

## МЕТОД АДАПТИВНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТУ В ДИНАМІЧНІЙ ЗАДАЧІ КОМІВОЯЖЕРА З ВИКОРИСТАННЯМ МОДИФІКОВАНОГО МУРАШИНОГО АЛГОРИТМУ

*Данчук В.Д.*, доктор фізико-математичних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, vdanchuk@ukr.net, orcid.org/0000-0003-4282-2400

*Гутаревич О.С.*, Національний транспортний університет, Київ, Україна, oleksandr.hutarevych@gmail.com, orcid.org/0009-0003-7355-8160

## METHOD OF ADAPTIVE ROUTE OPTIMIZATION FOR SOLVING DYNAMIC TRAVELING SALESMAN PROBLEM USING MODIFIED ANT COLONY ALGORITHM

*Danchuk V.D.*, Dr. Sc. (Phys.-Math.), National Transport University, Kyiv, Ukraine, vdanchuk@ukr.net, orcid.org/0000-0003-4282-2400

*Hutarevych O.S.*, National Transport University, Kyiv, Ukraine, oleksandr.hutarevych@gmail.com, orcid.org/0009-0003-7355-8160

**Постановка проблеми.** Інтелектуальні адаптивні методи оптимізації задач маршрутизації інформаційних потоків є важливим інструментом для забезпечення ефективної передачі даних у сучасних інформаційних системах різного функціонального призначення. Вони дозволяють системам у реальному режимі часу адаптуватися до змін у зовнішньому середовищі і реалізовувати максимально ефективний розподіл трафіку, швидко передачу даних, знижувати затримки і підвищувати продуктивність мережі.

Особливої актуальності останнім часом набуває використання інтелектуальних адаптивних методів (методів штучного інтелекту (AI) та машинного самонавчання) для аналізу умов та вибору оптимальних маршрутів у міській транспортній логістиці, де трафік та умови руху постійно змінюються.

Дійсно, прискорена автомобілізація при одночасному відставанні розвитку вулично-дорожніх мереж (ВДМ) великих міст призводить до різкого зменшення ефективності функціонування міської транспортної інфраструктури (значна нерівномірність транспортного навантаження, зменшення швидкості руху транспортних потоків (ТП), затори, дорожньо-транспортні пригоди тощо). Це, зокрема, зумовлює виникнення значних затримок у транспортуванні вантажів, і, отже, до суттєвих не лише часових, але й економічних втрат. У сучасних умовах найбільш ефективно вирішення цих проблем пов'язують з розробкою, впровадженням та застосуванням інтелектуальних транспортних систем (ІТС). Саме ефективно застосування ІТС дозволяє ефективно керувати рухом транспорту, зменшуючи витрати на паливо, час та викиди в атмосферу. І тут велику роль відіграє використання сучасних інноваційних інформаційних та телекомунікаційних технологій Інтернету речей (IoT), системи глобального позиціонування і моніторингу (GPS), blockchain (BC), великих даних (BD) та штучного інтелекту AI.

Між тим, використання AI інформаційних технологій для ефективної організації, оптимізації та управління транспортно-логістичними процесами в реальному режимі часу при великій і змінній завантаженості ВДМ є епізодичним і недосконалим. В першу чергу це пов'язано з відсутністю адекватних адаптивних методів дискретної оптимізації маршрутів щодо доставки товарів, які б одночасно враховували реальну конфігурацію ВДМ та реальну динаміку ТП на її ділянках під час здійснення перевезень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вирішення проблеми маршрутизації транспортних засобів (VRP) – це добре відома NP-складна задача дискретної (комбінаторної) оптимізації. Головна ідея якої полягає в плануванні маршрутів для парку транспортних засобів (ТЗ) з обслуговування певної кількості просторово рознесених пунктів (споживачів, логістичних центрів, складів і т. д.) при найменших витратах [1]. У великій кількості випадків тестові дослідження методів дискретної оптимізації маршрутів, що пропонуються, проводяться на прикладі задачі комівояжера (TSP), яка полягає у знаходженні найбільш оптимального за заданим критерієм замкнутого маршруту, що проходить через всі вказані точки хоча б по одному разу. Поряд з цим, розв'язання TSP має велике значення для практичного вирішення проблем транспортної логістики, наприклад, для електронної

комерції при визначенні маршрутів останньої милі (LMRRC), VRP з обмеженнями вантажопідйомності (capacitated VRP-CVRP), VRP з декількома депо (MDVRP), VRP з фіксованими або змінними часовими вікнами (VRPTW) тощо [2 – 6].

Слід зазначити, що до недавнього часу, проблеми дискретної оптимізації та планування маршрутів для логістичних систем у більшості випадків вирішувались за допомогою відповідних методів для статичної VRP. Тут процес відправлення доставок здійснюється за фіксованими або мало змінними властивостями системи протягом часу обслуговування [3, 4]. До статичних VRP з певними наближеннями можна віднести VRP з обмеженнями вантажопідйомності (capacitated VRP-CVRP), VRP з декількома депо (MDVRP) і VRP з фіксованими часовими вікнами (VRPTW).

Між тим, у реальних умовах при доставці товарів до пунктів призначення необхідно враховувати велику кількість параметрів, що пов'язані з невизначеністю, динамічністю та іншими реальними обмеженнями.

Відповідно, для багатьох транспортно-логістичних компаній, що працюють у швидкозмінному ринковому середовищі зниження вартості доставки товарів постає гострою проблемою. Більшість цих компаній повинні бути в змозі працювати в умовах строгих часових обмежень при забезпеченні гарантованої якості обслуговування, неперервної адаптації до змін у зовнішньому середовищі. При цьому середовище, в якому вони працюють, часто є невизначеним, і тому фактор часу відіграє визначальну роль.

Підхід статичної VRP не дозволяє компанії створювати маршрут на основі інформації в реальному часі. Це також не надає способів зв'язку між менеджерами та водіями, що призводить до затримки доставки товарів, економічних втрат, втрат бізнесу та клієнтів.

Відповідно, при вирішенні проблем маршрутизації в рамках динамічного VRP (DVRP) підходу потрібно враховувати змінні фактори умов доставки вантажів (варіації часу і послуг в дорозі) за можливістю в онлайн режимі. Ці фактори обумовлені динамічними часовими вікнами вивезення та доставки; нестационарною динамікою ТП на ділянках ВДМ; місткістю (вантажопідйомністю) ТЗ; розміром та складом автопарку; невизначеністю у замовленнях, часу доставки, попиту та кількості клієнтів, тощо [7]. При цьому, зрозуміло, що тут для реалізації онлайн супроводу процесів перевезень вантажів необхідно застосовувати відповідні апаратно-програмні комплекси, що працюють в автоматизованому або автоматичному режимі.

Усунення комплексу зазначених проблем з управління транспортно-логістичними операціями у сучасних умовах пов'язують з розробкою, впровадженням та ефективним застосуванням ІТС [8]. Тут можливе вирішення множини комбінаторних завдань в рамках DVRP, в яких принаймні один з параметрів системи є змінним, при умові використання сучасних інноваційних інформаційно-комунікаційних технологій IoT, BC, BD, AI, нечітких множин (FL) тощо [8].

Зокрема, використання технологій IoT, GPS, BD, AI, FL в ІТС в основному дозволяє отримувати та ефективно обробляти великі масиви даних про зміни стану зовнішнього середовища в реальному режимі часу. Для вирішення задач дискретної оптимізації в рамках DVRP в основному використовують евристичні або метаетвристичні AI методи, що мають достатньо високу швидкість обчислень. До них відносять: алгоритм мурашиних колоній (ACA), генетичний алгоритм (GA), еволюційний метод імітації підпалу (ESA), табу-пошук (TS), динамічна адаптована оптимізація роїв частинок (DAPSO) і пошук змінного сусідства (VNS) [9].

Як показує аналіз, велика кількість робіт, де розв'язуються задачі в рамках DVRP, присвячена вирішенню проблем оптимізації маршрутизації ТЗ з динамічними часовими вікнами (DVRPTW) (див. наприклад, [10 – 12]). В [10] представлено багатокритеріальну задачу маршрутизації ТЗ з гнучкими часовими вікнами (MOVRPFlexTW) на основі використання гібридних методів, що поєднують методи штучних нейронних мереж (ANM), як методів машинного самонавчання, так і методів AI дискретної оптимізації (генетичні, еволюційні, ройові, тощо). Тут ANM застосовують або для прогнозування певних транспортних процесів, або для налаштування евристичних параметрів інтелектуальних методів оптимізації з метою їх удосконалення при проведенні оптимізації маршруту з урахуванням впливу зовнішнього середовища. В [10] критеріями оптимізації є мінімізація загальних транспортних витрат на перевезення товару та максимізація загальної задоволеності клієнтів. При цьому запити клієнтів щодо часу доставки товару можуть змінюватись під час руху ТЗ. Така гнучкість дозволяє логістичній компанії заощаджувати витрати на розподіл товарів, забезпечуючи задоволеності клієнтів. Однак вплив динаміки ТП на процес маршрутизації в [10] не враховується. В [11] вирішується проблема маршрутизації ТЗ з декількома часовими вікнами (VRPMTW) за допомогою гібридного алгоритму, що складається з GA та VNS алгоритмів, в рамках певних обмежень (обмеження вантажопідйомності, часових вікон тощо). В [12] маршрутизація ТЗ

здійснюється з диверсифікацією часу прибуття для компаній, що працюють з готівкою у дорозі (СІТ), за допомогою VRPMTW з відсутністю часу очікування, щоб розробляти маршрути з непередбачуваним часом. Проблеми маршрутизації в [12] моделюються як завдання маршрутизації DVRPMTW, в якій множинні часові вікна будуються в налаштуваннях ковзного горизонту по часу шляхом видалення інтервалів прибуття, що були в попередніх маршрутах. Проте як в [11], так і в [12] урахування динаміки ТП не здійснювалось при вирішенні DVRPMTW.

Відносно недавно дослідження проблем маршрутизації почали розширюватись на вирішення задач DVRP, де враховуються дані ІТС про стан динаміки ТП в реальному режимі часу на ділянках ВДМ або усереднені дані про попередні її стани [13–18]. Так, наприклад, в [13] запропоновано покращений мурашиний алгоритм за рахунок оновлення його параметрів за допомогою глибокого навчання моделей ANM з використанням даних про трафік в реальному режимі часу. Це дозволяє знаходити більш коректну оптимізацію шляху для розподілу логістики в складних дорожніх умовах. Проте, як зазначають автори в [13], через реалістичні умови та труднощі зі збором даних не вдається продемонструвати переваги запропонованого алгоритму оптимізації маршруту під впливом складного трафіку. В [14] оптимізація маршруту за відстанню і за часом здійснювалась за допомогою різних AI методів з використанням історичних даних ІТС про динаміку ТП. В [15] представлено модель міського попиту на вантажні перевезення, в рамках якої намагаються оцінити потоки турів на підставі підрахунків маршрутів з використанням даних ІТС. Модель в [15], що заснована на теорії максимізації ентропії, враховує набір оцінок генерації вантажних рейсів, набір підрахунків трафіку за певні часові інтервали та загальну вартість вантажних перевезень у мережі. В [16] описується імітаційна модель на основі агентів у поєднанні з процедурами оптимізації, розробленими для прогнозування поведінки водіїв та кур'єрів доставки товарів клієнтам в центральні райони міста. Модель дозволяє оптимізувати маршрути кур'єрів на основі мінімізації витрат на керування ТЗ та ходьбу з використанням інформації сенсорів ІТС в реальному режимі часу про наявність і зайнятість зон завантаження. В [17] вперше представлено уніфіковане формулювання в рамках DVRP проблеми TSP з урахуванням даних про динаміку ТП на ділянках ВДМ. Ці дані отримують від сенсорів руху ІТС як в реальному режимі часу, так і усереднених історичних даних з відповідних сенсорів. В рамках такої моделі тут проведено відповідні імітаційні моделювання дискретної оптимізації маршруту за часом з динамічним оновленням послідовності відвідування клієнтів під час руху. Таке оновлення маршруту відбувається внаслідок поточних змін завантаженості ділянок ВДМ, що впливають на час доставки товару за раніше встановленим маршрутом. Проте, в [17] оптимізація маршруту здійснювалась тільки за часом з використанням розв'язника електронних таблиць з відкритим вихідним кодом (API from Bing and VRP\_Spreadsheet\_Solver) для вирішення VRP [3]. При цьому, виконання обчислювальних операцій при проведенні оптимізації маршруту за допомогою цього пакету здійснюється надто повільно [3]. Це не дозволяє у повній мірі реалізувати онлайн режим DVRP. В [18], в рамках підходу [17] з використанням модифікованого мурашиного алгоритму  $ACA_{mod}$  показано принципову можливість здійснення оптимальної маршрутизації доставки вантажів з динамічним оновленням маршруту в реальному режимі часу на основі обробки IoT та BD даних про нестационарну динаміку ТП на ділянках ВДМ. Проте, в [18] імітаційні дослідження щодо оптимізації маршруту здійснюються в рамках розв'язку симетричної динамічної задачі TSP на графі з використанням матриці витрат, прямими елементами якої є час (швидкість) руху ТЗ між вершинами графу. Крім того, функціональні можливості блоку вхідних даних про динамічні характеристики ТП на ділянках ВДМ тут обмежені тільки ручним режимом їх введення.

Отже, виходячи з проведеного аналізу, в даний час уявлення про динамічну маршрутизацію логістичних потоків в умовах швидкоплинної, нестационарної динаміки ТП є незавершеними та недосконалими. В тому числі, це пов'язано з відсутністю адекватних адаптивних методів дискретної оптимізації маршрутів щодо доставки товарів, які б в онлайн режимі одночасно враховували реальну конфігурацію ВДМ та реальну динаміку ТП на її ділянках під час здійснення перевезень.

У зв'язку з цим, метою роботи є розробка методу адаптивної оптимізації маршруту в онлайн режимі з урахуванням реальної динаміки ТП на ділянках ВДМ на основі модифікованого мурашиного алгоритму, в рамках якого реалізована можливість автоматичного оновлення ваг графу в залежності від змін динамічних характеристик на ділянках ВДМ при фіксації оптимальної конфігурації частково пройденого маршруту перед його оновленням.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** В роботі розглядається асиметрична динамічна задача комівояжера (DTSP) у вигляді двонаправлено орієнтованого зваженого графу. Вершини графу відповідають точкам доставки вантажів. Ваги ребер графу задаються відносними дискретними величинами відповідно до критерію оптимізації (наприклад, це може бути відстань між вершинами

графу, середній час або середня швидкість проходження ребра, витрати палива, вартість перевезень тощо). При цьому, матриця витрат для такого графу містить в собі непрямі елементи як сукупності ваг, що відповідають певному набору характеристик ділянок ВДМ, які ТЗ послідовно долає між точками доставки з урахуванням розподілу цих характеристик у певні моменти часу в залежності від конфігурації ВДМ.

Оскільки в реальному світі такі величини як час, середня швидкість, матеріальні витрати на проходження між точками можуть змінюватися залежно від різноманітних факторів, доцільно розглядати ваги ребер графу як динамічні величини. Наприклад, в умовах ВДМ великих міст факторами, які впливають на вагу проходження маршруту між певними точками, можуть виступати зміни у завантаженості певних ділянок доріг, виникнення дорожньо-транспортних пригод, часткове або повне перекриття проїжджої частини доріг у зв'язку з проведенням ремонтних робіт, тощо.

В рамках запропонованого методу, архітектура інформаційної системи адаптивної оптимізації маршруту в асиметричній DTSP з використанням модифікованого мурашиного алгоритму містить три модулі: 1. Побудова вхідного графу для поточного стану ВДМ (вхідна поточна (в певний момент часу) матриця витрат для ваги, за якою здійснюється оптимізація) з подальшою побудовою оптимального маршруту; 2. Динамічне оновлення побудованого графу відповідно до зміни дорожньої ситуації (зміни динаміки транспортних потоків на окремих ділянках ВДМ, затори, дорожньо-транспортні пригоди, тимчасові перекриття тощо); 3. Оптимізація маршруту в асиметричній DTSP на графі.

Загальна схема адаптивної оптимізації маршруту в асиметричній DTSP з використанням модифікованого мурашиного алгоритму в рамках запропонованого методу наведено на рис. 1.

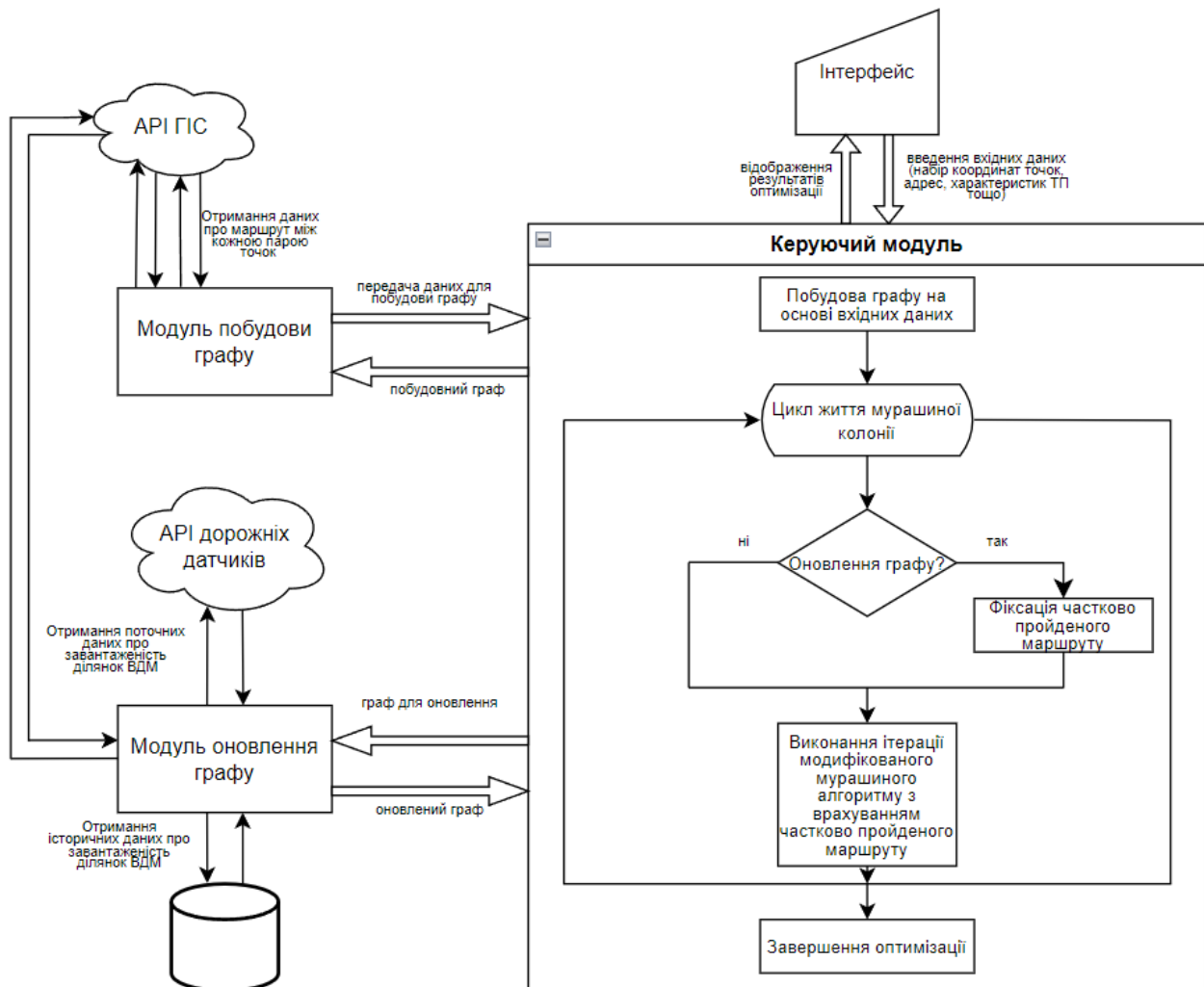


Рисунок 1 – Загальна схема адаптивної оптимізації маршруту в асиметричній динамічній задачі комівояжера з використанням модифікованого мурашиного алгоритму  
 Figure 1 – General scheme of adaptive route optimization in the dynamic problem of an asymmetrical traveling salesman using a modified ant algorithm

Модуль побудови графу відповідно до стану ВДМ в певні моменти часу (див. рис.1) призначений для створення двонаправлено орієнтованого зваженого графу, вершинами якого є задані точки доставки, а ребра, як було зазначено вище, характеризуються вагами послідовності ділянок ВДМ, які необхідно пройти для потрапляння з однієї вершини графу до іншої. Наприклад, час проходження ребра між двома вершинами визначається як сума часу проходження кожної ділянки з відповідної послідовності ділянок з урахуванням розподілу часів проходження по ділянках в залежності від конфігурації ВДМ.

Формування матриці витрат при побудові графу здійснюється, зокрема, за допомогою геоінформаційних систем (ГІС) [19]. Сучасні ГІС поєднують в собі географічні дані (наприклад, координати точок, висоти, кліматичні дані тощо) з інформацією про об'єкти та явища, що відбуваються у цих місцях, в тому числі інформацію про зміни стану на ВДМ. Отже, для формування графу пропонується для кожних двох вершин здійснюється запит до ГІС з метою отримання інформації про найбільш оптимальний маршрут між ними та характеристики ділянок ВДМ, через які він проходить. Наприклад, для отримання таких даних можна використати програмний інтерфейс Routes API сервісу Bing Maps (геоінформаційна система розроблена компанією Microsoft) [20].

Модуль динамічного оновлення побудованого графу призначений для введення змінених характеристик ділянок ВДМ, через які проходять ребра графу відповідно до зміни поточного стану або прогнозованих змін у майбутньому на ВДМ (див. рис.1). Зміни характеристик ділянок ВДМ, які проходять через певне ребро графу призводять до зміни характеристик цього ребра. Для оновлення графу у запропонованому методі реалізовано дві можливості введення даних про зміни характеристик ділянок ВДМ, що отримують: або а) з детекторів руху, розташованих на цих ділянках; або б) з використанням ГІС. Щодо останнього, то дані про поточний стан ВДМ отримують за допомогою Bing Maps, який надає окремий інтерфейс Traffic API, що дозволяє отримати інформацію про ДТП, затори та ремонти доріг [20]. Крім того, ГІС надає можливість будувати або перебудовувати оптимальний маршрут між вершинами графу в залежності від поточного стану ВДМ, а саме визначати або оновлювати послідовність ділянок ВДМ, яка відповідає оптимальному маршруту між кожною парою вершин графу. Це, в свою чергу, призводить до зміни характеристик ребер досліджуваного графу в цілому. Також в запропонованому методі є можливим використання історичних даних, отриманих з датчиків руху, для прогнозування динамічних характеристик ділянок ВДМ або здійснення ефективного планування маршруту в заданому часовому проміжку в майбутньому (див. рис.1).

Процедура розв'язку асиметричної DVRP (керуючий модуль, див. рис.1) за допомогою розробленого методу адаптивної оптимізації маршруту аналогічна як для графу, побудованого в рамках першого, так і другого модулю. При цьому адаптивна оптимізація здійснюється на основі запропонованої модифікації мурашиного алгоритму, в рамках якої реалізована можливість автоматичного оновлення ваг графу в залежності від змін динамічних характеристик на ділянках ВДМ при фіксації оптимальної конфігурації частково пройденого маршруту перед його оновленням. Відповідно, фіксація оптимальної конфігурації частково пройденого маршруту полягає в додаванні у «пам'ять» мурах частково-визначених маршрутів. Для цього в алгоритм вводиться  $Pre_k$  – список ребер графу, по яким  $k$  мураха зобов'язана рухатись в рамках оптимальної конфігурації частково пройденого маршруту, ігноруючи ймовірнісне правило класичного мурашиного алгоритму, описаного в [21]. Тобто, перебуваючи в вершині  $i$  графу, мураха  $k$  рухається в вершину  $j$  якщо  $(i, j) \in Pre_k$ , інакше наступна вершина знаходиться за ймовірнісним правилом. Така модифікація спрямована на створення можливості адаптації алгоритму до динамічних ситуацій, де вага вершин графу може змінюватися по ходу проходження мурахами частини маршруту.

Для проведення тестових досліджень було розроблено програмну реалізацію запропонованого модифікованого мурашиного алгоритму мовою програмування C# (платформа .NET 6). З метою перевірки адекватності та достовірності використання запропонованої модифікації мурашиного алгоритму для здійснення дискретної оптимізації маршруту були проведені відповідні тестові дослідження на прикладі набору загально-відомих тестових статичних TSP задач з критерієм оптимізації за відстанню у порівнянні з найбільш поширеними AI методами дискретної оптимізації (класичного алгоритму мурашиної колонії, генетичного алгоритму, алгоритму еволюційного відпаду) [22]. Результати проведених тестових досліджень подано в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати тестування алгоритмів вирішення задачі комівояжера  
Table 1 – Results of testing algorithms for solving the traveling salesman problem

Назва задачі	Кількість вершин	Найкращий відомий розв'язок, м	Класичний алгоритм мурашиної колонії (ACA)		Генетичний алгоритм (GA)		Алгоритм еволюційного відпаду (ESA)		Модифікований алгоритм мурашиної колонії (Dynamic ACA)	
			Розв'язок, м (відхилення)	Час, с	Розв'язок, м (відхилення)	Час, с	Розв'язок, м (відхилення)	Час, с	Розв'язок, м (відхилення)	Час, с
Oliver30	30	420	420 (0.0%)	0,4	420 (0.0%)	0,2	420 (0.0%)	0,7	420 (0.0%)	0,4
Eil51	51	426	428.1 (0.5%)	1,7	427 (0.2%)	1,7	426 (0.0%)	2,1	429 (0.7%)	2,5
Berlin52	52	7542	7542 (0.0%)	2,1	7542 (0.0%)	2,4	7542 (0.0%)	2,3	7542 (0.0%)	3,2
St70	70	675	679.1 (0.6%)	3,9	675 (0.0%)	4,2	675 (0.0%)	4,5	683 (1.1%)	7,7
Eil76	76	538	548.1 (1.9%)	5,1	545 (1.3%)	5,6	546 (1.5%)	5,8	546.7 (1.6%)	7,4
KroA100	100	21282	21445.3 (0.8%)	10,6	21350 (0.3%)	9,9	21282 (0.0%)	14,0	21824 (2,5%)	16,3
Eil101	101	629	646.4 (2.8%)	13,1	655 (4.1%)	10,6	650 (3.3%)	16,3	654,3 (4%)	25,9
Pr107	107	44303	44793.8 (1.1%)	12,1	44392 (0.2%)	10,8	44413 (0.2%)	16,7	44936.4 (1,4%)	32,7

Як видно з табл. 1, запропонована модифікація мурашиного алгоритму для розв'язання задач комівояжера демонструє прийнятний рівень точності (з відхиленням до 4% у найгірших варіантах), що може вважатися задовільним результатом для застосування у багатьох практичних випадках.

З метою перевірки чутливості алгоритму до динамічних змін у графі було проведено імітаційні дослідження в рамках асиметричної DTSP, які містили в собі різні варіанти оновлення графу під час роботи алгоритму. Для цього, розглянуто двоорієнтований зважений граф, який складається з 10 вершин (вершини нумеруються від 1 до 10). Вага ребер графу задається відповідно до табл. 2 (тут вага ребра  $p_{ij}$  з вершини  $i$  в вершину  $j$  відповідає значенню клітинки таблиці в  $i$ -тому рядку,  $j$ -тому стовчику). Критерієм оптимізації в проведеному імітаційному дослідженні виступає мінімізація сумарної ваги ребер графу, через які проходить маршрут. Враховуючи, що запропонований в даній статті метод дискретної оптимізації має універсальний характер, величини ваг ребер графу у табл. 2, 3, 4 наведені в умовних одиницях. Це можуть бути значення відстаней проходження транспортними засобами ділянок ВДМ, час проходження цих ділянок тощо.

Таблиця 2 – Початкові ваги ребер графу для проведення імітаційного моделювання (ум.од.)  
Table 2 – Initial weights of graph edges for simulation modeling (a.u.)

До \ З	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	305	477	637	451	659	828	684	494	406
2	359	0	464	388	205	410	710	435	519	463
3	481	504	0	457	549	474	669	519	344	501
4	513	361	335	0	264	261	456	374	493	570
5	488	244	492	322	0	459	633	551	669	593
6	455	283	277	201	361	0	642	558	512	512
7	931	801	778	670	626	667	0	403	701	1021
8	682	601	599	466	444	488	485	0	522	769
9	580	580	405	527	566	551	685	535	0	440
10	354	473	444	472	594	494	836	663	327	0

Для динамічного оновлення графу було обрано 5 ребер: 1-2, 2-6, 6-3, 7-8, 10-9, вага яких одночасно змінювалася відповідно до конкретної ситуації в процесі роботи алгоритму (між проведенням ітерацій життя мурашиної колонії). Відповідні зміни ваги ребер у графі та результати імітаційних досліджень подано в таблиці 3.

Таблиця 3 – Результати побудови оптимального маршруту з врахуванням динамічних змін у графі на ребрах 1-2, 2-6, 6-3, 7-8, 10-9

Table 3 – Results of building the optimal route taking into account dynamic changes in the graph on edges 1-2, 2-6, 6-3, 7-8, 10-9

№	$P_{1-2}$ (ум.од.)	$P_{2-5}$ (ум.од.)	$P_{6-3}$ (ум.од.)	$P_{7-8}$ (ум.од.)	$P_{10-9}$ (ум.од.)	Оптимальний маршрут	Вартість оптимального маршруту (ум.од.)
1	228.75	153.75	207.75	302.25	245.25	2-5-4-7-8-6-3-9-10-1-2	3296.5
2	305	205	277	403	327	2-5-4-7-8-6-3-9-10-1-2	3594
3	335.5	225.5	304.7	443.3	359.7	2-5-4-7-8-6-3-9-10-1-2	3713
4	366	246	332.4	483.6	392.4	2-1-10-9-3-6-4-7-8-5-2	3826
5	396.5	266.5	360.1	523.9	425.1	2-1-10-9-3-6-4-7-8-5-2	3899
6	427	287	387.8	564.2	457.8	2-1-10-3-9-8-7-6-4-5-2	3949
7	457.5	307.5	415.5	604.5	490.5	2-1-10-3-9-8-7-6-4-5-2	3949

В результаті, при проведенні імітаційних досліджень асиметричної DTSP за допомогою запропонованого методу адаптивної оптимізації маршруту з динамічним його оновленням під час перевезень вантажів, було виявлено низку ефектів, пов'язаних з перебудовою маршруту. Як видно з таблиці 3, реалізується 3 різні маршрути, які є оптимальними для різних станів ВДМ: маршрут 2-5-4-7-8-6-3-9-10-1-2 (позначимо як маршрут №1) є оптимальним для модельних ситуацій 1, 2, 3; маршрут 2-1-10-9-3-6-4-7-8-5-2 (позначимо як маршрут №2) є оптимальним для модельних ситуацій 4, 5; маршрут 2-1-10-3-9-8-7-6-4-5-2 (позначимо як маршрут №3) є оптимальним для модельних ситуацій 6, 7.

На рис. 2 графічно показані виявлені оптимальні маршрути для різних випадків імітаційного дослідження. Відповідно, в табл. 4 подано вартість проходження кожного з визначених маршрутів в умовах, що відповідають всім модельним ситуаціям, розглянутим при проведенні даних імітаційних досліджень. Жирним виділено вартість оптимального маршруту для кожної з ситуацій.

Таблиця 4 – Вартість проходження різних маршрутів в графі для розглянутих імітаційних ситуацій

Table 4 – The cost of different routes in the graph for the considered simulation situations

№ ситуації	Вартість маршруту №1	Вартість маршруту №2	Вартість маршруту №3
1	<b>3296.5</b>	3497.5	3949
2	<b>3594</b>	3680	3949
3	<b>3713</b>	3753	3949
4	3832	<b>3826</b>	3949
5	3951	<b>3899</b>	3949
6	4070	3972	<b>3949</b>
7	4189	4045	<b>3949</b>

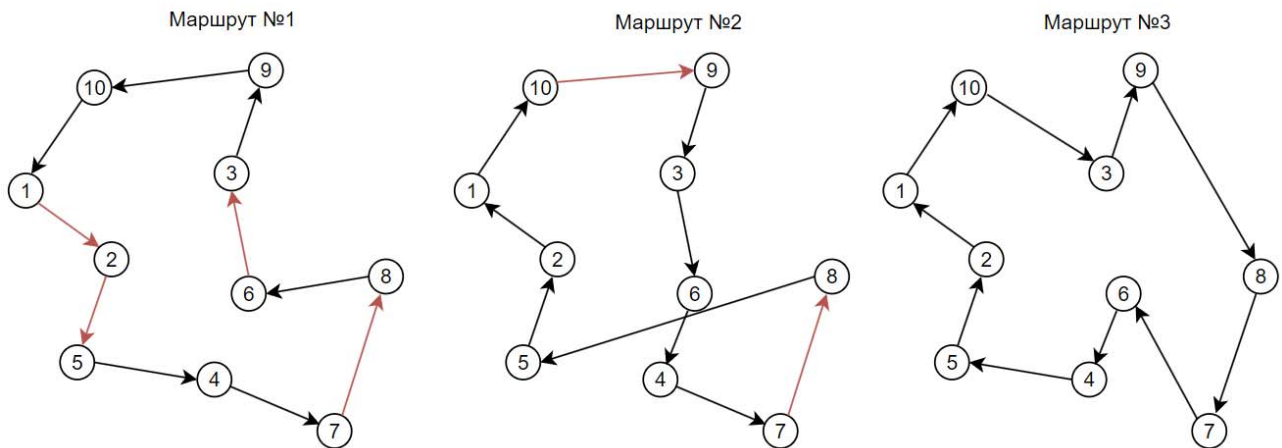


Рисунок 2 – Оптимальні маршрути для різних модельних станів ВДМ згідно даних табл. 3: маршрут №1 для модельних ситуацій 1, 2, 3; маршрут № 2 для модельних ситуацій 4,5; маршрут № 3 для модельних ситуацій 6,7;. Червоним кольором виділено ребра графу, вага яких змінювалась під час проведення імітаційних досліджень

Figure 2 – Optimal routes for different model states of the URN according to the data in the table. 3: route No. 1 for model situations 1, 2, 3; route No. 2 for model situations 4,5; route No. 3 for model situations 6,7;. The edges of the graph, the weight of which changed during simulations, are highlighted in red

Як видно з результатів проведеного дослідження, при динамічній модифікації графу алгоритм дозволяє знаходити оптимальне рішення з врахуванням цих змін. Це свідчить про можливість запропонованого модифікованого алгоритму мурашиної колонії ефективно адаптуватися до динамічних змін у графі та його придатність для розв'язання динамічної задачі комівояжера.

Таким чином, проведений аналіз результатів імітаційних досліджень доводить принципову можливість використання розробленого методу для вирішення задач міської транспортної логістики в онлайн режимі з урахуванням реальної конфігурації ВДМ та динаміки ТП на її ділянках.

**Висновки.** Запропоновано метод адаптивної оптимізації маршруту в динамічній задачі комівояжера з використанням модифікованого мурашиного алгоритму, в рамках якого реалізована можливість одночасного врахування реальної конфігурації ВДМ та реальної динаміки ТП на її ділянках. Метод передбачає вирішення задачі на двонаправлено орієнтованому зваженому графі, ваги ребер якого задаються відносними величинами відповідно до критерію оптимізації. Для динамічного оновлення графу пропонується використання даних про стан ВДМ, отриманих з датчиків руху або ГІС. Для вирішення асиметричної DTSP на двонаправлено орієнтованому зваженому графі запропоновано використання модифікованого мурашиного алгоритму, в рамках якого реалізована можливість автоматичного оновлення ваг графу в залежності від змін динамічних характеристик на ділянках ВДМ при фіксації оптимальної конфігурації частково пройденого маршруту перед його оновленням.

Для апробації запропонованого методу здійснено комплекс відповідних імітаційних досліджень процесів маршрутизації при різних умовах оптимізації. Так, з метою перевірки адекватності та достовірності запропонованої модифікації мурашиного алгоритму були проведені відповідні тестові дослідження на прикладі набору загально-відомих статичних TSP задач з критерієм оптимізації за відстанню у порівнянні з найбільш поширеними AI методами дискретної оптимізації. Результати досліджень демонструють прийнятний рівень точності (з відхиленням до 4% у найгірших варіантах), що може вважатися задовільним результатом для застосування у багатьох практичних випадках. При проведенні імітаційних досліджень асиметричної DTSP за допомогою запропонованого методу адаптивної оптимізації маршруту з динамічним його оновленням під час перевезень вантажів, зокрема, було виявлено низку ефектів, пов'язаних з перебудовою маршруту.

Таким чином, на підставі аналізу результатів імітаційних досліджень доведена принципова можливість використання розробленого методу для вирішення задач міської транспортної логістики в онлайн режимі з урахуванням реальної конфігурації ВДМ та динаміки ТП на її ділянках.



## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Larsen A. (2001). The dynamic vehicle routing problem. Technical University of Denmark. LYNGBY 2001 IMM-PHD-2000-73, 209p. <https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/5261816/imm143.pdf>.
2. Hernandez F., Sotelo R., Forets M. (2024). Optimization algorithms for adaptative route sequencing on real-world last-mile deliveries *Ingenius*, 2024(31), pp. 64–80. <https://ingenius.ups.edu.ec/index.php/ingenius/article/view/7410>.
3. Erdogan S. (2017). An open source spreadsheet solver for vehicle routing problems. *Computers&Operations Research*, 84, 62–72. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.02.022>.
4. Thompson R.G., Zhang L. (2018). Optimizing courier routes in central city areas. *Transportation Research Part C: Emerging Technology*, 93, 1–12. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.05.016>.
5. Jamil A., Abdallah B.N., Leksono V.A. (2021). Firefly algorithm for multi-type vehicle routing problem. *Journal of Physics: Conference Series*, 1726(1), 012006. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1726/1/012006>.
6. Wu H., Gao Y., Wang W., Zhang Z. (2021). A hybrid ant colony algorithm based on multiple strategies for the vehicle routing problem with time windows. *Complex & Intelligent Systems*, 18. doi: <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00401-1>.
7. Giuffrida N., Fajardo-Calderin J., Masegosa A. D., Werner F., Steudter M., Pilla F. (2022). Optimization and machine learning applied to last-mile logistics: A review. *Sustainability*, 14(9), 5329. doi: <https://doi.org/10.3390/su14095329>.
8. RTC. The Impact of Emerging Technologies on the Transport System; Research for Tran Committee, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Directorate-General for Internal Policies: Brussels, Belgium. (2020). Available at: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2020/652226/IPOL\\_STU\(2020\)652226\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2020/652226/IPOL_STU(2020)652226_EN.pdf).
9. Zajkani, M. A., Rahimi Baghdorani, R., Haeri, M. (2021). Model predictive based approach to solve DVRP with traffic congestion, *IFAC-Papers On Line* 54(21), 163-167. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.12.028>.
10. Zhang, H., Zhang, Q., Ma, L., Liu, Y. (2019). A hybrid ant colony optimization algorithm for a multi-objective vehicle routing problem with flexible time windows. *Information Sciences*, 490, 166-190. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.03.070>.
11. Belhaiza, S., M'Hallah, R., Brahim, G.B., Laporte, G. (2019). Three multi-start data-driven evolutionary heuristics for the vehicle routing problem with multiple time windows. *Journal of Heuristics*, 25(3), 485–515. doi: <https://doi.org/10.1007/s10732-019-09412-1>.
12. Hoogeboom, M., Dullaert, W. (2019). Vehicle routing with arrival time diversification. *European Journal of Operational Research*, 275(1), 93–107. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.11.020>.
13. Xu, Yu. (2022) Logistics distribution for path optimization using artificial neural network and decision support system. *Research Square*, 1–17. doi: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1249887/v1>.
14. Zhang, N. (2018). Smart logistics path for cyber-physical systems with Internet of Things. *IEEE Access*, 6, 70808-70819, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2879966>.
15. Sanchez-Diaz, I., Holguin-Veras, J., Ban, X.J. (2015). A time-dependent freight tour synthesis model. *Transportation Research Part B Methodological*, 78(C), 144–168. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.04.007>.
16. Zhang, L., Thompson, R.G. (2019). Understanding the benefits and limitations of occupancy information systems for couriers. *Transportation Research Part C: Emerging Technology*, 105, 520–535. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.06.013>.
17. Russo, F., Comi, A. (2021). Sustainable urban delivery: The learning process of path costs enhanced by information and communication technologies. *Sustainability*, 13(13103), 1–17. doi: <https://doi.org/10.3390/su132313103>.
18. Danchuk, V., Comi, A., Weiß, C., Svatko, V. (2023). The optimization of cargo delivery processes with dynamic route updates in smart logistics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – Vol. 2, No.3 (122). – P. 64 – 73. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277583>.
19. Lakshmi S., Ishwarya Srikanth, Arockiasamy M. (2019). Identification of Traffic Accident Hotspots using Geographical Information System. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*. – Vol. 9, Iss. 2. <http://dx.doi.org/10.35940/ijeat.B3848.129219>.
20. Microsoft Bing Maps Documentation – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://learn.microsoft.com/en-us/bingmaps>.

21. Dorigo, M., Di Caro, G.: The ant colony optimization meta-heuristic. In: Corne, D., Dorigo, M., Glover, F. (eds.) *New Idea in Optimization*, pp. 11–32. McGraw-Hill, London (1999).
22. Heidelberg University (2013). TSPLIB – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://comopt.ifl.uni-heidelberg.de/software/TSPLIB95>.

## REFERENCES

1. Larsen A. (2001). The dynamic vehicle routing problem. Technical University of Denmark. LYNGBY 2001 IMM-PHD-2000-73, 209p. <https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/5261816/imm143.pdf> [in English].
2. Hernandez F., Sotelo R., Forets M. (2024). Optimization algorithms for adaptative route sequencing on real-world last-mile deliveries *Ingenius*, 2024(31), pp. 64–80. <https://ingenius.ups.edu.ec/index.php/ingenius/article/view/7410> [in English].
3. Erdogan S. (2017). An open source spreadsheet solver for vehicle routing problems. *Computers&Operations Research*, 84, 62–72. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.02.022> [in English].
4. Thompson R.G., Zhang L. (2018). Optimizing courier routes in central city areas. *Transportation Research Part C: Emerging Technology*, 93, 1–12. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.05.016> [in English].
5. Jamil A., Abdallah B.N., Leksono V.A. (2021). Firefly algorithm for multi-type vehicle routing problem. *Journal of Physics: Conference Series*, 1726(1), 012006. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1726/1/012006> [in English].
6. Wu H., Gao Y., Wang W., Zhang Z. (2021). A hybrid ant colony algorithm based on multiple strategies for the vehicle routing problem with time windows. *Complex & Intelligent Systems*, 18. doi: <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00401-1> [in English].
7. Giuffrida N., Fajardo-Calderin J., Masegosa A. D., Werner F., Steudter M., Pilla F. (2022). Optimization and machine learning applied to last-mile logistics: A review. *Sustainability*, 14(9), 5329. doi: <https://doi.org/10.3390/su14095329> [in English].
8. RTC. The Impact of Emerging Technologies on the Transport System; Research for Tran Committee, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Directorate-General for Internal Policies: Brussels, Belgium. (2020). Available at: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2020/652226/IPOL\\_STU\(2020\)652226\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2020/652226/IPOL_STU(2020)652226_EN.pdf) [in English].
9. Zajkani, M. A., Rahimi Baghdorani, R., Haeri, M. (2021). Model predictive based approach to solve DVRP with traffic congestion, *IFAC-Papers On Line* 54(21), 163-167. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.12.028> [in English].
10. Zhang, H., Zhang, Q., Ma, L., Liu, Y. (2019). A hybrid ant colony optimization algorithm for a multi-objective vehicle routing problem with flexible time windows. *Information Sciences*, 490, 166-190. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.03.070> [in English].
11. Belhaiza, S., M'Hallah, R., Brahim, G.B., Laporte, G. (2019). Three multi-start data-driven evolutionary heuristics for the vehicle routing problem with multiple time windows. *Journal of Heuristics*, 25(3), 485–515. doi: <https://doi.org/10.1007/s10732-019-09412-1> [in English].
12. Hoogeboom, M., Dullaert, W. (2019). Vehicle routing with arrival time diversification. *European Journal of Operational Research*, 275(1), 93–107. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.11.020> [in English].
13. Xu, Yu. (2022) Logistics distribution for path optimization using artificial neural network and decision support system. *Research Square*, 1–17. doi: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1249887/v1> [in English].
14. Zhang, N. (2018). Smart logistics path for cyber-physical systems with Internet of Things. *IEEE Access*, 6, 70808-70819, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2879966> [in English].
15. Sanchez-Diaz, I., Holguin-Veras, J., Ban, X.J. (2015). A time-dependent freight tour synthesis model. *Transportation Research Part B Methodological*, 78(C), 144–168. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.04.007> [in English].
16. Zhang, L., Thompson, R.G. (2019). Understanding the benefits and limitations of occupancy information systems for couriers. *Transportation Research Part C: Emerging Technology*, 105, 520–535. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.06.013> [in English].
17. Russo, F., Comi, A. (2021). Sustainable urban delivery: The learning process of path costs enhanced by information and communication technologies. *Sustainability*, 13(13103), 1–17. doi: <https://doi.org/10.3390/su132313103> [in English].

18. Danchuk, V., Comi, A., Weiß, C., Svatko, V. (2023). The optimization of cargo delivery processes with dynamic route updates in smart logistics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – Vol. 2, No.3 (122). – P. 64 – 73. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277583> [in English].
19. Lakshmi S., Ishwarya Srikanth, Arockiasamy M. (2019). Identification of Traffic Accident Hotspots using Geographical Information System. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*. – Vol. 9, Iss. 2. <http://dx.doi.org/10.35940/ijeat.B3848.129219> [in English].
20. Microsoft Bing Maps Documentation. [learn.microsoft.com](https://learn.microsoft.com/en-us/bingmaps). Retrieved from <https://learn.microsoft.com/en-us/bingmaps> [in English].
21. Dorigo, M., Di Caro, G.: The ant colony optimization meta-heuristic. In: Corne, D., Dorigo, M., Glover, F. (eds.) *New Idea in Optimization*, pp. 11–32. McGraw-Hill, London (1999) [in English].
22. Heidelberg University (2013). TSPLIB. [comopt.ifl.uni-heidelberg.de](http://comopt.ifl.uni-heidelberg.de). Retrieved from <http://comopt.ifl.uni-heidelberg.de/software/TSPLIB95> [in English].

## РЕФЕРАТ

Данчук В.Д. Метод адаптивної оптимізації маршруту в динамічній задачі комівояжера з використанням модифікованого мурашиного алгоритму / В. Д. Данчук, О. С. Гутаревич // // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2024. – Вип. 1 (58).

У статті запропоновано метод адаптивної оптимізації маршруту в динамічній задачі комівояжера з використанням модифікованого мурашиного алгоритму. Метод передбачає знаходження оптимального маршруту на двонаправлено орієнтованому зваженому графі, вага ребер якого задається відносними дискретними величинами у відповідності до критерію оптимізації. Для побудови такого графу на основі вхідних даних щодо точок доставки вантажів використовується відповідна інформація, отримана за допомогою сучасних геоінформаційних систем (ГІС). Для динамічного оновлення графу використовується інформація, яку отримують з детекторів руху, розташованих на ділянках вулично-дорожньої мережі (ВДМ) та з програмних інтерфейсів ГІС.

Для проведення дискретної оптимізації маршруту в рамках розв'язку асиметричної динамічної задачі комівояжера (DTSP) розроблено модифікацію мурашиного алгоритму, в рамках якої реалізована можливість автоматичного оновлення ваг графу в залежності від змін динамічних характеристик на ділянках ВДМ при фіксації оптимальної конфігурації частково пройденого маршруту перед його оновленням.

Для апробації запропонованого методу здійснено комплекс відповідних імітаційних досліджень процесів маршрутизації при різних умовах оптимізації. Так, з метою перевірки адекватності та достовірності запропонованої модифікації мурашиного алгоритму були проведені відповідні тестові дослідження на прикладі набору загальновідомих статичних TSP задач з критерієм оптимізації за відстанню у порівнянні з найбільш поширеними AI методами дискретної оптимізації. Результати досліджень демонструють прийнятний рівень точності (з відхиленням до 4% у найгірших варіантах), що може вважатися задовільним результатом для застосування у багатьох практичних випадках. При проведенні імітаційних досліджень асиметричної DTSP за допомогою запропонованого методу адаптивної оптимізації маршруту з динамічним його оновленням під час перевезень вантажів, зокрема, було виявлено низку ефектів, пов'язаних з перебудовою маршруту.

Таким чином, на підставі аналізу результатів імітаційних досліджень доведена принципова можливість використання розробленого методу для вирішення задач міської транспортної логістики в онлайн режимі з урахуванням реальної конфігурації ВДМ та динаміки ТП на її ділянках.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ТРАНСПОРТНА СИСТЕМА, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ, ЗАДАЧА КОМІВОЯЖЕРА, МУРАШИНИЙ АЛГОРИТМ, ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ, ТРАНСПОРТНА ЛОГІСТИКА, ВУЛИЧНО-ДОРОЖНЯ МЕРЕЖА, ТРАНСПОРТНИЙ ПОТІК.

## ABSTRACT

Danchuk V.D., Hutarevych O.S. Adaptive route optimization method for the dynamic traveling salesman problem using the modified ant colony algorithm. *Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences»*. Scientific, scientific and industrial journal. – K.: NTU, 2024. – Issue 1 (58).

The article proposes an adaptive route optimization method for solving dynamic traveling salesman problem using a modified ant colony algorithm. The method involves finding the optimal route on a

bidirectional weighted graph, where the edge weights are defined by relative discrete values according to the optimization criterion. Relevant information obtained from modern geographic information systems (GIS) is utilized to construct such a graph based on input data regarding cargo delivery points. Additionally, information from motion detectors located on road network sections and GIS software interfaces is used for dynamic graph updates.

To perform discrete route optimization within the solution of the asymmetric dynamic traveling salesman problem (DTSP), a modification of the ant colony algorithm has been developed. This modification implements automatic updating of the graph's weights based on changes in dynamic characteristics on sections of the road network, upon fixation of the optimal configuration of the partially traversed route prior to its update.

To validate the proposed method, a comprehensive set of simulation studies on routing processes under various optimization conditions was conducted. Specifically, to assess the adequacy and reliability of the proposed modification of the ant colony algorithm, corresponding test studies were conducted using a set of well-known static traveling salesman problems with distance optimization criteria in comparison with the most common AI methods of discrete optimization. The research results demonstrate an acceptable level of accuracy (with deviations up to 4% in the worst-case scenarios), which can be considered satisfactory for application in many practical cases. Furthermore, simulation studies of solving the asymmetric DTSP using the proposed adaptive route optimization method with dynamic route updates during cargo transportation revealed several effects associated with route reconstruction.

Thus, based on the analysis of simulation results, the fundamental feasibility of using the developed method for solving urban transport logistics problems in real-time considering the actual configuration of the road network and the dynamics of traffic flows on its segments has been demonstrated.

**KEYWORDS:** INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEM, INTELLIGENT OPTIMIZATION METHODS, TRAVELING SALESMAN PROBLEM, ANT COLONY ALGORITHM, INFORMATION TECHNOLOGIES, GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS, TRANSPORT LOGISTICS, ROAD NETWORK, TRAFFIC FLOW.

#### **АВТОРИ:**

Данчук Віктор Дмитрович, доктор фізико-математичних наук, професор, Національний транспортний університет, декан факультету транспортних та інформаційних технологій, e-mail: vdanchuk@ukr.net, тел. +380996376677, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Бойчука 42, к. 211, orcid.org/0000-0003-3936-4509.

Гутаревич Олександр Сергійович, Національний транспортний університет, аспірант кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки, e-mail: oleksandr.hutarevych@gmail.com, тел. +380984420646, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Бойчука, 42, к. 202, orcid.org/0009-0003-7355-8160.

#### **AUTHORS:**

Danchuk V.D., Dr. Sc. (Phys.-Math.), National Transport University, Dean of the Faculty of Transport and Information Technology, e-mail: vdanchuk@ukr.net, tel. +380996376677 Ukraine, 01010, Kyiv, M. Boychuk str. 42, of. 211, orcid.org/0000-0003-3936-4509.

Hutarevych O.S., National Transport University, PhD student, e-mail: oleksandr.hutarevych@gmail.com, tel. +380984420646, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Boychuk str. 42, of. 202, orcid.org/0009-0003-7355-8160.

#### **РЕЦЕНЗЕНТИ:**

Мусієнко А. П., доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Київ, Україна

Аль-Амморі Алі, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки, Київ, Україна.

#### **REVIEWERS:**

Musienko Andrii P., Doctor of Technical Science, Professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Professor of the Department of Automation of Design of Energy Processes and Systems, Kyiv, Ukraine.

Al-Ammori Ali, Doctor of Technical Science, Professor, National Transport University, Head of the Department of Information and Analytical Activity and Information Security, Kyiv, Ukraine.