	12.8	14.1	11.5	12.8	12.3	11.9	12.4	13.8	9.4	9	7.9	8.6	15.2	15.6	0.55		50
	20	13.3	11.7	12.1	12.4	13.7	11.2	12.4	11.9	11.5	12	13.3	9	8.6	7.5	8.2	14.8	15.2	2.9	2.5	

Під головною діагоналлю – інформація про відстані між торговими точками;

Над головною діагоналлю – час проходження відповідної ділянки. Середня швидкість на кожній ділянці при вільному русі транспортних потоків становить 50 км/год та обмежується лише правилами дорожнього руху.

Критерієм оптимізації обрано час маршруту доставки вантажу до всіх обраних торгових пунктів. Використовуючи модифікований мурашиний алгоритм (дивись 3.1), було знайдено оптимальний за часом маршрут доставки вантажів для 20 торгових пунктів для вихідних даних моделювання. Цей оптимальний маршрут має наступний вигляд: 10 - 9 - 5 - 7 - 4 - 6 - 3 - 2 - 1 - 12 - 15 - 14 - 19 - 20 - 18 - 16 - 17 - 11 - 13 - 8 – 10 (нумерація торгових точок відповідає нумерації, наведеній в таблиці 3.7). В цьому випадку час доставки вантажів складає 86.2 хв, а довжина маршруту становить – 71.65 км.

Для проведення імітаційного моделювання процесів побудови оптимального маршруту в умовах, наближених до реального стану ВДМ, було обрано три ділянки ВДМ, на яких проводились експериментальні спостереження залежності щільності транспортного потоку від часу протягом доби. Це такі ділянки (дивись рисунок 3.5):

- Північний міст в обидва напрями (ділянка ВДМ 14 – 19);
- метро Дружби народів – міст Патона (ділянка ВДМ 17 – 11);
- перетин вулиці Братиславська та проспекту Лісовий в обидва напрями (ділянка ВДМ 13 – 8).

Обрання вказаних ділянок для модельного дослідження обумовлено тим, що вони входять до визначеного при вільному русі початкового оптимального маршруту, а також великою їх завантаженістю, частим виникненням транспортних заторів та ускладнень руху протягом доби, що призводить до суттєвого зменшення швидкості руху транспортних потоків на них.



а)

б)



в)

Рисунок 3.5 – Досліджувані ділянки ВДМ м. Києва: а) метро Дружби народів – міст Патона; б) Північний міст; в) вулиця Братиславська – проспект Лісовий

Кожна із обраних ділянок має певні особливості у своїх характеристиках. Так, ділянка ВДМ м. Києва метро Дружби народів – міст Патона в обидва напрями має по 3 смуги руху транспортних потоків та одну смугу руху громадського транспорту. Крім того, на вказаній ділянці передбачене світлофорне регулювання. На ділянці ВДМ Північний міст в обидва напрями передбачено по три смуги руху транспортних потоків та одна смуга для руху громадського транспорту в кожному напрямі. Додаткових обмежень на вказаній ділянці не встановлено, світлофорне регулювання відсутнє. Ділянка ВДМ на перетині вулиці Братиславська та проспекту Лісовий має по три смуги руху транспортних потоків автомобілів та одну смугу для руху громадського транспорту в кожному напрямі. На вказаній ділянці передбачене світлофорне регулювання.

Під час дослідження протягом 5 діб з інтервалом 1 хвилина відбувались щодобові спостереження за кількістю транспортних засобів, що заповнюють відповідні ділянки ВДМ в певні моменти часу доби. Отже, середні значення кількості автомобілів для певних моментів часу визначались за п'ятьма вимірюваннями. Отримані дані в подальшому використовувались для розрахунку таких показників транспортного потоку як середня інтенсивність та середня щільність. Далі згідно до (3.4) (дивись рис. 3.2) для певних моментів часу доби

визначались середні швидкості транспортних потоків в залежності від показників середньої щільності на вказаних ділянках ВДМ. Відносна похибка вимірювання для всіх зазначених показників не перевищувала 7% – 10%. На всіх інших ділянках ВДМ під час спостереження швидкості транспортних потоків вважались рівними 50 км/год.

Отримані залежності середньої щільності транспортних потоків від часу доби на досліджуваних ділянках ВДМ протягом доби, наведено на рисунках 3.6-3.8.

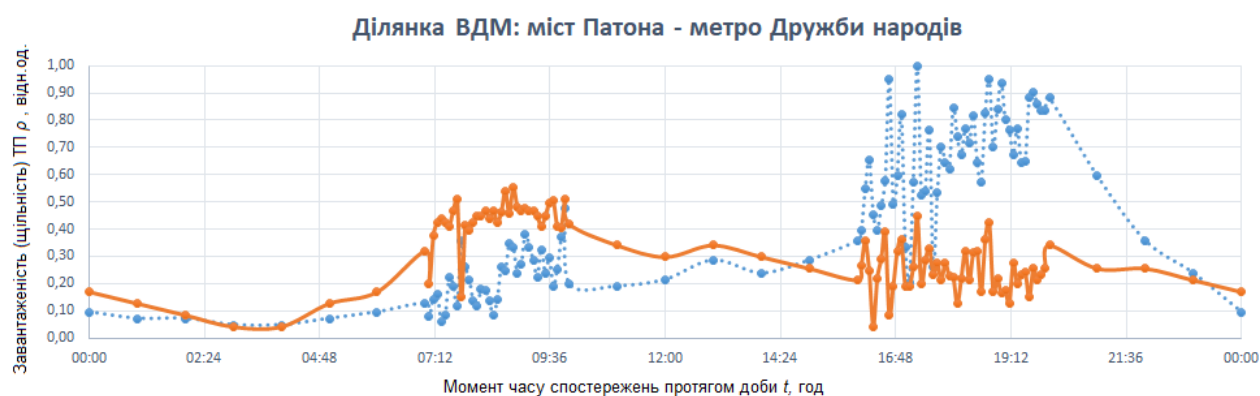


Рисунок 3.6 – Залежність середньої щільності транспортного потоку від часу доби на ділянці ВДМ проспект Дружби народів – міст Патона (синя крива відображає щільність в прямому напрямі, жовта – у зворотному)

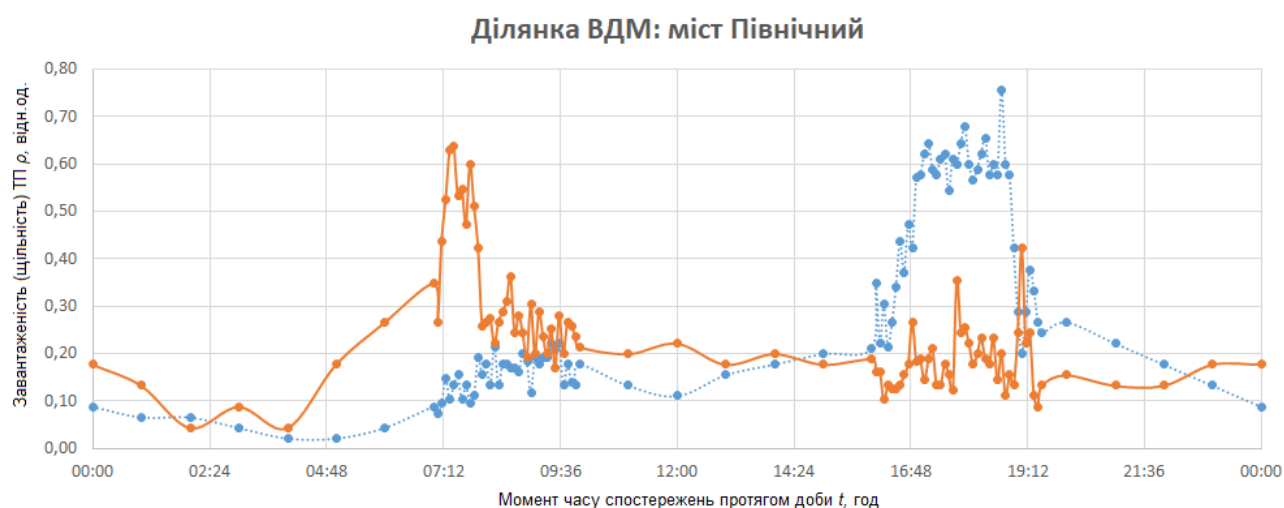


Рисунок 3.7 – Залежність середньої щільності транспортного потоку від часу доби на ділянці ВДМ міст Північний (синя крива відображає щільність в прямому напрямку від лівого берега, жовта – у зворотному)

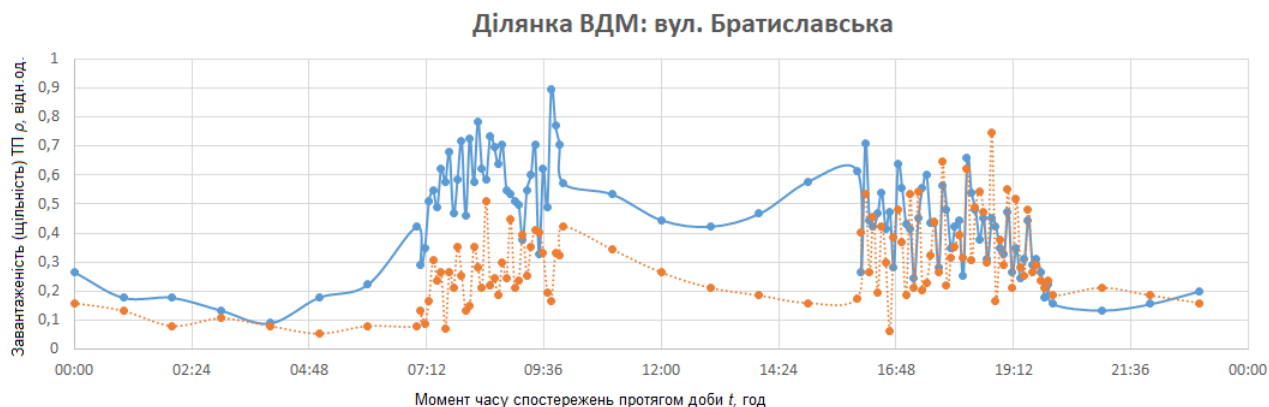


Рисунок 3.8 – Залежність середньої щільності транспортного потоку від часу доби на ділянці ВДМ вулиця Братиславська – проспект Лісовий.

Далі, на підставі отриманих даних середньої щільності транспортних потоків на досліджуваних ділянках ВДМ в певні моменти часу доби визначались відповідні швидкості транспортних потоків на цих ділянках згідно з (3.4) (дивись рис. 2.2).

Це дозволило за допомогою модифікованого мурашиного алгоритму (дивись розділ 3.1) провести імітаційні моделювання в режимі реального часу процесів побудови оптимального маршруту доставки товарів у торгові точки на визначеному фрагменті ВДМ міста Києва з урахуванням реальної динаміки транспортних потоків на трьох виділених модельних ділянках ВДМ протягом доби спостереження. При цьому, на цих ділянках швидкість змінювалась в діапазоні від 3 км/год до 50 км/год в залежності від величини щільності транспортного потоку на них. На всіх інших ділянках фрагменту ВДМ швидкість залишалась сталою і дорівнювала 50 км/год.

При проведенні моделювання було виявлено низку ефектів (дивись таблицю 3.9). Ці ефекти пов'язані з перебудовою оптимальних маршрутів при зменшенні середніх швидкостей руху транспортних засобів на модельних ділянках ВДМ до певних граничних значень, які відповідають певним режимам руху транспортних потоків.

Так, протягом доби в діапазонах від 00:00 до 07:05; від 08:50 до 09:15; від 10:00 до 17:10; 17:20; від 22:00 до 24:00 щільність транспортних потоків на досліджуваних ділянках менше 0.6, що відповідає вільному руху транспортного потоку. Оптимальний маршрут при цьому має вигляд: 10 - 9 - 5 - 7 - 4 - 6 - 3 - 2 - 1

- 12 - 15 - 14 - 19 - 20 - 18 - 16 - 17 - 11 - 13 - 8 – 10, час проходження маршруту 86.2 хв, а його довжина – 71.65 км. Отримані параметри для цих станів ВДМ, що зрозуміло, повністю збігаються з вихідними даними, наведеними вище. Такий же оптимальний маршрут ми спостерігаємо і о 07:10 та 21:00, хоча тут на ділянці 17 – 11 (метро Дружби народів – міст Патона) автомобілі рухаються у синхронізованому режимі (дивись таблицю 3). Це призводить тільки до певного збільшення часу маршруту (87.8 min) за рахунок зменшення швидкості на цій ділянці до 43 км/год.

Принципово змінюється ситуація в інші інтервали доби. Тут інтенсивність руху на певних модельних ділянках досліджуваної ВДМ суттєво збільшується. В деяких випадках рух транспортних потоків здійснюється не тільки у синхронізованому режимі, але й в режимі руху широкого кластера, виникнення затору (дивись рис.2.2). Це призводить до суттєвого зменшення швидкості на цих ділянках ВДМ і, відповідно, до перебудови конфігурації оптимального маршруту загалом. При цьому, з нових конфігурацій оптимального маршруту вилучаються деякі або всі модельні ділянки ВДМ: 14-19 (Північний міст), 17-11 (метро Дружби народів – міст Патона), 13 – 8 (перетин вулиці Братиславська та проспекту Лісовий) (дивись таблицю 3).

Так, наприклад, в інтервалі часу від 09:30 до 09:40 щільність транспортного потоку на ділянці 13 – 8 ВДМ стає більшою за 0.7, що відповідає режиму руху широкого кластера на цій ділянці, при вільному русі автомобілів на інших ділянках ВДМ (дивись таблицю 3.9). Розрахунки згідно запропонованого методу (дивись розділ 3.1) показують, що тут відбувається перебудова оптимального маршруту доставки товару так, що з нього вилучаються дві модельні ділянки ВДМ 14-19 та 13-8. У наступний проміжок часу спостереження від 09:45 до 09:55 щільність транспортного потоку на ділянці 13 – 8 продовжує збільшуватись, наближаючи стан транспортного потоку на цій ділянці до затору. Це призводить до перебудови оптимального маршруту, з якого вилучаються всі три модельні ділянки 14-19, 13-8 та 17-11 (дивись таблицю 3.9). При цьому оптимальний маршрут має таку конфігурацію – 8 - 2 - 4 - 10 - 7 - 5 - 12 - 13 - 15 - 14 - 18 - 19 - 20 - 16 - 17 - 9 - 11 - 1 - 3 - 6 – 8; час проходження оптимального маршруту – 88.1хв, довжина оптимального маршруту – 73.25 км. Аналогічна ситуація має

місце в інші проміжки часу спостереження за динамікою транспортного потоку на ВДМ міста Києва (дивись таблицю 3.9).

Таблиця 3.9 – Результати імітаційного моделювання процесів побудови оптимального маршруту доставки товарів в залежності від реальної динаміки транспортних потоків на ділянках ВДМ м. Києва

Час доби, год	14-19		17-11		13-8		Маршрут	Час маршруту, хв	Довжина маршруту, км
	v , км/год	ρ , відн.од.	v , км/год	ρ , відн.од.	v , км/год	ρ , відн.од.			
00:00-07:05	50	<0.6	50	<0.6	50	<0.6	10 - 9 - 5 - 7 - 4 - 6 - 3 - 2 - 1 - 12 - 15 - 14 - 19 - 20 - 18 - 16 - 17 - 11 - 13 - 8 - 10	86.2	71.65
07:10	50	0.6	43*	0.66	50	0.5	10 - 9 - 5 - 7 - 4 - 6 - 3 - 2 - 1 - 12 - 15 - 14 - 19 - 20 - 18 - 16 - 17 - 11 - 13 - 8 - 10	87.8	71.65
07:15	30	0.67	23	0.68	50	0.63	3 - 6 - 9 - 7 - 10 - 12 - 13 - 15 - 14 - 2 - 5 - 1 - 11 - 16 - 17 - 18 - 19 - 20 - 8 - 4 - 3	88.7	73.8
07:20-08:05	18	>0.69	13	>0.7	13	>0.7	13 - 6 - 10 - 5 - 4 - 3 - 8 - 9 - 7 - 2 - 11 - 12 - 14 - 15 - 20 - 18 - 19 - 16 - 17 - 1 - 13	89.2	74.3
08:10-08:45	50	<0.6	50	<0.6	13	>0.7	8 - 2 - 4 - 10 - 7 - 5 - 12 - 13 - 15 - 14 - 18 - 19 - 20 - 16 - 17 - 9 - 11 - 1 - 3 - 6 - 8	88.1	73.25
08:50-09:15	50	<0.6	50	<0.6	50	<0.6	10 - 9 - 5 - 7 - 4 - 6 - 3 - 2 - 1 - 12 - 15 - 14 - 19 - 20 - 18 - 16 - 17 - 11 - 13 - 8 - 10	86.2	71.65
09:20	50	<0.6	50	<0.6	23	0.68	1 - 2 - 5 - 7 - 13 - 12 - 14 - 4 - 8 - 6 - 3 - 9 - 10 - 15 - 20 - 19 - 18 - 16 - 17 - 11 - 1	87.7	72.9
09:25	50	<0.6	50	<0.6	3	0.79	8 - 2 - 4 - 10 - 7 - 5 - 12 - 13 - 15 - 14 - 18 - 19 - 20 - 16 - 17 - 9 - 11 - 1 - 3 - 6 - 8	88.1	73.25
09:30-09:40	50	<0.6	50	<0.6	15	>0.7	1 - 2 - 5 - 7 - 13 - 12 - 14 - 4 - 8 - 6 - 3 - 9 - 10 - 15 - 20 - 19 - 18 - 16 - 17 - 11 - 1	87.7	72.9

09:45-09:55	50	<0.6	50	<0.6	3	0.8	8 - 2 - 4 - 10 - 7 - 5 - 12 - 13 - 15 - 14 - 18 - 19 - 20 - 16 - 17 - 9 - 11 - 1 - 3 - 6 - 8	88.1	73.25
10:00-17:10	50	<0.6	50	<0.6	50	<0.6	10 - 9 - 5 - 7 - 4 - 6 - 3 - 2 - 1 - 12 - 15 - 14 - 19 - 20 - 18 - 16 - 17 - 11 - 13 - 8 - 10	86.2	71.65
17:15	50	<0.6	3	0.9	50	<0.6	8 - 2 - 4 - 10 - 7 - 5 - 12 - 13 - 15 - 14 - 18 - 19 - 20 - 16 - 17 - 9 - 11 - 1 - 3 - 6 - 8	88.1	73.25
17:20	50	<0.6	50	<0.6	50	<0.6	10 - 9 - 5 - 7 - 4 - 6 - 3 - 2 - 1 - 12 - 15 - 14 - 19 - 20 - 18 - 16 - 17 - 11 - 13 - 8 - 10	86.2	71.65
17:25	50	<0.6	50	<0.6	3	0.79	8 - 2 - 4 - 10 - 7 - 5 - 12 - 13 - 15 - 14 - 18 - 19 - 20 - 16 - 17 - 9 - 11 - 1 - 3 - 6 - 8	88.1	73.25
17:30-20:00	50	<0.6	3	<0.73	50	<0.6	8 - 2 - 4 - 10 - 7 - 5 - 12 - 13 - 15 - 14 - 18 - 19 - 20 - 16 - 17 - 9 - 11 - 1 - 3 - 6 - 8	88.1	73.25
21:00	50	<0.6	43	0.66	50	<0.6	10 - 9 - 5 - 7 - 4 - 6 - 3 - 2 - 1 - 12 - 15 - 14 - 19 - 20 - 18 - 16 - 17 - 11 - 13 - 8 - 10	87.8	71.65
22:00-24:00	50	<0.6	50	<0.6	50	<0.6	10 - 9 - 5 - 7 - 4 - 6 - 3 - 2 - 1 - 12 - 15 - 14 - 19 - 20 - 18 - 16 - 17 - 11 - 13 - 8 - 10	86.2	71.65

**Сірим фоном відмічені значення швидкості v та щільності транспортного потоку на модельних ділянках ВДМ, які відповідають щільному стану завантаженості транспортної мережі*

Динаміку зміни часу та довжини проходження оптимального маршруту протягом доби наведено відповідно на рис. 3.9 та рис. 3.10.



Рисунок 3.9 – Динаміка зміни часу проходження оптимального маршруту протягом доби



Рисунок 3.10 – Динаміка зміни довжини оптимального маршруту протягом доби

Крім того, в [191] представлено застосування методу, що базується на використанні модифікованого мурашиного алгоритму, для побудови оптимальних маршрутів доставки дрібнопартійних вантажів на вулично-дорожній мережі (ВДМ), що характеризується наявністю ділянок підвищеної крутизни, звивистості, обмеженою видимістю та високою аварійністю. Проведені тестові дослідження виконувались на базі ВДМ міста Кіто, що є столицею Еквадору. Отримані результати дослідження вказують на перспективність застосування запропонованого методу для знаходження оптимальних маршрутів доставки

дрібнопартійних вантажів, з урахуванням специфіки ВДМ міста, в межах якого здійснюються перевезення.

Отже, проведений аналіз результатів імітаційних досліджень, дає підстави вважати, що запропонований синергетичний підхід дозволяє достатньо адекватно здійснювати оптимізацію маршрутів доставки вантажу в режимі реального часу в умовах нестаціонарної динаміки транспортних потоків на ВДМ великих міст. У майбутньому він може знайти своє застосування в інтелектуальних транспортних системах (ІТС), наприклад, при вирішенні задач динамічної маршрутизації транспортних засобів з прогнозуванням трафіку [193]. В [193] основна ідея алгоритму полягає у використанні в режимі реального часу інформації про трафік, а також прогнозованої інформації про дорожній рух, яку надає центральний контролер маршрутизації. У нашому випадку у реальному часі необхідно використовувати інформацію про щільність транспортного потоку на ділянках ВДМ. Ця інформація може бути отримана при використанні бортового обладнання зв'язку транспортного засобу з іншими транспортними засобами та інфраструктурою транспортних систем (V2V, V2I або I2V). Далі, на підставі отриманої в певні моменти часу реальної інформації про трафік в рамках синергетичної підходу щодо опису динаміки транспортного потоку, який розроблено в цій роботі (дивись розділи 3.1 та 3.3), проводяться імітаційні моделювання альтернативних маршрутів, з яких визначаються найбільш оптимальні. Відповідно, отримана інформація про оптимальні маршрути в залежності від вихідних умов трафіку в певні моменти часу надається користувачу центральним контролером маршрутизації.

Тоді, подальша стратегія дослідження повинна бути спрямована на удосконалення цього методу, який дозволяв би враховувати вплив миттєвих значень фактичних параметрів динаміки транспортних потоків на ділянках ВДМ, світлофорного регулювання, тощо, на процеси оптимізації маршрутів доставки товарів.

Отримані таким чином результати можуть бути використані для удосконалення існуючих інтелектуальних транспортних систем і технологій

управління дорожнім рухом на ВДМ великих міст.

Висновки до розділу 3

1. З метою зменшення витрат часу на визначення оптимальних маршрутів доставки, а також урахування реальної динаміки транспортного потоку на ВДМ (зміна швидкості руху, затори тощо) розроблено модифікацію класичного мурашиного алгоритму. Для цього циклічний рух колонії замінено на асинхронний рух кожного мурашиного агента із певною (не обов'язково однаковою) швидкістю. Крім того, в запропонованій модифікації існує можливість фіксації частково пройденого шляху для розрахунку подальшого маршруту при зміні швидкості мурах, як аналогів транспортних засобів, під час руху. Також внесено зміни у ймовірнісно-пропорційне правило визначення ймовірності переходу між містами i та j мурашиного алгоритму. Для цього в класичний мурашиний алгоритм введено функцію μ_{ij} , що залежить від завантаженості ділянок ВДМ.

Відповідні тестові обчислення показали, що зміни, які були внесені в алгоритм, дозволили скоротити час пошуку оптимального рішення в середньому на 15% та збільшити точність обчислень.

Крім того, проведено кількісний порівняльний аналіз результатів розв'язку задачі комівояжера за допомогою мурашиного алгоритму та інших відомих методів, а саме, методу повного перебору та методу гілок та меж. Отримані результати вказують на ефективність застосування мурашиного алгоритму для вирішення задач маршрутизації в рамках задачі комівояжера. Так, для знаходження оптимального маршруту доставки товару для задач невеликої розмірності (до 15 вершин), використані методи дають подібні результати. Окрім того, отримані результати вказують на перспективність застосування мурашиного алгоритму до розв'язку задач транспортної логістики, що мають велику розмірність вхідних даних. При цьому, визначено дослідним шляхом, що найбільш коректні результати застосування мурашиного алгоритму можна отримати при наступних значеннях його параметрів: $\alpha = 1, \beta = 5, \rho = 0,67$.

Запропонована модифікація мурашиного алгоритму має універсальний характер і може знайти своє застосування для вирішення задач дискретної оптимізації маршрутів інформаційних потоків різної природи з урахуванням впливу зовнішнього нестационарного середовища на швидкість передачі інформації по ланцюгах інформаційної мережі.

2. За допомогою розробленого методу дискретної оптимізації маршрут, що базується на використанні запропонованої модифікації мурашиного алгоритму, проведені імітаційні моделювання з оптимізації за часом маршруту в умовах, наближених до реальної динаміки транспортних потоків на ВДМ м. Києва. В рамках зазначеної моделі представлення мережі, що містить 10 пунктів доставки вантажу, враховувались одночасні зміни середніх швидкостей транспортних потоків та, відповідно завантаженість на декількох (трьох) ділянках ВДМ.

3. Отримано результати, які можуть бути використані при удосконаленні існуючих інтелектуальних транспортних систем і технологій управління дорожнім рухом на ВДМ мегаполісів. Особливо в тих питаннях, що стосуються впливу миттєвих значень фактичних параметрів динаміки транспортних потоків на ділянках ВДМ, світлофорного регулювання тощо.

Результати досліджень даного розділу викладено у публікаціях [188-191].

РОЗДІЛ 4. МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО РОЗТАШУВАННЯ РОЗПОДІЛЬЧИХ ОБ'ЄКТІВ НА ТРАНСПОРТНІЙ МЕРЕЖІ

4.1. Метод оптимізації розташування розподільчих об'єктів (складів), що базується на методі планування променевої терапії злоякісних новоутворень

4.1.1. Математичний алгоритм методу планування променевої терапії злоякісних новоутворень

Нехай G – обмежена область обслуговування в k -мірному просторі R , точки якої позначаються x . Позначимо через $\tau_i = (\tau_i^1, \dots, \tau_i^n) \in G, i = \overline{1, N}$, джерела впливу на середовище, які необхідно розмістити. Нехай вплив кожного i -го джерела в точці $x \in G$ описується функцією $d_i(r_i) = d_i(\|x - \tau_i\|), i = \overline{1, N}$, де $\|\cdot\|$ евклідова норма. Сукупний ефект дії всіх джерел $\tau_i, i = \overline{1, N}$ в точці $x \in G$ утворює поле дії $D(\tau, x)$, що описується функцією [70]:

$$D(\tau, x) = \sum_{i=1}^N d_i(\|x - \tau_i\|). \quad (4.1)$$

Необхідно розмістити на обмеженій області G джерела $\tau_i, i = \overline{1, N}$ таким чином, щоб максимально мінімізувати рівень поля $D(\tau, x)$ на даній області G . Іншими словами, необхідно так розмістити джерела, щоб поле на всій області G було якомога більш однорідним. Математично дана вимога записується наступним чином:

$$\min_{x \in G} D(\tau, x) \rightarrow \max_{\tau \in G^N}. \quad (4.2)$$

На відміну від моделі в [70], де функцією впливу джерела $d_i(r_i)$ було обрано степеневу функцію $d_i(r_i) = \frac{1}{r_i^\theta}$ при $\theta=2$, згідно роботи [71] пропонується розглядати наступну функцію

$$d_i(r_i) = Q_i \exp(-\alpha_i \cdot r_i), \quad (4.3)$$

де Q_i – інтенсивність (потужність) i -го джерела; $\alpha_i > 0$ – параметр функції, що показує, наскільки «широка» дія відповідного джерела τ_i (підбирається експериментально); $r_i = \|x - \tau_i\|, i = \overline{1, N}$. Вибір виду функції впливу джерел оснований на наступних міркуваннях. Степеневі функції виду $d(r) = \frac{1}{r^\theta}, \theta > 0$, що

задовольняють умові $d_i(+0)=\infty$ наділені неприємною, з обчислювальної точки зору, особливістю, що потребує вилучення цих точок при обчисленні значення функції (4.1), реалізуючи алгоритм вирішення задачі. Це значно ускладнює або робить майже неможливим застосування до вирішення поставленої задачі максимізації числових методів, які добре зарекомендували себе навіть при вирішенні задач недиференційованої оптимізації, збіжність яких теоретично доведена. Функція виду (4.3) позбавлена такого недоліку.

4.1.2. Математичний опис методу оптимізації розташування розподільчих об'єктів (складів), що базується на методі планування променевої терапії злоякісних новоутворень

Нехай на обмеженій області обслуговування G маємо обмежену n множину пунктів доставки (складів) $(A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n)$, в яких розміщено однорідний вантаж в обсягах $a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n$ одиниць. Загальна місткість n складів a складає

$$a = \sum_{i=1}^n a_i. \quad (4.4)$$

З іншого боку маємо на обмеженій області обслуговування G обмежену m множину споживачів (супермаркетів) $(B_1, B_2, \dots, B_j, \dots, B_m)$ з обсягами попиту відповідно $b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_m$ одиниць. Тоді загальний обсяг попиту на товари складає

$$b = \sum_{j=1}^m b_j. \quad (4.5)$$

Вважаємо, що можливе транспортування з кожного пункту постачання до кожного пункту споживання. Позначимо через C_{ij} сумарні транспортні витрати, які пов'язані з доставкою вантажу від пункту доставки A_i до споживачів B_j ($i=1, n$; $j=1, m$). Вплив кожного i -го складу в точці $x \in G$ описується функцією (4.3).

При цьому, кожен склад характеризується місцем розташування з координатами $(x_i; y_i)$ та відстанями до кожного споживача (супермаркету), а також максимальною місткістю (кількість вантажу, яку можна зберігати на даному об'єкті). Кожен покупець характеризується місцем розташування з координатами $(x_j; y_j)$, відстанями до кожного з постачальників, а також розміром попиту (об'ємом товару для постачання). Задача полягає в тому, щоб для заданої

кількості покупців розмістити склади таким чином, щоб вони були розташовані оптимально до вказаних постачальників (тобто максимально близько до споживачів). Це означає, що необхідно з існуючих складів $(A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n)$ обрати ті, сумарні транспортні витрати C_{ij} яких при доставці товару до всіх споживачів були б мінімальними.

Спочатку для існуючих n складів визначаємо той, що оптимально (максимально близько) розташований до всіх споживачів. При цьому будемо припускати, що знайдений склад має таку місткість, що повністю задовольняє всі потреби споживачів. У розрахунку використовується такий показник як Q_i – інтенсивність (потужність) i -го джерела (див. 4.1.1). У нашому випадку величина цього показника вибиралась як величина, що обернено пропорційна до величини виконаної роботи при перевезенні вантажу з певного складу до споживачів. Розмір виконаної транспортної роботи W визначався за формулою

$$W = G_{\text{ван}} \times S_{\text{ван}}, \quad (4.6)$$

де $G_{\text{ван}}$ – вага вантажу, т; $S_{\text{ван}}$ – пробіг з вантажем, км.

Параметр функції α_i , що показує, наскільки широка дія відповідного джерела t_i , підбирається експериментально. Для нашого випадку визначено, що $\alpha_i = 0.2$.

Отже, використовуючи для вирішення оптимізаційної задачі алгоритм (4.1) – (4.6) можна знайти оптимальне розташування того складу, який повністю задовольняє потреби всіх споживачів. Нехай це буде склад A_t , місткість якого становить a_t одиниць товару.

Проте відомо, що при плануванні розташування складів для задоволення потреб споживачів у мегаполісі, часто виникає ситуація, коли місткість одного складу не дає змоги повністю задовольнити потреби всіх споживачів (супермаркетів) на обмеженій області обслуговування.

Тоді розглянемо випадок, коли місткість знайденого складу A_t не задовольняє загальний попит на товар обсягом b . В якості критерію, за яким будемо виявляти споживачів, що будуть обслуговуватись визначеним оптимальним складом A_t , вибираємо мінімальну відстань між відповідними об'єктами. Таким чином, цей склад буде обслуговувати тільки тих споживачів, які знаходяться на мінімальній відстані від нього, і загальна місткість якого a_t не перевищує загальної потреби цих споживачів.

Нехай цей склад A_t за зазначеним критерієм повністю задовольняє потребу у товарі k споживачів з множини $\{B_m\}$ із загальною величиною

$$Y = \sum_{l=1}^k y_l \quad (4.7)$$

де $(y_1, y_2, \dots, y_k)$ – індивідуальні потреби k споживачів. При цьому

$$a_t = Y, \quad k < m \quad (4.8)$$

Оскільки знайдений оптимальний склад A_t із своєю місткістю a_t задовольняє умові (4.8), то виникає необхідність знаходження додаткового складу для задоволення потреб інших споживачів. Знов за алгоритмом (4.1) – (4.6) знаходиться наступний оптимальний склад для доставки товару споживачам. При цьому вже розглядається множина $\{A_{n-1}\}$, в якій не враховується склад A_t з місткістю a_t , а також множина $\{B_{m-k}\}$, в якій вже не враховуються k споживачів з потребою Y згідно (4.7).

Якщо, в результаті оптимізації, знайдений наступний склад задовольняє відповідній умові згідно (4.8), то процедура (4.1) – (4.6) повторюється до тих пір, поки не буде знайдена така кількість оптимальних складів S із загальною місткістю Y_S , що задовольняє умові $Y_S = b$.

4.1.3. Вирішення задачі оптимального розташування розподільчих об'єктів (складів) на ВДМ на прикладі м. Києва

Оскільки особливої актуальності останнім часом набуває проблема оптимізації автомобільних перевезень дрібнопартійних вантажів в мегаполісах, то найбільш репрезентативним варіантом таких перевезень вважаємо доставку харчової продукції нетривалого терміну придатності від виробника до споживачів (супермаркетів). Проблема автомобільних перевезень дрібнопартійних вантажів характерна для великих густонаселених міст, які в свою чергу характеризуються високою завантаженістю транспортних мереж, великою щільністю транспортного потоку та великою кількістю споживачів (супермаркетів). В якості репрезентативного об'єкта для розв'язку зазначеної задачі оптимізації за допомогою запропонованого методу (розділ 3) була вибрана ділянка території міста Києва [194,195], яка наведена на рис. 4.1.

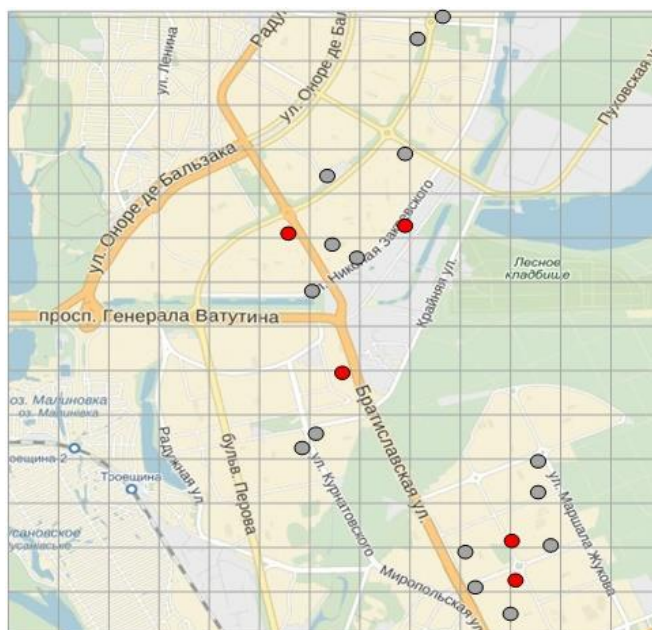


Рисунок 4.1 - Схема розташування складів та супермаркетів на карті м. Києва

Як видно з рис. 4.1, на певній ділянці міста Києва маємо мережу супермаркетів (покупців), які є споживачами з певним об'ємом потреб у товарі. Крім того, на вказаній ділянці розміщені склади постачальника з певним об'ємом місць для складування товарів, а також основний склад виробника, що розташований на території підприємства. Оскільки до складу нашої системи входить основний склад виробника, розподільчі центри та кінцеві споживачі (супермаркети), то можемо говорити про класичну модель логістичної системи. Схематичне зображення моделі логістичної системи наведено на рис. 4.2.

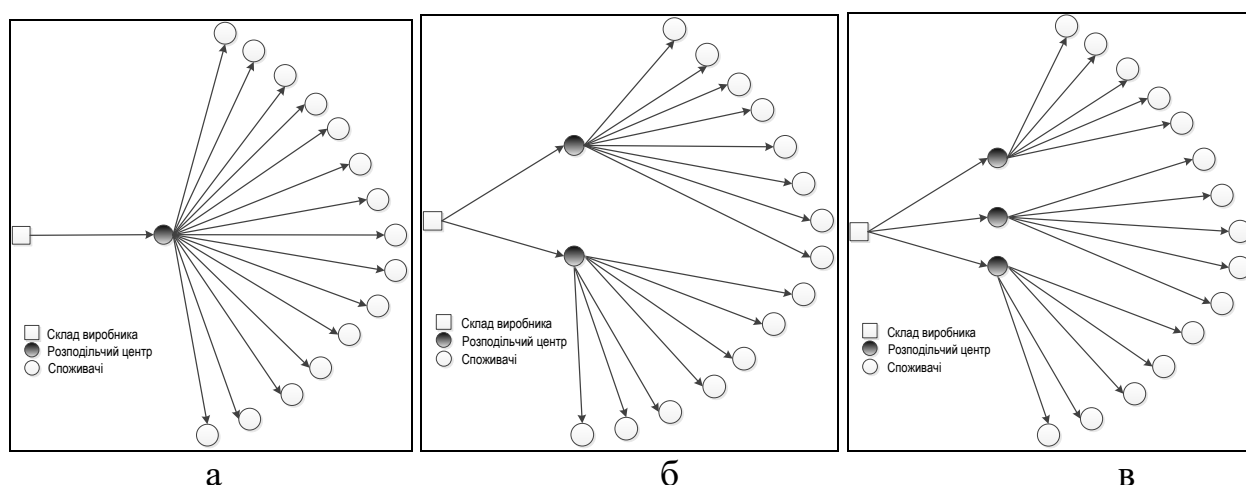


Рисунок - 4.2. Фізична модель розподільчої системи постачать продукції: а) з одним розподільчим центром; б) з двома розподільчими центрами; в) з трьома розподільчими центрами.

Нехай в якості вихідних даних маємо на цій ділянці території 5 складів (розподільчих центрів) та склад на території підприємства виробника продукції. Кожен склад характеризується місцем розташування (координатами), відстанями до кожного споживача (супермаркету), а також максимальною місткістю (кількість вантажу, яку можна зберігати на даному об'єкті). Окрім того, маємо 15 покупців (у нашому випадку це супермаркети торгових мереж). Дані про потреби споживачів (супермаркетів) та місткість постачальників (складів) наведено в табл. 4.1. Доставка товару здійснюється за схемою основний склад виробника – розподільчі центри – супермаркети.

Таблиця 4.1 - Потреба споживачів та місткість постачальників

№ п/п	Позначення	Тип об'єкту	Адреса	*Вага, т
1.	MAIN	Склад	Броварський пр-кт, 16 км	45,00
2.	A	Склад	вул. Мілютенко, 28	8,00
3.	B	Склад	вул. Мілютенко, 10Б	8,00
4.	C	Склад	вул. Теодора Драйзера, 11	9,00
5.	D	Склад	вул. Карбишева, 18Б	5,00
6.	E	Склад	вул. М.Закревського, 20	8,00
7.	1	Супермаркет	пр-кт Маяковського, 85	1,2
8.	2	Супермаркет	пр-кт Маяковського, 43/2	0,7
9.	3	Супермаркет	вул. Братиславська, 14Б	1,5
10.	4	Супермаркет	вул. Стальського, 22/10	1,9
11.	5	Супермаркет	вул. Теодора Драйзера, 8	0,9
12.	6	Супермаркет	пр-кт Маяковського, 60/10	2,2
13.	7	Супермаркет	вул. Сабурова, 3	1,1
14.	8	Супермаркет	вул. М.Закревського, 21	1,5
15.	9	Супермаркет	вул. М.Закревського, 29	0,6
16.	10	Супермаркет	вул. Курнатовського, 11	0,85
17.	11	Супермаркет	пр-кт Лісовий, 28	1,3
18.	12	Супермаркет	вул. Ак. Курчатова, 8а	1,9
19.	13	супермаркет	вул. Шолом-Алейхема, 4	0,75
20.	14	супермаркет	вул. Шолом-Алейхема, 17	0,5
21.	15	супермаркет	вул. Ак. Курчатова, 23	1,55

Примітка: *для типу об'єкту склад у полі вага вказано місткість, для супермаркетів – потреба у товарі.

Інформація про відстані між споживачами та складами, а також вага вантажів наведені у табл. 4.2.

Таблиця 4.2 - Матриця відстаней між складами та супермаркетами, вага потреби вантажів та об'єм виконаної роботи

*Супер-маркети	Пот-ба, т	A, км	ТКМ	B, км	ТКМ	C, км	ТКМ	D, км	ТКМ	E, км	ТКМ
1	1,2	7,6	9,12	9,6	11,52	4	4,8	5	6	5,5	6,6
2	0,7	6,7	4,69	8,7	6,09	3,1	2,17	4,2	2,94	4,7	3,29
3	1,5	2,6	3,9	2,1	3,15	6,6	9,9	6,3	9,45	6,9	10,35
4	1,9	3	5,7	5	9,5	2,6	4,94	1,6	3,04	3	5,7
5	0,9	4,4	3,96	6,4	5,76	0,6	0,54	1,9	1,71	2,4	2,16
6	2,2	7,5	16,5	9,5	20,9	4	8,8	5	11	5,5	12,1
7	1,1	6,2	6,82	8,2	9,02	2,6	2,86	3,7	4,07	4,1	4,51
8	1,5	4,3	6,45	6,3	9,45	1,1	1,65	1,8	2,7	2,3	3,45
9	0,6	4,3	2,58	6,3	3,78	1,1	0,66	1,8	1,08	2,2	1,32
10	0,85	4,9	4,165	6,4	5,44	4,2	3,57	3,1	2,635	4,5	3,825
11	1,3	1,3	1,69	4	5,2	4,3	5,59	4,1	5,33	4,7	6,11
12	1,9	1,4	2,66	2,9	5,51	4,6	8,74	4,3	8,17	4,9	9,31
13	0,75	1,2	0,9	2,6	1,95	4,4	3,3	4,1	3,075	4,7	3,525
14	0,5	1,2	0,6	1,8	0,9	5,5	2,75	5,3	2,65	5,9	2,95
15	1,55	0,9	1,395	2,3	3,565	5	7,75	4,8	7,44	5,3	8,215
Всього	18,45	57,5	71,13	82,1	101,7	53,7	68	57	71,3	66,6	83,4

Примітка: *адреси супермаркетів наведено в табл. 4.1

При визначенні загальних витрат на доставку товару в логістичній системі враховуються наступні групи затрат: транспортні затрати, затрати на оплату праці водія, затрати пов'язані зі зберіганням товарів, експлуатаційні та інші витрати, а також затрати від втрачених продаж.

При визначенні оптимального розташування складу в логістичній системі дистрибуції сумарні витрати на доставку товару від виробника до споживача розділено на дві частини: витрати при доставці товару від виробника до розподільчих центрів та витрати при доставці товару від розподільчих центрів до кінцевих споживачів (супермаркетів).

Врахування затрат в такому вигляді, на нашу думку, дасть можливість комплексно вирішувати задачу пошуку оптимального розташування складу, для всієї системи розподіленої логістики.

За допомогою (4.1) – (4.6) для існуючих складів А, В, С, D та Е знаходимо той, що оптимально розташований до споживачів. Таким складом є склад А.

Оскільки місткість визначеного складу А значно менша (8,00т) від потреби всіх споживачів (18,45т), то виникає необхідність визначення тих супермаркетів, які будуть обслуговуватися складом А. В якості критерію, за яким будемо визначати таких споживачів, є мінімальна відстань між об'єктами (див. розділ 4.1.2). Таким чином, визначений оптимальний склад буде обслуговувати тих споживачів, які знаходяться на мінімальній відстані, тобто найближче до нього.

Використовуючи даний механізм визначення супермаркетів, було розраховано, що склад А (вул. Мілютенко, 28), з місткістю в 8т вантажу зможе обслуговувати супермаркети за адресами: вул. Курчатова, 23 (1,55т), вул. Шолом-Алейхема, 17 (0,5т), вул. Шолом-Алейхема, 4 (0,75т), пр-кт Лісовий, 28 (1,3т), вул. Курчатова, 8а (1,9т) та вул. Братиславська, 14В (1,5т). Загальна потреба вказаних супермаркетів становить 7,5т вантажу, що не перевищує можливості визначеного складу.

Оскільки знайдений оптимальний склад своєю місткістю не може задовольнити потреби всіх споживачів, то згідно (4.8) виникає необхідність знаходження ще одного складу для задоволення потреб супермаркетів, що не були враховані при попередньому розвезенні товару (див. розділ 4.1.2) .

За допомогою (4.1) – (4.6) знаходимо новий оптимальний склад для групи споживачів. При цьому з розрахунку виключається знайдений раніше оптимальний склад А (вул. Мілютенко, 28) та споживачі, що він обслуговує (див. розділ 4.1.2). Результати розрахунку вказують, що для тих споживачів, які залишились невикористаними, оптимальним є склад D, який знаходиться за адресою вул. Карбишева, 18В з місткістю в 5,00т вантажу. Оскільки місткість визначеного складу не задовольняє потреби споживачів, виникає необхідність визначення тих супермаркетів, які будуть обслуговуватися визначеним складом. Використовуючи раніше описану процедуру (див. розділ 4.1.2), знаходимо супермаркети, які найближче розташовані до вказаного складу. Місткість складу D дозволяє задовольнити потреби наступних споживачів: вул. Стальського, 22/10

(1,9т), вул. М.Закревського, 21 (1,5т), вул. М.Закревського, 29 (0,6т) та вул. Т.Драйзера, 8 (0,9т). Загальна потреба вказаних супермаркетів становить 4,9т вантажу.

Оскільки знову знайдені оптимальні склади своєю місткістю не можуть задовольнити потреби всіх споживачів, то необхідно повторити процедуру, описану у розділі 4.1.2. За допомогою (4.1) – (4.6) знаходимо новий оптимальний склад для групи споживачів, що залишилися. При цьому з розрахунку виключаються раніше використані склади і супермаркети. Згідно отриманих результатів розрахунків, оптимальним є склад С, що знаходиться за адресою вул. Теодора Драйзера, 11 з місткістю в 9,00т вантажу. Місткість даного складу дає можливість обслуговувати всі супермаркети, що залишилися за адресами: пр-кт Маяковського, 85 (1,2т), пр-кт Маяковського, 43/2 (0,7т), вул. Курнатовського, 11 (0,85т), пр-кт Маяковського, 60/10 (2,2т) та вул. Сабурова, 3 (1,1т). Загальна потреба вказаних супермаркетів становить 6,05т вантажу, що не перевищує можливості визначеного складу С.

Після визначення оптимальних місць розташування складів, а також необхідної їх кількості, виникає необхідність побудови оптимального маршруту розвезення товару зі складу до споживачів. Для визначення оптимального маршруту доставки товару від складу до споживачів було використано метод самоорганізації мурашиної колонії, який описано у [155, 191]. Оскільки згідно (4.1) – (4.8) визначено 3 склади для розвезення вантажів, то і маршрутів доставки товару буде також 3. Використовуючи метод мурашиної колонії [155,191], було побудовано наступні оптимальні (мінімальні) маршрути доставки товару з розподільчих складів до супермаркетів (позначення складів та супермаркетів наведені на рисунку 1 та в таблиці 1):

маршрут №1 (рисунок 4.3а): А – 15 – 11 – 14 – 13 – 3 – 12 – А (довжина маршруту 8,4 км);

маршрут №2 (рисунок 4.3б): D – 4 – 9 – 5 – 8 – D (довжина маршруту 7,6 км);

маршрут №3 (рисунок 4.3в): С – 6 – 1 – 7 – 2 – 10 – С (довжина маршруту 19,4 км).

На рис. 4.3 наведено схеми розташування складів та супермаркетів, маршрути доставки товару від визначених складів до споживачів.



Рисунок 4.3 - Маршрути доставки товарів від визначених складів до споживачів

Після визначення оптимального розташування складів, а також їх кількості, за допомогою мурашиного алгоритму було побудовано оптимальні (мінімальні) маршрути розвезення товарів з розподілених центрів до споживачів.

Для перевірки коректності застосування запропонованого методу оптимізації розташування складських приміщень в задачах транспортної логістики, в роботі використано метод самоорганізації мурашиної колонії, який дозволяє побудувати оптимальні маршрути доставки товару від складу до споживачів в рамках задачі комівояжера.

Для цього, розглянемо таку ж модельну задачу, як і в попередньому розділі. В цій задачі є основний склад, що знаходиться на території підприємства виробника продукції, 5 розподільчих центрів (складів) та 15 супермаркетів. Необхідно із зазначених складів визначити той, загальна вартість доставки товару з якого до споживачів буде мінімальною. Затрати на доставку товару розділено на дві групи: від основного складу підприємства виробника до розподілених центрів та від розподілених центрів до супермаркетів. До загальної вартості доставки товару входять транспортні затрати, затрати на оплату праці водія, затрати пов'язані зі зберіганням товарів, експлуатаційні та інші витрати, а також затрати від втрачених продаж. Таким чином, оптимально розташованим вважаємо той склад, вартість на доставку товару якого до всіх споживачів буде мінімальною.

За допомогою методу самоорганізації мурашиної колонії для кожного із 5

складів знаходимо найкоротший маршрут доставки товару зі складу до всіх 15 супермаркетів. Використовуючи дані про відстані між складами та супермаркетами, а також обсяг потреб з вантажу кожного супермаркету, що наведено у табл. 4.1 та 4.2, розрахуємо об'єм виконаної транспортної роботи для кожного маршруту. Використовуючи дані про відстань між основним складом виробника і кожним з розподільчих центрів, а також вага перевезеного вантажу, відстані між складами та супермаркетами. Таким чином, для знаходження оптимального розташування розподіленого центру враховувались витрати не лише при доставці від складу до супермаркету, а і витрати від виробника до розподіленого центру.

Оскільки вага вантажу у модельній задачі становить 18,45т, то для перевезення вантажів використовуються транспортні засоби моделі MAN TGA (20т) тягач. Для даної моделі транспортного засобу підприємством встановлено нормативні дані витрат палива: норма витрат палива на пробіг – 30 л/100км; норма витрат палива на виконану роботу (перевезено тон вантажу) – 1 л/100ткм, норма витрат палива на роботу рефрижератора – 4л/год, вид палива – «Дизельне паливо». Середня вартість даного виду палива на ринку по місту Києву у 2017р. становить 22,10 грн.

Використовуючи дані про норми витрат палива для обраної моделі транспортного засобу та середню вартість палива на ринку, розраховуємо сумарні витрати на доставку товару з кожного складу до всіх споживачів.

При визначенні оптимального розташування розподіленого центру важливу роль у загальному об'ємі витрат відіграють затрати на оплату праці водія. Згідно статистичних даних розмір середньої заробітної плати водія вантажних автомобілів по місту Києву у квітні 2017 року становить 10000 грн. Норма тривалості робочого часу для п'ятиденного 40-а годинного робочого тижня у квітні становить 152 год. На підприємстві, що здійснює розвезення продукції встановлено погодинну оплати праці водія. Вартість 1 години роботи водія в квітні 2017 року становить 65,79 грн. В обов'язки водія входить лише оформлення документів, розвезення товару по пунктам призначення та контроль за дотримання правил завантаження/розвантаження та приймання/здачі вантажу. Таким чином, відпрацьований водієм час включає в себе: час завантаження чи

розвантаження товару; час на оформлення документів; час доставки товару (час на проходження маршруту між точками); час маневрування. Для розрахунку часу доставки товару приймалась середня швидкість руху по місту Києву – 25 км/год. Результати отриманих розрахунків наведено у таблиці 4.3.

Слід відмітити, що в нашій модельній задачі розглядається лише варіант роботи водія в рамках його звичайного робочого дня, що не передбачає відпрацювання наднормових, вечірніх, нічних чи святкових годин.

Як видно з отриманих результатів розрахунків, що наведено у табл. 4.3, із запропонованих п'яти складів, оптимально розташованим є склад А за адресою вул. Мілютенко, 28. Загальна вартість доставки з вказаного складу є мінімальною та становить 1564,30 грн. До речі, найбільші витрати на доставку товару зі складу, що знаходиться за адресою вул. М.Закревського, 20 становлять 1678,02 грн. У даній роботі, за допомогою метода променевої терапії (див.розділ 4.1.3), було визначено склад А, як такий, що найбільш оптимально розташований до всіх супермаркетів. Таким чином, знаходження оптимального складу на обмеженій області обслуговування методом променевої терапії і методом самоорганізації мурашиної колонії дають однакові результати.

Відомо, що місткість складу А, який знаходиться за адресою вул. Мілютенко, 28, не дає можливості задовольнити потреби всіх споживачів. Тому, використовуючи метод самоорганізації мурашиної колонії, знаходимо ще один склад, який буде оптимально розташований до супермаркетів. При проведенні розрахунків склад, який був раніше визначений як оптимальний, а також супермаркети, які він обслуговує, виключаються з розрахунків. Така процедура застосовувалась, як і в запропонованому методі, розглянутому вище, до тих пір, поки не була визначена та кількість оптимальних складів, яка повністю задовольнить потреби всіх супермаркетів.

В результаті проведених розрахунків методом самоорганізації мурашиної колонії виявлено, що повністю потреби всіх споживачів задовольняють три склади, які оптимально розташовані до цих споживачів. Як видно з таблиці 4.3, це склади А, D, С (див. табл. 4.1) розташовані відповідно за адресами: вул. Мілютенко, 28, вул. Карбишева, 18Б та вул. Т. Драйзера, 11. В таблиці 3 склади А, D, С, що визначені в результаті поетапної оптимізації методом самоорганізації

мурашиної колонії відмічені сірим кольором. Результати цих розрахунків повністю збігаються з результатами попередніх розрахунків за допомогою запропонованого методу.

Отже, як показує порівняльний аналіз, пошук оптимального розташування складів за допомогою методу оптимального планування променевої терапії злоякісних новоутворень [70] та методу мурашиної колонії [155,191] дають однакові результати. Це свідчить про коректність запропонованого методу пошуку оптимального розташування пунктів обслуговування, який базується на методі оптимального планування променевої терапії злоякісних новоутворень.

Відомо, що в загальному випадку наявність кількох (більше ніж 1) розподілених центрів збільшує розмір сумарних затрат в логістичній системі, ніж наявність одного розподіленого центру. Це може бути пов'язано з тим, що витрати на утримання таких розподільчих центрів (складів) можуть перевищувати інші витрати. Проте часто місткість розподіленого центру є обмеженою, тому виникає необхідність у збільшенні таких центрів. Така задача розглядалась у розділі 4.1.3 при знаходженні оптимального розташування складів за методом променевої терапії.

Крім того, необхідність збільшення розподільчих центрів може виникати тоді, коли є потреба у розширенні ринку збуту товару виробнику (збільшення кількості клієнтів), і при цьому, місткість одного розподільчого центру є обмеженою. Це означає наявність втрат від продажу.

Для такої задачі важливо знайти таку кількість складів у системі логістичної дистрибуції, загальні витрати при якій, були найменшими. Для знаходження такої кількості складів використовуємо інформацію про витрати на доставку товару та оплату праці водіїв, наведену у таблиці 4.3. Крім того, враховуємо експлуатаційні затрати, затрати пов'язані зі зберіганням продукції, затрати від втрати ринку продаж та інші затрати, наведені в таблиці 4.4.

Згідно таблиці 4.4 до складу експлуатаційних затрат включено витрати на утримання складського приміщення (оплата комунальних платежів). Інші затрати містять в собі зокрема оплату праці супровідного персоналу. Затрати від втрачених продаж визначаються сумою збитків, які отримує підприємство виробник продукції від неможливості задовольнити потреби всіх споживачів.

Таблиця 4.3 - Витрати на доставку товару в залежності від розміщення та кількості складів в логістичній системі

Стаття затрат	I-а ітерація					II-а ітерація				III-а ітерація		
	A	B	C	D	E	B	C	D	E	B	C	E
Затрати на доставку від виробника до розподільчих центрів												
Відстань, км	10	10	14	12	13	10	14	12	13	10	14	13
Вага вантажу, т	18.45	18.45	18.45	18.45	18.45	10.95	10.95	10.95	10.95	6.05	6.05	6.05
Робота, ткм	184.50	184.50	258.30	221.40	239.85	109.50	153.30	131.40	142.35	60.50	84.70	78.65
Робота рефрижератора, год	0.40	0.40	0.56	0.48	0.52	0.40	0.56	0.48	0.52	0.40	0.56	0.52
Витрати палива пробіг, л	6.00	6.00	8.40	7.20	7.80	6.00	8.40	7.20	7.80	6.00	8.40	7.80
Витрати палива робота, л	1.85	1.85	2.58	2.21	2.40	1.10	1.53	1.31	1.42	0.61	0.85	0.79
Витрати палива рефрижератора, л	1.60	1.60	2.24	1.92	2.08	1.60	2.24	1.92	2.08	1.60	2.24	2.08
Всього палива, л	9.45	9.45	13.22	11.33	12.28	8.70	12.17	10.43	11.30	8.21	11.49	10.67
Час завантаження/розвантаження, хв	92	92	92	92	92	56	56	56	56	32	32	32
Час оформлення документів, хв	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Час маневрування, хв	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
Норма часу доставки товару, хв	24	24	34	29	31	24	34	29	31	24	34	31
Всього витрачено часу, год	5.40	5.40	5.72	5.56	5.64	4.20	4.52	4.36	4.44	3.40	3.72	3.64
Вартість палива, грн	208.73	208.73	292.23	250.48	271.35	192.16	269.02	230.59	249.81	181.33	253.86	235.73
Вартість роботи водія, грн	355.26	355.26	376.32	365.79	371.05	276.32	297.37	286.84	292.11	223.68	244.74	239.47
<i>Сумарні затрати, грн</i>	<i>564.00</i>	<i>564.00</i>	<i>668.54</i>	<i>616.27</i>	<i>642.41</i>	<i>468.48</i>	<i>566.39</i>	<i>517.43</i>	<i>541.91</i>	<i>405.01</i>	<i>498.60</i>	<i>475.20</i>
Затрати на доставку з розподільчих центрів до кінцевих споживачів												
Відстань, км	33.1	35.5	33.2	33.4	35.6	30.1	22.5	22.7	24.6	27.1	19.4	21.2
Вага вантажу, т	18.45	18.45	18.45	18.45	18.45	10.95	10.95	10.95	10.95	6.05	6.05	6.05
Робота, ткм	327.22	376.61	311.34	310.59	342.25	130.05	117.66	139.52	114.53	83.29	69.98	74.49
Робота рефрижератора, год	1.32	1.42	1.33	1.34	1.42	1.20	0.90	0.91	0.98	1.08	0.78	0.85
Витрати палива пробіг, л	9.93	10.65	9.96	10.02	10.68	9.03	6.75	6.81	7.38	8.13	5.82	6.36
Витрати палива робота, л	3.27	3.77	3.11	3.11	3.42	1.30	1.18	1.40	1.15	0.83	0.70	0.74
Витрати палива рефрижератора, л	5.30	5.68	5.31	5.34	5.70	4.82	3.60	3.63	3.94	4.34	3.10	3.39
Всього палива, л	18.50	20.10	18.39	18.47	19.80	15.15	11.53	11.84	12.46	13.30	9.62	10.50
Час завантаження/розвантаження, хв	92	92	92	92	92	56	56	56	56	32	32	32
Час оформлення документів, хв	240	240	240	240	240	150	150	150	150	75	75	75
Час маневрування, хв	128	128	128	128	128	80	80	80	80	40	40	40
Норма часу доставки товару, хв	79	85	80	80	85	72	54	54	59	65	47	51
Всього витрачено часу, год	8.99	9.09	8.99	9.00	9.09	5.97	5.67	5.67	5.75	3.53	3.23	3.30
Вартість палива, грн	408.81	444.12	406.32	408.18	437.55	334.74	254.74	261.60	275.39	293.91	212.69	231.98
Вартість роботи водія, грн	591.49	597.81	591.75	592.28	598.07	392.81	372.81	373.33	378.33	232.50	212.24	216.97
<i>Сумарні затрати, грн</i>	<i>1000.30</i>	<i>1041.93</i>	<i>998.07</i>	<i>1000.47</i>	<i>1035.62</i>	<i>727.54</i>	<i>627.54</i>	<i>634.94</i>	<i>653.73</i>	<i>526.41</i>	<i>424.94</i>	<i>448.96</i>
Total costs	1564.30	1605.93	1666.62	1616.74	1678.02	1196.02	1193.94	1152.37	1195.64	931.42	923.52	924.16

Таблиця 4.4 - Розрахунок затрат для логістичної системи при різних кількості розподільчих центрів

К-сть складів	Затрати на доставку у до складів, грн	Затрати на доставку до супермаркетів, грн	Експлуатаційні затрати, грн	Затрати на зберігання, грн	Інші затрати, грн	Втрачені продажі, грн	Всього затрат, грн
1	5640	10003	2310	1413	3200	15000	37566
2	11280	6349	4158	2669	6400	5000	35856
3	17443	4249	5240	3454	9600	500	40486
4	23867	7275	9240	4710	12800	500	58392
5	30552	10599	11550	5966	16000	500	75167

Як видно з таблиці 4.4 при наявності одного розподільчого центру з достатньою місткістю врахування затрат без втрати від продажу є достатнім для забезпечення всіх споживачів 22566 грн. див. рис. 4.4. Якщо враховувати ситуацію із збільшенням ринку, тобто втрати від продаж, то розрахунки показують, що загальні затрати є мінімальними у випадку двох розподільчих центрів. див. рис. 4.5.

Витрати логістичної системи

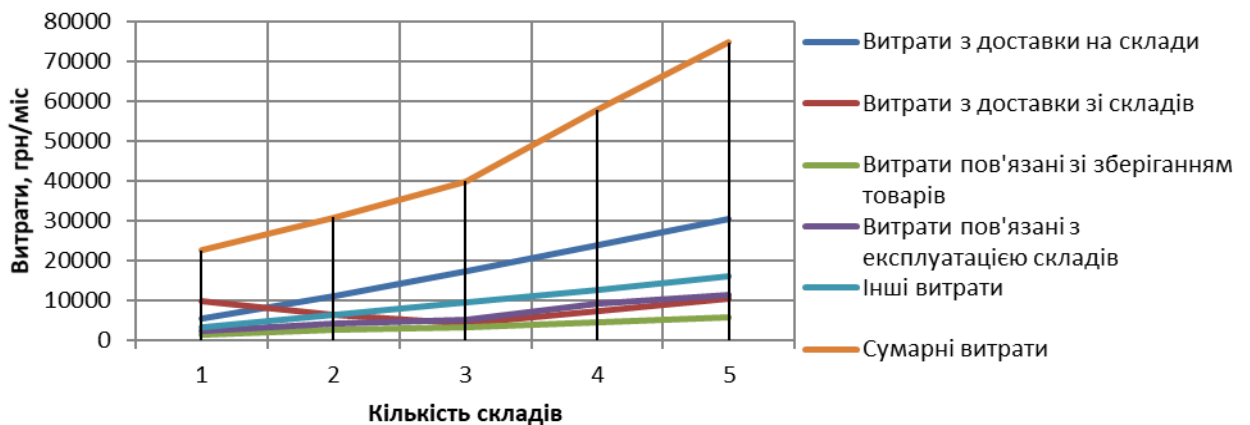


Рисунок 4.4 - Затрати на утримання логістичної системи без врахування втрачених продаж

Розглянемо у такій логістичній задачі системі склад підприємства

виробника продукції, 5 розподілених центрів та 15 супермаркетів. Розв'язок цієї задачі полягає в тому, щоб знайти таку кількість складів у логістичній системі, при якій витрати на утримання всієї системи були мінімальними. Відомо, що використання кожного складу характеризується розміром сумарних затрат, які включають: витрати на доставку товару до складу від виробника, витрати на доставку товару з розподіленого центру до кінцевого споживача, витрати пов'язані зі зберіганням товару та експлуатацією складів та інші витрати. При визначенні витрат на доставку товару на склади та зі складів до супермаркетів враховувалась інформація про відстань між підприємством виробником продукції та розподільчим центром, вага перевезеного вантажу та час доставки товару, що впливає на розмір оплати праці водія. Витрати пов'язані зі зберіганням товарів на складах визначалися розміром запасів товарів на складах, які необхідно зберігати для забезпечення безперебійної поставки товарів кінцевим споживачам. Експлуатаційні витрати враховують витрати на утримання складських приміщень. Заробітна плата персоналу складу та інші непостійні витрати включені у групу інших затрат.

Витрати логістичної системи

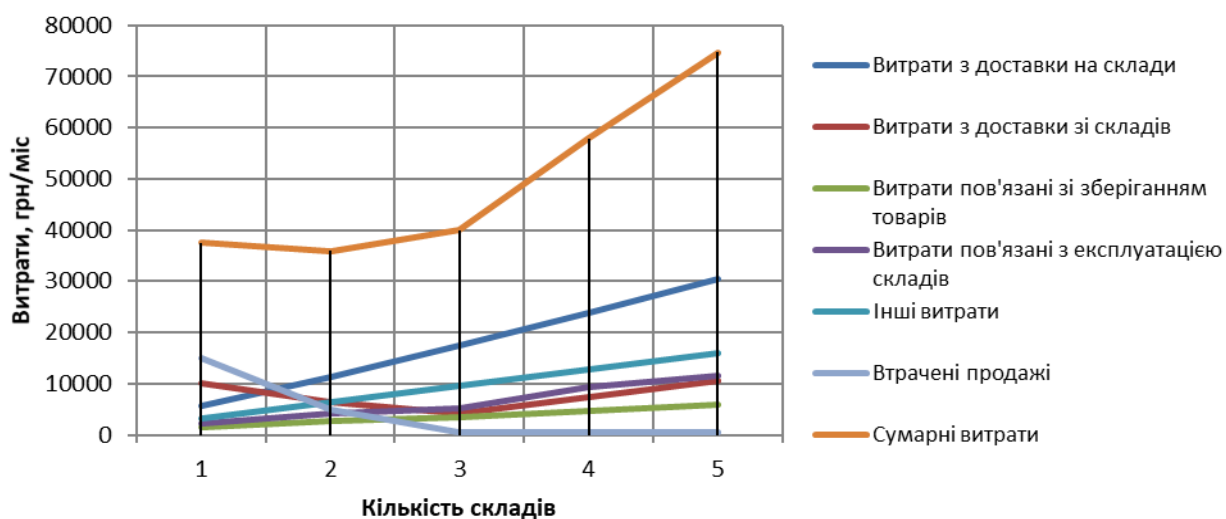


Рисунок 4.5 - Затрати на утримання логістичної системи з врахуванням втрачених продаж

Збитки від втрачених продаж визначаються кількість супермаркетів, які неможливо обслужити у випадку недостатньої кількості складів в логістичній системі та інших причин. Серед них: місткість розподільчого центру, що не дає можливості збільшити об'єм товарів, кількість пунктів розвезення вантажу одним автомобілем за один робочий день не може перевищувати 15 (дані для міста Києва) та інші причини. Розмір збитків виражається кількістю товару, який підприємство виробник не може доставити потенційним покупцям (супермаркетам).

Згідно отриманих розрахунків, при врахуванні розмірів втрачених продаж оптимальна кількість складів становить 2, що можна побачити на рисунку 4.5. Загальна сума затрат при такому розміщенні становитиме 35856 грн. Більша кількість складів є економічно не вигідною, особливо суттєво зростають сумарні витрати для 4-х та більше складів у системі. Це говорить про те, що розмір втрачених продаж при розміщенні 3-х, 4-х та 5-ти складів фактично не змінюється, а затрати на їх утримання тільки зростають.

Таким чином проведені розрахунки вказують, величина затрат можуть змінюватись від потреб та мети, яку ставить перед собою виробник. Це визначає вибір моделі розподіленої логістичної системи, яка забезпечує мінімізацію затрат на доставку товару до споживачів.

Проведені розрахунки вказують на ряд переваг запропонованого методу визначення оптимальної кількості та місця розташування пунктів обслуговування (складів), що базується на методі оптимального планування променевої терапії злоякісних новоутворень. Зокрема, такими перевагами мають бути можливість вирішення відповідних задач оптимізації достатньо високої розмірності, висока точність знайдених результатів, швидкість розрахунків, можливість застосування запропонованого методу для вирішення подібного класу задач, що описують процеси іншої фізичної природи.

Оскільки в даній роботі розглядається вперше розроблений метод

оптимізації розташування складів по відношенню до споживачів, що базується на методі променевої терапії, то виникає необхідність у проведенні подальших досліджень з метою визначення меж його застосування та можливостей його удосконалення.

Висновки до Розділу 4

1. Виходячи з проведеного аналізу класифікації задач розміщення, було визначено, що задача, яка вирішується в даному розділі відноситься до задач з декількома джерелами обслуговування та обмеженою місткістю цих джерел. В нашому випадку вирішувалась задача знаходження декількох складів з розміщення товару та враховувалась місткість кожного із запропонованих складів.

2. Запропоновано методику визначення кількості складських приміщень та їх місцерозташування, що базується на використанні методу променевої терапії. Проведені експериментальні дослідження показали, що застосування запропонованого методу дозволяє знаходити оптимальне розташування розподільчих центрів (складів) до супермаркетів.

3. Проведено перевірку отриманих результатів за допомогою методу модифікованого мурашиного алгоритму. Результати якого наведено у розділі 4.1.3.

Результати досліджень даного розділу викладено у публікаціях [194,195].

РОЗДІЛ 5. ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ ОПТИМАЛЬНИХ РІШЕНЬ ЩОДО ЛОГІСТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ У ВЕЛИКИХ МІСТАХ

5.1. Програмна реалізація моделі інформаційної системи підтримки прийняття рішень при логістичному управлінні доставки вантажів у великих містах

За результатами проведених досліджень, що описані в попередніх розділах дисертації, запропонована модель інформаційної системи підтримки прийняття рішень (ІСППР) при логістичному управлінні доставки вантажів, використання якої дозволяє підвищувати ефективність транспортування вантажів в межах великих міст.

Наведена на рисунку 5.1. модель ІСППР «Логістичне управління доставки вантажів у великих містах» складається з 4 підсистем (блоків):

- Блок вхідних даних;
- Блок зберігання, обробки та доступу до бази даних;
- Блок моделювання, аналізу та звітності
- Блок адміністрування.

В рамках моделі ІСППР запропоновано інформаційну технологію динамічної маршрутизації вантажних перевезень, що базується на використанні розроблених інтелектуальних методів оптимізації процесів доставки вантажів дрібних партій на ВДМ великих міст, які дозволяють враховувати нестационарну (реальну) динаміку транспортних потоків високої щільності в реальному режимі часу при проведенні оптимізації маршрутів доставки, а також визначати оптимальне розташування розподільчих об'єктів доставки вантажів на таких ВДМ.

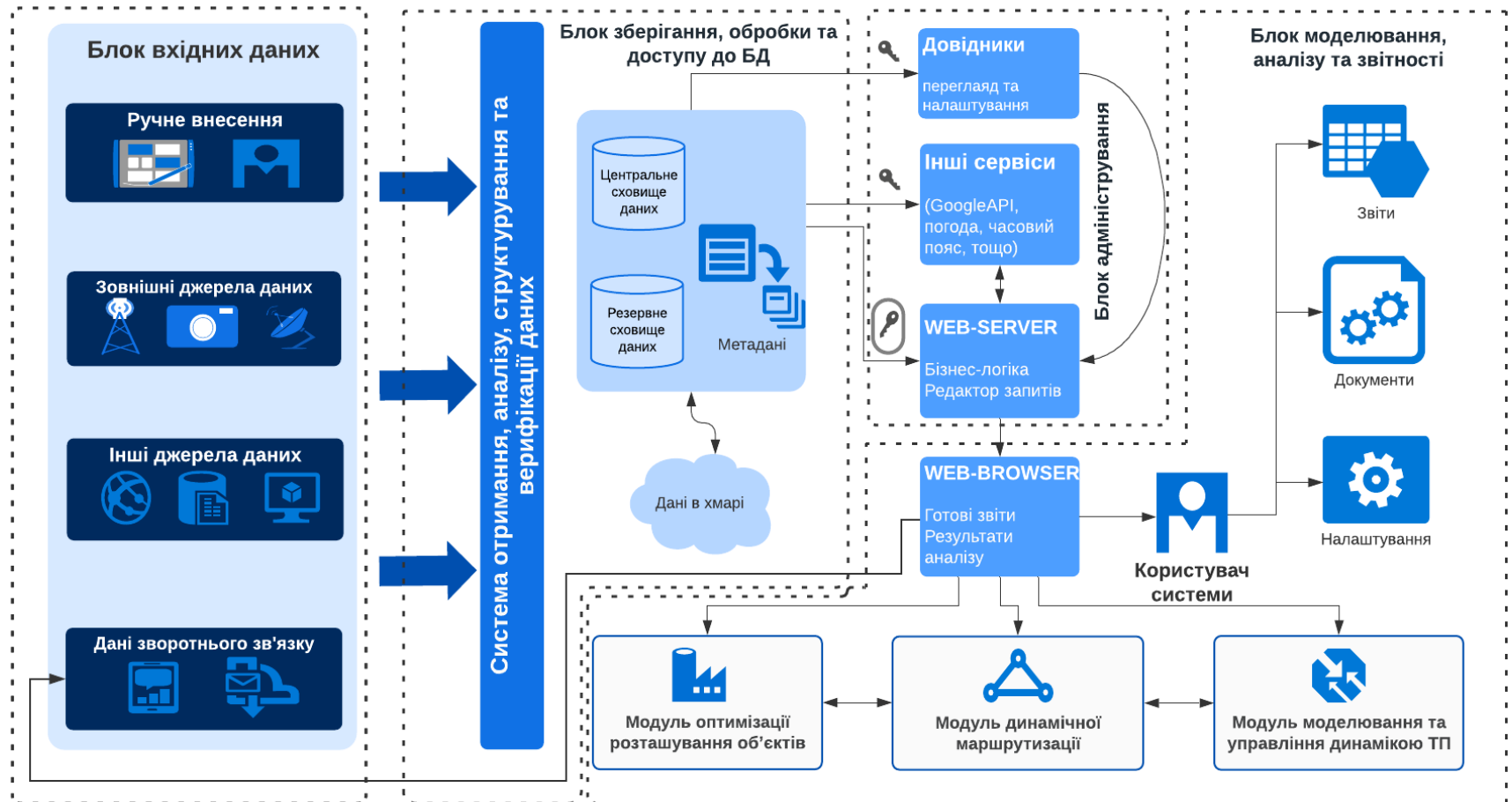


Рисунок 5.1 - Модель інформаційної системи підтримки прийняття рішень «Логістичне управління доставки вантажів у великих містах»

Така інформаційна технологія реалізується у блоці моделювання, аналізу та звітності моделі інформаційної системи підтримки прийняття рішень, що складається з трьох модулів: модуль оптимального розташування об'єктів; модуль динамічної маршрутизації; модуль моделювання та управління динамікою ТП (див. рис. 5.1).

Основними модулями функціонування цієї інформаційної технології, відповідно, є модуль динамічної маршрутизації та модуль моделювання та управління динамікою ТП. В модулі динамічної маршрутизації здійснюється обробка даних моніторингу поточних характеристик динаміки ТП на ділянках ВДМ та вхідної інформації про кількість, місця розташування замовників та обсяги їх потреб у товарах; вибір найбільш оптимальних сценаріїв маршруту доставки вантажів за результатами експериментальних даних та результатами розробки сценаріїв прогнозування динаміки ТП і адаптації моделей вибору маршруту до реальних умов; внесення в модель умов початку застосування інформаційної технології динамічної маршрутизації і скасування її застосування на основі детектування відповідних поточних даних динамічного стану ТП на ділянках ВДМ. Відповідно в модулі моделювання та управління динамікою ТП на основі даних про поточний стан динаміки ТП на ділянках ВДМ, отриманих з модулю динамічної маршрутизації, та результатах імітаційного моделювання з використанням модифікованого мурашиного алгоритму здійснюється розробка сценаріїв прогнозування динаміки ТП і адаптація отриманих моделей вибору маршруту до реальних умов.

Крім того, використання такої інформаційної технології дозволяє здійснювати оптимізацію процесу розташування розподільчих об'єктів транспортно-логістичних систем з подальшою оптимізацією маршрутів доставки вантажів при урахуванні нестационарної (реальної) динаміки транспортних потоків на ВДМ міста. Тут користувач має можливість при наявності вхідної інформації про кількість та обсяги потреб у товарах

замовників, а також про динамічний стан ВДМ міста в певний момент часу отримати вихідну інформацію про оптимальні кількість та місця розташування розподільчих центрів (складів) заданої місткості при доставці вантажів дрібних партій заданого обсягу від складу виробника до заданої кількості супермаркетів, як замовників відповідних видів товарів.

Важливо, що кожен із модулів можна використовувати окремо для вирішення відповідних задач, або ж комплексно для пошуку та визначення оптимальних рішень для логістичному управлінню доставки вантажів у великих містах.

Відповідно, функціональність користувацької WEB-BROWSER-ної частини програмного продукту передбачає 3 модулі: модуль оптимального розташування об'єктів; модуль динамічної маршрутизації; модуль моделювання та управління динамікою ТП.

Загалом, до складу функцій підсистем СППР входить імпорту/експорту та структурування даних, робота з базою даних, відслідковування показників та довідкової інформації, графічне представлення інформації, аналіз даних, прогнозування тощо.

Короткий опис блоків (підсистем), що входять до складу СППР.

Блок (підсистема) вхідних даних

Блок (підсистема) вхідних даних передбачає можливість отримання даних (інформації) різними способами, як від ручного введення певних даних (інформації) користувачами до автоматичного завантаження даних (інформації) з інших ресурсів. Крім того, тут передбачено зворотній зв'язок від користувачів наведеного програмного продукту.

Ручне внесення даних. Цей потік вхідної інформації передбачає можливість внесення певної інформації користувачем вручну, використовуючи при цьому сам програмний продукт у випадках, коли користувач отримав певну інформацію і вважає за доцільне наявність такої інформації в ІС. Наприклад,

ДТП, ТЗ, яке зупинилось на дорозі з технічних причин і є перешкодою для вільного руху тощо.

Зовнішні джерела даних. Інформація, що отримана з інших джерел у вільному доступі. Такими джерелами можуть бути системи відеоспостереження за транспортними потоками, відомості про світлофорне регулювання, інші дані інтелектуальних систем (підсистем), що використовуються для збору даних про стан ВДМ.

Інші джерела даних. Такими джерелами даних можуть бути інші програмні продукти та сервіси, які мають необхідну інформацію. Крім того, використовуємо сервіс Google API для відображення маршруту на карті.

Дані зворотного зв'язку. Дані, які ми отримуємо від активних користувачів програмного продукту. Проходження кожної ділянки ВДМ фіксуються певні параметри, що подаються на вхід системи. Наприклад, фактична швидкість транспортного потоку, щільність транспортного потоку, наявність місць ремонту, ДТП, інших перешкод руху тощо. Більша кількість користувачів даного програмного продукту дасть більший зворотній зв'язок, що дозволить більш точно планувати маршрути в майбутньому.

Система отримання, аналізу, структурування та верифікації даних. Оскільки вхідні дані у нас поступають з різних джерел, які в свою чергу мають різну структуру, тип та формат, їх необхідно структурувати до одного виду структури БД. Ці роботи виконуються на даному етапі.

Блок (підсистема) доступу до БД

Вся інформація, що поступає в БД зберігається в зручному для системи вигляді в Центральному сховищі даних.

До функцій сховища даних системи відносяться:

- перетворення різних типів, структур та форматів даних з різних джерел в єдиний формат;

- перевірка логічної коректності та повноти інформації, яка вводиться;
- контроль за виконанням регламенту надходження та повноти інформації, що вводиться;
- зберігання поточних та історичних (за попередні періоди) даних;
- забезпечення зручного доступу до інформації, що зберігається.

Метадані – це, як правило, розраховані показники та значення на основі інформації з центрального сховища даних. Такі дані дозволяють суттєво скоротити час обробки запитів та отримувати необхідний результат значно швидше.

Блок (підсистема) аналізу та звітності

Довідники. У цьому блоці користувачі з відповідними правами (як правило адміністратори системи) мають можливість проводити налаштування роботи довідників та переглядати їх вміст.

Інші сервіси. Використання інших сервісів та програмних продуктів, наприклад таких як, Google API для відображення маршруту на карті, погода (при врахування погодних умов планування маршруту), часовий пояс (при побудові оптимального маршруту розвезення товару з часовими рамками) тощо. Можливе використання інших сервісів, в залежності від потреб користувача системи.

WEB-SERVER. Серверна частина програмного продукту, де розміщена вся бізнес-логіка та редактор запитів. Виконує отримані запити від WEB-BROWSER, використовуючи при цьому доступ до БД, та повертаючи користувачу у зрозумілій для нього формі (звіт, графік, діаграма, маршрут, таблиця тощо) результат запиту. При цьому при виконанні запитів WEB-SERVER використовує як дані з центрального сховища даних так і метадані. Крім того він взаємодіє з сторонніми (зовнішніми) сервісами.

WEB-BROWSER. Клієнтська частина програмного продукту, яка дозволяє будь-якому користувачу використовувати його за призначенням. Це інтерфейс за допомогою якого користувач взаємодіє з системою. Результатом роботи є отримання результатів запиту у формі звіту, діаграми, графіку, маршруту, таблиці тощо. Крім того, інформація про фактично пройдені маршрути є інформацією зворотного зв'язку, що буде використано при наступній побудові схожих маршрутів.

Функціональність користувацької WEB-BROWSER-ної частини програмного продукту передбачає 3 блоки: блок оптимального розташування об'єктів; блок динамічної маршрутизації; блок побудови оптимального маршруту.

Модуль оптимального розташування об'єктів. В даному блоці користувач має можливість на основі інформації про об'єм потреб замовників, їх кількості та інформації про відстані між всіма об'єктами – визначити найбільш оптимальне розташування розподільчого центру (розподільчих центрів), з якого буде виконуватись доставка товарів до споживачів. Таким чином, користувач має можливість знайти найбільш економічно вигідний варіант розташування РЦ.

Модуль динамічної маршрутизації. Передбачає можливість знаходження оптимального маршруту на базі інформації про динаміку зміни транспортних потоків на вулично-дорожній мережі в режимі реального часу. Інформація про стан ТП на ВДМ оновлюється постійно, що дозволяє фактично одразу враховувати ці зміни та перебудовувати раніше знайдений маршрут. При цьому основним параметром оптимізації є величина часу доставки.

Модуль імітаційного моделювання та прогнозування динаміки ТП. Тут користувач має можливість знаходження оптимального маршруту доставки вантажів з урахуванням динаміки транспортних потоків (з попереднього блоку) та інших параметрів. Наприклад, врахування «часових вікон» доставки вантажів, знаходження маршруту з найменшими витратами на доставку тощо.

Фактично, даний блок використовує інформацію з попередніх двох блоків та дозволяє вирішувати задачу транспортної логістики комплексно, враховуючи при цьому відповідну кількість різних параметрів.

Як видно з наведеної на рисунку 5.1 моделі інформаційної системи підтримки прийняття рішень «Логістичне управління доставки вантажів у великих містах», програмний продукт реалізовано у формі WEB-додатку. Реалізоване програмне забезпечення складається з двох частин: WEB-серверу та WEB-браузеру. На рисунку 5.2 наведено багаторівневу логічну архітектуру інформаційної системи.

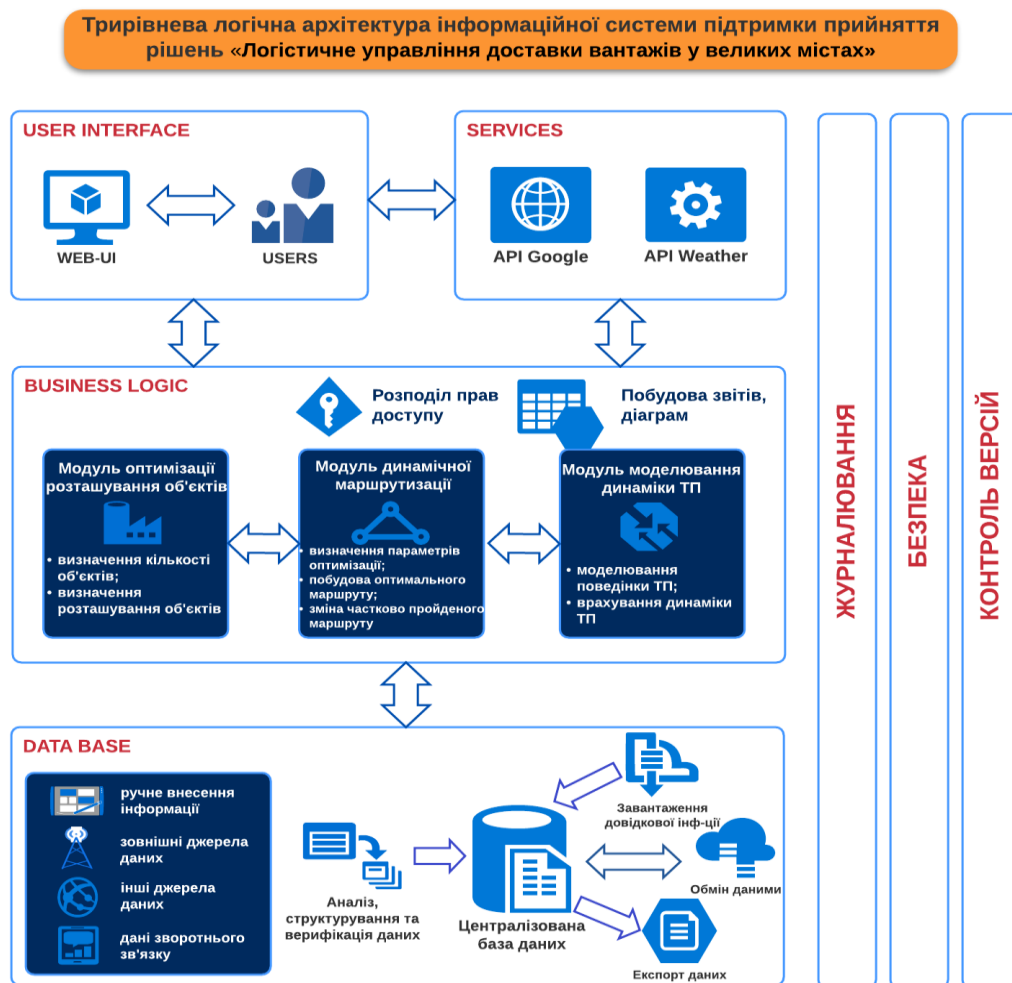


Рисунок 5.2 – Логічна архітектура інформаційної системи підтримки прийняття рішень «Логістичне управління доставки вантажів у великих містах»

На рисунку 5.2 представлено тришарову логічну архітектуру інформаційної системи підтримки прийняття рішень «Логістичне управління доставки вантажів у великих містах».

Як видно з наведеного рисунку, логічна архітектура складається із трьох основних рівнів (шарів):

1. Рівень User Interface. Цей рівень містить функції, які відповідають за взаємодію користувача і системи, і, компонентів, які надають доступ до базової функціональності системи, що знаходиться в рівні бізнес-логіки.

2. Рівень Business Logic, де реалізовано основні функції системи та їх взаємодію між собою. На цьому рівні реалізована базова функціональність системи. Компоненти цього рівня можуть надавати інтерфейс для використання сервісів цього рівня.

3. Рівень доступу до даних Data Base, який відповідає за цілісність даних, операції з додавання, редагування та видалення даних. Цей рівень надає доступ до даних, які зберігаються системою, і до даних доступ до яких надається іншими системами віддалено (у вигляді сервісів). Рівень даних надає інтерфейс доступу компонентам рівня бізнес-логіки.

Крім того, на рівні доступу до БД передбачена функціональна можливість:

- завантаження довідкової інформації з зовнішніх інформаційних та довідкових систем;
- обмін інформацією між системами (у випадку реалізації інтелектуальної інформаційної системи типу V2I або V2V тощо);
- вивантаження або експорт інформації з системи в різних форматах (.doc, .xls, .csv) для використання в інших, наприклад, облікових системах типу 1C, ERP тощо.

Наскрізною функціональністю інформаційної системи буде:

- механізм журналювання;
- забезпечення безпеки даних системи;
- механізм контролю версій системи.



Рисунок 5.3 – Блок-схема роботи алгоритму інформаційної системи підтримки прийняття рішень

На рисунку 5.3 наведено блок-схему роботи алгоритму інформаційної системи підтримки прийняття рішень «Логістичне управління доставки вантажів у великих містах». Основними блоками запропонованої моделі

Послідовність кроків під час виконання алгоритму наступний:

1. Завантаження вхідної інформації. Під час виконання цієї операції завантажуються вся інформація, яка може бути отримана від декількох різних джерел: користувач системи має можливість додати інформацію за допомогою ручного вводу, завантажити інформацію з інших систем, отримати інформацію від різних пристроїв (датчики, пристрої фіксації швидкості, транспортних потоків тощо).

2. Обробка вхідної інформації. Оскільки вхідна інформація може надходити декількома способами, то існує необхідність провести операції, пов'язані з аналізом, структурування та верифікацією цієї інформації. На даному етапі відбувається також видалення інформації, яка не пройшла верифікацію.

3. Завантаження вхідної інформації в базу даних. На даному етапі відбувається процес безпосереднього додавання отриманої структурованої інформації в базу даних.

4. Заповнення довідкової інформації. У випадку необхідності заповнення довідкової інформації, на даному етапі роботи алгоритму, користувач має можливість додати, модифікувати або видалити відповідні дані. Наприклад, такою довідковою інформацією є дані про транспортні засоби та їх техніко-експлуатаційні характеристики, адреси пунктів доставки вантажів, довідник з групами товарів тощо.

5. Після завантаження в БД всієї вхідної інформації виконується перевірка на підключення відповідних сервісів. Для оптимальної роботи інформаційної системи пропонується використання сторонніх сервісів (API Google Maps, API Weather тощо), які допомагають, наприклад, візуалізувати отриманий оптимальний маршрут на мапі.

6. Наступним кроком роботи алгоритму є вибір блоку функціональності, задачі якої планується вирішувати. Обираємо блок

оптимізації розташування об'єктів на мережі. Під час проведення оптимізації місця розташування об'єктів на мережі використовується розроблений у роботі інтелектуальний метод променевої терапії, який дозволяє не лише визначити оптимальне місце розташування, а і знайти оптимальну кількість таких складів для заданих параметрів.

- 6.1. Обираємо вхідні для проведення процесу оптимізації. На цьому етапі роботи алгоритму користувач повинен вказати відповідні точки розташування на карті, по відношенню до яких буде здійснено пошук оптимального розташування складу.
 - 6.2. Задаємо параметри оптимізації. За замовчуванням, параметром оптимізації є відстань між складом та точками доставки вантажів з вказаного складу. За необхідності, користувач має можливість задати інший параметр проведення процесу оптимізації.
 - 6.3. Отримання результатів проведення оптимізації. На вказаному етапі користувачу інформаційної системи надається інформація про знайдене оптимальне місце розташування відповідного складу та вказано результати проведеної оптимізації. У випадку задоволення вимог користувача, він має можливість сформулювати звіт з результатами оптимізації. У випадку необхідності зміни вхідних даних або параметрів оптимізації, користувач має можливість повернутись до п.6.1 роботи алгоритму та задати нові дані для оптимізації.
7. У випадку обрання блоку динамічної маршрутизації, користувач має можливість вирішення задачі знаходження оптимального (мінімального) маршруту обходу заданої кількості пунктів доставки вантажу. Під час проведення пошуку оптимального маршруту доставки вантажів з урахуванням реальної динаміки транспортних потоків на ВДМ використовується інтелектуальний метод модифікованого мурашиного алгоритму, який дозволяє скоротити час пошуку такого оптимального

рішення та передбачає можливість перебудови маршруту з урахуванням частини пройденого.

- 7.1. Обираємо вхідні для проведення процесу оптимізації. На цьому етапі роботи алгоритму користувач повинен вказати відповідні точки розташування на карті, по відношенню до яких буде здійснено пошук оптимального маршруту.
- 7.2. На наступному етапі передбачена можливість використання результатів імітаційного моделювання та прогнозування зміни динаміки транспортних потоків на тих частинах ВДМ, що входять до складу оптимального маршруту.
- 7.3. У випадку використання таких результатів імітаційного моделювання та прогнозування зміни динаміки транспортних потоків на тих частинах ВДМ, що входять до складу оптимального маршруту, на даному етапі здійснюється завантаження відповідної інформації.
- 7.4. На наступному етапі роботи алгоритму передбачена можливість використання результатів проведеної оптимізації розташування об'єктів на мережі, що базується на інтелектуальному методі променевої терапії.
- 7.5. Завантаження відповідної інформації про результати проведеної оптимізації розташування об'єктів. Ця інформація використовується в більшості випадків тоді, коли ми вирішуємо комплексну задачу оптимізації доставки вантажів від виробника до споживачів з використанням розподільчих центрів.
- 7.6. Визначення параметрів оптимізації. За замовчуванням, параметром оптимізації є мінімальна відстань між складом та точками доставки вантажів. На даному етапі користувач має можливість обрати інший критерій оптимізації, наприклад час доставки, а не відстань. Крім

того, тут задаються інші обмежуючі фактори, такі як часові вікна доставки вантажів, час на простої під розвантаженням тощо.

7.7. Отримання результатів оптимізації. На вказаному етапі користувачу інформаційної системи надається інформація про знайдений оптимальний маршрут доставки вантажу, який враховує реальну зміну динаміки транспортних потоків на відповідних ділянках ВДМ та всі обмеження, які були вказані користувачем (часові вікна, час на простої під розвантаження тощо). У випадку задоволення вимог користувача, він має можливість сформувати звіт з результатами проведеної оптимізації, побачити оптимальний маршрут на мапі тощо. У випадку необхідності зміни вхідних даних або параметрів оптимізації, користувач має можливість повернутись до п.7.1 роботи алгоритму та задати нові дані для оптимізації.

8. У випадку обрання блоку імітаційного моделювання та прогнозування зміни динаміки ТП, користувач має можливість вирішення модельної задачі знаходження оптимального (мінімального) маршруту обходу заданої кількості точок. Під час проведення пошуку оптимального маршруту доставки вантажів з урахуванням реальної динаміки транспортних потоків на ВДМ використовується інтелектуальний метод модифікованого мурашиного алгоритму, а опис динаміки транспортних потоків здійснюється за допомогою теорії трьох фаз Кернера.

8.1. Обираємо вхідні для проведення імітаційного моделювання. На цьому етапі роботи алгоритму користувач повинен вказати відповідні точки розташування на карті, по відношенню до яких буде здійснено пошук оптимального маршруту.

8.2. Визначаємо параметри оптимізації. Вказується інформація про те, що буде параметром оптимізації, наприклад, мінімальний час проходження маршруту між складом та точками доставки вантажів. Передбачена можливість зміни критерії оптимізації. Крім того, тут

задаються інші обмежуючі фактори, такі як часові вікна доставки вантажів, час на простої під розвантаженням тощо.

8.3. Отримуємо результати проведеного імітаційного моделювання та прогнозування зміни динаміки ТП на обраних ділянках ВДМ, що дає можливість використати отримані дані для побудови оптимальних маршрутів доставки вантажів в межах великих міст.

9. На етапі побудови звітів, користувачу надається можливість отримати результати у формі таблиць, графіків, діаграм або рисунків. Крім того, передбачена можливість друкування відповідних документів або їх збереження у різних форматах: .doc, .xls, .csv тощо.

10. Перед завершенням роботи алгоритму отримані результати записуються в БД для подальшого використання.

Цільовою аудиторією (зацікавленими сторонами) для розробленої інформаційної технології динамічної маршрутизації можуть бути:

- транспортні компанії, що надають послуги з перевезення вантажів у великих містах;
- виробничі компанії, які самостійно доставляють власну продукцію споживачам;
- торгові мережі, які мають розподільчі центри;
- Державне агентство автомобільних доріг України;
- Департаменти транспортної інфраструктури міських та обласних державних адміністрацій України;
- будь-який водій транспортного засобу тощо.

Як видно з переліку зацікавлених осіб, запропонована інформаційна технологія охоплює багато сфер логістики, та дозволяє спростити процес прийняття рішення.

В залежності від потреб зацікавлених осіб, кожен з них має можливість використання або частини модулів (блоків), або використання вцілому.

Можна виділити наступні групи змін, які забезпечує впровадження запропонованої інформаційної системи підтримки прийняття рішень процесу доставки вантажів у великих містах.

Зміни, що належать до першої групи, дозволяють покращити часові характеристики процесів без модифікації їх змісту. Такі зміни, не будучи революційними, дозволяють:

- автоматизувати роботу і скоротити ручну працю;
- аналізувати дані новими методами, які неможливо застосовувати вручну.

Друга група охоплює потреби організації послідовності виконання завдань у бізнес-процесі. Мета полягає в істотному покращенні процесів обробки інформації за рахунок:

- одночасного виконання різних робіт, використовуючи бази даних і мережі;
- переходу до розподіленої організації даних, що забезпечує доступ до інформації з різних місць;
- винесення частини процесів за межі компаній і надання клієнтам і партнерам можливості доступу до інформаційних систем;
- координування дій, що досягається за рахунок швидкого доступу до необхідної інформації у межах компанії;
- використання експертних систем для залучення співробітників середньої кваліфікації до виконання складних висококваліфікованих робіт.

Зміни з третьої групи не стосуються власне процесів, але дозволяють контролювати кожен конкретний елемент процесу і виявляти, де він стикається з тими ж проблемами.

5.2. Апробація інформаційної системи підтримки прийняття рішень «Логістичне управління доставки вантажів у великих містах»

Для перевірки можливості застосування запропонованої інформаційної системи підтримки та прийняття рішень процесу доставки вантажів у великих містах використовувались дані підприємства ТОВ «Фрозен Фрут». Обране підприємство здійснює доставку замороженої продукції дрібними партіями до споживачів, що розташовуються в м. Києві.

Особливості процесу доставки вантажів на підприємстві:

- Вага партій вантажу від 0,1 до 1т;
- Вантаж – свіжозаморожені овочі та фрукти;
- Доставка вантажу здійснюється спеціальним транспортом для підтримання постійно необхідної температури;
- Доставка вантажу здійснюється власним транспортом;
- Маршрути доставки є усталеними.

Для перевірки можливості застосування запропонованої інформаційної системи підтримки прийняття рішень процесу доставки вантажів у великих містах, використовувались дані по одному транспортному засобу, за 11 календарних днів. Вантаж перевозився автомобілем ГАЗ-3307.

На основі реальних даних з подорожніх листів, що були видані транспортному засобу, який здійснює перевезення товару від виробника до торгових точок проведено порівняльний аналіз ефективності побудови маршруту, виходячи з маршрутних даних згідно подорожнього листа та результатів оптимізації маршруту за вказаним алгоритмом, результати якого наведені у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 - Порівняльний аналіз побудови маршрутів доставки товару споживачам

№ м-ту	Маршрут згідно подорожнього листа	Пробіг, км	Витрати палива, л	Оптимізований маршрут	Пробіг, км	Витрати палива, л
1.	1-32-14-27-29-55-51-53-1	77	21	1-32-14-27-29-53-55-51-1	77	21
2.	1-47-7-10-6-13-1	111	31	1-47-6-7-10-13-1	86	24
3.	1-22-27-36-3-1	79	22	1-22-36-3-27-1	73	20
4.	1-50-45-5-24-8-49-54-55-53-51-1	118	33	1-24-50-5-45-8-54-53-49-55-51-1	100	28
5.	1-46-34-48-36-33-26-25-1	86	24	1-48-46-36-34-33-25-26-1	73	20
6.	1-4-5-2-3-1	104	29	1-4-3-5-2-1	90	25
7.	1-7-21-19-4-6-17-1	75	21	1-17-6-7-19-4-21-1	60	17
8.	1-53-55-54-24-23-48-8-1	67	19	1-55-53-54-8-24-23-48-1	63	18
9.	1-10-30-9-31-17-1	111	31	1-17-9-10-31-30-1	70	19
10.	1-49-12-11-34-33-36-1	96	27	1-49-12-11-33-36-34-1	81	22
11.	1-45-5-3-31-30-19-1	108	30	1-45-19-3-31-5-30-1	91	25
Всього:		1032	288		864	239

Як видно з таблиці 5.1 без урахування ваги перевезеного вантажу використання інформаційної технології, що базується на інтелектуальному методі мурашиної колонії довжина пробігу зменшується для конкретного маршруту на 168 км та, відповідно, витрати палива на 49 л.

Таблиця 5.2 - Порівняльний аналіз витрат палива в залежності від методу пошуку оптимального маршруту доставки товару

№ маршрут у	Перевезен о вантажу, т	Дані з подорожнього листа			Оптимізовані дані		
		пробіг , км	виконан о ткм	витрачен о палива, л	пробіг , км	виконан о ткм	витрачен о палива, л
1.	2,5	77	193	23	77	193	23
2.	3,2	111	355	34	86	275	27
3.	1,6	79	126	23	73	117	21
4.	2	118	236	35	100	200	30
5.	3,1	86	267	26	73	226	22
6.	2,5	104	260	31	90	225	27
7.	2,7	75	203	23	60	162	18
8.	2,3	67	154	20	63	145	19
9.	1,84	111	204	33	70	129	21
10.	2,07	96	199	29	81	168	24
11.	3,8	108	410	34	91	346	29
Всього	27,61	1032	2607	312	864	2185	261

Аналогічно проведено відповідний порівняльний аналіз з урахуванням ваги перевезеного вантажу (див. табл. 5.2), з якої видно, що відсоток зменшення витрат палива при застосуванні інформаційної технології, що базується на модифікованому методі самоорганізації мурашиної колонії при побудові оптимального маршруту доставки товару складає

$$\left(\frac{312 - 261}{312}\right) * 100\% = 16,4\%$$

Станом на сьогоднішній день обране нами підприємство здійснює розвезення товару власного виробництва у більше ніж 55 торгових точок у місті Києві, Київській області та інших населених пунктах України. Для цього використовуються 5 транспортних засобів наступних моделей: ГАЗ 3307 (2 автомобілі), ЗІЛ 5301 БО (2 автомобілі), MAN TGA01 (1 автомобіль). Кожен із зазначених транспортних засобів має свої техніко-експлуатаційні характеристики, серед яких: модель транспортного засобу, тип авто, місткість паливного баку, норма витрат палива (л/100км), максимальна швидкість, повна вага автомобіля, вантажопідйомність, габарити транспортного засобу (довжина,

ширина, висота), розмір внутрішньої платформи (довжина, ширина, висота), колісна формула та екологічний стандарт.

Для здійснення даного виду перевезень підприємства було знайдено ефективний транспортний засіб, що базується на основі запропонованого методу аналізу ієрархій Сааті. Таким автомобілем було визначено КАМАЗ 5308. Техніко-експлуатаційні характеристики даного транспортного засобу, а також фактично автомобіль ГАЗ 3307, який використовується в транспортних перевезеннях, наведені у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 - Техніко-експлуатаційні характеристики фактичного та ефективного транспортних засобів

№ п/п	Характеристика	Значення	
		фактичний автомобіль	ефективний автомобіль
1.	Модель транспортного засобу	ГАЗ 3307	КАМАЗ
2.	Тип транспортного засобу	фургон	сер.тон.
3.	Вид палива	А-80	ДП
4.	Паливний бак, л	100	400
5.	Норма витрат палива (л/100км) базові	27,7	17,6
6.	Максимальна швидкість, км/год	90	117
7.	Повна вага автомобіля, кг	7850	15000
8.	Вантажопідйомність, кг	4500	7500
9.	Габарити (довжина), мм	6330	9540
10.	Габарити (ширина), мм	2380	2550
11.	Габарити (висота), мм	2350	3520
12.	Розмір внутрішньої платформи (довжина), мм	3490	7120
13.	Розмір внутрішньої платформи (ширина), мм	2170	2550
14.	Розмір внутрішньої платформи (висота), мм	510	2350
15.	Колісна формула	4x2	4x2
16.	Екологічний тип (EURO)	0	IV

Аналогічний аналіз, проведений за вище вказаною схемою моделей транспортних засобів ГАЗ 3307 та КАМАЗ 5308 (див. табл. 5.4) доводить, що зменшення витрат палива при використанні запропонованого нами ефективного транспортного засобу КАМАЗ 5308 при доставці товару складає

$$\left(\frac{312 - 208}{312}\right) * 100\% = 33,3\%$$

Таким чином, у випадку заміни існуючого парку транспортних засобів на автомобілі, що були визначені як найбільш ефективні для даного виду доставки товару, дасть можливість зменшити витрати більше, ніж на 30%.

Таблиця 5.4 - Порівняльний аналіз витрат палива в залежності від моделі транспортного засобу

№ маршруту	перевезено вантажу, т	пробіг, км	виконано ткм	Витрачено палива, л	
				ГАЗ 3307	КАМАЗ 5308
1.	2,5	77	193	23	15
2.	3,2	111	355	34	23
3.	1,6	79	126	23	15
4.	2	118	236	35	23
5.	3,1	86	267	26	18
6.	2,5	104	260	31	21
7.	2,7	75	203	23	15
8.	2,3	67	154	20	13
9.	1,84	111	204	33	22
10.	2,07	96	199	29	19
11.	3,8	108	410	34	23
Всього	27,61	1032	2607	312	208

Проведені розрахунки показують, що застосування інформаційної технології, що базується на інтелектуальному методі модифікованого мурашиного алгоритму при побудові оптимального маршруту доставки товару дає можливість зменшити витрати палива в середньому на 15-20%. Заміна парку транспортних засобів на більш ефективні дозволить зменшити вартість доставки товару більше, ніж на 30%. Отже, запропоновані методи оптимізації маршруту та знаходження ефективного транспортного засобу дають можливість підприємству зменшити витрати на доставку товару в середньому

на 50%. В умовах жорсткої конкуренції на ринку даного виду послуг це може мати вирішальне значення.

Висновки до розділу 5

1. За результатами проведених досліджень, що описані в попередніх розділах дисертації, запропонована модель ІСППР при логістичному управлінні доставки вантажів, використання якої дозволяє підвищувати ефективність транспортування вантажів в межах великих міст. В рамках представленої моделі розроблено логічну архітектуру та алгоритм функціонування ІСППР.

2. Основними елементами запропонованої моделі ІСППР є модулі динамічної маршрутизації, моделювання та управління динамікою ТП, а також модуль оптимізації розташування розподільчих об'єктів, функціонування яких ґрунтується на розробленій інформаційній технології динамічної маршрутизації вантажних перевезень.

Ця інформаційна технологія базується на застосуванні розробленого на основі модифікованого мурашиного алгоритму інтелектуального методу оптимізації маршрутів доставки вантажів, який враховує нестационарну (реальну) динаміку ТП на ВДМ, та на результатах імітаційного моделювання динаміки ТП, що отримують в рамках використання цього методу. Основними модулями функціонування цієї інформаційної технології, відповідно, є модуль динамічної маршрутизації та модуль моделювання та управління динамікою ТП, між яким здійснюється обмін відповідними даними, необхідними для їх роботи.

Крім того, використання такої інформаційної технології дозволяє здійснювати оптимізацію процесу розташування розподільчих об'єктів транспортно-логістичних систем з подальшою оптимізацією маршрутів доставки вантажів при урахуванні нестационарної (реальної) динаміки транспортних потоків на ВДМ міста. Тут користувач має можливість при наявності вхідної інформації про кількість та обсяги потреб у товарах

замовників, а також про динамічний стан ВДМ міста в певний момент часу отримати вихідну інформацію про оптимальні кількість та місця розташування розподільчих центрів (складів) заданої місткості при доставці вантажів дрібних партій заданого обсягу від складу виробника до заданої кількості супермаркетів, як замовників відповідних видів товарів.

Важливо, що кожен із модулів можна використовувати окремо для вирішення відповідних задач, або ж комплексно для пошуку та визначення оптимальних рішень при логістичному управлінні доставки вантажів у великих містах.

3. Проведено апробацію запропонованої моделі ІСППР процесів доставки вантажів у великих містах на прикладі підприємства ТОВ «Фрозен Фрут», що здійснює доставку замороженої продукції дрібними партіями до споживачів у м. Києві. За результатами досліджень визначено, що застосування розроблених інформаційних технологій дає можливість зменшити витрати палива на транспортування вантажів в середньому на 15-20%. Заміна парку ТЗ на більш ефективні дозволяє зменшити вартість доставки товару більше, ніж на 30%. Отримані результати вказують на те, що застосування запропонованої моделі ІСППР та відповідних інформаційних технологій дозволяє суттєво підвищувати ефективність функціонування транспортно-логістичних систем доставки вантажів у великих містах.

4. Розроблено рекомендації щодо використанні ІСППР та розроблених інформаційних технологій процесів доставки вантажів, де, зокрема, визначено групи зацікавлених сторін (підприємств), які приймають участь у розробці, створенні та впровадженні ефективних транспортно-логістичних систем як підсистем ІТС з оптимізації та оперативного управління процесами доставки вантажів на ВДМ великих міст, а також у транспортуванні вантажів і мають можливість отримувати зазначену інформацію в реальному режимі часу з використанням відповідних інформаційно-комунікаційних технологій для ефективного здійснення цих процесів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Головним результатом дисертаційної роботи є створення на основі запропонованих інтелектуальних методів оптимізації та узагальнення отриманих результатів імітаційних досліджень, сучасного науково-практичного базису інтелектуалізації транспортно-логістичних систем доставки вантажів у великих містах шляхом реалізації розробленої інтелектуальної інформаційної технології динамічної маршрутизації вантажних перевезень в реальному режимі часу з урахуванням нестаціонарної (реальної) динаміки транспортних потоків на ділянках ВДМ.

За підсумками дисертаційного дослідження сформульовані такі основні висновки:

1. Проведений аналіз методів, моделей та інформаційних технологій показав, що існуючі на сьогоднішній день методи та моделі оптимізації маршруту транспортних перевезень та відповідні програмно-технічні комплекси в основному вирішують задачі маршрутизації для стаціонарних станів транспортної мережі, коли швидкості на ділянках таких мереж не змінюються. Відсутні адекватні теоретичні уявлення про динаміку ТП в області фазових переходів від вільного до синхронізованого стану та щільних станів формування ТП. Існуючі інформаційні технології не вирішують проблему динамічної маршрутизації вантажних перевезень в реальному режимі часу на ВДМ міст з урахуванням нестаціонарної динаміки ТП.

2. За допомогою синергетичного підходу в роботі розвинуто теоретичні уявлення про динаміку транспортних потоків в області високої щільності. Зокрема, в рамках синергетичної моделі Лоренца, проведено інтерпретацію експериментальної фазової діаграми Кернера переходу від вільного до синхронізованого транспортного потоку, а також в області щільного транспортного потоку. В рамках цієї мікроскопічної моделі отримано функціональні залежності швидкості руху ТЗ від щільності транспортного

потоків, які вказують на наявність чітких границь переходу між відповідними фазами динаміки ТП.

3. На прикладі оптимізаційної задачі маршрутизації вантажних перевезень на ВДМ великих міст розроблено модифікацію існуючого класичного мурашиного алгоритму дискретної оптимізації маршрутів інформаційних потоків різної природи, з метою зменшення часу пошуку оптимальних рішень та реалізації можливості урахування впливу зовнішнього нестационарного середовища на швидкість передачі інформації по ланцюгах інформаційної мережі. Основні зміни пов'язані з тим, що синхронний циклічний рух мурашиної колонії замінено на асинхронний рух кожного мурашиного агента із певною (відмінною однієї від іншої) швидкістю. Також існує можливість фіксації результатів оптимізації частково пройденого шляху для розрахунку подальшого маршруту при зміні умов руху цих агентів, як аналогів ТЗ, під впливом зовнішнього середовища. Для перевірки коректності використання модифікованого мурашиного алгоритму проводились тестові дослідження оптимізації маршруту за довжиною з використанням методу повного перебору та методу гілок та меж. Отримані результати досліджень у повній мірі збігаються з такими, що отримані за допомогою модифікованого мурашиного алгоритму. При цьому час пошуку оптимальних рішень зменшується більше, ніж на 15%.

4. На основі модифікованого мурашиного алгоритму розроблено інтелектуальний метод оптимізації маршрутів доставки вантажів з урахуванням нестационарної (реальної) динаміки транспортних потоків на ВДМ міста. При цьому функціональні залежності зміни швидкості транспортного потоку від характерного часу та щільності навантаження на ділянках дорожньої мережі визначаються в рамках синергетичної моделі Лоренца. Для апробації запропонованого методу здійснені імітаційні моделювання процесів оптимізації маршруту в рамках задачі комівояжера на прикладі ВДМ м. Києва та м. Кіто (Quito), столиці Еквадору. При проведенні імітаційного моделювання було

виявлено низку ефектів, які пов'язані з перебудовою оптимальних маршрутів при зменшенні середніх швидкостей руху ТЗ на модельних ділянках ВДМ до певних граничних значень, які відповідають певним режимам руху транспортних потоків.

5. Розроблено інтелектуальний метод оптимального розташування розподільчих об'єктів доставки вантажів на ВДМ міста, що має важливе значення для ефективного управління логістичними процесами при вантажних перевезеннях. Цей метод базується на використанні методу планування променевої терапії злоякісних новоутворень та модифікованого мурашиного алгоритму. Апробація методу здійснювалась на прикладі фрагменту ВДМ м. Києва, де розглядалась оптимізаційна задача визначення за кількістю та місцем розташування розподільчих центрів (складів) заданої місткості при доставці вантажів дрібних партій заданого обсягу від складу виробника до заданої кількості супермаркетів. Результати досліджень показують, що запропонований метод дозволяє значно мінімізувати вартість доставки товару від виробника до споживача (до 23 %).

6. За результатами проведених досліджень, в рамках запропонованої моделі ІСППР при логістичному управлінні доставки вантажів у великих містах, розроблено інтелектуальну інформаційну технологію динамічної маршрутизації вантажних перевезень, що базується на застосуванні розроблених методів оптимізації маршрутів та розташування розподільчих об'єктів доставки вантажів. Отримані результати апробації ІСППР вказують на можливість суттєвого (принаймні до 30%) підвищення ефективності функціонування транспортно-логістичних систем доставки вантажів.

7. Розроблено рекомендації щодо застосування моделі ІСППР та запропонованої інформаційної технології для управління процесами доставки вантажів, де, зокрема, визначено групи зацікавлених сторін (підприємств), які приймають участь у розробці, створенні та впровадженні ефективних транспортно-логістичних систем як підсистем ІТС з оптимізації та

оперативного управління процесами доставки вантажів на ВДМ великих міст, а також у транспортуванні вантажів і мають можливість отримувати зазначену інформацію в реальному режимі часу з використанням відповідних інформаційно-комунікаційних технологій для ефективного здійснення цих процесів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Першаков В.М., Белятинський А.О., Ступанчук О.В., Кротов Р.В. Дослідження транспортних потоків в аспекті заторових станів дорожнього руху: Монографія. – К.: НАУ, 2015. – 177с.
2. Мигаль В.Д. Інтелектуальні системи в технічній експлуатації автомобілів: монографія. Харків. Майдан, 2018. 262 с.
3. Benjelloun A., Crainic T. G., Bigras Y. Towards a Taxonomy of City Logistics Projects. *Procedia Social and Behavioral Sciences*. 2010. №2 pp. 6217-6228.
4. Arango M.D., Adarme W. Y., and Zapata J.A. La movilidad de carga en ciudades metrópolis - logística de ciudades. *Apotema S.A.S*. ISBN: 978-958-44-9517-4, 2011.
5. Pillac V., Gendreau M., Gueret C., Medaglia A. A Review of Dynamic Vehicle Routing Problems. *CirreIt*, 2011.
6. Crainic, T. City Logistics. *CirreIt*, 2008.
7. Arango M.D., Adarme W., Zapata J. A. Distribución de commodities, usando medios alternativos de transporte. *Caso Colombia Pymes panificadoras*, DYNA. vol. 77, pp. 222-233.
8. Taniguchi E., Thompson R.G., Yamada T. Recent Advances in Modelling City Logistics. *City Logistics II*, Institute of Systems Science Research. Kyoto. 2001. pp. 3-34.
9. Taniguchi E., Thomson R., Yamada T. Visions for City Logistics. *Logistics systems for sustainable cities*, Elsevier. 2004. pp. 1-16.
10. Tamagawa D., Taniguchi E., Yamada T. Evaluating City Logistics Measures using a Multi-agent Model. *Procedia Social and Behavioral Sciences*. 2010. vol. 2. pp. 6002-6012.
11. Jarasuniene A. Research Into Intelligent Transport Systems (ITS) Technologies and Efficiency. *Transport*. 2007. Vol. XXII, No 2. pp. 61-67.

12. Perego A., Perotti S., Mangiaracina R. ICT for Logistics and freight transportation: a literature review and research agenda. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. 2011. Vol. 41, No. 5. pp. 457-483.
13. Gilmore D., Tompkins J. Transport Plays Key Role in Supply Strategy. *ID Systems*. 2000. Vol. 20. pp. 16-17.
14. Tyan J.C., Wang F.K., Du T. Applying Collaborative Transportation Management Models in Global Third-Party Logistics. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2003. Vol. 16, No. 4. pp. 283-291.
15. Giaglis G.M., Minis I., Tatarakis A., Zeimpekis V. Minimizing Logistics Risk through Real-Time Vehicle Routing and Mobile Technologies. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. 2004. Vol. 34, No. 9. pp. 749-764.
16. Rodina E., Zeimpekis V., Fouskas K. Remote Workforce Business Processes Integration through Real-Time Mobile Communications. *Proceedings of 2nd International Conference on Mobile Businesses*. Vienna. 2003.
17. Agre P.E., Harbs C.A. Social Choice about Privacy: Intelligent Vehicle-highway Systems in the United States. *Information Technology & People*. 1994. Vol. 7, No. 4. pp. 63-90.
18. Barrero F., Toral S., Vargas M., Cortés F., Milla J. M. Internet in the Development of Future Road-traffic Control Systems. *Internet Research*. 2010. Vol. 20, No. 2. pp. 154-168.
19. Lee J. K., Ye-Hwan Lim, Sung-Do Chi. Hierarchical Modeling and Simulation Environment for Intelligent Transportation Systems. *Simulation*. 2004. Vol. 80, No. 2. pp. 61-76.
20. FHWA. Traffic Monitoring Guide Truck Weight Monitoring (Section 5). Available in: <http://www.fhwa.dot.gov/policy/ohpi/hss/presentations/truckweight.htm>. Дата звернення: січень 2021.

21. Q-free. CVIS.- Cooperative vehicle-infrastructure systems. European commission Information society and media. Available in: http://www.cvisproject.org/download/qfree_cvis_brosjyre.pdf. Дата звернення: січень 2021.
22. Dimitrakopoulos G. Intelligent Transportation Systems based on Internet-Connected Vehicles: Fundamental Research Areas and Challenges. *11th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*. IEEE, 2011.
23. Bagherpoor Z., Parhizi S., Hoseininia M., Heidari N., Yaghin R.G. Warehouse Location Problem. In: Zanjirani Farahani R., Hekmatfar M. Facility Location. Contributions to Management Science. Physica, Heidelberg, 2009. https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2151-2_13
24. Reza Zanjirani Farahani, Masoud Hekmatfar. Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies. 2009. 544p.
25. Drezner Z. Location of regional facilities. *Naval Res Logist Quart.* 1986. Vol. 33. pp. 523–529.
26. Zaferanieh M., Taghizadeh K.H, Brimberg J., Wesolowsky G.O. ABSSS algorithm for the single facility location problem in two regions with different norms. *Eur J Oper Res.* 2008. Vol. 190, No. 1. pp. 79–89.
27. Allen W.R. An improved bound for the multifacility location model. *Oper Res Lett.* 1995. Vol. 17, No. 4. pp. 175–180.
28. Aykin T., Babu A.J.G. Multifacility location problems on a sphere. *Int J Math Math Sci.* 1987. Vol. 10, No. 3. pp. 583–596.
29. Davoud Pour H., Nosraty M. Solving the facility and layout and location problem by antcolony optimization-metaheuristic. *Int J Prod Res.* 2006. Vol. 44, No. 23. pp. 5187–5196.
30. Abreu N.M., Querido T.M., Boaventura-Netto P.O. A simulated annealing for the quadratic assignment problem. *RedInv- SA. RAIRO Oper Res.* 1999. Vol. 33, No. 3. pp. 249–273.

31. Acan A. An external partial permutations memory for ant colony optimization. *Lect Notes Comput Sci.* 2005. Vol. 3448. pp. 1–11.
32. Adams W.P., Guignard M., Hahn P.M., Hightower W.L. A level-2 reformulation-linearization technique bound for the quadratic assignment problem. *Eur J Oper Res.* 2007. Vol. 180, No. 3. pp. 983–996.
33. Araz C., Hasan S., Irem O. A fuzzy multi objective covering-based vehicle location model for emergency services. *Comput Oper Res.* 2007. Vol. 34. pp. 705–726.
34. Farahani R., Asgari N. Combination of MCDM and covering techniques in a hierarchical model for facility location: A case study. *Eur J Oper Res.* 2007. Vol. 176, No. 3. pp. 1839–1858.
35. Alba E., Dominquez E. Comparative analysis of modern optimization tools for the p-median problem. *Stat Comput.* 2006. Vol. 16. pp. 251–260.
36. Correa E.S., Steiner M.T.A., Freitas A.A., Carnieri C. Genetic algorithm for solving a capacitated p-median problem. *Numer Algorithms.* 2004. Vol. 35. pp. 373–388.
37. Lorena L., Senne E. A column generation approach to capacitated p-median problems. *Oper Res.* 2004. Vol. 31. pp. 863–876.
38. Chan Y., Mahan J.M., Chrissis J.W., Drake D.A., Wang D. Hierarchical maximal coverage location allocation: Case of generalized search-and-rescue. *Comput Oper Res.* 2008. Vol. 35. pp. 1886–1904.
39. Espejo L.G.A., Galvao R.D., Boffey B. Dual-based heuristics for a hierarchical covering location problem. *Comput Oper Res.* 2003. Vol. 30. pp. 165–180.
40. Ignacio A.A.V., Filho V.J.M.F., Galvao R.D. Lower and upper bounds for atwo-level hierarchical location problem in computer networks. *Comput Oper Res.* 2008. Vol. 35. pp. 1982–1998.
41. Sahin G., Sural H. A review of hierarchical facility location models. *Comput Oper Res.* 2007. Vol. 34. pp. 2310–2331.

42. Aboolian R., Berman O., Krass D. Competitive facility location and design problem. *Eur J Oper Res.* 2006. Vol. 182. pp. 40–62.
43. Beasley J.E. An algorithm for solving large capacitated warehouse location problems. *Eur J Oper Res.* 1988. Vol. 33. pp. 314–323.
44. Heras F., Larrosa J. Intelligent variable orderings and re-orderings in DAC-based solvers for WCSP. *Heuristics.* 2006. Vol. 12. pp. 287–306.
45. Melachrinoudis E., Min H. Redesigning a warehouse network. *Eur J Oper Res.* 2007. Vol. 176. pp. 210–229.
46. Nagy T. Warehouse location problem. Available online at <http://www.freehackers.org>. 2004.
47. Nuass R.M. An improved algorithm for the capacitated facility location problem. *Oper Res Soc.* 1978. Vol. 29, No. 12. pp. 1195–1201.
48. Sharma R.K., Berry V. Developing new formulations and relaxations of single stage capacitated warehouse location problem (SSCWLP): Empirical investigation for assessing; relative strengths and computational effort. *Eur J Oper Res.* 2007. Vol. 177. pp. 803–812.
49. Cappanera P., Gallo G., Maffioli F. Discrete facility location and routing of obnoxious activities. *Discrete Appl Math.* 2004. Vol. 133. pp. 3–28.
50. Yapicioglu H., Smith A.E., Dozier G. Solving the semi-obnoxious facility location problem using bi-objective particle swarm. *Eur J Oper Res.* 2007. Vol. 177. pp. 733–749.
51. Dias J., Captivo E., Climaco J. Efficient primal-dual heuristic for a dynamic location problem. *Comput Oper Res.* 2007. Vol. 34. pp. 1800–1823.
52. Rajagopalan H., Saydamb C., Xiaoc J. A multiperiod set covering location model for dynamic redeployment of ambulances. *Comput Oper Res.* 2008. Vol. 35. pp. 814–826.
53. Lin C.K.Y., Kwok R.C.W. Multi-objective meta heuristics for a location-routing problem with multiple use of vehicles on real data and simulated data. *Eur J Oper Res.* 2006. Vol. 175. pp. 1833–1849.

54. Puerto J., Fernandez F.R. Multicriteria mini-sum facility location problems. *J Multicriteria Decision Anal.* 1999. Vol. 8. pp. 268–280.
55. Rakas J., Teodorovic D., Kim T. Multi-objective modeling for determining location of undesirable facilities. *Transp Res.* 2004. Vol. 9. pp. 125–138.
56. Yang L., Jones B.F., Yang S.H. A fuzzy multi-objective programming for optimization of fire station locations through genetic algorithms. *Eur J Oper Res.* 2007. Vol. 181. pp. 903–915.
57. Altiparmak F., Gen M., Lin L., Paskoy T. A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks. *Comput Ind Eng.* 2006. Vol. 51. pp. 197–216.
58. Amiri A. Designing a distribution network in a supply chain system: Formulation and efficient solution procedure. *Eur J Oper Res.* 2006. Vol. 171. pp. 567–576.
59. Daskin M.S., Snyder L.V., Berger R.T., Langevin A., Riopel D. Facility location in supply chain design. *Logistics systems: Design and operation.* Springer. New York. 2005. pp. 39–66.
60. Hinojosaa Y., Kalcsicsb J., Nickelc S., Puertod J., Veltene S. Dynamic supply chain design with inventory. *Comput Oper Res.* 2008. Vol. 35. pp. 373–391.
61. Кочетов Ю.А. Двухуровневые задачи размещения. *Труды ИВМ и МГ СО РАН: Серия Информатика.* 2007. №7. С. 97-104.
62. Owen S.H., Daskin M.S. Strategic facility location: A review. *European Journal of Operational Research.* 1998. Vol. 111. pp. 423-447.
63. Melo M. T., Nickel S., Saldanha da Gama F. Dynamic multi-commodity capacitated facility location: a mathematical modeling framework for strategic supply chain planning. *Computers and Operations Research.* 2006. Vol. 33. pp. 181-208.

64. Berman O., Krass D. Facility location problems with stochastic demands and congestion. *Facility location: applications and theory*. 2001. pp. 329-371.
65. Sathe A., Miller-Hooks E. Optimizing location and relocation of response units in guarding critical facilities. *Journal of the Transportation Research Board*. 2005. Vol. 1923. pp. 127-136.
66. Current J.R., Ratrick S., ReVelle C. Dynamic facility location when the total number of facilities is uncertain: a decision analysis approach. *European Journal of Operations Research*. 1998. Vol. 110. pp. 597-609.
67. Ярославцева, М.В. Обзор методов оптимального размещения объекта бизнеса.
<http://sevntu.com.ua/jspui/bitstream/123456789/1306/1/econom.732005.85-96.pdf>.
68. Казаков А.Л., Поспелов А.М. Определение оптимального местонахождения базового контейнерного терминала. *Транспорт Урала*. 2008. № 2(17). С. 57–64.
69. Казаков А.Л., Лемперт А.А. Об одном подходе к решению задач оптимизации, возникающих в транспортной логистике. *Автоматика и телемеханика*. 2011. № 7. С. 50 -57.
70. Клеппер Л.Я. Оптимизация поля действия конечного числа источников в непрерывной среде. *Экономика и математические методы*. 2009. № 2(45). С.113-119.
71. Коряшкина Л.С., Гранкина Н.А. Об одной модели задачи оптимизации размещения и поля действия конечного числа источников в непрерывной среде. *Сборник материалов IX Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Наука и образование – 2014»*. Астана. 2014.
72. Киселева Е.М., Коряшкина Л.С. Модели и методы непрерывных задач оптимального разбиения множеств: линейные, нелинейные, динамические задачи. Киев. Наукова думка. 2013. 606 с.

73. Love R.F., Morris J.G., Wesolowsky G.O. Facilities location: models and methods. North-Holland. 1988. 296 p.
74. Daskin M.S. Network and discrete location: models, algorithms, and applications. Wiley. 1995. 498 p.
75. Sonmez A.D., Lim G.J. A decomposition approach for facility location and relocation problem with uncertain number of future facilities. *European Journal of Operational Research*. 2012. Vol. 218, No. 2. pp. 327-338.
76. Wei Gu, Xin Wang, McGregor E.S. Optimization of preventive health care facility locations. *International Journal of Health Geographics*. 2010. Vol. 9, No. 1. pp. 9-17.
77. Griffin P.M., Scherrer C.R., Swann J.L. Optimization of community health center locations and service offerings with statistical need estimation. *IIE Transactions*. 2008. Vol. 40, No. 9. pp. 880-892.
78. Frank C., Wagner D., Wattenhofer R. Facility Location. Algorithms for Sensor and Ad-Hoc Networks. *Lecture Notes in Computer Science*. 2007. Vol. 4621. Springer, Berlin, Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-74991-2_8
79. Korte B., Vygen J. Facility Location. Combinatorial Optimization. *Algorithms and Combinatorics*. 2018. Vol. 21. Springer, Berlin, Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-56039-6_22
80. V. Chvatal. Selected combinatorial research problems. — *Technical Report STAN-CS-72-292*. — Computer Science Department, Stanford University, 1972.
81. Гаджинский А.М. Логистика: Учебник для высших и средних специальных учебных заведений. Москва. Информационно-внедренческий центр «Маркетинг». 2000.
82. Ковалев В.П. Эффективность грузовых автомобильных перевозок: Состояние, проблемы, перспективы. Минск, Беларусь. 1984.

83. Просветов Г. И. Математические методы в логистике. Москва. РДЛ. 2006.
84. Левитин А.В. Глава 3. Метод грубой силы: Задача коммивояжера. *Алгоритмы: введение в разработку и анализ (Introduction to The Design and Analysis of Algorithms)*. Москва. «Вильямс». 2006. С. 159-160.
85. Lenstra J. K., Rinnooy Kant A. H. G.. Complexity of vehicle routing and scheduling problems. *Networks*. 1981. Vol. 11, No. 2. pp. 221-227.
86. Subramanian A. Heuristics exact and hybrid approaches for vehicle routing problems. *Universidade Federal Fluminense. Tesis Doctoral*. Niteroi. 2012. pp. 13-19.
87. Berbeglia G., Cordeau J. F., Laporte G.. Dynamic pick up and delivery problems. *European Journal of Operational Research. Elsevier*. 2009. pp. 8-15.
88. Abdullahi A. Ibrahim, Rabiati O. Abdulaziz Jeremiah A. Ishaya, Samuel O. Sowole. Vehicle Routing Problem with Exact Methods. *OSR Journal of Mathematics (IOSR-JM)*. 2019. Vol.15, Issue 3. pp. 05-15.
89. Malczewski J., Rinner C. Heuristic Methods. *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science. Advances in Geographic Information Science*. 2015. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74757-4_6
90. Cuevas E., Barocio Espejo E., Conde Enríquez A. Introduction to Metaheuristics Methods. *Metaheuristics Algorithms in Power Systems. Studies in Computational Intelligence*. 2019. Vol 822. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11593-7_1
91. Marti K. Hybrid Methods. *Optimization Under Stochastic Uncertainty. International Series in Operations Research & Management Science*. 2020. Vol. 296. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55662-4_17

92. Braekers K., Ramaekers K., Van Nieuwenhuyse I. The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers & Industrial Engineering*. 2016. Vol. 99. pp. 300-313.
93. Farik M., Shawkat Ali. Algorithm To Ensure And Enforce Brute-Force Attack-Resilient Password In Routers. *International journal of scientific & technology research*. 2018. Vol. 4, No. 10.
94. Fayez M., Katib I., Rouskas G., Gharib T. F., Khaled H., Faheem H. Performance Evaluation of Brute Force Techniques for Routing and Spectrum Assignment in Elastic Optical Network Using MPI and CUDA. *International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, Las Vegas. NV. USA. 2018. pp. 1422-1426.
DOI: 10.1109/CSCI46756.2018.00274.
95. Jiang Z., Sahasrabudhe V., Mohamed A., Grebel H., Rojas-Cessa R. Greedy Algorithm for Minimizing the Cost of Routing Power on a Digital Microgrid. *Energies*. 2019. Vol. 12. P. 3076.
<https://doi.org/10.3390/en12163076>.
96. Azlinah M., Marina Y., Sofianita M., Shuzlina A. R. Modified Branch and Bound Algorithm. *Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on Evolutionary Computing*. Vancouver. British Columbia. Canada. June 19-21, 2007. pp. 274 – 279.
97. Lawler E. W., Wood D. E. Branch and Bound Methods. *Operations Research*. 1977. Vol. 14. pp. 99- 118.
98. Бастриков Ю., Протасова Л., Гапизов А., Кузнецов, М. Estimation of perspectivity of branches in the method of branches and borders when solving the traditional traffic task. *Electrotechnic and Computer Systems*. 2019. Vol. 30, No. 106, pp. 93-98.
<https://doi.org/10.15276/eltecs.30.106.2019.10>.
99. Chauhan C., Gupta R., Pathak K. Survey of Methods of Solving TSP along with its Implementation using Dynamic Programming Approach.

International Journal of Computer Applications. 2012. Vol. 52, No.4. pp. 0975 – 8887.

100. Bouman P., Agatz N. A.H. and Schmidt M. Dynamic Programming Approaches for the Traveling Salesman Problem with Drone. September 11, 2017. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3035323>.

101. Mingozzi A., et al. Dynamic Programming Strategies for the Traveling Salesman Problem with Time Window and Precedence Constraints. *Operations Research*. 1997. Vol. 45. No. 3. pp. 365–377.

102. Baidoo E., Opoku S. Solving the TSP using Traditional Computing Approach. *International Journal of Computer Applications*. 2016. Vol. 152, No. 8. pp. 0975 – 8887.

103. Wilfahrt R., Kim S. Traveling Salesman Problem (TSP). *Encyclopedia of GIS*. 2008. Springer, Boston, MA.

https://doi.org/10.1007/978-0-387-35973-1_1406.

104. Rosenberg E. Dynamic Routing Methods. A Primer of Multicast Routing. 2012. *Springer Briefs in Computer Science*. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1873-3_3

105. Casazza M., Ceselli A., Calvo W. A route decomposition approach for the single commodity Split Pickup and Split Delivery Vehicle Routing Problem. *European Journal of Operational Research*. Vol. 289, Issue 3. 2021. pp. 897-911.

106. Colin J.Y., Nakechbandi M., Ould Cheikh A.S. Searching Shortest Paths on Weakly Dynamic Graphs. *Proceedings of the European Conference on Complex Systems*. 2013. Springer Proceedings in Complexity. Springer, Cham.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-00395-5_21

107. A. Fabri, P. Recht. On dynamic pickup and delivery vehicle routing with several time windows and waiting times. *Transportation Research Part B: Methodological*. Vol. 40, Issue 4. 2006. pp. 335-350.

108. Hsu-Hao Yang, Yen-Liang Chen. Finding K shortest looping paths with waiting time in a time–window network. *Applied Mathematical Modelling*. Vol. 30, Issue 5. 2006. pp. 458–465.
109. Stubhaug A. Waiting Time. *Gösta Mittag-Leffler*. 2010. Springer, Berlin, Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-11672-8_23
110. Leite, P., Teixeira, J.M., Farias, T. Nearest Neighbor Searches on the GPU. *Int J Parallel Prog.* 2012. Vol. 40. pp. 313–330.
<https://doi.org/10.1007/s10766-011-0184-3>
111. Chung Y.C., Su I.F., Lee C. Multiple k nearest neighbor search. *World Wide Web*. 2017. Vol. 20. pp. 371–398.
<https://doi.org/10.1007/s11280-016-0392-2>.
112. Baraglia R., Ignacio Hidalgo J., Perego R. A Parallel Hybrid Heuristic for the TSP. Applications of Evolutionary Computing. *EvoWorkshops 2001. Lecture Notes in Computer Science*. 2001. Vol. 2037. Springer, Berlin, Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/3-540-45365-2_20.
113. Duarte A., Laguna M., Martí R. Tabu Search. Metaheuristics for Business Analytics. *EURO Advanced Tutorials on Operational Research*. 2008. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-68119-1_4.
114. Glover F. Heuristics for integer programming using surrogate constraints. *Decision Sciences*. 1977. Vol. 8. pp. 371–392.
115. Martí R., Laguna M., Glover F., Campos V. Reducing the bandwidth of a sparse matrix with tabu search. *European Journal of Operational Research*. 2001. Vol. 135. pp. 450–459.
116. Glover F.W. Tabu Search. *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*. 2013. Springer, Boston, MA.
https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1153-7_1034.

117. Gendreau M., Soriano P., Salvail L. Solving the maximum clique problem using a tabu search approach. *Annals of Operations Research*. 1993. Vol. 41. pp. 385–404.
118. Antony S., Jayarajan J.N. Playlist Generation Using Reactive Tabu Search. *Emerging ICT for Bridging the Future - Proceedings of the 49th Annual Convention of the Computer Society of India CSI*. 2015. Vol. 2. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 338. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13731-5_12.
119. Xiangyong Li, Lanjian Zhu, Fazle Baki, Chaouch A.B. Tabu search and iterated local search for the cyclic bottleneck assignment problem. *Computers & Operations Research*. Vol. 96. 2018. Pp. 120-130.
120. Jianyou Xu, Shang-Chia Liu, Chuanli Zhao, Junjie Wu, Win-Chin Lin, Pay-Wen Yu. An iterated local search and tabu search for two-parallel machine scheduling problem to minimize the maximum total completion time. *Journal of Information and Optimization Sciences*. 2019. Vol. 40, Issue 3. pp. 751-766.
DOI: [10.1080/02522667.2018.1468610](https://doi.org/10.1080/02522667.2018.1468610).
121. Pardalos P.M., Mavridou T.D. Simulated Annealing. *Encyclopedia of Optimization*. 2008. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-0-387-74759-0_617.
122. Chopard B., Tomassini M. Simulated Annealing. *An Introduction to Metaheuristics for Optimization. Natural Computing Series*. 2018. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-93073-2_4.
123. Vinícius Nunes Carvalho, Sezimária de Fátima Pereira Saramago. Improved Simulated Annealing. *Congresso Nacional de Matemática Aplicada à Indústria, Blucher Mathematical Proceedings*. 2015. Vol. 1. pp. 213-222.
124. Gerber M., Bornn L. Improving simulated annealing through derandomization. *J Glob Optim*. 2017. Vol. 68. pp. 189–217. <https://doi.org/10.1007/s10898-016-0461-1>.

125. Blum C., Puchinger J., Raidl G., Roli A. Hybrid Metaheuristics. Hybrid Optimization. *Springer Optimization and Its Applications*. 2011. Vol. 45. Springer, New York, NY.

https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1644-0_9.

126. Walshaw C. Multilevel refinement for combinatorial optimisation: boosting metaheuristic performance. Hybrid metaheuristics – an emerging approach to optimization. *Studies in computational intelligence*. 2008. Vol. 114. Springer, Berlin, pp. 85–116.

127. Raidl G.R. A unified view on hybrid metaheuristics. *Proceedings of HM 2006 – third international workshop on hybrid metaheuristics. Lecture notes in computer science*. 2006. Vol. 4030. Springer, Berlin, pp. 1–12.

128. Oliveira C.A.S., Pardalos P.M. A Hybrid Metaheuristic for Routing on Multicast Networks. *Springer Proceedings in Mathematics & Statistics*. 2006. Vol. 104. Springer, Cham.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-09758-9_9.

129. Dorigo M., Di Caro G. The ant colony optimization meta-heuristic. *New Idea in Optimization*. 1999. pp. 11–32.

130. Dorigo M., Gambardella L.M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Trans. Evol. Comput.* 1997. Vol. 1. Pp. 53–66.

131. Fidanova S. Ant Colony Optimization. *Studies in Computational Intelligence*. 2021. Vol. 947. Springer, Cham.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-67380-2_2.

132. Resende M.G.C., Ribeiro C.C. Local search. *Optimization by GRASP*. 2016. Springer, New York, NY.

https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6530-4_4.

133. Stützle T., Ruiz R. Iterated Local Search. *Handbook of Heuristics*. 2018. Springer, Cham.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-07124-4_8.

134. Okwu M.O., Tartibu L.K. Genetic Algorithm. Nature-Inspired Algorithms Swarm and Computational Intelligence, Theory and Applications. *Studies in Computational Intelligence*. 2021. Vol. 927. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61111-8_13.
135. Raymer M.L., Punch W.F., Goodman E.D., Kuhn L.A., Jain A.K. Dimensionality reduction using genetic algorithms. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2000. Vol. 4, Issue 2. pp. 164–171.
136. Judson R.S. Genetic Algorithms. *Encyclopedia of Optimization*. 2008. Springer, Boston, MA.
https://doi.org/10.1007/978-0-387-74759-0_218.
137. Dzidolikaite A. Hybrid genetic algorithm. *Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream)*. 2015. Vilnius, Lithuania. 2015. pp. 1-4.
DOI: 10.1109/eStream.2015.7119482.
138. Brynn Hibbert D. Hybrid genetic algorithms. *Data Handling in Science and Technology*. 2003. Vol. 23. pp. 55-68.
139. Kaveh A. Particle Swarm Optimization. *Advances in Metaheuristic Algorithms for Optimal Design of Structures*. 2021. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59392-6_2.
140. Chen W.N., Zhang J., Chung H.S.H., Zhong W.L., Wu W.G., Shi Y. A novel set-based particle swarm optimization method for discrete optimization problems. *IEEE Trans Evol Comput*. 2010. Vol. 14, Issue 2. pp. 278–300.
141. Gomes M.H. Truss optimization with dynamic constraints using a particle swarm algorithm. *Expert Syst Appl*. 2011. Vol. 38. Pp.957–968.
142. Jianhao T., Jing Z., Caixia S., Ya W. A Coevolution Algorithm in the Image Recognition System. *2013 Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications*, Hong Kong, China, 2013, pp. 22-25.
DOI: 10.1109/ISDEA.2012.12.

143. Tian J., Li M., Chen F. A Cooperative Coevolution Algorithm of RBFNN for Classification. *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining. PAKDD 2007. Lecture Notes in Computer Science*. 2007. Vol. 4426. Springer, Berlin, Heidelberg.

https://doi.org/10.1007/978-3-540-71701-0_89

144. Joshi A.V. Evolutionary Algorithms. *Machine Learning and Artificial Intelligence*. 2020. Springer, Cham.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-26622-6_10.

145. Corne D., Lones M.A. Evolutionary Algorithms. *Handbook of Heuristics*. 2018. Springer, Cham.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-07124-4_27

146. Xia S., Li M., Yu J. Logistics Transportation System Based on the Differential Evolutionary Algorithm. *2020 Chinese Automation Congress (CAC)*, Shanghai, China. 2020. pp. 5817-5820.

DOI: 10.1109/CAC51589.2020.9327852.

147. Yin P.-Y., Chen P.-Y., Wei Y.-C., Day R.-F. Cyber Firefly Algorithm Based on Adaptive Memory Programming for Global Optimization. *Appl. Sci*. 2020. Vol. 10. Pp. 8961.

<https://doi.org/10.3390/app10248961>

148. Furian N., Vössner S. A hybrid algorithm for constrained order packing. *Cent Eur J Oper Res*. 2014. Vol. 22. Pp. 157–186. <https://doi.org/10.1007/s10100-012-0282-3>.

149. Chen P., Huang H., Dong X. An Ant Colony System Based Heuristic Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pickup. *2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. 2007. Harbin, China. pp. 136-141.

DOI: 10.1109/ICIEA.2007.4318385.

150. Rego C., Glover F. Local search and metaheuristics. *The traveling salesman problem and its variations*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 2002. pp. 309–368.

151. Yasuoka Y., Shinomiya Y., Hoshino Y. Evaluation of Optimization Methods for Neural Network. *8th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 17th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS)*, Sapporo, Japan. 2016. pp. 92-96.

DOI: 10.1109/SCIS-ISIS.2016.0032.

152. Hoshino Y., Takimoto H. PSO training of the neural network application for a controller of the line tracing car. *Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE) 2012 IEEE international Conference*. 2012. pp. 1-8.

153. Carpenter G.A., Grossberg S. Adaptive Resonance Theory. *Encyclopedia of Machine Learning and Data Mining*. 2017. Springer, Boston, MA.

https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7687-1_6.

154. Krejčí J. Fuzzy Set Theory. *Pairwise Comparison Matrices and their Fuzzy Extension. Studies in Fuzziness and Soft Computing*. 2017. Vol. 366. Springer, Cham.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-77715-3_3.

155. Danchuk V., Svatko V., Bakulich O. An improvement in ant algorithm method for optimizing a transport route with regard to traffic flow. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 187. Pp. 425 – 434.

156. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими : пер. с англ. / Д.Дрю. – М. : Транспорт, 1972. – 423 с.

157. Доля В.К. К применению открытых систем в управлении транспортными потоками / В.К. Доля, И.П. Кардаш // Коммунальное хозяйство городов : науч.-техн. сб. – К. : Техника, 2002. – Вып. 36. – С. 443–445.

158. Колосок Б.В. Луцьк: архітектурно-історичний нарис / *Б.В. Колосок, Р.Г. Метельський*. – К. : Будівельник, 1990. – 192 с.
159. Лобанов Е.М. Транспортная планировка городов / *Е.М. Лобанов*. – М. : Транспорт, 1990. – 240 с.
160. Лобашов О.О. Моделювання впливу мережі паркування на транспортні потоки в містах : монографія / *О.О. Лобашов*. – Харків : ХНАМГ, 2010. – 170 с.
161. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, 1966. – 616с.
162. Хоменко А.В., Ющенко О.В. Синергетическая теория перехода между режимами транспортного потока. *Вісник СДУ*. 2000. №1(17). С.20-26.
163. Кленов С.Л. Теория Кернера трех фаз в транспортном потоке – новый теоретический базис для интеллектуальных транспортных технологий. *Труды МФТИ*. 2010. Том 2, №4. С.75-89.
164. Kerner B.S. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control. — Berlin: Springer, 2009.
165. Lobanov A.I. Model of cellular automata. *Computer Research and Modeling*. 2010. Vol. 2, no. 3. pp. 273-293.
166. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. / Т.Саати //— М.: Радио и связь, 1989.
167. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем. / Т.Саати, К.Кернс// – М.: Радио и связь, 1991.
168. Данчук В.Д., Олійник Р.В., Сватко В.В. Визначення ефективних засобів вантажних перевезень в транспортних задачах методом аналізу ієрархій. *Вісник Національного транспортного університету*. Київ. 2011. № 22. С. 127-136.
169. Данчук В.Д., Бакуліч О.О., Сватко В.В. Визначення ефективного автомобіля як характеристики транспортного потоку за допомогою методу аналізу ієрархій. *Вісник Національного транспортного університету*. Київ. 2012. № 26 (2). С. 123-127.

170. Електронний ресурс моделей транспортних засобів на ринку.
<http://www.gruz-inform.interdalnoboy.com>
171. Електронний ресурс моделей транспортних засобів на ринку.
<http://www.autonet.ru>
172. Lighthill M.J., Whitham G.B. On kinematic waves: II. A Theory of traffic flow on long crowded roads. *Proc. Roy. Soc. A*. 1955. Vol. 229, Issue 1178. pp. 281–345.
173. Cremer M., Meiner F. Traffic prediction and optimization using an efficient macroscopic simulation tool. *Modelling and Simulation. Ed. Pave A., Soc. Comput. Simulation Int.*, Ghent. 1993. pp. 515–519.
174. Daganzo C. F. The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. *Transpn. Res. B*. 1994. V. 28. pp. 269–287.
175. Хомяк Я.В. Организация дорожного движения: Учебник для вузов. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1986, - 271 с.
176. Пугачев И.Н. Организация и безопасность движения: Учеб. пособие /И. Н. Пугачёв. – Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2004. –232 с.
177. Webster F.V., Cobbe B.M. Traffic Signals. *Road Research Technical Paper*. 1966. №56, HMSQ, London, 111 p.
178. Miller A. J. The Capacity of Signalized Intersections in Australia. *Australian Road Research Board, ARRB, Bulletin №3*, 1968.
179. Branston D. Some factors affecting the capacity of signalized intersection. *Traffic Eng. and Contr.* 1979. Vol. 20, Issue 8-9. pp. 390 – 396.
180. Branston D. A comparison of observed and estimated queue lengths at oversaturated traffic signals. *Traffic Eng. and Contr.* 1978. Vol. 19, Issue 7. pp. 322 – 327.
181. Врубель Ю.А. О потоке насыщения. Белорус. политех. ин- т. Минск, 1988. – 7 с. – Рук. деп. в ЦБНТИ Минавтотранса РСФСР, № 663 – ат 89.

182. Sosin J.A. Delays at intersections controlled by fixed cycle traffic signals. *Traffic Eng. and Contr.* 1980. Vol. 21, Issue 5. pp. 264 – 265.
183. Левашев А.Г., Михайлов А.Ю. Основные параметры оценки пропускной способности регулируемых пересечений. *ВИНИТИ*. 2004. №3. С. 14 – 19.
184. Левашев А.Г., Михайлов А.Ю., Головных И.М. Проектирование регулируемых пересечений: Учеб.пособие – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. – 208 с.
185. Kockelman K.M., Raheel A.S. Effect of vehicle type on the capacity of signalized intersections. – *The University of Texas at Austin*, 1999. – 23p. [http://www.ce.utexas.edu/prof/kockelman/public_html/ASCELDTS habih.pdf](http://www.ce.utexas.edu/prof/kockelman/public_html/ASCELDTS%20habih.pdf).
186. Дорожньо-будівельні норми ДБН В.2.3-4:2007 «Споруди транспорту. Автомобільні дороги».
187. Данчук В.Д., Бакуліч О.О., Сватко В.В. Синергетична інтерпретація фазового переходу між режимами вільного та синхронізованого транспортного потоку. *Вісник Національного транспортного університету*. Київ. 2014. № 29. С. 109-115.
188. Данчук В.Д., Сватко В.В. Застосування модифікованого методу самоорганізації мурашиної колонії для визначення оптимального маршруту вантажних перевезень в транспортних задачах. *Вісник Національного транспортного університету*. Київ. 2011. № 24 (2). С. 147-153.
189. Данчук В.Д., Сватко В.В. Модифікований мурашиний метод оптимізації маршруту в динамічній задачі комівояжера. *Вісник Національного транспортного університету*. Київ, 2012. № 25. С. 378-382.
190. Данчук В.Д., Сватко В.В. Оптимізація пошуку шляхів по графу в динамічній задачі комівояжера методом модифікованого мурашиного алгоритму. *Системні дослідження та інформаційні технології*. Київ. 2012. №2. С. 78-86.

191. Danchuk V., Bakulich O., Svatko V. Building optimal routes for cargo delivery in megacities. *Transport and Telecommunication*. 2019. Vol. 20, Issue 2. P. 142-152.

DOI: <https://doi.org/10.2478/ttj-2019-0013>

192. Obsab E., Yang X. S., Diaz F., Lopez-Garcia P., Carballedo R. An Improved Discrete Bat Algorithm for Symmetric and Asymmetric Traveling Salesman Problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2016. Vol. 48, Issue 1. pp. 59-71.

193. Kwangsoo Kim, Minseok Kwon, Jaegun Park, Yongsoon Eun. Dynamic Vehicular Route Guidance Using Traffic Prediction Information. Hindawi Publishing Corporation. *Mobile Information Systems*. 2016. Vol. 2016. pp. 1–11.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/3727865>.

194. Danchuk V., Bakulich O., Svatko V. Identifying warehouse location using the radiation therapy method in logistic distribution system. *Transport Problems*. 2018. Vol. 13. Issue 4. P. 143 – 155.

DOI: <https://doi.org/10.20858/tp.2018.13.4.13>

195. Danchuk V., Bakulich O., Svatko V. Identifying optimal location and necessary quantity of warehouses in logistic system using a radiation therapy method. *Transport*. 2019. Vol. 34, Issue 2. P. 175-186.

DOI: <https://doi.org/10.3846/transport.2019.8546>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Свідоцтва про реєстрацію

авторського права



УКРАЇНА
Міністерство освіти і науки України
Державний департамент інтелектуальної власності

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 38692

Науковий твір "Оптимізація маршруту транспортних перевезень в динамічній задачі комівояжера модифікацією методу самоорганізації мурашиної колонії"

(назва, якщо є специфічний твір)

Автор(и) Даничук Віктор Дмитрович, Снатко Віталій Володимирович, Позиняй Максим Ігорович

(повне ім'я, прізвище (як наявний))

Авторське майноке права належать: Даничук Віктор Дмитрович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Снатко Віталій Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Позиняй Максим Ігорович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010

(повне ім'я фізичної особи (якщо фізична), юридичної особи (якщо юридична), адреса)

Дата реєстрації

21.08.2011

Голова Державного департаменту інтелектуальної власності



М.В.Паладій



УКРАЇНА
Міністерство освіти і науки України
Державний департамент інтелектуальної власності

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 38693

Комп'ютерна програма "Оптимізація маршруту транспортних перевезень в динамічній задачі комівояжера модифікованим методом самоорганізації мурашиної колонії"

(вид, назва створеного твору)

Автор(и): Даничук Віктор Дмитрович, Святко Віталій Володимирович, Позивай Максим Ігорович

(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності))

Авторські майнові права належать: Даничук Віктор Дмитрович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Святко Віталій Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Позивай Максим Ігорович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010

(вказати всіх фізичних та/або повних офіційно зареєстрованих юридичних осіб, адреса)

Дата реєстрації

21.06.2011

Голова державного департаменту інтелектуальної власності



М.В.Паладій

УКРАЇНА



СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 97439

Літературний письмовий твір наукового характеру "Імітаційне моделювання процесів оптимізації розподілу пунктів доставки вантажів за допомогою методу променевої терапії"

(вид, назва службового твору)

Автор(и) Данчук Віктор Дмитрович, Святко Віталій Володимирович

(прізвище, ім'я, по батьку (за наявності))

Авторські майнові права належать Національний транспортний університет, вул. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010

(повне ім'я фізичної або юридичної особи, офіційна найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації 05.05.2020

Заступник Міністра розвитку економіки,
торгівлі та сільського господарства
України Д. О. Романович





ДОДАТОК Б

**АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ
ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ**



Сільськогосподарське товариство з обмеженою
відповідальністю

«Племтахопродуктор»

Зугреський»

« 15 » грудня 2013 р.

№ 123/А

АКТ

про впровадження результатів наукової розробки на СТОВ «ППР Зугреський»
спеціалізованого програмного модуля «Оптимізація маршруту транспортних
перевезень в динамічній задачі комівояжера модифікованим методом
самоорганізації мурашиної колонії»

Розроблені в дисертаційній роботі Сватка Віталія Володимировича на
тему «Інтелектуальні методи та моделі оптимізації маршруту автомобільних
перевезень дрібнопартійних вантажів» рішення з математичного,
інформаційного та програмного забезпечення були використані при розробці
підсистеми «Транспортної логістики» у складі інтегрованої автоматизованої
системи керування «Ландгут», яка впроваджена у промислову експлуатацію.

Впровадження такого спеціалізованого програмного модуля «Оптимізація
маршруту транспортних перевезень в динамічній задачі комівояжера
модифікованим методом самоорганізації мурашиної колонії» при розробці
підсистеми «Транспортна логістика» у складі ІАСУ «Ландгут» на СТОВ «ППР
Зугреський» підвищує якість та ефективність функціонування інформаційної
системи управління на підприємстві, а також надає додаткові можливості
проведення якісної і кількісної оцінки ефективності використання транспорту
на підприємстві.

Цей документ не є підставою для фінансових розрахунків.

Директор



А.В.Кисельов

Товариство з обмеженою відповідальністю
«ФРОЗЕН ФРУТ»

02152, м. Київ, Дніпровська набережна, 1А, прим. №1-8 гр.прим. №150, тел. +380 44 295 80 80

03 червня 2020 р.

м. Київ

вих. № 98

АКТ

про впровадження матеріалів дисертаційної роботи

на тему: **«Інтелектуальні методи та інформаційна технологія оптимізації процесів доставки вантажів у великих містах»** здобувача **Сватка Віталія Володимировича**, представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології

Даним актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи Сватка В.В. використовуються в ТОВ «Фрозен Фрут» в процесах доставки вантажів дрібних партій заморожених продуктів у великих містах.

Впровадження методичних рекомендацій, розроблених на основі запропонованої моделі підтримки прийняття рішень для визначення маршруту доставки вантажів з урахуванням зміни завантаженості вулично-дорожньої мережі на прикладі міста Києва, дозволило зменшити витрати, пов'язані з доставкою заморожених продуктів у відповідних ланцюгах постачань на 30%. Запропонована інформаційна технологія інтегрована в загальну інформаційну систему оперативного обліку підприємства, що дозволило скоротити час прийняття рішень про оптимальний маршрут доставки в середньому на 15%.

Впроваджено в ТОВ «Фрозен Фрут» інтелектуальний метод оптимального розташування розподільчих центрів доставки вантажів на ВДМ міста Києва.

Даний акт не є основою для виплати грошової винагороди.

Директор



П.В. Попович

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Директор ТОВ «Ландгут Бройлер»
 Прокудін О.Г.
 29 2019 р.
В. № 166

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Сватка Віталія
 Володимировича на тему «Інтелектуальні методи та інформаційна технологія
 оптимізації процесів доставки вантажів у великих містах»

Даним актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи Сватка Віталія Володимировича «Інтелектуальні методи та інформаційна технологія оптимізації процесів доставки вантажів у великих містах», яка була виконана у Національному транспортному університеті під керівництвом д.ф.-м.н., професора В.Д. Данчука впроваджена у транспортно-логістичній службі ТОВ «Ландгут Бройлер». У якості результатів впровадження виступають:

- інтелектуальний метод оптимізації маршрутів доставки вантажів з урахуванням реальної динаміки транспортних потоків на вулично-дорожній мережі міст;
- програмне забезпечення оптимальної маршрутизації вантажних перевезень та раціонального використання рухомого складу на виробничому підприємстві ТОВ «Ландгут Бройлер».

Наукова новизна впроваджених результатів полягає в тому, що Сватком В.В. сформульовані теоретичні та методичні основи розв'язання проблеми ефективного функціонування транспортної логістики виробничого підприємства.

Практичним значенням одержаних результатів є розробка на основі запропонованих у ній теоретичних підходів по управлінню транспортної логістикою і розроблених інтелектуальних методів програмно-інструментальних комплексів по оптимізації вантажних перевезень та раціональному закріпленню рухомого складу виробничого підприємства.

Використання засобів сучасних інформаційних технологій у вигляді розробленого програмного забезпечення і методів оптимізації при плануванні вантажних перевезень готової продукції дозволило ТОВ «Ландгут Бройлер» на 15 % знизити витрати на здійснення цих перевезень, значно скоротити їх час, а також звільнити співробітників підприємства від виконання рутинних, малоефективних операцій по складанню плану перевезень і закріплення рухомого складу підприємства.

Даний акт не є основою для виплати грошової винагороди.

Керівник
 транспортно-логістичної служби
 ТОВ «Ландгут Бройлер»



А.В. Тарасенко

ЗАТВЕРДЖЕНО

Проректор з навчальної роботи
Національного транспортного
університету

Гришук О.К.

«27» січня 2021 р.



АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Сватка Віталія Володимировича
за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні системи
в освітній процес НТУ
у 2020-2021 р.р.

Результати дисертаційної роботи Сватка Віталія Володимировича «Інтелектуальні методи та інформаційна технологія оптимізації процесів доставки вантажів у великих містах» впроваджені в освітній процес кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки Національного транспортного університету згідно нижченаведеної форми викладання дисципліни «Основи функціонування інтелектуальних транспортних систем» для підвищення якості підготовки студентів першого рівня вищої освіти – ступінь бакалавра, спеціальності 275 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)».

Що впроваджено	Форма впровадження
Інтелектуальні методи та інформаційна технологія	Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Основи функціонування інтелектуальних транспортних систем» студентами денної форми навчання перший рівень вищої освіти: ступінь – бакалавра спеціальності 275 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)».

Декан факультету
транспортних та інформаційних
технологій НТУ
д.ф.-м.н., професор

Данчук В.Д.

Завідувач кафедри
інформаційно-аналітичної діяльності
та інформаційної безпеки
д.т.н., професор

Аль-Амморі Алі

ЗАТВЕРДЖЕНО

Проректор з навчальної роботи
Національного транспортного
університету

Гришук О.К.

«28» січня 2021 р.



АКТ

про впровадження в освітній процес матеріалів
кандидатської дисертаційної роботи **«Інтелектуальні методи та інформаційна
технологія оптимізації процесів доставки вантажів у великих містах»**

Сватка Віталія Володимировича
за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні системи
в освітній процес НТУ
у 2020-2021 р.р.

Результати дисертаційної роботи Сватка Віталія Володимировича **«Інтелектуальні методи та інформаційна технологія оптимізації процесів доставки вантажів у великих містах»** впроваджені в освітній процес кафедри інформаційних систем і технологій Національного транспортного університету згідно нижченаведеної форми викладання дисципліни «Інтелектуальний аналіз даних» для підвищення якості підготовки студентів першого рівня вищої освіти – ступінь бакалавра, спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення». Галузь знань 12 «Інформаційні технології».

Що впроваджено	Форма впровадження
Інтелектуальні методи та інформаційна технологія	Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Інтелектуальний аналіз даних» студентами денної форми навчання перший рівень вищої освіти: ступінь – бакалавра. Галузь знань 12 «Інформаційні технології». Спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення».

Декан факультету
транспортних та інформаційних
технологій НТУ
д.ф.-м.н., професор

В.Д. Данчук

Завідувач кафедри
інформаційних систем і технологій
д.ф.-м.н., професор

В.В. Гавриленко

ДОДАТОК В

**СПИСОК НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ
ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ
РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

СПИСОК РОБІТ, ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз

1. Svatko V., Danchuk V., Bakulich O. An improvement in ant algorithm method for optimizing a transport route with regard to traffic flow. *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 187. – P. 425 – 434. [Scopus]
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.396>
2. Svatko V., Danchuk V., Bakulich O. Identifying warehouse location using the radiation therapy method in logistic distribution system. *Transport Problems*. 2018. Vol. 13. Issue 4. P. 143 – 155. [Scopus]
DOI: <https://doi.org/10.20858/tp.2018.13.4.13>
3. Svatko V., Danchuk V., Bakulich O. Identifying optimal location and necessary quantity of warehouses in logistic system using a radiation therapy method. *Transport*. 2019. Vol. 34, Issue 2. P. 175-186. [Scopus]
DOI: <https://doi.org/10.3846/transport.2019.8546>
4. Svatko V., Danchuk V., Bakulich O. Building optimal routes for cargo delivery in megacities. *Transport and Telecommunication*. 2019. Vol. 20, Issue 2. P. 142-152. [Scopus]
DOI: <https://doi.org/10.2478/ttj-2019-0013>

Публікації у фахових виданнях України:

5. Сватко В.В., Данчук В.Д., Олійник Р.В. Визначення ефективних засобів вантажних перевезень в транспортних задачах методом аналізу ієрархій. *Вісник Національного транспортного університету*. Київ, 2011. № 22. С. 127-136.

6. Сватко В.В., Данчук В.Д. Застосування модифікованого методу самоорганізації мурашиної колонії для визначення оптимального маршруту вантажних перевезень в транспортних задачах. *Вісник Національного транспортного університету*. Київ, 2011. № 24 (2). С. 147-153.

7. Сватко В.В., Данчук В.Д. Модифікований мурашиний метод оптимізації маршруту в динамічній задачі комівояжера. *Вісник Національного транспортного університету*. Київ, 2012. № 25. С. 378-382.

8. Сватко В.В., Данчук В.Д. Оптимізація пошуку шляхів по графу в динамічній задачі комівояжера методом модифікованого мурашиного алгоритму. *Системні дослідження та інформаційні технології*. Київ, 2012. №2. С. 78-86.

9. Сватко В.В., Данчук В.Д., Бакуліч О.О. Визначення ефективного автомобіля як характеристики транспортного потоку за допомогою методу аналізу ієрархій. *Вісник Національного транспортного університету*. Київ, 2012. № 26 (2). С. 123-127.

10. Сватко В.В., Данчук В.Д., Бакуліч О.О. Синергетична інтерпретація фазового переходу між режимами вільного та синхронізованого транспортного потоку. *Вісник Національного транспортного університету*. Київ, 2014. № 29. С. 109-115.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

11. Сватко В.В., Данчук В.Д. Оптимізація пошуку шляхів по графу в задачах логістики методом модифікованого мурашиного алгоритму. *XII Міжнародна науково-технічна конференція Системний аналіз та інформаційні технології САІТ-2010: тези доповідей*. Київ: НТУУ «КПІ», 2010. С. 72.

12. Сватко В.В., Данчук В.Д. Оптимізація транспортних перевезень в динамічній задачі комівояжера. *XVI Міжнародна науково-практична конференція: тези доповідей*. Київ: Європейський університет, 2010. С.148-150.

13. Сватко В.В., Данчук В.Д., Позивай М.І. Оптимізація маршруту транспортних перевезень модифікованим методом самоорганізації мурашиної колонії. *Системний аналіз та інформаційні технології САІТ-2011*: тези доповідей. Київ: НТУУ «КПІ», 2011. С. 78.

14. Сватко В.В., Данчук В.Д. Оптимізація маршруту вантажних перевезень в умовах реальної динаміки транспортних потоків. *LXVIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*: тези доповідей. Київ: НТУ, 2012. С. 74.

15. Сватко В.В. Методика визначення коефіцієнтів приведення до легкового автомобіля з використанням моделі ефективного транспортного засобу. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції: Сучасні напрямки теоретичних і прикладних досліджень*: тези доповідей. Одеса: Sworld, 2013. С. 16-24.

16. Сватко В.В., Данчук В.Д. Визначення ефективного транспортного засобу на основі даних спостереження стану транспортної мережі міста за допомогою методу аналізу ієрархій Сааті. *LXIX наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*: тези доповідей. Київ: НТУ, 2013. С. 73.

17. Сватко В.В. Використання моделі ефективного транспортного засобу для визначення коефіцієнтів приведення до легкового автомобіля. *XV Міжнародна конференція «Системний аналіз та інформаційні технології САІТ-2013»*: тези доповідей. Київ: НТУУ «КПІ», 2013. С. 185.

18. Сватко В.В., Данчук В.Д., Бакуліч О.О. Синергетична інтерпретація фазового переходу між станами вільного та синхронізованого транспортного потоку. *Системний аналіз та інформаційні технології САІТ-2014*: тези доповідей. Київ: НТУУ «КПІ», 2014. С. 79.

19. Сватко В.В., Данчук В.Д. Оптимізація розташування складських приміщень в задачах транспортної логістики за допомогою методу оптимального планування променевої терапії злоякісних новоутворень. *LXXIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей*. Київ: НТУ, 2017. С. 88.

20. Сватко В.В., Данчук В.Д. Розробка інформаційної керуючої системи для побудови оптимальних маршрутів доставки вантажів. *LXXIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей*. Київ: НТУ, 2017. С. 89.

21. Svatko V., Danchuk V., Bakulich O. An improvement in ant algorithm method for optimizing a transport route with regard to traffic flow. *X International Scientific Conference: TRANSBALICA 2017: Transportation Science and Technology*. Vilnius, Lithuania: Vilnius Gediminas Technical University, 2017.

22. Svatko V., Danchuk V., Bakulich O. Applying the radiation therapy method for solving the problems of the optimal location of warehouses in logistics distribution system. *IX International conference: Transport Problems*. Katowice, Poland: University of Silesia in Katowice, 2017. P. 104-115.

23. Сватко В.В., Данчук В.Д. Використання методу променевої терапії для вирішення задач оптимізації розташування складів у логістичній розподільчій системі. *Міжнародна науково-практична конференція «Перспективні напрями розвитку регіональних транспортних та логістичних систем»*. Харків, 2018. С.177-181.

24. Svatko V., Danchuk V., Bakulich O. Building optimal routes for cargo delivery taking into account the dynamics of traffic flows. *6th International Conference on Traffic and Logistic Engineering*. Bangkok, Thailand, 2018. Vol. 259. - P. 1-6.

DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925901001>

25. Svatko V., Danchuk V., Talal Ameen, Bakulich O. Simulation Processes of Construction of Optimal Routes for the Delivery of Goods by Road Transport on Urban Road Network in Mountainous Cities. *XI International Scientific Conference: TRANSBALICA 2019: Transportation Science and Technology*. Vilnius, [Lithuania](#): [Vilnius Gediminas Technical University](#), 2019.

Свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір:

26. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №38692 науковий твір «Оптимізація маршруту транспортних перевезень в динамічній задачі комівояжера модифікованим методом самоорганізації мурашиної колонії» / В.Д. Данчук, В.В. Сватко, М.І. Позивай (Україна). – №39100; заявл. 19.04.2011; зареєстр. 21.06.2011.

27. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №38693 комп'ютерна програма «Оптимізація маршруту транспортних перевезень в динамічній задачі комівояжера модифікованим методом самоорганізації мурашиної колонії» / В.Д. Данчук, В.В. Сватко, М.І. Позивай (Україна). – №39101; заявл. 19.04.2011; зареєстр. 21.06.2011.

28. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №97439 науковий твір «Імітаційне моделювання процесів оптимізації розподілу пунктів доставки вантажів за допомогою методу променевої терапії» / В.Д. Данчук, В.В. Сватко (Україна). – №97439; зареєстровано 05.05.2020.

ДОДАТОК Г
КОД РЕАЛІЗОВАНОГО ПРОГРАМНОГО
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ


```

#zero diagonal - between pairs of vertices with identical numbers (нулимо
діагональ - між парами вершин з однаковими номерами)
if i == j:
    self.distance[i][j] = 0
    self.vision[i][j] = 0
    self.feromon_1[i][j] = 0
# move values that are diagonal above the diagonal, i.e. (переносимо
значення, які над діагоналлю під діагональ, тобто)
# 2 - 1 = 1 - 2
elif i > j:
    self.distance[i][j] = self.distance[j][i]
    self.vision[i][j] = self.vision[j][i]
    self.feromon_1[i][j] = self.feromon_1[j][i]
#Zero concentration of pheromone at the transitions (нулимо
концентрацію феромону на переходах)
    self.feromon_2[i][j] = 0
else:
    count += 1
    #write down the diagonal of the distance between the pairs of vertices
    from the next cell of the list
    #записуємо над діагоналлю відстані між парами вершин із
    наступної чарунки списку
    keyDistance = self.distanceIn_transit.get(count)
    if keyDistance != None:
        distance_vert = self.distanceIn.get(keyDistance)
        # min distance 1m
        if distance_vert < 0:
            distance_vert = 1
        self.distance[i][j] = distance_vert
        #determine visibility (визначаємо видимість)
        self.vision[i][j] = 1 / self.distance[i][j]
        #set the initial concentration of pheromone - the same on all
        transitions
        #встановлюємо початкову концентрацію феромону - однакову на
        всіх переходах
        self.feromon_1[i][j] = 1 / 10000000
        #Zero concentration of pheromone at the transitions
        #нулимо концентрацію феромону на переходах
        self.feromon_2[i][j] = 0
    #print("distance:")
    #print(self.distance)

```

```

def calc(self, lb_cycle: tk.Label, text_route: tk.Text, lb_length: tk.Label,
text_journal: tk.Text):
    # 1
    self.fill_ranges()
    # randomly place the ants on the vertices
    self.route_start()
    # for UI
    res_cycle = ""
    res_text_route = ""
    res_text_journal = ""
    cur_ii = 0
    for indexLife in range(0, self.life): # //цикл по часу життя колонії
        res_cycle = str(indexLife + 1) + ' : ' + str(cur_ii + 1)
        self.pLength = [0 for i in range(self.vert_matrix)] # нулимо пройдений
        мурахою шлях

        for indexVertex in range(0, self.vert_matrix): # //цикл по переходах між
        вершинами
            for jAnt in range(0, self.vert_matrix): # //цикл по мурахах
                sum_P = 0 # //знаменник у формулі ймовірності

                # //визначення ймовірності переходу
                for z in range(0, self.vert_matrix):
                    if self.check_route_hor(jAnt, z):
                        if indexLife == 0 and indexVertex == 0:
                            self.probability[jAnt][z] = self.vision[jAnt][z]
                        else:
                            self.probability[jAnt][z] = (self.feromon_1[jAnt][z] ** self.alpha)
* (self.vision[jAnt][z] ** self.beta)
                    else:
                        self.probability[jAnt][z] = 0
                        sum_P += self.probability[jAnt][z]

                if sum_P != 0:
                    for z in range(0, self.vert_matrix):
                        self.probability[jAnt][z] = self.probability[jAnt][z] / sum_P

                # // встановлюємо наступний пункт маршруту
                if indexVertex != self.vert_matrix - 1:
                    self.route[jAnt][indexVertex + 1] = self.check_max_hor(jAnt)
                else:
                    self.route[jAnt][indexVertex + 1] = self.route[jAnt][0]

```

```

# // відкладаємо на маршруті феромон
routeji = self.route[jAnt][indexVertex]
routejiNext = self.route[jAnt][indexVertex + 1]
#print("jAnt " + str(jAnt) + " indexVertex " + str(indexVertex))
#print("routeji " + str(routeji) + " routejiNext " + str(routejiNext) )
self.pLength[jAnt] = self.pLength[jAnt] +
self.distance[routeji][routejiNext] # // для кожного мурахи залежно від
пройденого ним шляху
    if self.pLength[jAnt] != 0:
        self.feromon_2[routeji][routejiNext] =
self.feromon_2[routeji][routejiNext] + self.q /self.pLength[jAnt]
# //кінець циклу по мурахах

# // оновлюємо кількість феромону
for y in range(0, self.vert_matrix):
    for x in range(0, self.vert_matrix):
        self.feromon_1[y][x] = (1 - self.ro) * self.feromon_1[y][x] +
self.feromon_2[y][x]
        self.feromon_2 = [[0] * self.vert_matrix for i in range(self.vert_matrix)]
# //кінець циклу по переходах між вершинами

# //визначаємо довжину кожного маршруту
for y in range(0, self.vert_matrix):
    sum_P = 0 # //щоб не створювати нову змінну
    for x in range(0, self.vert_matrix):
        routeyx = self.route[y][x] # - 1
        routeyxNext = self.route[y][x + 1] # - 1
        sum_P = sum_P + self.distance[routeyx][routeyxNext]
    self.rLength[y] = sum_P
# print("route indexLife" + str(indexLife) )
# print(self.route)

# // виводимо отримані дані

mm = self.check_min_vert()

# //запам'ятовуємо глобальний мінімальний маршрут
if self.rLength[mm] < self.globalMinLength:
    self.globalMinLength = self.rLength[mm]
# //виводимо поточний цикл
cur_ii = indexLife
res_cycle = str(indexLife + 1) + ' : ' + str(cur_ii + 1)
# //у поле "маршрут"

```

```

res_text_route = ""
for x in range(0, self.vert_matrix + 1):
    res_text_route = res_text_route + str(self.route[mm][x] + 1)
    if x != self.vert_matrix:
        res_text_route = res_text_route + ' - '
# text_route.insert('1.0', '{}\n'.format(str_route))
self.globalMinRoute = res_text_route
# //у поле "довжина маршруту"
lb_length['text'] = self.rLength[mm]
# //у журнал (виводимо лише найкоротші маршрути)
res_text_journal = res_text_journal + 'cycle ' + str(indexLife + 1) + ': ' +
str(self.rLength[mm]) + ' -> ' + res_text_route + "\n "
#text_journal.insert('1.0', '{}\n'.format(res_text_journal))

for y in range(0, self.vert_matrix):
    for x in range(1, self.vert_matrix):
        # //нулимо матрицю маршрутів і розпочинаємо маршрут з останньої
        # відвіданої точки
        self.route[y][x] = -1

# //кінець циклу по часу життя колонії
lb_cycle['text'] = res_cycle
text_route.insert('1.0', '{}\n'.format(res_text_route))
text_journal.insert('1.0', '{}\n'.format(res_text_journal))

def check_route_vert(self, r: int):
    """перевірка унікальності початку маршруту"""
    j = -1
    for i in range(0, self.vert_matrix):
        if self.route[i][0] == r:
            j += 1
    if j == -1:
        return True
    else:
        return False

def check_route_hor(self, ii: int, r: int):
    """запобігання переходу у вже відвідану вершину"""
    j = -1
    for i in range(0, self.vert_matrix):
        if self.route[ii][i] == r:
            j += 1
    if j == -1:

```

```

        return True
    else:
        return False

def check_max_hor(self, ii: int):
    """визначення максимальної ймовірності"""
    max = -100000000
    j = -1

    # //визначаємо максимальну ймовірність
    for i in range(0, self.vert_matrix):
        #print("self.probability["+str(ii) + "]["+str(i) + "] " +
str(self.probability[ii][i]))
        if self.probability[ii][i] > max and self.probability[ii][i] != 0:
            max = self.probability[ii][i]
            j = i

    # // ну, а наостанок переходимо в останню невідвідану вершину
    #print(self.route)
    if j == -1:
        j = self.m_sum
        for i in range(0, self.vert_matrix):
            if self.route[ii][i] > 0:
                j = j - self.route[ii][i]
                # print("j " + str(j))

    return j

def check_min_vert(self):
    """визначення мінімальної довжини маршруту"""
    # //Мінімальний мінімум
    min = 1000000000000000000
    # //визначаємо мінімальну довжину
    for i in range(0, self.vert_matrix):
        if self.rLength[i] < min:
            min = self.rLength[i]
            j = i
    return j

def route_start(self):
    """randomly place the ants on the vertices
    (випадковим чином розташовуємо мурах по вершинах)"""
    #array of available vertices (масив доступних вершин)

```

```

rf = [i for i in range(self.vert_matrix)]
i = 0
while i < self.vert_matrix:
    # randomly select values from an array of available vertices
    # випадковим чином вибираємо значення з масиву доступних вершин
    ii = random.choice(rf)
    if self.check_route_vert(ii):
        #if not used, then write the generated value to the beginning of the route
        #якщо ні, то записуємо згенероване значення на початок маршруту
        self.route[i][0] = ii
        i += 1
    # print(self.route)

```

Фрагмент файлу побудови знайденого оптимального маршруту на карті

```

import tkinter as tk

class Point:
    def __init__(self, vert_num=None, address=None, latitude=None,
longitude=None):
        self.vert_num = vert_num
        self.address = address
        self.latitude = latitude
        self.longitude = longitude

    def __str__(self):
        return self.__srtParam()

    def __repr__(self):
        return self.__srtParam()

    def __srtParam(self):
        if type(self.vert_num) == tk.StringVar().__class__:
            p_vert_num = self.vert_num.get()
        else:
            p_vert_num = self.vert_num

        if type(self.address) == tk.StringVar().__class__:
            p_address = self.address.get()
        else:
            p_address = self.address

        if type(self.latitude) == tk.StringVar().__class__:

```

```
        p_latitude = self.latitude.get()
    else:
        p_latitude = self.latitude

    if type(self.longitude) == tk.StringVar().__class__:
        p_longitude = self.longitude.get()
    else:
        p_longitude = self.longitude

    return "Point([ {0},{1},{2},{3} ])".format(p_vert_num, p_address, p_latitude,
p_longitude)
```

ДОДАТОК Г

РЕЗУЛЬТАТИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА

ДІЛЯНКАМИ ВУЛИЧНО-ДОРОЖНЬОЇ МЕРЕЖІ

м.КИЄВА

Ділянка ВДМ м.Києва – міст Північний

Час	К-сть, авт. (пр.н.)	К-сть, авт. (зв.н.)	Щільність, відн.од. (пр.н.)	Щільність, відн.од. (зв.н.)	Час	К-сть, авт. (пр.н.)	К-сть, авт. (зв.н.)	Щільність, відн.од. (пр.н.)	Щільність, відн.од. (зв.н.)	Час	К-сть, авт. (пр.н.)	К-сть, авт. (зв.н.)	Щільність, відн.од. (пр.н.)	Щільність, відн.од. (зв.н.)
00:00	4	8	0,09	0,18	09:10	8	13	0,18	0,29	17:25	28	6	0,61	0,13
01:00	3	6	0,07	0,13	09:15	9	11	0,19	0,24	17:30	28	8	0,62	0,18
02:00	3	2	0,07	0,04	09:20	9	9	0,19	0,20	17:35	25	7	0,54	0,16
03:00	2	4	0,04	0,09	09:25	10	11	0,22	0,25	17:40	28	6	0,61	0,12
04:00	1	2	0,02	0,04	09:30	9	8	0,21	0,17	17:45	27	16	0,60	0,36
05:00	1	8	0,02	0,18	09:35	10	13	0,22	0,28	17:50	29	11	0,64	0,24
06:00	2	12	0,04	0,27	09:40	6	9	0,13	0,20	17:55	31	12	0,68	0,26
07:00	4	16	0,09	0,35	09:45	8	12	0,18	0,27	18:00	27	10	0,60	0,22
07:05	3	12	0,07	0,27	09:50	6	12	0,14	0,26	18:05	26	8	0,57	0,18
07:10	4	20	0,10	0,44	09:55	6	11	0,13	0,24	18:10	27	9	0,59	0,20
07:15	7	24	0,15	0,53	10:00	8	10	0,18	0,21	18:15	28	11	0,62	0,23
07:20	5	28	0,10	0,63	11:00	6	9	0,13	0,20	18:20	30	9	0,66	0,19
07:25	6	29	0,13	0,64	12:00	5	10	0,11	0,22	18:25	26	8	0,58	0,18
07:30	7	24	0,16	0,53	13:00	7	8	0,16	0,18	18:30	27	11	0,60	0,23
07:35	5	25	0,10	0,55	14:00	8	9	0,18	0,20	18:35	26	7	0,58	0,14
07:40	6	21	0,13	0,47	15:00	9	8	0,20	0,18	18:40	34	9	0,76	0,20
07:45	4	27	0,10	0,60	16:00	10	9	0,21	0,19	18:45	27	5	0,60	0,11
07:50	5	23	0,11	0,51	16:05	16	7	0,35	0,16	18:50	26	7	0,58	0,16
07:55	9	19	0,19	0,42	16:10	10	7	0,22	0,16	18:55	19	6	0,42	0,13
08:00	7	12	0,16	0,26	16:15	14	5	0,30	0,10	19:00	13	11	0,29	0,24
08:05	8	12	0,18	0,27	16:20	10	6	0,21	0,13	19:05	9	19	0,20	0,42
08:10	6	12	0,13	0,27	16:25	12	6	0,27	0,13	19:10	13	10	0,29	0,22
08:15	10	10	0,21	0,22	16:30	15	6	0,34	0,13	19:15	17	11	0,38	0,24
08:20	6	12	0,13	0,27	16:35	20	6	0,44	0,13	19:20	15	5	0,33	0,11
08:25	8	13	0,18	0,29	16:40	17	7	0,37	0,16	19:25	12	4	0,27	0,09
08:30	8	14	0,18	0,31	16:45	21	8	0,47	0,18	19:30	11	6	0,24	0,13
08:35	8	16	0,17	0,36	16:50	19	12	0,42	0,27	20:00	12	7	0,27	0,16
08:40	8	11	0,17	0,24	16:55	26	8	0,57	0,19	21:00	10	6	0,22	0,13
08:45	7	13	0,16	0,28	17:00	26	9	0,58	0,19	22:00	8	6	0,18	0,13
08:50	9	11	0,20	0,24	17:05	28	7	0,62	0,14	23:00	6	8	0,13	0,18
08:55	8	9	0,19	0,19	17:10	29	9	0,64	0,19	00:00	4	8	0,09	0,18
09:00	5	14	0,12	0,30	17:15	27	10	0,59	0,21					
09:05	9	9	0,19	0,20	17:20	26	6	0,58	0,13					

Ділянка ВДМ м.Києва – міст Патона – метро Дружби народів

Час	К-сть, авт. (пр.н.)	К-сть, авт. (зв.н.)	Щільність, відн.од. (пр.н.)	Щільність, відн.од. (зв.н.)	Час	К-сть, авт. (пр.н.)	К-сть, авт. (зв.н.)	Щільність, відн.од. (пр.н.)	Щільність, відн.од. (зв.н.)	Час	К-сть, авт. (пр.н.)	К-сть, авт. (зв.н.)	Щільність, відн.од. (пр.н.)	Щільність, відн.од. (зв.н.)
00:00	4	8	0,10	0,17	09:10	14	22	0,33	0,47	17:25	23	13	0,54	0,28
01:00	3	6	0,07	0,13	09:15	12	22	0,29	0,47	17:30	32	16	0,76	0,33
02:00	3	4	0,07	0,09	09:20	9	21	0,22	0,45	17:35	11	11	0,26	0,23
03:00	2	2	0,05	0,04	09:25	14	19	0,33	0,41	17:40	22	13	0,53	0,28
04:00	2	2	0,05	0,04	09:30	10	21	0,24	0,45	17:45	30	10	0,70	0,21
05:00	3	6	0,07	0,13	09:35	12	23	0,29	0,50	17:50	27	13	0,64	0,28
06:00	4	8	0,10	0,17	09:40	8	24	0,19	0,50	17:55	26	11	0,62	0,23
07:00	5	15	0,13	0,32	09:45	11	19	0,25	0,41	18:00	36	11	0,85	0,22
07:05	3	9	0,08	0,20	09:50	16	19	0,37	0,40	18:05	31	6	0,74	0,13
07:10	6	18	0,14	0,38	09:55	20	24	0,48	0,51	18:10	28	10	0,67	0,22
07:15	7	20	0,16	0,43	10:00	8	20	0,20	0,42	18:15	32	15	0,77	0,32
07:20	3	21	0,06	0,44	11:00	8	16	0,19	0,34	18:20	30	10	0,71	0,21
07:25	4	20	0,08	0,43	12:00	9	14	0,21	0,30	18:25	34	15	0,82	0,31
07:30	9	19	0,22	0,41	13:00	12	16	0,29	0,34	18:30	27	15	0,64	0,32
07:35	8	22	0,19	0,47	14:00	10	14	0,24	0,30	18:35	24	8	0,57	0,17
07:40	5	24	0,12	0,51	15:00	12	12	0,29	0,26	18:40	35	17	0,83	0,36
07:45	15	7	0,36	0,15	16:00	15	10	0,36	0,21	18:45	40	20	0,95	0,43
07:50	11	20	0,26	0,41	16:05	17	13	0,39	0,27	18:50	30	8	0,70	0,17
07:55	9	19	0,21	0,40	16:10	23	17	0,55	0,35	18:55	35	10	0,84	0,22
08:00	6	20	0,13	0,43	16:15	28	12	0,65	0,24	19:00	39	8	0,94	0,16
08:05	5	21	0,12	0,45	16:20	19	2	0,45	0,04	19:05	34	8	0,80	0,18
08:10	8	21	0,18	0,45	16:25	17	10	0,40	0,22	19:10	32	6	0,76	0,13
08:15	7	22	0,17	0,47	16:30	20	14	0,48	0,29	19:15	28	13	0,67	0,28
08:20	6	21	0,13	0,44	16:35	24	18	0,58	0,39	19:20	32	9	0,77	0,20
08:25	4	22	0,08	0,47	16:40	40	4	0,95	0,09	19:25	27	11	0,64	0,23
08:30	6	20	0,14	0,43	16:45	21	9	0,49	0,19	19:30	27	11	0,65	0,24
08:35	11	22	0,26	0,46	16:50	25	15	0,60	0,32	19:35	37	7	0,88	0,15
08:40	10	25	0,25	0,54	16:55	35	17	0,82	0,36	19:40	38	12	0,90	0,26
08:45	15	22	0,35	0,46	17:00	14	9	0,33	0,19	19:45	36	10	0,86	0,21
08:50	14	26	0,33	0,55	17:05	9	9	0,20	0,19	20:00	37	16	0,88	0,34
08:55	10	23	0,24	0,48	17:10	24	12	0,57	0,26	21:00	25	12	0,60	0,26
09:00	11	22	0,27	0,47	17:15	42	21	1,00	0,45	22:00	15	12	0,36	0,26
09:05	16	22	0,38	0,48	17:20	22	9	0,52	0,20	23:00	10	10	0,24	0,21

Ділянка ВДМ м.Києва – вул.Братиславська – пр-кт Лісовий

Час	К-сть, авт. (пр.н.)	К-сть, авт. (зв.н.)	Щільність, відн.од. (пр.н)	Щільність, відн.од. (зв.н)	Час	К-сть, авт. (пр.н.)	К-сть, авт. (зв.н.)	Щільність, відн.од. (пр.н)	Щільність, відн.од. (зв.н)	Час	К-сть, авт. (пр.н.)	К-сть, авт. (зв.н.)	Щільність, відн.од. (пр.н)	Щільність, відн.од. (зв.н)
00:00	12	6	0,27	0,16	09:10	17	15	0,38	0,39	17:25	27	9	0,6	0,23
01:00	8	5	0,18	0,13	09:15	25	10	0,55	0,25	17:30	20	12	0,44	0,32
02:00	8	3	0,18	0,08	09:20	27	13	0,6	0,35	17:35	20	17	0,44	0,44
03:00	6	4	0,13	0,11	09:25	32	16	0,7	0,41	17:40	13	10	0,28	0,26
04:00	4	3	0,09	0,08	09:30	15	15	0,33	0,4	17:45	25	25	0,56	0,65
05:00	8	2	0,18	0,05	09:35	28	13	0,62	0,33	17:50	22	8	0,48	0,22
06:00	10	3	0,22	0,08	09:40	22	7	0,49	0,19	17:55	16	12	0,35	0,32
07:00	19	3	0,42	0,08	09:45	40	6	0,9	0,17	18:00	19	13	0,42	0,35
07:05	13	5	0,29	0,13	09:50	35	13	0,77	0,33	18:05	20	15	0,44	0,39
07:10	16	3	0,35	0,09	09:55	32	12	0,7	0,32	18:10	11	12	0,25	0,32
07:15	23	6	0,51	0,17	10:00	26	16	0,57	0,42	18:15	30	24	0,66	0,62
07:20	25	12	0,55	0,31	11:00	24	13	0,53	0,34	18:20	24	12	0,54	0,31
07:25	22	9	0,49	0,24	12:00	20	10	0,44	0,26	18:25	22	19	0,48	0,49
07:30	28	10	0,62	0,26	13:00	19	8	0,42	0,21	18:30	17	21	0,38	0,54
07:35	26	3	0,58	0,07	14:00	21	7	0,47	0,18	18:35	20	18	0,45	0,47
07:40	31	10	0,68	0,26	15:00	26	6	0,58	0,16	18:40	14	11	0,31	0,3
07:45	21	8	0,47	0,21	16:00	28	7	0,61	0,18	18:45	20	28	0,45	0,75
07:50	26	13	0,59	0,35	16:05	12	15	0,27	0,4	18:50	19	6	0,42	0,17
07:55	32	10	0,72	0,25	16:10	32	20	0,71	0,54	18:55	16	14	0,35	0,38
08:00	21	5	0,46	0,13	16:15	20	10	0,44	0,26	19:00	15	11	0,33	0,29
08:05	33	6	0,73	0,15	16:20	19	17	0,42	0,46	19:05	21	21	0,47	0,55
08:10	26	13	0,58	0,35	16:25	21	7	0,47	0,19	19:10	12	8	0,27	0,21
08:15	35	11	0,79	0,28	16:30	24	16	0,54	0,42	19:15	16	20	0,35	0,52
08:20	28	8	0,62	0,21	16:35	19	11	0,41	0,3	19:20	11	11	0,24	0,28
08:25	26	19	0,59	0,51	16:40	21	2	0,47	0,06	19:25	14	10	0,31	0,25
08:30	33	8	0,73	0,22	16:45	13	15	0,28	0,39	19:30	20	18	0,44	0,48
08:35	31	9	0,7	0,25	16:50	29	18	0,64	0,48	20:00	13	10	0,29	0,26
08:40	29	7	0,64	0,18	16:55	25	14	0,56	0,37	21:00	14	11	0,31	0,29
08:45	32	11	0,7	0,3	17:00	19	7	0,43	0,18	22:00	12	9	0,27	0,24
08:50	25	9	0,55	0,25	17:05	19	20	0,41	0,54	23:00	8	8	0,18	0,21
08:55	24	17	0,53	0,45	17:10	11	8	0,24	0,21	00:00	12	6	0,27	0,16
09:00	23	8	0,51	0,21	17:15	20	21	0,45	0,54					
09:05	22	9	0,5	0,24	17:20	25	8	0,56	0,2					