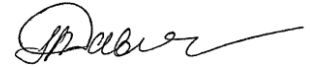


**Національна академія наук України
Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова**

ПАВЛЕНКО Анна Ігорівна



УДК 519.7

**МОДЕЛЮВАННЯ І ОПТИМІЗАЦІЯ МАРШРУТІВ У ТРАНСПОРТНИХ
МЕРЕЖАХ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
Гуляницький Леонід Федорович,
Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України,
завідувач відділу методів комбінаторної оптимізації та інтелектуальних інформаційних технологій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Снитюк Віталій Євгенович,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, завідувач кафедри інтелектуальних та інформаційних систем,

доктор технічних наук, професор,
Томашевський Валентин Миколайович,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
професор кафедри автоматизованих систем обробки інформації та управління.

Захист відбудеться “___” ___ квітня 2019 р. о (об) 12⁰⁰ годині, на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.194.02 при Інституті кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України за адресою:
03187, Київ-187, проспект Академіка Глушкова, 40.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічному архіві Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України за адресою:
03187, Київ-187, проспект Академіка Глушкова, 40.

Автореферат розісланий “___” ___ березня 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



Вагіс О.А.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Задача пошуку оптимальних шляхів в мережах, характеристики яких змінюються з часом, знаходить застосування в багатьох сферах людської діяльності, серед яких маршрутизація пакетів в глобальній мережі Інтернет, планування подорожей (створення маршрутів із застосуванням різних видів транспорту, рух яких залежить від часу), складання розкладів залізничних сполучень, логістиці (оптимізація доставки товарів отримувачам), в обороні (планування маршрутів безпілотних літальних апаратів при збиранні розвідувальної інформації про визначені місця) тощо.

В роботі увага приділяється задачам пошуку оптимальних шляхів в мережі авіаперельотів за критерієм вартості. Увага до цього обумовлена глобалізацією, яка пов'язана з лібералізацією міжнародної торгівлі, вільним переміщенням капіталу та робочої сили, інвестиціями тощо. Одним із видимих проявів глобалізації є розвиток туризму, який, у свою чергу, обумовлює попит на нові авіасполучення та зростання авіамереж. За даними IATA (Міжнародна асоціація повітряного транспорту), чисельність пасажирів авіатранспорту зросла з 1.994 млн. у 2004 році до 4.358 млн. у 2018 році. 54% всіх інтернаціональних пасажирів користувались авіатранспортом для подорожей. У 2018 році у світі виконувалось 39 млн. комерційних авіаперевезень і їх кількість зростає з кожним роком. За даними Державної авіаційної служби України, пасажиропотік в Україні становив 12.9 млн. у 2016 році, 16.5 млн. у 2017 році, 20.5 млн. у 2018 році.

Інтернет-технології значно знизили витрати, зменшивши важливість посередників або виключивши їх взагалі, сприяючи появі нових сервісів для самостійного пошуку пасажиром маршрутів з гнучкими умовами. Це створює потребу в ефективних алгоритмах знаходження оптимального маршруту за прийнятний час за наявних обмежень обчислювальних ресурсів, динамічних даних про стан системи та гнучких початкових умовах, що задаються користувачем, а також їх використання в програмних комплексах для пошуку розв'язків в реальному часі. Попит знаходить своє відображення в появі нових систем маршрутизації та агрегаторів (наприклад, Google Maps, SkyScanner, GPS навігатори тощо).

Досліджувану проблему можна звести до задачі орієнтування, яка вперше описана у працях Tsiligirides у 1984 році. Постановка задачі орієнтування з залежністю від часу є відносно новою і її різновиди були описані у працях Fomin and Lingas (2002), Abbaspour and Samadzadegan (2011), Garcia et al. (2013), Li et al. (2010), Li (2011), Gavalas et al. (2014, 2015), Verbeeck, Vansteenwegen і El-Houssaine Aghezzaf (2018). Проте, як засвідчили результати аналізу літератури, задача пошуку оптимального шляху в мережі авіаперельотів із спеціальними користувацькими умовами для побудови туристичного маршруту і підходи до її розв'язування розглядаються вперше.

Таким чином, попри вже існуючі наукові результати дослідження пошуку оптимальних шляхів в динамічних мережах залишається невирішеною проблема побудови маршруту з користувацькими умовами в реальному часі для авіамереж.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертацію виконано у відділі методів комбінаторної оптимізації та інтелектуальних інформаційних технологій Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України. Результати роботи отримано при проведенні науково-дослідних робіт за темами: «Розробити математичні методи розв'язання складних проблем комбінаторної оптимізації, інтелектуального аналізу та захисту даних із використанням суперкомп'ютерів» (№ держреєстрації 0112U001427, 2012-2016), «Розробити математичний апарат, орієнтований на створення інтелектуальних інформаційних технологій розв'язування проблем комбінаторної оптимізації та інформаційної безпеки» (№ держреєстрації 0117U000323, 2017).

Мета і завдання дослідження. *Метою* дисертаційної роботи є підвищення ефективності пошуку маршрутів у транспортних мережах з урахуванням користувацьких умов, вартості подорожі і розкладу транспорту шляхом побудови відповідних моделей для подання транспортних мереж і розробки алгоритмів пошуку оптимальних шляхів у залежних від часу мережах з додатковими умовами.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі завдання:

- аналіз підходів до подання моделей та розробки алгоритмів розв'язування задач побудови оптимальних шляхів у динамічних мережах, а також проблем, що виникають при цьому;
- розробка та формалізація математичних моделей для подання задачі пошуку оптимальних шляхів у залежних від часу графах з додатковими умовами користувача;
- розробка алгоритмів пошуку оптимальних шляхів у залежних від часу графах з додатковими умовами користувача;
- дослідження ефективності розроблених алгоритмів з використанням реальних даних.

Об'єктом дослідження є процес побудови оптимальних шляхів у залежних від часу мережах з додатковими умовами.

Предметом дослідження є моделі, методи та засоби побудови оптимальних шляхів у залежних від часу мережах з додатковими умовами.

Методи дослідження – методи комбінаторної оптимізації на основі оптимізації мурашиними колоніями (ОМК), а також модифікації табу списків, локального пошуку, методу гілок і меж та бектрекінгу – для побудови оптимальних шляхів у залежній від часу мережі та аналізу відносної якості сполучень авіамережі за критерієм вартості; генетичні алгоритми для побудови прогнозу зміни вартості авіасполучень, що дозволяє оптимізувати кількість запитів сторонніх сервісів – власників даних, а також комбінації цих методів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

- вперше сформульовано і описано задачу пошуку оптимального шляху мандрівника в мережі авіаперельотів, яка на відміну від існуючих задач враховує вартість побудованого маршруту як критерій оптимальності та наявність користувацьких умов при залежній від часу зміні вартості сполучень;
- вперше запропоновано, реалізовано і досліджено ряд алгоритмів систем мурашиних колоній для розв'язування залежної від часу задачі пошуку оптимального шляху мандрівника, поданої розширеним графом перельотів, які на відміну від існуючих методів на основі ОМК враховують динамічність мережі (залежність наявності і вартості сполучення від часу) та користувацькі умови;
- розроблений алгоритм систем мурашиних колоній (АСМК) удосконалено шляхом застосування гібридних методів, що включали табу-списки, бектрекінг, метод гілок і меж, локальний пошук, що дозволило зменшити простір пошуку і час виконання без втрати точності розв'язків;
- удосконалено підхід до диверсифікації пошуку в мурашиних алгоритмах в умовах залежності від часу для щільного графу, що дозволило підвищити якість побудованих маршрутів для запитів користувача з початковим та цільовим пунктів, що належать різним регіонам;
- отримав подальший розвиток розподілений АСМК з препроцесингом, що дозволило підвищити ефективність результатів розв'язування порівняно з класичним ОМК за рахунок використання евристичної інформації та зменшити час роботи алгоритму за рахунок можливості розподілених обчислень.

Практичне значення отриманих результатів роботи полягає в тому, що на основі одержаних наукових результатів дисертаційної роботи можливе подальше використання метаевристичних методів для задач пошуку оптимальних шляхів із врахуванням додаткових умов. Результати дослідження були впроваджені у навчальному процесі кафедри автоматизованих систем обробки інформації та управління КПІ імені Ігоря Сікорського, а саме у викладанні навчальних дисциплін «Дослідження операцій» та «Наближені методи комбінаторної оптимізації» для студентів спеціальностей 122 «Комп'ютерні науки та інформаційні технології» та 126 «Інформаційні управляючі системи та технології».

Запропонований алгоритм з препроцесингом для пошуку оптимальних шляхів в транспортних мережах було впроваджено в українській ІТ-компанії «Innova», що надає технологічні послуги та інноваційні сервіси для банківської індустрії. Впровадження отриманих результатів дозволяє надавати додаткові можливості по пошуку оптимальних туристичних маршрутів клієнтам банку.

Особистий внесок здобувача. Всі наукові положення і результати, що складають основний зміст роботи, автором отримано самостійно. У роботах [2, 3, 11, 12] керівник визначив напрям і методи дослідження, дисертант розробив алгоритм прогнозування часових рядів на основі генетичного алгоритму, дослідив

підходи до побудови процедур навчання, запропонував способи подання популяцій в алгоритмі, рекомбінації, побудови ніш, розрахунок пристосованості, розв'язання конфліктів, провів обчислювальні експерименти для налаштування алгоритмів і дослідження ефективності з використанням реальних часових рядів.

В роботах [8, 10, 13, 15] керівник визначив постановки задач та рекомендації щодо методів їх розв'язання, особистим внеском дисертанта є виконання всіх основних досліджень, побудова структури алгоритмічного комплексу разом з більшою частиною його складових, формулювання висновків та оформлення результатів.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційного дослідження доповідалися та обговорювалися на міжнародних конференціях «Проблеми прийняття рішень в умовах невизначеності» (Мукачево, 2014 р. та Східниця, 2015 р.), міжнародній конференції «Системний аналіз та інформаційні технології» (Київ, 2015 р.), міжнародній конференції «Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)» (Черкаси, 2015 р.), міжнародній конференції «Knowledge-Dialogue-Solution» (Київ, 2014 р.), а також під час роботи міжнародної школи-семінару «Теорія прийняття рішень» (Ужгород, 2014 р.) і на наукових семінарах Інституту кібернетики імені В.М.Глушкова НАН України (Київ, 2014 – 2018 рр.).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковано в 15 наукових роботах, з яких 9 наукових статей і 6 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях. 7 робіт [1-3, 6-9] опубліковано у наукових виданнях з Переліку наукових фахових видань України. 2 роботи [4-5] опубліковані в зарубіжних журналах, що індексуються в Worldcat, ROAD Directory of Open Access scholarly Resources, Google Scholar, CiteseerX, IThENA. Робота [6] опублікована у виданні, що індексується в базі РІНЦ.

Структура дисертації. Робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, 2 додатків та списку використаних літературних джерел з 115 найменувань. Загальний обсяг дисертації становить 191 сторінку.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ містить загальну характеристику роботи, актуальність теми, зв'язок роботи з науковими програмами, мету і задачі дослідження, об'єкт, предмет та методи дослідження, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача в працях у співавторстві, дані апробації результатів дослідження.

У **першому розділі** наведено огляд літератури за темою дисертації. Динамічна задача пошуку найкоротших шляхів вперше була описана в літературі Куком і Хелсі у 1966 р.: задано граф множиною вершин та множиною дуг, необхідно знайти найкоротший шлях між заданими вершинами. Кожна дуга характеризується часовою затримкою, тобто необхідним часом для переміщення по ній в певний момент часу. Більшість сучасних постановок динамічних задач можна розділити за типом додаткових обмежень, які накладаються: неперервність або дискретність часу,

дозвіл або заборону простою у пунктах, наявність часових вікон, критерій оптимальності. У розділі коротко розглянуті поширені підходи для розв'язування динамічної задачі найкоротшого шляху точними методами та еволюційними методами, а також наведено опис реальних інформаційних систем розкладів (ARIADNE і TRAINS) та схема їх роботи. Через зростання складності задач з'являються евристичні підходи для пошуку наближених розв'язків і пришвидшення пошуку точних алгоритмів.

Розглядувана динамічна задача пошуку оптимального шляху має кілька споріднених постановок, серед яких залежна від часу задача орієнтування та залежна від часу задача пошуку маршруту через задану множину вершин. Відмінність досліджуваної задачі полягає у розширеній множині умов користувача, що накладається на маршрут, а також підходами до розв'язування.

У **другому розділі** подано загальну постановку і математичну модель задачі пошуку оптимального шляху у динамічному мультиграфі для побудови туристичного маршруту з користувацькими умовами. Розділ містить основні поняття задачі пошуку оптимального шляху у мережі громадського транспорту, такі як розклад, елементарне сполучення, маршрут, запит користувача, мультимодальна транспортна мережа, а також формулюються вимоги до програмного комплексу побудови оптимального шляху.

В літературі описано декілька підходів подання динамічних мереж громадського транспорту, основні – розширений за часом граф (*time-expanded*) і залежний від часу граф (*time-dependent*). Ідея першого підходу полягає у створенні вершини для кожної події розкладу, що призводить до графів великої розмірності. У залежному від часу графі сегменти подорожі подаються однією дугою, тобто граф містить по одній вершині на кожну зупинку. Для подання ваг дуг використовуються значення залежних від часу функцій тривалості подорожі і вартостей сполучення.

Аналіз підходів подання залежних від часу транспортних мереж показав, що універсального методу подання мереж поки що не існує і рекомендується розробляти моделі відповідно до умов задачі, типу транспортних мереж та їх властивостей. Наведено способи подання простих та реалістичних моделей, залежних та розширених за часом, особливості подання авіамереж.

Метою дослідження є розв'язування задачі пошуку оптимального за вартістю шляху в транспортній мережі з заданими користувацькими умовами: початковий і кінцевий пункт, часове вікно і тривалість подорожі, проміжні пункти, кількість трансферів. Розширена версія задачі може включати обов'язкове відвідування проміжних пунктів в задані часові інтервали, тип авіаліній, загальну кількість пересадок і транзитний час. В роботі наведена задача мінімізації (Y, f, Ω) , де Y – множина розв'язків, f – цільова функція, яка визначає значення вартості $f(y, t)$ кожному розв'язку $y \in Y$, $\Omega(t)$ – множина обмежень, t – параметр, що відображує часову залежність цільової функції або обмежень.

Мережу транзитних пунктів і сполучень подамо як направлений мультиграф $G = (V, A)$, який описує залежні від часу сполучення між містами. Нехай V – множина n вершин, що відповідають транспортним вузлам (аеропорти, порти, залізничні зупинки тощо), A – множина m сполучень між транспортними вузлами. Кожна дуга $a_{ij}(t) \in A$ позначає наявність сполучення між пунктами i та j з відправленням в момент часу t .

Перехід по дузі $a_{ij}(t) \in A$ в момент часу t спричиняє деяку часову затримку $c_{ij}(t)$ і матеріальні витрати $l_{ij}(t)$. Тобто, маємо $C: A \rightarrow \mathbb{R}^+ \cup \{0\}$ – функцію, яка визначає невід’ємне значення тривалості сполучення $c_{ij}(t)$ для кожної дуги $a_{ij}(t) \in A$. Аналогічно, $L: A \rightarrow \mathbb{R}^+ \cup \{0\}$ – функція, яка визначає невід’ємне значення вартості сполучення $l_{ij}(t)$ для кожної дуги $a_{ij}(t) \in A$. Для спрощення час дискретизується (по годинам, дням тощо). В роботі вважається, що трійка (i, j, t) унікально задає рейс (дугу) $a_{ij}(t)$. Якщо в задачі фігурують кілька видів транспорту, то пропонується розглянути дві моделі подання мереж: множину графів мереж (кожен граф подає деякий вид транспорту, при цьому вершини можуть дублюватись у кількох графах) та граф множини мереж (кожна дуга графу задається $a_{ij}^r(t) \in A$, де r – вид транспорту).

Можливість простою в проміжних пунктах можна подавати додатковими вершинами очікування, проте недоліком такого подання є значне зростання розміру графу в залежності від інтервалу подорожі та кількості часових інтервалів, у межах яких будується граф. Перевагою такого подання є простіша адаптація базових алгоритмів на графах. Тому пропонується використовувати залежні від часу функції, а не розширення графу за часом. Нехай $\zeta(i_j, i_{j+1}, t_j)$ – функція, що подає час простою в пункті i_j перед подорожжю сполученням (i_j, i_{j+1}, t_j) , а $\delta(i_j, i_{j+1}, t_j)$ – вартість простою в пункті i_j перед подорожжю сполученням (i_j, i_{j+1}, t_j) . Для випадку побудови туристичного маршруту умови користувача при задаванні обов’язкових для відвідування пунктів можуть включати часові інтервали для відвідування кожного пункту; мінімальний $\zeta_{\min}(i_j)$ і максимальний $\zeta_{\max}(i_j)$ час простою; межі вартості простою (мінімальне допустиме значення вартості більш актуальне для багатокритеріальних задач, коли вагу намагаються максимізувати): $\zeta_{\min}(i_j) \leq \zeta(i_j, i_{j+1}, t_j) \leq \zeta_{\max}(i_j)$, $t_{j\min} \leq t_j \leq t_{j\max}$, $\delta_{\min}(i_j) \leq \delta(i_j, i_{j+1}, t_j) \leq \delta_{\max}(i_j)$.

За відсутності обов’язкових для відвідування проміжних пунктів і від’ємних значень ваг дуг очевидно, що в оптимальному маршруті через кожен вершину можна пройти не більше одного разу, тому умова проходження через кожен проміжну вершину для задачі без обов’язкових проміжних пунктів виглядає так:

$$0 \leq \sum_{i \neq j} x_{ij} \leq 1,$$

де $x_{ij} = 1$, якщо рейс з пункту i в пункт j належить y , інакше $x_{ij} = 0$, $i, j \in V$.

Окрім початкового s і кінцевого d пунктів, користувач може задавати проміжні обов'язкові для відвідування пункти $v_{mandatory} \in V_{mandatory} \subset V$, що впливає на кількість входжень вершин до маршруту. Тоді умови проходження через проміжні вершини виглядають так: $\sum_{i \in V} x_{si} \geq 1$, $\sum_{i \in V} x_{id} \geq 1$, $\sum_{\substack{i \in V \setminus \{j\} \\ j \in V_{mandatory} \setminus \{i\}}} x_{ij} \geq 1$, $\sum_{\substack{i \in V_{mandatory} \setminus \{j\} \\ j \in V \setminus \{i\}}} x_{ij} \geq 1$.

Якщо користувач задає заборонений для відвідування пункт з множини $V_{prohibited}$, то $\sum_{\substack{i \in V \setminus \{j\} \\ j \in V_{prohibited}}} x_{ij} = 0$, $\sum_{\substack{i \in V_{prohibited} \\ j \in V \setminus \{i\}}} x_{ij} = 0$. Користувач може визначити бажані, але необов'язкові для відвідування проміжні пункти $v_{desired} \in V_{desired} \subset V$. Така інформація є евристичними даними, що можуть надаватись алгоритму для пріоритезації дослідження деяких пунктів або при здійсненні багатокритеріального пошуку.

Назвемо маршрутом (шляхом) $y(i_0, i_k, t_0)$ з пункту i_0 в пункт i_k і відправленням в момент часу t_0 таку упорядковану послідовність дуг, для якої виконується:

$$y(i_0, i_k, t_0) = ((i_0, i_1, t_0), (i_1, i_2, t_1), \dots, (i_{k-2}, i_{k-1}, t_{k-2}), (i_{k-1}, i_k, t_{k-1})),$$

$$t_k > t_{k-1} + c(i_{k-1}, i_k, t_{k-1}) > t_{k-2} + c(i_{k-2}, i_{k-1}, t_{k-2}) > \dots > t_0 + c(i_0, i_1, t_0),$$

тобто відправлення з наступного пункту відбувається завжди пізніше, ніж прибуття, $t_k > t_{k-1} > \dots > t_0$.

Позначимо y довільний маршрут із початкової вершини $i_0 = s$ до кінцевої $i_w = d$, який визначається послідовністю w фрагментарних маршрутів y :

$$y = (y(i_0, i_1, t_0), y(i_1, i_2, t_1), \dots, y(i_{w-1}, i_w, t_{w-1})).$$

Тоді загальний час подорожі маршрутом y з кількістю сегментів $arcs$ визначимо так: $C(y) = \sum_{j=1}^{arcs} c(i_j, i_{j+1}, t_j) + \zeta(i_j, i_{j+1}, t_j)$,

де $\zeta(i_j, i_{j+1}, t_j)$ – час простою в пункті i_j перед подорожжю сполученням (i_j, i_{j+1}, t_j) .

Аналогічно, вартість переходу з вершини відправлення i_0 у кінцеву i_k з відправленням в момент часу t_0 позначимо $l(i_0, i_k, t_0)$. Тоді загальну вартість маршруту $L(y)$ задамо формулою $L(y) = \sum_{j=1}^{arcs} [l(i_j, i_{j+1}, t_j) + \delta(i_j, i_{j+1}, t_j)]$, де $\delta(i_j, i_{j+1}, t_j)$ – вартість простою в пункті i_j перед подорожжю сполученням (i_j, i_{j+1}, t_j) .

Якщо користувачем визначено мінімальну y_{min} і максимальну y_{max} кількості обов'язкових проміжних пунктів у маршруті, тоді $y_{min} \leq \|y\| \leq y_{max}$, де $\|y\|$ – кількість пунктів у маршруті y .

Описані умови є опціональними, тобто можуть включатись або відкидатись користувачем в момент запиту, а пошуковий алгоритм повинен гнучко адаптуватись.

Задача полягає в пошуку оптимального шляху з початкового пункту (вершини) $s \in V$ до цільового пункту $d \in V$. Критерієм оптимальності може бути час, вартість, кількість зупинок тощо в залежності від умов користувача. Якщо критеріїв декілька, тоді визначається інтегральна оцінка розв'язку в залежності від ваг критеріїв. Часовий інтервал, в якому необхідно побудувати маршрут подорожі, задається найранішим і найпізнішим часом відправлення з початкової вершини $[t_{0min}, t_{0max}]$, а також найранішим і найпізнішим часом прибуття в кінцеву вершину $[t_{dmin}, t_{dmax}]$. Отже, критерієм є мінімальна сумарна вартість подорожі, яка визначається функцією $f(y) = \sum_{j=1}^w l(y(i_j, i_{j+1}, t_{i_j}))$, де w – кількість фрагментарних маршрутів, що утворюють маршрут y , $i_1 = s$, $i_{w+1} = d$, а t_{i_j} – час відправлення з пункту i_j . Задача полягає у знаходженні такого допустимого маршруту $y_* \in Y$, який мінімізує цільову функцію $y_* = \arg \min_{y \in \tilde{Y} \subseteq Y} f(y)$, де \tilde{Y} – множина допустимих розв'язків.

В розділі наведена класифікація задач в залежності від умов користувача.

У **третьому розділі** запропоновані методи і алгоритми для пошуку оптимальних шляхів в мережах громадського транспорту.

Наведено опис розробленого багатокритеріального алгоритму на основі алгоритму міток. Критерії формуються такими факторами: μ_1 – загальна вартість подорожі, μ_2 – загальний час подорожі, μ_3 – загальна кількість трансферів, μ_4 – транзитний час. Для порівняння якості маршрутів використовується поняття лексикографічного порядку: $y_1(i, j, t) \leq_L y_2(i, j, t)$, якщо $\mu_{k_j}(y_1) \leq \mu_{k_j}(y_2)$ і $\mu_{k_u}(y_1) = \mu_{k_u}(y_2)$ для $u = 1, \dots, j-1$. Кожному рейсу з відправленням з пункту v_i в час t відповідає мітка $\underline{\lambda}^t(v_i) = (\lambda_{\mu_1}^t(v_i), \lambda_{\mu_2}^t(v_i), \lambda_{\mu_3}^t(v_i), \lambda_{\mu_4}^t(v_i))$, за якою оцінюється якість переходу по дузі. Кожний атрибут мітки $\lambda_{\mu_j}^t(v_i)$, $j = 1, \dots, 4$, відповідає значенню критерію μ_j в маршруті з вершини v_i в час t в вершину $v_n = d$. На етапі ініціалізації для кожної вершини і моменту часу $\forall t \in [dep_{v_0}^e, arr_{v_n}^l]$ встановлюються $\lambda_{\mu_j}^t(v_n) = 0$, $\lambda_{\mu_j}^t(v_r) = \infty$, $\psi^t(v_r) = nil$, де $j = 1, \dots, 4$, а індекси e і l позначають найраніший і найпізніший час допустимий час відправлення dep чи прибуття arr . На другому кроці для кожної вершини v_r , суміжної до вершини v_n , створюються нові мітки: $\lambda_{\mu_1}^t = l(v_r, v_n, t)$, $\lambda_{\mu_2}^t = c(v_r, v_n, t)$, $\lambda_{\mu_3}^t = 1$, $\lambda_{\mu_4}^t = c(v_r, v_n, t)$, $\psi^t(v_r) = v_n$, де $arr_{v_n}^e \leq t + c(v_r, v_n, t) \leq arr_{v_n}^l$. Далі на кожному кроці алгоритму, що визначається

поточним моментом часу, визначається мінімальна лексикографічна мітка з показником $\psi^t(v_i)$ на наступну вершину в маршруті. Для кожної вершини v_r необхідно створити мітки очікування для моменту t , базуючись на оптимальних мітках в момент $t+1$: $\lambda_{\mu_1}^t = \lambda_{\mu_1}^{t+1}(v_r)$, $\lambda_{\mu_2}^t = \lambda_{\mu_2}^{t+1}(v_r) + 1$, $\lambda_{\mu_3}^t = \lambda_{\mu_3}^{t+1}(v_r)$, $\lambda_{\mu_4}^t = \lambda_{\mu_4}^{t+1}(v_r)$, $\psi^t(v_r) = v_r$ і, використовуючи лексикографічний порядок, видалити з множини міток недомінуючі. На цьому кроці змінюються значення загального часу подорожі. На наступному кроці створити мітки: $\lambda_{\mu_1}^t = l(v_r, v_j, t) + \lambda_{\mu_1}^{t+1}(v_r)$, $\lambda_{\mu_2}^t = c(v_r, v_j, t) + \lambda_{\mu_2}^{t+1}(v_r)$, $\lambda_{\mu_3}^t = \lambda_{\mu_3}^{t+1}(v_r) + 1$, $\lambda_{\mu_4}^t = c(v_r, v_j, t) + \lambda_{\mu_4}^{t+1}(v_r)$, $\psi^t(v_r) = v_j$ і використовуючи лексикографічний порядок, видалити з множини міток недомінуючі. Таким чином, на виході з алгоритму маємо множини пар $(\lambda^t(v_r), \psi^t(v_r))$ недомінуючих міток для кожної вершини v_r і показника $\psi^t(v_r)$ на наступну вершину для кожного моменту часу t . Результат дозволяє однозначно визначити оптимальний шлях з початкового пункту $v_0 = s$ в момент часу $t = t_0$ через показники на наступну вершину $\psi^t(v_r)$ в кожній наступний момент часу.

Дослідження ефективності розробленого алгоритму міток показали, що з ростом розміру графу стрімко зростає і час роботи, що робить його неприйнятним для застосування в реальному часі. Для пришвидшення процесу розв'язування розроблено алгоритми на базі ОМК, які можуть ефективно використовувати евристичні дані задачі. В розділі наведено загальну схему ОМК, ідею застосування та модель задачі ОМК для пошуку маршруту в динамічній транспортній мережі з користувацькими умовами.

Для розв'язання поставленої задачі на базі ОМК розроблено алгоритм мурашиних колоній з одним поколінням. Динамічний граф пропонується подати як ациклічний багатошаровий статичний граф, що дозволяє застосувати схему алгоритма ММАС ОМК для пошуку найкоротшого шляху, хоча і збільшує кількість вершин з n до $n \times |T|$, де $|T|$ – кількість днів, для яких проводиться розрахунок. Багатошарова матриця феромонів будується аналогічно, але граничні умови кількості феромонів для дуг, що входять в $V_{desired}$, є вищими. Така процедура допомагає частіше включати бажані вершини в припустимий розв'язок. На кожній ітерації алгоритму перевіряються додаткові умови і з множини можливих переходів виключаються вершини $V_{prohibited}$. Після успішного проходу мурахи перевіряється на допустимість отриманий розв'язок і оновлюється матриця феромонів.

Розроблений алгоритм показав кращі результати часу виконання при тій же точності в порівнянні з алгоритмом міток, проте подальші дослідження ефективності та підходи покращення якості розв'язків привели до розробки гібридного алгоритму систем мурашиних колоній (АСМК) із використанням табу-списків, методу гілок і меж, бектрекінгу, локального пошуку. Феромонний слід τ_{ij} відображує бажаність перельоту,

а евристична інформація $\eta_{ijt} = 1/l(v_i, v_j, t)$ – обернено пропорційна вартість перельоту з пункту v_i до пункту v_j з відправленням в момент часу t . Феромонні сліди ініціалізуються $\forall(i, j, t), \tau_{ijt} = \tau_0 = z/L^m$, де z – кількість мурах, L^m – довжина маршруту, згенерована евристикою найближчого сусіда. Кожен агент при ініціалізації поміщується в стартовий пункт v_0 . На кожному кроці до часткового маршруту з використанням значень τ_{ijt} , η_{ijt} і ймовірнісної процедури додається досяжний за часом черговий пункт. Побудова маршруту завершується, якщо досягнуто кінцевий пункт $v_d = d$ або більше не існує допустимих кроків (за часом). Ймовірність переходу мурахи k , яка знаходиться в пункті i до пункту j в момент часу t визначається як

$$p_{ijt}^k = \frac{[\tau_{ijt}]^\alpha [\eta_{ijt}]^\beta}{\sum_{j \in N_{it}^k} [\tau_{ijt}]^\alpha [\eta_{ijt}]^\beta}, \text{ де } \alpha \text{ і } \beta \text{ – параметри, що визначають стадність і жадібність}$$

алгоритму; N_{it}^k – допустимий окіл для мурахи k , що знаходиться в пункті v_i в час t , тобто множина допустимих невідвіданих вершин; $j \in N_{it}^k$. Пам'ять мурахи M^k використовується для виключення вже відвіданих вершин та збереження маршруту. Вибір наступного пункту і час відправлення в нього здійснюється за правилом:

$$(v_j, t_{v_j}) = \begin{cases} \arg \max_{j \in N_{it}^k} \{ \tau_{ijt} \times \eta_{ijt}^\beta \}, \text{ якщо } q \leq q_0 \\ J, \text{ в іншому випадку} \end{cases},$$

де q – випадкова змінна, рівномірно розподілена в $[0,1]$, $q_0 (0 \leq q_0 \leq 1)$ – заданий параметр алгоритму, J – випадкова змінна, обрана відповідно до розподілу ймовірності.

Оновлення феромону здійснюється в два етапи. Локальне оновлення феромону здійснюється мурахами після кожного переміщення вздовж дуги протягом побудови маршруту: $\tau_{v_i, v_j, t_{v_j}} \leftarrow (1 - \varepsilon) \times \tau_{v_i, v_j, t_{v_j}} + \varepsilon \tau_0$, де $0 < \varepsilon < 1$ і τ_0 – параметри алгоритму. Після кожної ітерації алгоритму виконується глобальне оновлення – феромон додається тільки на тих дугах, що входять в кращий маршрут y^{bs} із знайдених в поточному поколінні мурах $\tau_{v_i, v_j, t_{v_j}} \leftarrow (1 - \rho) \times \tau_{v_i, v_j, t_{v_j}} + \rho \Delta \tau_{v_i, v_j, t_{v_j}}^{bs}$, $\forall (v_i, v_j, t_{v_j}) \in y^{bs}$, де $\Delta \tau_{v_i, v_j, t_{v_j}}^{bs} = 1/L^{bs}$.

Простір пошуку алгоритму скорочується на кожній ітерації методами гілок і меж, табу-списками та локальним пошуком. Табу списки включають ті сполучення, які приводять до недопустимих маршрутів за часом. На етапі вибору допустимих дуг з поточної вершини для наступного кроку мурахи враховується значення поточного рекорду: в окіл не потрапляють дуги, які однозначно не покращать рекорд. Якщо мураха потрапила в глухий кут, то виконується крок бектрекінгу – мураха повертається в попередній пункт, видаляється попередній стан мурахи, в пам'ять мурахи додається пункт як розглянутий і продовжується робота. Якщо мураха не змогла знайти маршрут протягом заданої кількості ітерацій, добудовується маршрут, який буде допустимим.

Дослідження ефективності гібридного АСМК показали, що алгоритм залежить від топології графу і користувацьких умов, а саме що для запитів пошуку міжрегіональних маршрутів похибка є вищою на 5-20% (в залежності від мережі і контрольного прикладу). Причина полягає в тому, що граф авіамережі є досить щільним, а евристики напряму руху до кінцевої вершини у мурахи немає. Через це мураха витрачає ресурси на дослідження сусідніх вершин і не проходить до вершин в віддалених сегментах. В розділі пропонується розглянути модифікацію АСМК, яка дозволяє розширити "зір" мурах на кілька кроків вперед – диверсифікований АСМК.

Відмінністю диверсифікованого АСМК від попередньої реалізації є зміна процедури пошуку множини допустимих сусідів, яка повертає усі можливі підмаршрути з поточної вершини довжиною до K кроків наперед. Таким чином для однокрокового алгоритму процедура поверне множину $N_{ii}^k(1)$, тобто усі суміжні і досяжні за часом вершини i , для K -крокового алгоритму результатом процедури є $N_{ii}^k(1) \cup N_{ii}^k(2) \cup \dots \cup N_{ii}^k(K)$. При формуванні околів береться до уваги множина умов Ω і відкидаються недопустимі варіанти або гірші за вартістю ніж рекорд. На етапі вибору наступного пункту для переходу повертається скомпонований підмаршрут, що складається з кількох кроків мурахи. Для оптимізації алгоритму в процедурі пошуку множини допустимих сусідів і формуванні комплексних дуг використовується додаткова пам'ять для збереження обчислювальних ресурсів і пришвидшення роботи алгоритму, а також метод гілок і меж, табу-списки та бектрекінг. Для нових дуг (i, j, t_i) , що сформовані на основі проміжних дуг $(i, i+1, t_i), (i+1, i+2, t_{i+1}), \dots, (j-1, j, t_{j-1})$, їх характеристики розраховуються за формулами: $\tau_{ij_i} = \tau_{i,i+1,t_i} \times \tau_{i+1,i+2,t_{i+1}} \times \dots \times \tau_{j-1,j,t_{j-1}}$, $l_{ij_i} = l_{i,i+1,t_i} + l_{i+1,i+2,t_{i+1}} + \dots + l_{j-1,j,t_{j-1}}$, $c_{ij_i} = t_{j-1} + c_{j-1,j,t_{j-1}} - t_i$.

Проведений теоретичний аналіз збіжності розроблених алгоритмів на основі ОМК показав, що для будь-якого $\tau_{ij_i}(h)$ справедлива нерівність: $\lim_{h \rightarrow \infty} \tau_{ij_i}(h) \leq \tau_{\max} = b(y_*)$, де b – порція феромону, що додається при оновленні феромонної матриці, h – ітерація алгоритму. Доведено, що якщо $P^*(h)$ – ймовірність того, що алгоритм знайде оптимальний розв'язок за перші h ітерацій, то для будь-якого як завгодно малого $\varepsilon > 0$ буде виконуватись умова $P^*(h) \geq 1 - \varepsilon$.

Для побудови кільцевих маршрутів та покращення якості розв'язків при пошуці міжрегіональних маршрутів розроблено двонаправлений гібридний АСМК. Така модифікація потребує розділу популяції на дві початкові локації – початкову та цільову вершини. Для кожної півпопуляції запропоновано використовувати власну матрицю феромонів та пам'ять. Для сполучень, пов'язаних з обов'язковими для відвідування пунктами, а також хабами, значення феромону ініціалізуються вищими значеннями. Якщо мурахи з різних півпопуляцій зустрічаються в спільному пункті в однаковий час, то будується допустимий маршрут з фрагментарних маршрутів мурах,

а мурахи продовжують свій шлях. Очевидною перевагою алгоритму є інтуїтивність побудови кільцевих маршрутів, а недоліком – використання додаткової пам'яті.

Подальшого розвитку АСМК набула розробка процедур локального пошуку заміною рейсу на інший час відправлення, вилучення проміжних рейсів в маршруті, заміни хабу. Локальний пошук допомагає швидше оновлювати значення рекорду і покращувати ефективність відсікання простору пошуку методом гілок та меж.

Для пошуку оптимальних шляхів у реальному часі розроблено АСМК з етапом попередньої обробки. Пропонується завчасно виконувати аналіз графу, що включає побудову оптимальних шляхів за наявними даними про сполучення між всіма парами вершин, а також виконується кластеризація вершин. Суть кластеризації полягає в потенційному зменшенні простору пошуку для запиту в одному кластері (наприклад, якщо здійснюється пошук маршруту по Європі, то можна не розглядати мережі Західної півкулі). Також, попередній аналіз дозволяє знайти поточні хаби (популярні транспортні вузли). На наступному етапі перераховуються оцінки вартостей – наприклад, прогнозується підвищення цін на деякі напрями і та їх перевірка. Далі виконується аналіз графу, що полягає у розрахунку відносних коефіцієнтів, що відображають вигідність кожного сполучення. На практиці, в авіамережах рейси лоукостів матимуть вищі коефіцієнти. Останнім кроком попередньої обробки є поєднання всіх підтримуваних мереж транспорту, якщо їх декілька. На етапі виконання запиту визначається необхідний простір пошуку (у залежності від запитуваних кластерів вершин), ініціалізується матриця феромонів для поточного графу, а також матриця відносних коефіцієнтів якості. У залежності від визначених бажаних або небажаних вершин, наявності хабів задається значення початкового феромону на відповідних сполученнях протягом ініціалізації. Ймовірність переходу мурахи k , яка знаходиться в пункті i в пункт j в момент часу t визначається так:

$$p_{ijt}^k = \frac{[\tau_{ijt}]^\alpha [\eta_{ijt}]^\beta [v_{ijt}]^\gamma}{\sum_{j \in N_{it}^k} [\tau_{ijt}]^\alpha [\eta_{ijt}]^\beta [v_{ijt}]^\gamma}, \quad j \in N_{it}^k$$

де $j \in N_{it}^k$, v_{ijt} – коефіцієнт якості сполучення, γ – параметр впливу евристичних даних якості. Результатом роботи алгоритму є множина розв'язків.

У **четвертому розділі** описується створений програмний комплекс для розв'язування поставленої задачі. Комплекс складається з модуля збору даних авіаперельотів; ядра – основної бібліотеки для побудови графу, попередньої обробки та розрахунку маршрутів в системах розподілених обчислень; веб-застосування, яке виконує роль панелі керування для вводу запиту користувача. Бібліотека має декілька інтерфейсів взаємодії – консольний клієнт для попередніх розрахунків та веб сервер для взаємодії з модулем візуалізації даних, і містить реалізації АСМК, алгоритму міток, алгоритму прогнозування часових рядів на

основі бази правил. Для виконання паралельних та розподілених обчислень використовується бібліотека Glow, що написана на мові програмування Go і реалізує модель обчислень map-reduce.

У **п'ятому розділі** наведено результати обчислювальних експериментів – порівняльний аналіз розроблених методів пошуку оптимальних шляхів у залежних від часу мережах. Обчислювальні експерименти проводились на персональних комп'ютерах з процесором Intel® Core (TM) i7-4790 CPU @ 3.60GHz, RAM 32.0 GB, 64-бітною операційною системою та 8-Core 3.2GHz Intel Xeon W Turbo, Boost up to 4.2GHz. Дані для обчислень (розклад авіаперельотів) отримані за допомогою API пошукових клієнтів SkyScanner і QrxExpress по аеропортам Європи та США. Час дискретизовано по дням. Точність розрахунків оцінюється за відомими критеріями MAPE, MSE, MRE.

Порівняння ефективності розроблених алгоритму міток і алгоритму мурашиних колоній для залежної від часу задачі пошуку оптимального шляху показав, що для розкладу малих розмірів алгоритм міток працює швидше, ніж АСМК, проте для розкладів з кількістю елементів більше, ніж 400, час роботи АСМК збільшується несуттєво, на відміну від алгоритму міток. Для розкладу з 746 рейсами алгоритм міток в середньому працює півгодини, у той час коли алгоритм ОМК – одну хвилину. Для розв'язування задач більшої розмірності в реальному часі алгоритм міток виявився незадовільним за часом.

Модифікований АСМК з диверсифікованим пошуком показав суттєві покращення середніх похибок для складних маршрутів. Разом з тим, через структуру графу перельотів, кожний додатковий крок при формуванні околів для мурахи суттєво збільшує час роботи і пам'ять алгоритму, що ускладнює роботу для вершин одного кластеру (регіону).

Описано схему налаштування параметрів розробленого АСМК та результати проведених обчислювальних експериментів. Для кожного набору параметрів було виконано 10 запусків алгоритму, після чого було розраховано значення відносної похибки по 10 запускам. Результати налаштування показали, що для експериментів з параметрами $\alpha = 5$, $\beta = 3$, $\xi \in [0.1; 0.2]$, $q_0 \in [0.5, 0.7]$ похибка обчислень MAPE є мінімальною і складає 1.5%. Рекомендована кількість мурах складає 13500 в 30 поколіннях (по 450) для авіамережі з 21144 сполученнями для досягнення MAPE менше 1%.

Проаналізовано результати роботи двонаправленого АСМК і порівняння з простим АСМК, що показало покращення точності обчислень в середньому на 5% для запитів з вершинами в різних кластерах по 100 запускам.

Для оцінки роботи АСМК з препроцесингом і порівняння з попередніми методами, було виконано 100 запусків для 5 контрольних маршрутів. Кількість популяцій зменшена до 5 з 200 мурахами в кожній. Середня похибка MAPE двонаправленого АСМК становить 7%, однонаправленого – 11%, АСМК з

препроцесингом – 1%. Наведено результати роботи розробленого алгоритму прогнозування часових рядів на основі генетичного програмування і побудови системи правил.

У додатках наведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи та рисунки інтерфейсу користувача веб застосування програмного комплексу.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дисертаційної роботи вирішена науково-технічна задача розробки моделі, алгоритмів і програмних засобів для побудови оптимального шляху у залежних від часу транспортних мережах з урахуванням користувацьких умов. Зокрема, отримані наступні результати:

1. Проведено аналіз існуючих постановок, підходів до подання моделей і методів розв'язування задач побудови оптимального шляху у залежних від часу транспортних мережах із врахуванням користувацьких умов, який свідчить про те, що на момент написання дисертаційної роботи не існує точного ефективного методу розв'язання поставленої задачі, а наближені методи в літературі не достатньо глибоко досліджені. Сформульовані вимоги до програмного комплексу у вигляді адаптивності, масштабованості, розподіленості та роботи в реальному часі дозволили вибрати напрям досліджень – розробку метаевристичних алгоритмів.

2. Вперше сформульовано задачу пошуку оптимального шляху за критерієм вартості з користувацькими умовами у мережі громадського транспорту. В процесі розв'язання задачі виявлено практичну проблему постійного оновлення даних в динамічній мережі від сторонніх агрегаторів даних авіасполучень, що обумовило рішення включити до алгоритму етап прогнозу зміни даних по транспортним сполученням для мінімізації кількості запитів. Розв'язання описаної задачі дозволяє будувати комплекси для пошуку в реальному часі оптимальних шляхів мандрівника з гнучкими обмеженнями користувача по часу подорожі, виду транспорту або класу сполучення, вартості, початковим і цільовим пунктам тощо.

3. Для розв'язування сформульованої задачі розроблено оригінальний багатокритеріальний алгоритм на основі алгоритму міток, який дозволяє отримувати точні розв'язки в динамічній мережі авіасполучень. Кількість критеріїв ускладнює оцінку розв'язку алгоритму, тому в послідуючих порівняннях з іншими методами алгоритм було налаштовано для єдиного критерію вартості маршруту. Подальші дослідження показали, що час роботи алгоритму значно зростає з ростом мережі сполучень, тому він виявився неефективним для використання в реальному часі на реальних об'ємах даних. Це і обумовило розгляд метаевристичних підходів, які здатні знаходити допустимі розв'язки в реальному часі.

4. На основі підходу оптимізації мурашиними колоніями вперше розроблено спеціальний АСМК, здатний працювати з залежними від часу вагами дуг, що

подають вартості сполучень. Гнучкість реалізації алгоритму дозволила застосувати підходи на основі паралельних обчислень, бектрекінгу, методу гілок і меж, табу-списків, збереження проміжних рекордів у вигляді кеша для зменшення простору пошуку без втрати розв'язків і оптимізації обчислень. Запропонований алгоритм показав значно кращі результати за критерієм часу роботи, ніж розроблений раніше метод на основі міток, проте якість розв'язків складних оптимальних маршрутів виявилась нижчою. Аналіз роботи алгоритму показав, що йому бракує евристичних даних про природу графу і запиту – алгоритм на однакових умовах розглядає усі можливі сполучення з поточного пункту, що призводить до погіршення результатів для пунктів запиту з різних регіонів, та він може бути покращений декомпозицією простору пошуку на кілька сегментів графу або кластеризацією пунктів.

5. Для покращення якості розв'язків складних оптимальних маршрутів розроблено алгоритм пошуку оптимального шляху у залежній від часу мережі з додатковими умовами користувача на основі диверсифікованого АСМК, який показав кращі результати для часткового випадку – побудови маршрутів між пунктами, що належать різним регіонам. Проте похибка і час роботи алгоритму для пунктів у загальному випадку є вищою. Дослідження показали, що використання диверсифікованого АСМК у мультиграфі, який подає мережу авіасполучень в нативному вигляді (без попередньої обробки з метою зменшення кількості дуг), не є ефективним через надмірну густоту подання графу в запропонованому підході.

6. На основі розробленого АСМК запропоновано двонаправлений АСМК для пошуку оптимального шляху в залежній від часу мережі. Алгоритм дозволяє здійснювати пошук кільцевих маршрутів та пришвидшити побудову допустимих розв'язків.

7. Для задоволення вимог виконання у режимі реального часу та адаптивності, запропоновано алгоритм на основі АСМК з попередньою обробкою даних, що включає етапи аналізу топології графу та прогнозу зміни вартості сполучень, а також етап розрахунку маршруту в реальному часі. Вперше запропоновано покращення ефективності алгоритму шляхом використання таблиці відносної якості сполучень, яка розраховується на етапі попередньої обробки даних. Результати обчислювального експерименту показали, що середня похибка результатів АСМК з етапом попередньої обробки складає 4,3%, а з імовірністю 90% похибка не перевищує 6.9%.

8. Ряд отриманих результатів досліджень використано в учбовому процесі в НТУУ «Київський політехнічний університет ім.І.Сікорського» та впроваджено в українській ІТ-компанії «Innoqa» для надання інформаційних послуг при побудові туристичних маршрутів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Павленко А. І. Застосування генетичного алгоритму для прогнозування на основі бази правил. Комп'ютерна математика. Київ, 2014. № 2. С. 74–80.
2. Гуляницький Л. Ф., Павленко А. І. Динамічна задача пошуку найкоротшого шляху з додатковими умовами для задачі побудови маршруту авіаперельотів. *Математичне моделювання в економіці*. 2015. № 2. С. 39–50.
3. Павленко А. І. Розв'язання залежних від часу задач пошуку найкоротшого шляху. *Журнал обчислювальної та прикладної математики*. 2015. № 1. С. 24–37.
4. Hulianytskyi L., Pavlenko A. Ant colony optimization for time dependent shortest path problem in directed multigraph. *Information Content and Processing*. 2015. № 1. С. 52–61.
5. Hulianytskyi L., Pavlenko A. Development and analysis of genetic algorithm for time series forecasting problem. *Information Models and Analyses*. 2015. № 4(1). С. 13–29.
6. Гуляницький Л. Ф., Павленко А. І. Разработка и исследование генетических алгоритмов для прогнозирования временных рядов. *Управляющие системы и машины*. 2015. № 3. С. 21–29.
7. Гуляницький Л. Ф., Павленко А. І. Моделювання залежних від часу проблем пошуку оптимальних маршрутів: огляд. *Математичне моделювання в економіці*. 2017. № 1-2(8). С. 102–116.
8. Павленко А. І. Розв'язування багатокритеріальної задачі пошуку оптимального шляху в динамічних мережах алгоритмом міток. Теорія оптимальних рішень. 2017. № 1. С. 58–63.
9. Гуляницький Л. Ф., Павленко А. І. Оптимізація шляхів у динамічному графі перельотів модифікованим алгоритмом мурашиних систем. *Математичне моделювання в економіці*. 2018. № 2. С. 26–39.
10. Павленко А. І. Застосування генетичного алгоритму прогнозування до задачі управління запасами. Праці XXIII міжнар. конф. «Проблеми прийняття рішень в умовах невизначеності» (Мукачєво, 12–16 травня 2014). Київ, 2014. С. 145–146.
11. Гуляницький Л. Ф., Павленко А. І. Прогнозирование на основе генетического алгоритма обучения. Proc. XX Int. Conf. «Knowledge-Dialogue-Solution» (September 8–10, 2014, Kyiv). Kyiv–Sofia: ITNEA, 2014. С. 41–42.
12. Гуляницький Л. Ф., Павленко А. І. Налаштування параметрів моделі алгоритму прогнозування на основі генетичних алгоритмів. Праці VII міжнар. школи-семінара «Теорія прийняття рішень» (Ужгород, 29 вересня – 4 жовтня 2014). Ужгород: УжНУ, 2014. С. 90–93.

13. Павленко А. І. Пошук найкоротшого шляху в динамічному мультиграфі методом мурашиних колоній. Праці XXV міжнар. конф. «Проблеми прийняття рішень в умовах невизначеності» (Східниця, 11–15 травня 2015). Київ, 2015. С. 119–120.
14. Гуляницький Л. Ф., Павленко А. І. Оптимізація шляху у динамічному графі з додатковими умовами алгоритмом мурашиних колоній. Праці III міжнар. наук.-практ. конф. «Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)» (Київ-Черкаси, 12–15 травня 2015). Київ-Черкаси: видавець Чабаненко Ю., 2015. С. 243.
15. Павленко А. І. Пошук найкоротшого шляху у динамічному мультиграфі методами мурашиних колоній з одним поколінням. Матеріали 17-ї міжнар. наук.-техн. конф. «Системний аналіз та інформаційні технології» (Київ, 22-25 червня 2015). Київ, 2015. С. 304.

АНОТАЦІЯ

Павленко А.І. Моделювання і оптимізація маршрутів у транспортних мережах. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи – Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ, 2019.

Дисертація присвячена моделюванню і оптимізації маршрутів у транспортних мережах, а саме розробці алгоритмів розв'язування та експериментального програмного комплексу для побудови оптимальних шляхів за критерієм вартості в залежних від часу мережах авіаперельотів з урахуванням обмежень користувача і необхідності виконання розрахунків у реальному часі.

Сформульовано спеціальну задачу пошуку оптимального за критерієм вартості шляху мандрівника з користувацькими умовами: початковий і цільовий пункт подорожі, часове вікно, максимальна кількість транзитних пунктів і тривалість подорожі, бажані і заборонені проміжні пункти. Відмінність даної задачі від існуючих постановок полягає у врахуванні таких властивостей транспортної мережі, як залежність її характеристик від часу. Аналіз подання моделей різних транспортних мереж виявив їх відмінності і можливість застосування евристичних алгоритмів розв'язування поставленої задачі.

Запропоновано алгоритм на основі міток і ряд алгоритмів на основі модифікації оптимізації мурашиними колоніями. Алгоритм міток показав задовільні результати для невеликих мереж, але значне зростання часу виконання у порівнянні з мурашиним алгоритмом з ростом мережі. Алгоритм мурашиних систем модифіковано з урахуванням специфіки задачі, а саме операції бектрекінгу, локального пошуку, табу-списків, побудови допустимого маршруту, відсікання

простору пошуку методом гілок і меж. Для покращення точності обчислень для міжрегіональних маршрутів запропоновано диверсифікований алгоритм мурашиних систем. При пошуку кільцевих або міжрегіональних маршрутів пропонується застосовувати розроблений двонаправлений алгоритм систем мурашиних колоній (АСМК).

Задоволення вимог адаптивності та роботи в реальному часі програмного комплексу досягається запропонованим алгоритмом з попередньою обробкою даних, який використовує АСМК для пошуку оптимальних шляхів для всіх пар вершин мережі, а потім використовує цю інформацію для побудови відносних оцінок якості кожного сполучення за критерієм вартості. Оцінки якості використовуються для пошуку маршруту в реальному часі. Така задача та методи її розв'язування актуальні для пошуку оптимальних маршрутів мандрівників в реальному часі в мережі громадського транспорту.

Ключові слова: математичне моделювання, залежна від часу задача пошуку оптимального шляху, динамічна мережа, транспортні мережі, мурашині алгоритми, генетичні алгоритми.

АННОТАЦІЯ

Павленко А.И. Моделирование и оптимизация маршрутов в транспортных сетях. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Институт кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины, Киев, 2019.

Диссертация посвящена теме моделирования и оптимизации маршрутов в транспортных сетях, а именно разработке экспериментального комплекса для построения оптимальных путей по критерию стоимости в зависимых от времени сетях авиаперелетов с учетом ограничений пользователя и необходимости выполнения расчетов в реальном времени.

Сформулирована специальная задача поиска оптимального по критерию стоимости пути путешественника с пользовательскими условиями: начальный и целевой пункт назначения, временное окно, максимальное количество транзитных пунктов и длительность путешествия, желаемые и запрещенные промежуточные пункты. Отличие данной задачи от существующих постановок проявляется в учете такой особенности транспортной сети, как зависимость её характеристик от времени. Анализ представления моделей нескольких транспортных сетей обнаружил их различия и возможность применения эвристических подходов к поставленной задаче.

Для решения задачи предложен алгоритм на основе меток и несколько модификаций на основе алгоритма муравьиных систем. Алгоритм меток показал

удовлетворительные результаты для небольших сетей, но значительное увеличение времени выполнения с ростом сети по сравнению с муравьиным алгоритмом. Разработанный алгоритм муравьиных систем модифицирован с учетом специфики задачи, а именно операциями бэктрекинга, локального поиска, табуирования, достройкой допустимого маршрута, отсекаания пространства поиска методом ветвей и границ. Для уменьшения погрешности вычислений для межрегиональных маршрутов предложен диверсифицированный алгоритм систем муравьиных колоний (АСМК). Для поиска кольцевых и межрегиональных маршрутов предлагается применять двунаправленный АСМК.

Для удовлетворения требований адаптивности и работы в реальном времени программного комплекса предложен алгоритм с предварительной обработкой данных, который использует АСМК для поиска оптимальных путей для всех пар вершин сети, а затем использует эту информацию для построения относительных оценок качества каждого сообщения по критерию стоимости. Оценки качества используются для поиска маршрута в реальном времени.

Описанная задача и методы ее решения являются актуальными для разработки методов поиска оптимальных маршрутов путешественников в реальном времени в сети общественного транспорта.

Ключевые слова: математическое моделирование, зависящая от времени задача поиска оптимального пути, динамическая сеть, транспортные сети, муравьиные алгоритмы, генетические алгоритмы.

ABSTRACT

Pavlenko A. Route modeling and optimization in transportation networks. – The manuscript.

Thesis for a candidate degree in technical sciences by specialization 01.05.02 – mathematical modeling and computational methods. – V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of NASciences of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the topic of modeling and optimizing routes in transportation networks, in particular, application development for constructing optimal routes by cost criteria in time-dependent air networks, taking into account user's limitations and real time calculations requirement.

Time dependent optimal traveler's path by cost criteria problem is defined with given user's limitations: source and target points, travel time window, maximum number of transit points and duration of the trip, desired and prohibited intermediate points. The main difference of this problem from existing ones is taking into account network properties, since it's time dependent and costs are dynamic.

Analysis of models presentations of various transport networks showed their differences and the possibility of applying heuristic approaches to the problem.

Multicriterial labelling based algorithm and several ant colony system (ACS) based modifications were proposed to solve the problem. The labeling algorithm showed satisfactory results for small networks, however execution time significantly increased with network growth, comparing to ant algorithm.

Developed ACS-based algorithm has been modified with consideration of the specifics of the problem, applying backtracking operation, route fixing, method of branches and bounds, several local search procedures, tabu-lists. To reduce error ratio for international routes, a diversified algorithm of ant colony systems was proposed. To find return or multiregional routes, bidirectional ACS was proposed.

To meet the requirements of adaptability and real-time execution, a preliminary data processing algorithm was proposed that uses ACS to search for optimal paths for all pairs of vertices of the network and then uses this information to build relative estimates of the quality of each connection based on cost criteria. Quality ratios are used to find the route in real time.

Described problem and solution approaches are relevant for development of techniques for finding optimal traveler's routes in real time in the public transport network.

Keywords: mathematical modeling, time-dependent shortest path problem, dynamic network, transport networks, ant colony optimization, genetic algorithm.

Підп. до друку 25.01.2019. Формат 60x84/16. Друк цифровий.
Папір офс. Ум. друк. арк. 0,93. Ум. фарбо-відб. 1,05.
Обл.-вид. арк. 1,0. Зам. 47. Тираж 100 прим.

Редакційно-видавничий відділ
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України
03187, Київ-187, проспект Академіка Глушкова, 40.