МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

Муляревич Олександр Володимирович

УДК 004.89:004.942

РОЗВ’ЯЗАННЯ ДИНАМІЧНОЇ ЗАДАЧІ КОМІВОЯЖЕРА З ВИКОРИСТАННЯМ ПОВЕДІНКОВОЇ МОДЕЛІ КОЛОНІЇ МУРАХ В БАГАТОАГЕНТНИХ СИСТЕМАХ

05.13.05 – комп’ютерні системи та компоненти

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2016

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Голембо Вадим Адольфович,
доцент кафедри електронних обчислювальних машини Національного університету «Львівська політехніка».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кучерук Володимир Юрійович,
завідувач кафедри метрології та промислової автоматики Вінницького національного університету, м. Вінниця;

доктор технічних наук, професор
Щесняк Збігнєв Владислав,
професор кафедри електротехніки промислової та автоматики Технологічного університету Політехніка Свєнтокжиська, Польща, м. Кєльци.

Захист відбудеться «28» жовтня 2016 р. о 14^{00} годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.08 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, Львів, вул. С. Бандери, $28^{а}$, ауд. 711 5-го навчального корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий «24» вересня 2016 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, д.т.н., проф. Я.Т. Луцик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність дослідження. Під час опису транспортних чи комунікаційних процесів за допомогою теорії графів, проблема оптимізації витрат зводиться до розв'язання задачі однократного обходження точок (пунктів, міст, вузлів) графу (циклу Гамільтона) найкоротшим шляхом, яка називається задачею комівояжера (ЗК). Оскільки за найменших витрат ресурсів (часу, енергії та інших) для досягнення поставленого завдання досягаються найбільші продуктивність та відповідно прибуток, тому розв'язок ЗК за прийнятний час та точність (наближеність до оптимального розв'язку) є предметом багатьох наукових досліджень. Одним з найбільш перспективних напрямів досліджень є перехід до застосування децентралізованих колективів автономних агентів з метою автоматизації вимірювальних, обчислювальних та технологічних процесів.

Розв'язання динамічної (вхідні дані змінюються в процесі розв'язання задачі: кількості точок, вартості та доступності з'єднань) ЗК, в тому числі в умовах частково невідомих вхідних даних є важливим завданням для взаємодії агентів в колективі мобільних вимірювально-обчислювальних апаратів, для проектування робототехнічних систем військового, космічного та промислового призначення, для маршрутизації в комунікаційних мережах (КМ), для моделювання складських процесів. Більшість існуючих методів розв'язання ЗК не здатні розв'язувати динамічну ЗК, а розв'язання динамічної асиметричної ЗК в умовах частково невідомих даних практично не було досліджено. Тому **актуальним науковим завданням** є підвищення ефективності розв'язання динамічної ЗК шляхом вдосконалення існуючих та розробки нових методів, моделей та засобів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації відповідає науковому напряму кафедри електронних обчислювальних машин Національного університету "Львівська політехніка": "Питання теорії, проектування та реалізації комп'ютерних систем та мереж, а також комп'ютерних засобів, вузлів, приладів і пристроїв вимірювальних, інформаційних, керуючих, телекомунікаційних та кіберфізичних систем". Дисертаційна робота виконувалася в межах науково-дослідної роботи "Інтеграція методів і засобів вимірювання, автоматизації, опрацювання та захисту інформації в базисі кібер-фізичних систем" (номер державної реєстрації 0115U000446).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності розв'язання динамічної ЗК шляхом вдосконалення існуючих та розробки нових методів, моделей та засобів, що базуються на використанні поведінкової моделі колонії мурах в багатоагентних системах.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні **задачі**:

1. аналіз існуючих та пошук нових методів, моделей та засобів для розв'язання динамічної задачі комівояжера, в тому числі динамічної асиметричної задачі комівояжера в умовах частково невідомих даних;

2. дослідження можливості використання поведінкової моделі колонії мурах для розв'язання динамічної ЗК;

3. розроблення моделі багатоагентної системи з використанням технологій паралельних обчислень та вдосконалення існуючих методів для розв'язання динамічної ЗК з кількістю пунктів обходу 100 і більше;

4. розроблення нових засобів та моделі багатоагентної системи з метою реалізації можливості розв'язання динамічної асиметричної ЗК в умовах частково невідомих даних;

5. оцінювання ефективності запропонованих методів, засобів та розроблених моделей багатоагентних систем для розв'язання динамічної ЗК, в тому числі динамічної асиметричної ЗК в умовах частково невідомих даних.

Об'єктом дослідження є процес розв'язання узагальненої багатокритеріальної динамічної ЗК, в тому числі в умовах частково невідомих вхідних даних.

Предметом дослідження є методи, засоби та моделі для розв'язання узагальненої багатокритеріальної динамічної ЗК, в тому числі в умовах частково невідомих вхідних даних.

Методи дослідження. Під час вирішення наукових задач використовувались основні положення дискретної математики, теорії імовірності, теорії графів та математичного моделювання. Методи досліджень базуються на принципах системного аналізу. Використання методів теорії паралельних обчислень, теорії багатоагентних систем дозволило розробити ефективні засоби для розв'язання динамічної ЗК.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

- вперше розроблено та апробовано модель багатоагентної системи, яка базується на використанні поведінкової моделі колонії мурах при розміщенні цифрових міток на комунікаційних вузлах, що дозволило розв'язати динамічну асиметричну задачу комівояжера в умовах частково невідомих вхідних даних;

- вперше розроблено метод і отримано експериментальні результати подолання виявлених негативних наслідків нескінченного збільшення значень цифрових міток (пам'яті колонії мурах), який базується на використанні адаптивної верхньої межі значення цифрової мітки, що дозволило розробленій багатоагентній системі відновити пошук маршрутів меншої вартості навіть після тривалого статичного стану вхідних даних;

- вперше розроблено метод опрацювання результуючого маршруту при розв'язанні динамічної задачі комівояжера, який базується на використанні алгоритмів локальної оптимізації 2-opt, 2.5-opt, 3-opt в залежності від інтенсивності динамічних змін вхідних даних, що дозволило зменшити вартість результуючих маршрутів;

- удосконалено метод розв'язання задачі комівояжера, який базується на використанні поведінкової моделі колонії мурах, шляхом зміни початкової установки значень міток та імовірнісного вибору наступного вузла для переходу мурахи-агента, що дозволило зменшити кількість ітерацій циклу пошуку маршрутів агентами та відповідно час розв'язання задачі комівояжера.

Практичне значення одержаних результатів досліджень полягає у використанні для розробки:

- класифікації існуючих методів розв'язання динамічної ЗК, аналіз якої показав, що для великої кількості пунктів (N >100) потрібно орієнтуватись на

методи розв’язання із застосуванням колективної поведінки агентів, серед яких найбільш перспективний – метод колонії мурах;

- додаткового програмного модуля на базі методів локальної оптимізації, застосування якого дозволило збільшити точність отримуваних результатів, зберігаючи можливість розв’язання динамічної ЗК;

- багатоагентної системи з використанням поведінкової моделі колонії мурах та технологій паралельних обчислень для розв’язання динамічної ЗК з кількістю вузлів до 65536;

- багатоагентної системи для розв’язання динамічної асиметричної ЗК в умовах частково невідомих вхідних даних, наближених до умов в реальній комунікаційній мережі робототехнічних систем космічного та військового призначення.

Основні результати дисертаційної роботи впроваджено:

- в науково-дослідну роботу «Інтеграція методів і засобів вимірювання, автоматизації, опрацювання та захисту інформації в базисі кібер-фізичних систем» (шифр ДБ/КІБЕР, реєстраційний номер 0115U000446) Національного університету «Львівська політехніка»;

- при розробці програмного забезпечення та оптимізаційних рішень в міжнародній компанії “Logivations GmbH” (Гребенцель, Німеччина);

- при розробці обчислювальних засобів в міжнародній компанії “Eleks” (Львів, Україна);

- в навчальному процесі на кафедрі електронних обчислювальних машин Національного університету «Львівська політехніка».

Особистий внесок здобувача. Усі основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи автор отримав самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать: розроблена нова модифікація алгоритму колонії мурах [1,6]; систематизовано та розроблено класифікацію існуючих методів розв’язання ЗК [7]; розроблена багатоагентна система для розв’язання динамічної ЗК з використанням додаткового програмного модуля на базі методів локальної оптимізації [2,3]; розроблені засоби та модель багатоагентної системи для розв’язання динамічної асиметричної ЗК в умовах частково невідомих вхідних даних [4,5,8].

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи було апробовано у доповідях на 3 науково-технічних конференціях, а саме: 1) 5-а Міжнародна науково-технічна конференція ACSN-2011 "Сучасні комп'ютерні системи та мережі: розробка та використання", м.Львів, 29 вересня – 01 жовтня 2011 р.; 2) IX Міжнародна науково-технічна конференція «Методи і засоби вимірювань фізичних величин» - «Температура-2012», м.Львів, 25 – 28 вересня 2012 р.; 3) XIII Міжнародна науково-технічна конференція TCSET’2016 «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії», Львів – Славське, 23 – 26 лютого 2016.

Публікації. За результатами виконаних наукових досліджень опубліковано 8 наукових праць, з них 4 статей у наукових журналах, що входять до переліку періодичних фахових видань, 1 стаття у закордонному науковому журналі, що входить до наступних наукометричних баз даних:

Google Scholar, ERIH, Index Copernicus, Ulrichsweb Global Serials Directory, DOAJ, EBSCOhost, GetInfo, Research Bible; 3 тези доповідей у збірниках міжнародних науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, що містять 53 рисунки і 9 таблиць, висновків, списку використаних джерел (112 найменувань) і 10 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 227 сторінок, з яких основний зміст викладено на 129 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано основні завдання та мету роботи, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Названо об’єкт, предмет та використані методи дослідження. Наведено відомості про зв’язок роботи з науковими програмами, планами та темами, а також про апробацію роботи, особистий внесок дисертанта, публікації, обсяг і структуру дисертації.

Перший розділ присвячений аналізу існуючих методів, моделей та засобів для розв’язання багатокритеріальної ЗК, визначенню проблем і постановці задач дисертації. Запропоновано класифікацію існуючих методів розв’язання ЗК, яка дозволила обґрунтовано вибрати метод колонії мурах та методи локальної оптимізації як найбільш перспективних для розв’язання динамічної задачі комівояжера. Комп’ютерні системи для розв’язання ЗК, що базуються на використанні класичних методів, незалежно від типу необхідних початкових даних та принципу знаходження найкоротшого шляху мають наступні недоліки: 1) пошук розв’язку виконує один комівояжер (агент), що робить неможливим розподілене обчислення ЗК; 2) розв’язання лише статичної ЗК, без можливості розв’язання динамічної ЗК; 3) слабка або неефективна здатність до розпаралелення виконання алгоритму для більшості методів; 4) спроможність більшості методів знайти розв’язки ЗК наближені до оптимального результату за допустимий на практиці час лише для кількості вузлів $N < 100$. Розглянуті недоліки комп’ютерних систем для розв’язання ЗК, що базуються на використанні класичних алгоритмів, роблять їх застосування на практиці для розв’язання ЗК великої розмірності N неефективним. Особливо коли мова йде про динамічні ЗК, які є більш поширеними в реальному житті.

Розглянуто можливість застосування поведінкової моделі колонії мурах під час розв’язання динамічної асиметричної задачі комівояжера в умовах частково невідомих вхідних даних, наведено основні положення алгоритму колонії мурах, процедури базового алгоритму та набір необхідних вхідних параметрів та даних. Мураха розглядається як програмно-апаратний агент, який є членом колективу агентів (колонії мурах) і використовується для вирішення поставленого завдання. Стігмергія – механізм опосередкованої непрямої взаємодії між індивідумами (мурахами-агентами), одна з форм самоорганізації складних, децентралізованих, незалежних систем без прямої взаємодії між агентами, що реалізовується шляхом використання міток. Колектив мурах за рахунок явища стігмергії утворює складну багатоагентну систему, в якій

використовується для непрямої комунікації між агентами сукупність значень міток – пам’ять колонії мурах, яка є акумулятором накопиченого мурахами досвіду в процесі розв’язання ЗК.

Метод колонії мурах дозволяє розв’язувати динамічну ЗК, отримуючи за початкові дані тільки кількість пунктів N та початковий вузел P(0). Матриця вартостей C та матриця доступностей A в повному обсязі є необов’язковими для даного алгоритму, тобто дані теоретично можуть бути частково невідомими на початок обчислень або евристичними, що є неможливою задачею для інших розглянутих методів. Це дозволяє використати метод колонії мурах для розв’язання динамічної асиметричної ЗК в умовах частково невідомих даних, яка відповідає умовам в реальній комунікаційній мережі.

З метою збільшення точності результуючого маршруту було розглянуто методи локальної оптимізації: 2-opt, 2.5-opt та 3-opt для опрацювання отриманих маршрутів в залежності від інтенсивності динамічних змін вхідних даних ЗК.

У **другому розділі** проведено розробку блок-схем базових алгоритмів, представлено вдосконалення базового методу колонії мурах та запропоновані нові методи та засоби для розв’язання динамічної асиметричної ЗК в умовах частково невідомих даних.

Метод розв’язання ЗК, який базується на використанні поведінкової моделі колонії мурах, було удосконалено (рис.1) шляхом зміни початкової установки значень міток (додано нову процедуру ініціалізації - Процедура I (initialization)) та імовірнісного вибору наступного вузла для переходу мурахи-агента (змінено існуючу процедуру D на процедуру mD (modified decision)).

Додавання початкової установки значень міток (рівня феромону (Процедура I на рис.1.б). В класичному алгоритмі колонії мурах вказано, що початкова установка рівня феромону має проводитись заданою невеликою константою, більшою за 0. Це призведе до початкової рівномірної ненульової ймовірності вибору з’єднання між вузлами для переходу агентом. Однак, якщо ввести початкову ініціалізацію не константою, а значеннями згідно початкового аналізу вартості з’єднання як $\Delta Mij^k(t)$, яке буде обчислюватись за рівнянням:

$$\Delta M_{ij}^{k}(t) = \frac{Q}{C^{k}(t)}, \qquad (1)$$

де **Q** – константа пропорційна до очікуваної сумарної вартості маршруту,

$\mathbf{C^k(t)}$ – сумарна вартість маршруту на момент часу **t** для **k**-ого мурахи-агента, початкова імовірність вибору також буде ненульовою. Всі значення ймовірності знаходяться в межах від 0 до 1. Сума імовірностей доступних виборів дорівнює 1. Фактично відбудеться занесення до пам’яті колонії мурах (матриця M) початкового стану мережі, що дає ряд вагомих переваг: 1) фактичний «пробіг» мурахами-агентами з метою аналізу та оцінки одразу по всім з’єднанням, жодне не залишиться без уваги. Відповідно, виявлення найменш придатних або не доступних з’єднань для прокладання маршруту в момент ініціалізації; 2) від самого старту виконання алгоритму агенти орієнтуються у виборі шляху не на просту випадковість, а на вже сформований певний досвід – початкову ініціалізовану пам'ять колонії мурах, що дає змогу

значно пришвидшити алгоритм знаходження оптимального шляху, особливо для розв’язання статичної ЗК; 3) зменшення кількості ітерацій циклу пошуку

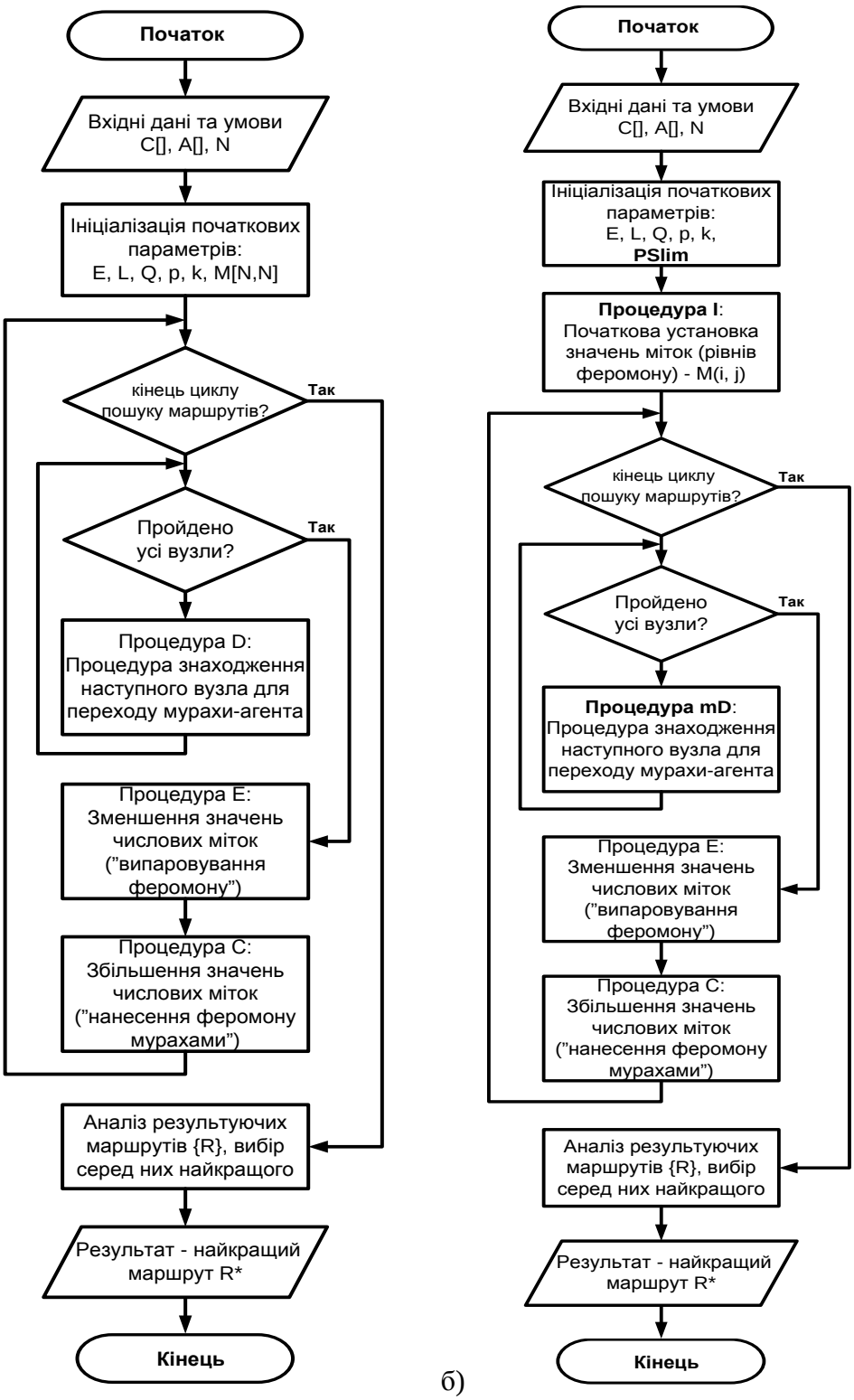

Рис. 1. Порівняння блок-схем алгоритмів: а) класичний алгоритм колонії мурах, б) алгоритм колонії мурах з врахуванням запропонованої модифікації

машрутів мурахами-агентами необхідної для визначення оптимального шляху та збільшення важливості іншого параметру – кількості мурах-агентів. Як показує практика, запуск більшої кількості мурах-агентів практично не збільшує час обчислення в багатоядерних системах та є менш ресурсо

затратним, ніж збільшення кількості ітерацій циклу пошуку машрутів мурахами-агентами.

Зміна імовірнісного вибору наступного вузла для переходу мурахи-агента (Процедура mD на рис.1). За класичним алгоритмом колонії мурах зазвичай обирається наступне найбільш імовірнісне з'єднання для переходу, згідно величини ймовірності його вибору. А якщо врахувати, що і значення мітки після ініціалізації також залежить від вартості з'єднання через застосування Процедури I, то існує імовірність зведення алгоритму до жадібного алгоритму, або як його ще називають – алгоритму «найближчого сусіда» (greedy algorithm). З метою вдосконалення базового методу та усунення імовірності зведення результатів алгоритму мурашиної колонії до результатів жадібного алгоритму підраховані ймовірності аналізуються наступним чином: 1) встановлюється нижня імовірнісна межа – PSlim, як додатковий початковий параметр алгоритму; 2) аналізуються усі можливі переходи до ще не відвіданих вузлів та створюється список — пул (BestNodes список), з найбільш придатних для переміщення, імовірність обирання яких вища за PSlim. Інші доступні вузли для переходу потрапляють до списку LowChanceNodes; 3) якщо BestNodes список є порожнім, то за допомогою «зваженого» генератора обирається наступний вузел для переходу; 4) В інакшому випадку, для визначення списку вузлів, який буде застосовуватись, обчислюється значення граничної ймовірністі PSb наступним чином:

$$PSb = (PSmin + 1 / NA) / 2, \quad (2)$$

де PSmin – мінімальне значення імовірністі, яке обчислюється для вузлів зі списку LowChanceNodes,

NA – кількість доступних вузлів для переходу (сумарна розмірність LowChanceNodes та BestNodes списків). Фактично це середнє значення імовірності, що обчислюється для всіх доступних вузлів для переходу; 5) генерується за допомогою генератора псевдовипадкових чисел з нормальним розподілом число PSs. Якщо $PSs \geq PSb$, то використовується BestNodes список вузлів, а з'єднання для переходу вибирається шляхом використання «зваженого» генератора псевдовипадкових чисел (з рівномірним розподілом), інакше використовується LowChanceNodes список та генератор псевдовипадкових чисел з нормальним розподілом.

Такий метод визначення мурахою-агентом наступного вузла забезпечує гнучкість алгоритму, постійний розгляд можливих більш оптимальних відхилень від вже існуючих знайдених оптимальних маршрутів. Регулювання значення PSlim дозволяє визначати межу ігнорування низьких значень імовірностей, а також дозволяє уникнути зведення до жадібного алгоритму.

Представлено запропонований метод опрацювання результуючого маршруту при розв'язанні динамічної задачі комівояжера, який базується на використанні алгоритмів локальної оптимізації 2-opt, 2.5-opt, 3-opt в залежності від інтенсивності динамічних змін вхідних даних, дозволяє зменшити вартість результуючого маршруту.

З переходом до розв'язання динамічної асиметричної ЗК в умовах частково невідомих вхідних даних, виникають наступні складності, що потребують розробки нових методів та засобів для їх подолання:

1) Необхідність уникнення та виходу з ситуацій «пасток» та «зациклень»;

2) Неможливість виконання звичайної процедури «нанесення феромону», яка виконується після завершення маршруту та повернення в початковий вузел усіх мурах-агентів.

3) Недоцільність повторного використання знайдених результуючих маршрутів після їх отримання, через постійні динамічні зміни вхідних даних та, відповідно, стану мережі, без можливості своєчасного виявлення цих змін.

4) Надмірне збільшення значень цифрових міток, розташованих на вузлах мережі – надмірне укріплення «пам'яті колонії мурах», яке було виявлено в процесі аналізу та тестування розробленої моделі багатоагентної системи, актуальне для розв'язання ЗК динамічного характеру.

Для виявлення та виходу з ситуацій «пасток» та «зациклень» було запропоновано нові методи та розроблено на базі запропонованих методів засоби опрацювання критичних ситуацій. Складність пов'язана з тим, що частково невідомі вхідні дані та їх динамічна змінюваність роблять неможливим гарантувати розв'язання ЗК, тобто проходження через усі вузли мережі через їх недоступність або неможливість проходження однократно через структуру мережі.

Неможливість звичайного оновлення значень цифрових міток. Запропоновано новий метод для вирішення даної складності: значення цифрових міток збільшуються тепер в процесі проходження сполучення між вузлами на момент досягнення вузла призначення, ідея реалізації такого процесу збільшення значень міток була частково запозичена з природньої поведінки мурах, оскільки вони відкладають феромон (збільшують значення мітки) постійно, протягом усього свого руху. Збільшення значення мітки відбувається тепер за наступним запронованим рівнянням:

$$\Delta M_{ij}^{k}(t) = \frac{(2 \times Q / N)}{C_{ij}^{k}(t)} \times ExpF, \qquad (3)$$

де $\mathbf{C^k(t)}$ – сумарна вартість маршруту на момент часу **t** для **k**-ого мурахи-агента, **ExpF** – коефіцієнт, що визначає відношення прогнозованої кінцевої вартості поточного маршруту мурахи-агента до вартості знайденого колективом агентів квазі-оптимального результуючого маршруту. А зменшення значень міток відбувається за заданим періодом часу $\mathbf{T_{evp}}$, який було додано як ще один вхідний параметр.

Недоцільність повторного використання знайдених результуючих маршрутів після їх отримання, через постійні динамічні зміни вхідних даних та, відповідно, стану мережі, без можливості своєчасного виявлення цих змін.

Для вирішення даної задачі було запропоновано новий засіб організації функціонування системи в режимі поєднання процесу пошуку маршрутів з процесом передачі даних. Процес обчислення та пошук оптимальних шляхів має поєднуватись з розсиланням даних по мережі, тобто в процесі передачі даних мурахами-агентами відбувається постійний пошук найкращих, мінімальних за вартістю шляхів з метою зменшення витрат.

В межах такого режиму функціонування системи, маршрути, що знаходяться, є актуальними на момент їх обчислення, а після повернення

мурах-агентів до початкового вузла – завершення ітерації циклу пошуку маршрутів мурахами-агентами, зібрана інформація про мережу є доступною для подальшого аналізу. Для передачі дані діляться на порції – блоки даних відповідно до кількості мурах-агентів – k, та розмірності даних – DataVolume. Якщо деякі мурахи-агенти не повернулись за визначений відлік часу через розглянуті ситуації "пастки" або "зациклення", блоки даних, які передавались ними, можна відправити повторно новими агентами, розпочавши нову ітерацію циклу пошуку маршрутів мурахами-агентами.

Виявлення та метод подолання негативних наслідків надмірного укріплення «пам'яті колонії мурах». В процесі дослідження розробленої моделі багатоагентної системи для розв'язання динамічної асиметричної ЗК в умовах частково невідомих вхідних даних було виявлено ще одну складність — надмірне збільшення значень цифрових міток, розташованих на вузлах мережі**.** Чим більше значення цифрової мітки на з'єднанні між вузлами, тим більше ймовірність його обирання для проходження мурахами-агентами. Після знаходження мурахами-агентами квазі-оптимального шляху в умовах, коли динамічні зміни відсутні, або не впливають на знайдений шлях протягом тривалого періоду, відбувається збільшення значень міток (процедура «нанесення феромону») на тих самих з'єднаннях, що входять до знайденого маршруту. Тобто сформована «пам'ять колонії мурах», в якій зберігається знайдений квазі-оптимальний шлях, продовжує надмірно укріплюватись.

Для вирішення даної задачі було розроблено новий метод, що базується на застосуванні адаптивної верхньої межі значення мітки Mmax — максимальне значення цифрової мітки. Значення цифрової мітки M(i,j) на з'єднаннях між вузлами i та j визначається як:

$$M(i,j) = T * V(i,j), \quad (4)$$

де T – час пересилання даних по мережі в процесі обчислення ЗК,

V(i,j) – швидкість накопичення значення цифрової мітки між вузлами i та j.

Припустимо, що час обчислення в умовах відсутності динамічних змін вхідних даних набуває надзвичайно великих значень $T \to \infty$; тоді згідно з рівнянням 4 значення цифрової мітки необмежено збільшується $M(i,j) \to \infty$.

Згідно розробленого методу подолання виявлених негативних наслідків нескінченного збільшення значень цифрових міток, що базується на застосуванні адаптивної верхньої межі цифрової мітки Mmax вираз (4) можна представити у вигляді:

$$M(i,j) = \min(T * V(i,j), Mmax). \quad (5)$$

Значення верхньої адаптивної межі цифрової мітки Mmax є динамічно змінюваним в процесі обчилення ЗК, встановлюється в залежності від наступних факторів: кількості агентів – k; швидкості накопичення значення цифрової мітки V(i,j) — різниця між значеннями цифрової мітки в результаті виконання процедури «нанесення феромону» та процедури «випаровування феромону» відносно часу обчислення T; інтенсивності динамічних змін вхідних даних – If. Тобто Mmax можна представити залежністю:

$$Mmax = Function(k, V(i,j), If). \quad (6)$$

Згідно з виразом (5) значення цифрової мітки M(i,j) тепер може набувати лише значення в межах від 0 до Mmax.

За допомогою застосування адаптивної верхньої межі значення цифрової мітки, збільшення значень міток на з'єднаннях між вузлами відбувається до певної межі, залишаючи можливість для пошуку альтернативних більш оптимальних маршрутів мурахами-агентами, навіть коли динамічних змін вхідних даних тривалий час не відбувається. А коли виникають динамічні зміни вхідних даних, за яких зберігається доступність використовуваних з'єднань вже знайденого квазі-оптимального шляху, система здатна швидко адаптуватись до нових умов, що було практично неможливо до цього.

У **третьому розділі** представлено опис двох розроблених моделей багатоагентних систем з використанням поведінкової моделі колонії мурах:

1) для розв'язання динамічної задачі комівояжера з врахуванням розробленої модифікації базового алгоритму, з застосуванням розробленого додаткового програмного модуля опрацювання результуючих маршрутів на базі методів локальної оптимізації та використанням технологій паралельного обчислення (кожен агент – окремий потік);

2) для розв'язання динамічної асиметричної задачі комівояжера в умовах частково невідомих вхідних даних шляхом розміщення цифрових міток на комунікаційних вузлах та використовуючи запропоновані в другому розділі методи та засоби.

Узагальнену структуру моделі багатоагентної системи для розв'язання ЗК, що базується на використанні алгоритму колонії мурах представлено на рис.2. Як видно з рис.2, кожен з k агентів взаємодіє з середовищем, з якого агенти отримують дані про кількість вузлів, доступні з'єднання для переходу між ними, вартість переходу по з'єднанню, а також значення цифрових міток, які забезпечують непряму комунікацію між агентами, яка досягається шляхом накопичення колективного досвіду (пам'яті колонії мурах) в процесі руху агентів по мережі.

Середовище включає в себе наступні дані: матрицю доступностей (матриця A), матрицю вартостей (матриця C), пам'ять колонії мурах (матриця M) та вхідні параметри ЗК. Кожен мураха-агент включає в себе список пройдених вузлів (taboo список); ідентифікатор; блок читання та виводу даних для взаємодії з середовищем; блок прийняття рішень, в якому визначається, згідно отриманих даних, наступний вузел для переходу агента.

Мета агента – знаходження маршруту обходження одноразово усіх N вузлів, що входять до мережі, сформованої на базі вхідних даних ЗК. В кожен момент часу агент володіє інформацією про поточний вузел, в якому він знаходиться, для переходу до наступного вузла, агенту необхідно виконати запит до середовища з метою отримання даних про доступні вузли. Після чого агент приймає рішення про виконання переходу до наступного вузла, та передає ці дані в середовище, в якому відповідно до задіяних агентами з'єднань, відбувається процедура збільшення значень міток («нанесення феромону») та зменшення з часом значень міток («випаровування феромону»). Таким чином мурахи-агенти впливають на середовище в процесі свого руху по мережі.

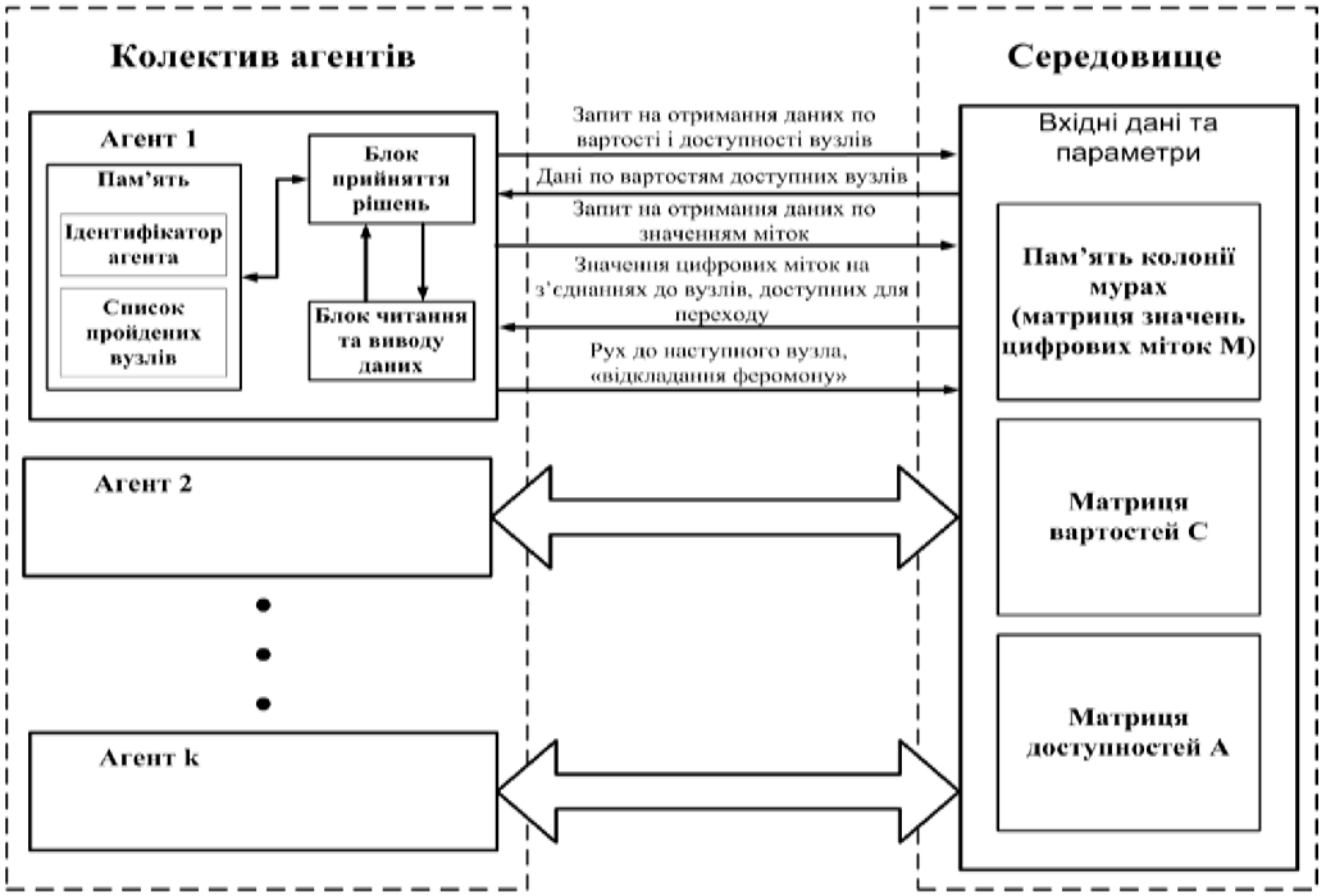

Рис. 2. Узагальнена структура моделі багатоагентної системи розв'язання ЗК

Розроблений засіб, що базується на об'єднанні процесу обчислення з виконанням практичного завдання – передачі даних в мережі, було використано під час розробки моделі багатоагентної системи для розв'язання динамічної асиметричної ЗК в умовах частково невідомих даних, структурну схему якої представлено на рис.3.

Розроблена багатоагентна система включає в себе симуляцію динамічного невідомого середовища – аналог реальної комунікаційної мережі, та віртуальні вузли, з встановленим програмним забезпеченням, що забезпечує обчислення ЗК та передачу даних – агентів-пакетів, які є вмістилищем даних.

Програмний модуль, який було названо «Сканер» (див. структурну схему на рис.3), встановлено на кожному вузлі комунікаційної мережі. Даний модуль дозволяє виконувати звернення до об'єкту динамічного невідомого середовища, з метою отримання доступних для переходу вузлів, включаючи вартість переходу агента до них. Пам'ять колонії мурах тепер не входить до даних, які включено в об'єкт середовища, вона знаходиться розподілено безпосередньо на вузлах комунікаційної мережі.

В процесі розробки системи було додано отримання статусів доступних вузлів. Кожен статус відповідає певній логіці по обробці та взаємодії з вузлом. Статус може приймати наступні значення: 1) «нормальний» – активний доступний вузел; 2) «пастка» – статус пастки на вузлі; 3) «відключений» – вузел від'єднано від мережі, опрацювання даних та агентів-пакетів неможливе. Список доступних вузлів після отримання з середовища передається на блок прийняття рішень, що працює на базі процедури mD (див. рис.1), з

Рис. 3. Структура розробленої моделі багатоагентної системи

врахуванням розроблених алгоритмів опрацювання ситуацій «пастки» та «зациклення». Кожен вузел крім статусу, зберігає наступні дані: 1) ідентифікатор – унікальний ключ користувача, який користується вузлом; 2) набір параметрів, що відносяться до алгоритму колонії мурах з врахуванням запропонованої модифікації базового алгоритму (E, L, Q, PSlim, P, Tevp); 3) черга агентів-пакетів – агенти, що були успішно прийняті на вузлі, опрацьовані та готові для подальшої передачі. Черга працює за принципом FIFO (first input first output) – перший отримано, перший відіслано; 4) пам'ять значень цифрових міток на з'єднаннях з поточного вузла до доступних для переходу вузлів – M(i,j), фактично рядок з матриці значень цифрових міток. Кожен запис в цій пам'яті включає в себе наступну інформацію: ідентифікатор вузла для переходу; значення цифрової мітки; час останньої зміни або створення запису;

Якщо агент немає доступних для переходу вузлів після аналізу в блоку прийнятті рішень, або передачу до наступного вузла було перервано, агент потрапляє знову в цю чергу в кінець. Тобто його буде знову опрацьовано через визначений момент часу, з повторною спробою передачі до наступних вузлів.

В якості мурахи-агента використовується пакет даних, який зображено на рис.4. Цифрами на рисунку позначено кількість бітів, за якими можна визначити розмір кожного поля пакета даних. Крім користувацьких даних пакет

включає в себе наступні поля: ідентифікатор мурахи-агента (64 біта – 8 байт); ідентифікатор початкового вузла – вузла ініціатора розсилання агентів (32 біта – 4 байти); лічильник пройдених вузлів мережі (20 бітів та 12 бітів зарезервованих); лічильник часу (64 біта – 8 байт); максимальна кількість кроків (кількість пересилань) та час існування агента, які обмежують час існування мурахи-агента, а також зібрані в процесі шляху агента по мережі службові дані (кожне поле по 32 біта – 4 байти); послідовність пройдених вузлів мережі, включаючи час їх відвідування (4 байти ідентифікатор вузла та 4 байти час відвідування, тобто кожен запис по 8 байт), список "табу" — список відвіданих (або заборонених для відвідування) агентом вузлів мережі формується шляхом вибірки з послідовності пройдених вузлів унікальних ідентифікаторів вузлів.

Рис. 4. Пакет даних – мураха-агент в розробленій системі

Поле «розмір користувацьких даних» має розмір 24 біта, тобто максимально допустимий розмір даних для передачі в пакеті 15 МБ. Поле «розмір зібраних службових даних» має розмір 20 біт, тобто максимально допустимий розмір службових даних 1023 КБ, враховуючи розмір кожного запису (8 байт), це складає 130944 записів про відповідну кількість пройдених вузлів. Якщо в процесі передачі агента до наступного вузла виник збій –

з’єднання стало не доступним, відключився вузол, відбувається повторне сканування середовища з метою подальшої передачі агента з поточного вузла.

За запропонованою методикою було проведено розрахунок об’єму споживання пам’яті для збереження даних, необхідних для розроблених багатоагентних систем. В обох випадках витрати на збереження даних мають характер $O(N^2)$ відповідно до розмірності ЗК – N (для кількості вузлів N = 65535 для розроблених систем необхідно від 16 до 68 ГБ пам’яті).

У **четвертому розділі** проведено тестування розроблених багатоагентних систем та оцінювання ефективності запропонованих методів, моделей та засобів. Отримані результати розв’язання згенерованих ЗК на 100, 500, 1000 та 10000 вузлів продемонстрували те, що застосування розробленої модифікації базового алгоритму колонії мурах дозволяє зменшити час отримання результуючого маршруту у майже 4 рази для ЗК розмірністю до 1000 вузлів та на 20% для ЗК розмірністю до 10000 вузлів без потреби перезапуску процесу обчислення після виникнення змін вхідних даних. Проведені параметричні дослідження розроблених багатоагентних систем, дозволяють використовувати визначені оптимальні значення параметрів по замовчуванню та зменшують кількість обов’язкових вхідних параметрів для запуску.

Режим роботи розробленої багатоагентної системи визначається вхідним параметром opt: 1) без використання методів локальної оптимізації; 2) з використанням 2-opt методу; 3) з використанням 2.5-opt методу; 4) з використанням 3-opt методу. Параметр opt змінюється в залежності від інтенсивності динамічних змін в процесі обчислення. Для порівняння результатів розробленої системи було включено аналіз альтернативної системи LKH 2.0 для розв’язання ЗК на базі LKH (Lin-Kernighan Heuristic) – методу.

Тестування проводилось на ЕОМ з процесором Intel Core i7-5960X Haswell-E 8-Core 3.0 GHz, 8 ядер, 16 ГБ ОЗУ. Крім обчислення тестової ЗК «ATT532» на 532 вузли – відповідно до основних крупних міст в США, було додано запис усіх проміжних результатів у файл (логування усіх етапів та подій) для обох систем, яке також займає певний додатковий час крім виконання обчислення ЗК (до 60% сумарного часу). Кількість запусків для збору статистики – 100. Результати тестування розробленої багатоагентної системи та системи на базі LKH-методу для порівняння представлено в таблиці 1. MIN, AVG, MAX – позначення відповідно для мінімального, середнього та максимального результатів. Оптимальний маршрут, зображений на рис.5, для тестової ЗК має довжину 27686 (виділено в таблиці), його було досягнуто з застосуванням розробленої системи в режимі використання методу 3-opt локальної оптимізації та за допомогою системи на базі LKH-методу.

Для запуску розробленої багатоагентної системи використовувались 8 агентів, в таблиці 1 час дослідження показано при виконанні на одному ядрі, в дужках значення часу при виконанні обчислень з використанням 8-и доступних ядер. Система на базі методу LKH має кращі показники за вартістю отримуваних результатів. Однак крім наближеності до оптимального результату слід враховувати ще й час обчислення ЗК, а також здатність пристосовуватись до динамічних змін.

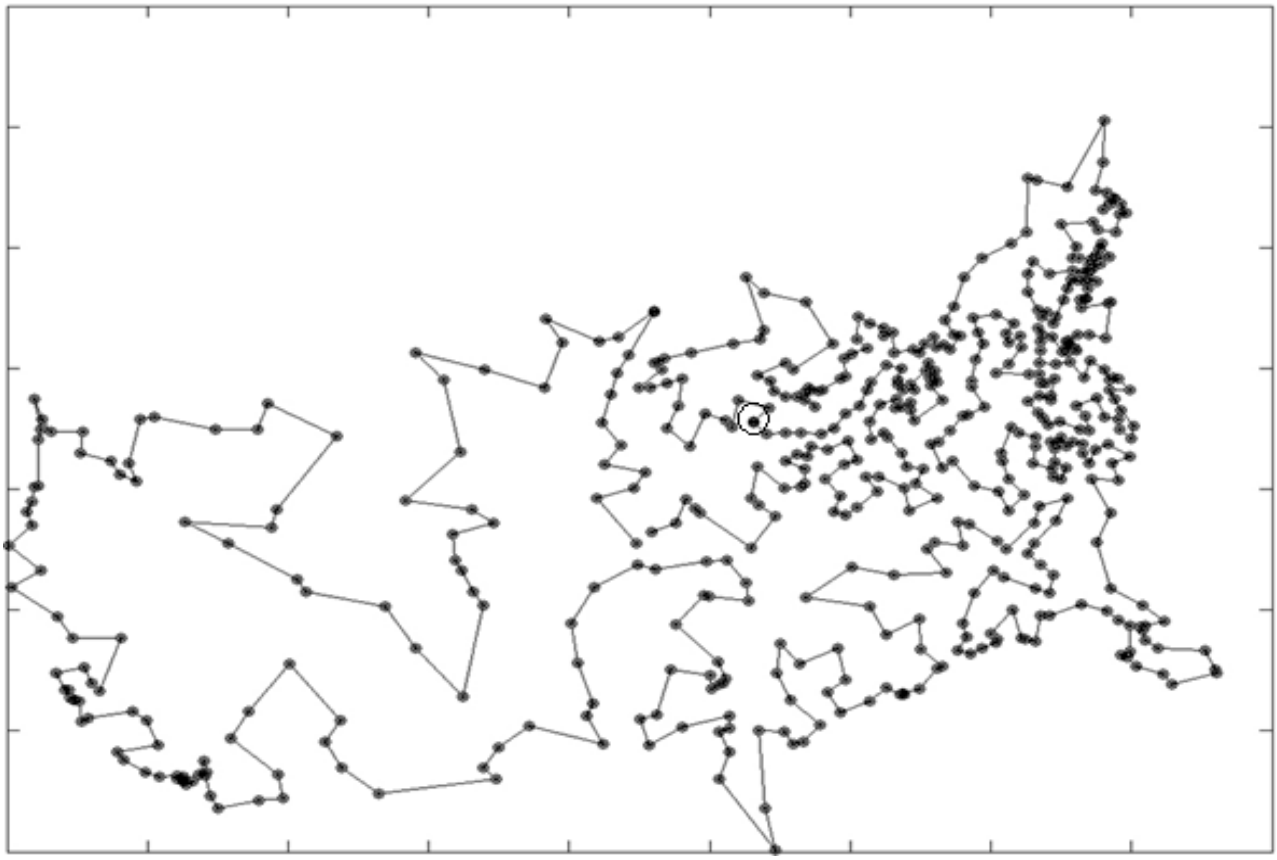

Рис. 5. Результуючий маршрут ЗК (ATT532)

Таблиця 1.

Порівняльні характеристики обчислення результату ЗК (ATT532).

Досліджувана система	Результат за вартістю			Час знаходження результату, с			Відхилення середнього від оптимального результату, %
	MIN	AVG	MAX	MIN	AVG	MAX	
Розроблена система з використанням 3-opt методу локальної оптимізації	**27686**	27700.3	27705	1,96	4,95	8,7	0,07
Розроблена система з використанням 2,5-opt методу локальної оптимізації	27693	27712.8	27751	2.3	4.6	7.1	0.1
Розроблена система з використанням 2-opt методу локальної оптимізації	27717	27733.4	27762	1.9	4.4	7.1	0.2
Розроблена система без використання методів локальної оптимізації	33255	34104.7	34835	0,6	0,9	1,4	5,2
Система на базі методу LKH	**27686**	**27686**	**27686**	3,3	7,0	10,9	0

Після виникнення динамічних змін систему на базі LKH методу необхідно перезапускати. Розроблену багатоагентну систему для розв’язання динамічної ЗК перезапускати не потрібно, відбувається виконання наступної ітерації циклу пошуку маршрутів мурахами-агентами з метою пошуку нового

маршруту після виникнення динамічних змін, накопичений досвід (пам'ять колонії мурах) не втрачається та корегується агентами. Проведені дослідження по розв'язанню бібліотечних тестових ЗК показали, що використання методу опрацювання результуючого маршруту дозволило отримати оптимальний результат або квазі-оптимальний результат з різницею від оптимального не більше ніж 2% для симетричних та асиметричних ЗК з кількістю вузлів до 6000.

Продемонстровано можливості розробленої багатоагентної системи для розв'язання динамічної асиметричної задачі комівояжера в умовах частково невідомих вхідних даних, яка забезпечує знаходження результуючих маршрутів, якщо існує цикл Ейлера, інакше забезпечується обходження усіх вузлів та повернення агентів в початковий вузел. Отримані в ході дослідження (розв'язання ЗК з вхідними мережами різних фізичних топологій) результати демонструють здатність розробленої багатоагентної системи пристосовуватись до виникнення динамічних змін в процесі розв'язання асиметричної ЗК в умовах частково невідомих даних без потреби перезапуску обчислень. Процес передачі даних за допомогою агентів-пакетів не припиняється, агенти швидко адаптуються до нових умов завдяки розробленим методам та засобам.

У **додатках** наведено документи, що підтверджують впровадження результатів наукових досліджень за темою дисертації, огляд класичних методів, опис обраних програмних засобів для розробки та вихідний код програмного забезпечення розроблених багатоагентних систем.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання – підвищення ефективності розв'язання динамічної ЗК шляхом вдосконалення існуючих та розробки нових методів, моделей та засобів, що базуються на використанні поведінкової моделі колонії мурах в багатоагентних системах. Отримано такі наукові та практичні результати:

1. Розроблено класифікацію існуючих методів розв'язання динамічної ЗК, аналіз якої показав, що при великій кількості пунктів ($N > 100$) потрібно орієнтуватись на методи розв'язання із застосуванням колективної поведінки агентів, серед яких найбільш перспективний – метод колонії мурах. Проведено дослідження можливості застосування поведінкової моделі колонії мурах для розв'язання динамічної асиметричної ЗК в умовах частково невідомих вхідних даних.

2. Удосконалено метод розв'язання задачі комівояжера, який базується на використанні поведінкової моделі колонії мурах, шляхом зміни початкової установки значень міток та імовірнісного вибору наступного вузла для переходу мурахи-агента, що дозволило зменшити кількість ітерацій циклу пошуку маршрутів агентами та відповідно час розв'язання ЗК у майже 4 рази при розмірності до 1000 вузлів та на 20% при розмірності до 10000 вузлів.

3. Вперше розроблено метод опрацювання результуючого маршруту при розв'язанні динамічної задачі комівояжера, який базується на використанні алгоритмів локальної оптимізації 2-opt, 2.5-opt, 3-opt в залежності від інтенсивності динамічних змін вхідних даних, що дозволило зменшити вартість

результуючих маршрутів.

4. Розроблено багатоагентну систему для розв’язання динамічної ЗК. Система базується на використанні поведінкової моделі колонії мурах, технологій паралельних обчислень та методу опрацювання результуючого маршруту. Система здатна видати оптимальний результат або квазі-оптимальний результат з різницею від оптимального не більше, ніж 2% для симетричних та асиметричних ЗК з кількістю вузлів до 6000.

5. Вперше розроблено метод і отримано експериментальні результати подолання виявлених негативних наслідків нескінченного збільшення значень цифрових міток (пам’яті колонії мурах), який базується на використанні адаптивної верхньої межі значення цифрової мітки, що дозволило розробленій багатоагентній системі відновити пошук маршрутів меншої вартості навіть після тривалого статичного стану вхідних даних.

6. Вперше розроблено та апробовано модель багатоагентної системи, яка базується на використанні поведінкової моделі колонії мурах при розміщенні цифрових міток на комунікаційних вузлах, що дозволило розв’язати динамічну асиметричну задачу комівояжера в умовах частково невідомих вхідних даних.

7. Розроблено багатоагентну систему для розв’язання динамічної асиметричної ЗК в умовах частково невідомих вхідних даних з кількістю вузлів до 65536. Система базується на використанні: розробленого методу подолання виявлених негативних наслідків нескінченного збільшення значень цифрових міток, розробленого методу виявлення та виходу мурахи-агента з критичних ситуацій «пастки» та «зациклення», запропонованого методу оновлення значень цифрових міток в процесі проходження сполучення між вузлами, запропонованого засобу організації функціонування системи в режимі поєднання процесу пошуку маршрутів з процесом передачі даних.

СПИСОК ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Голембо В.А., Муляревич О.В. Модифікація методу мурашиної колонії для розв’язання задачі комівояжера колективом автономних агентів // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2011. – №717: Комп’ютерні системи та мережі. – с. 24 – 30.

2. Муляревич О.В., Голембо В.А. Імплементація методів локальної оптимізації у комп’ютерній системі для розв’язання динамічної задачі комівояжера з використанням моделі ройової поведінки агентів // Вісник НУ "Львівська політехніка". – 2013. – №771: Комп’ютерні науки та інформаційні технології. – с. 245 – 252.

3. Муляревич О.В., Голембо В.А. Розробка додаткового програмного модуля з використанням методів локальної оптимізації у комп’ютерній системі для розв’язання динамічної задачі комівояжера // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2014. – №806: Комп’ютерні системи та мережі. – с. 181 – 186.

4. Муляревич О.В., Голембо В.А. Вирішення проблем при розв'язанні динамічної асиметричної задачі комівояжера в умовах частково невідомих

вхідних даних // Науковий вісник Чернівецького університету. - 2015. Комп'ютерні системи та компоненти. Т.6, Вип.1. – с. 21 – 26.
5. Muliarevych O., Golembo V. New approaches for solving travelling salesman problems using agents swarm intelligence behavior model // European Cooperation: Scientific Approaches and Applied Technologies. - CLM Consulting Publ., Warsaw 2015, Vol 5(5). – pp. 131 – 143.
6. Голембо В.А., Бочкарьов О.Ю., Муляревич О.В. Нові підходи до розв'язку задач комбінаторної оптимізації колективом автономних агентів // Матеріали 5-ої Міжнародної науково-технічної конференції ACSN-2011 "Сучасні комп'ютерні системи та мережі: розробка та використання". — Львів. — 2011. — с. 227 – 230.
7. Муляревич О. Переваги застосування колективної поведінки агентів для розв'язку задачі комівояжера динамічного характеру // Тези доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції «Методи і засоби вимірювань фізичних величин» - «Температура-2012», 25-28 вересня 2012р. – Львів: ПП Сорока Т.Б., 2012. – с. 165 – 168.
8. Muliarevych O. Solving dynamic asymmetrical Travelling Salesman Problem in conditions of partly unknown data // Матеріали XIII-ої міжнародної конференції "Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії — TCSET'2016, 23 - 26 лютого 2016. — Львів - Славське: Видавництво Львівської політехніки, 2016. — с. 446 – 448.

АНОТАЦІЯ

Муляревич О.В. Розв'язання динамічної задачі комівояжера з використанням поведінкової моделі колонії мурах в багатоагентних системах. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2016.

Дисертація присвячена вирішенню актуального наукового завдання – розв'язанню динамічної задачі комівояжера з використанням поведінкової моделі колонії мурах в багатоагентних системах. Удосконалено метод розв'язання задачі комівояжера, який базується на використанні поведінкової моделі колонії мурах, шляхом зміни початкової установки значень міток та імовірнісного вибору наступного вузла для переходу мурахи-агента, що дозволило зменшити час розв'язання задачі комівояжера. Розроблено метод опрацювання результуючого маршруту при розв'язанні динамічної задачі комівояжера, який базується на використанні алгоритмів локальної оптимізації 2-opt, 2.5-opt, 3-opt в залежності від інтенсивності динамічних змін вхідних даних, що дозволило зменшити вартість результуючих маршрутів. Розроблено метод і отримано експериментальні результати подолання виявлених негативних наслідків нескінченного збільшення значень цифрових міток, який базується на використанні адаптивної верхньої межі значення цифрової мітки, що дозволило розробленій багатоагентній системі відновити пошук маршрутів меншої вартості. Розроблено та апробовано модель багатоагентної системи, яка

базується на використанні поведінкової моделі колонії мурах при розміщенні цифрових міток на комунікаційних вузлах, що дозволило розв'язати динамічну асиметричну задачу комівояжера в умовах частково невідомих вхідних даних.

Ключові слова: динамічна задача комівояжера, поведінкова модель колонії мурах, багатоагентні системи.

АННОТАЦИЯ

Муляревич О.В. Решение динамической задачи коммивояжера с использованием поведенческой модели колонии муравьев в многоагентных системах. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты. – Национальный университет «Львивська политэхника» Министерства образования и науки Украины, Львов, 2016.

Диссертация посвящена разрешению актуальной научной проблемы – решению динамической задачи коммивояжера с использованием поведенческой модели колонии муравьев в многоагентных системах. Усовершенствовано метод решения задачи коммивояжера, который базируется на использовании поведенческой модели колонии муравьев, путем изменения начальной установки значений меток и вероятностного выбора следующего узла для перехода муравья-агента, что позволило уменьшить время нахождения результата задачи коммивояжера. Разработан метод обработки результирующего маршрута при решении динамической задачи коммивояжера, который базируется на использовании алгоритмов локальной оптимизации 2-opt, 2.5-opt, 3-opt в зависимости от интенсивности динамических изменений входящих данных, что позволило уменьшить стоимость результирующих маршрутов. Разработан метод и получено экспериментальные результаты преодоления негативных последствий бесконечного увеличения значений цыфровых меток, который базируется на использовании адаптивной верхней границы значения цыфровой метки, что позволило разработанной многоагентной системе возобновить поиск маршрутов меньшей стоимости. Разработана и апробирована модель многоагентной системы, которая базируется на использовании поведенческой модели колонии муравьев при размещении цифровых меток на коммуникационных, что позволило решить динамическую асимметрическую задачу коммивояжера в условиях частично неизвестных входящих данных.

Ключевые слова: динамическая задача коммивояжера, поведенческая модель колонии муравьев, многоагентные системы.

ABSTRACT

Muliarevych O.V. Solving dynamic travelling salesman problem using ant colony behavior model in multiagent systems. – On the rights of manuscript.

Thesis for scientific degree of candidate of technical sciences by speciality: 05.13.05 – computer systems and components. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2016.

The thesis is devoted to popular scientific task – dynamic travelling salesman problem solving using ant colony behavior model in multiagent systems. In thesis a model of multiagent system was firstly developed, based on applying ant colony behavior model with distributed placement of digital marks on communication nodes, which enables to solve dynamic asymmetric travelling salesman problem in conditions of a partly unknown input data. Classification of existed methods for solving travelling salesman problem of dynamic type was represented, based on it ant colony optimization and local search methods were selected with potential of realization in scope of multiagent systems. Method for solving dynamic travelling salesman problem, which is based on ant colony behavior model was improved by modification of digital marks' values initialization procedure and procedure of next node selection for movement of ant-agent. Developed improvement of method decreases calculation time.

Two models of multiagent systems using ant colony behavior model were developed: 1) for dynamic travelling salesman problem solving using developed modification of base method, where each agent – is separate thread; 2) for dynamic asymmetrical travelling salesman problem in conditions of a partly unknown input data by distributed placement of digital marks on nodes and using developed methods and tools. Investigation of travelling salesman problem parameters was done. Method for travelling salesman problem result route processing was developed, which is based on 2-opt, 2.5-opt and 3-opt local search algorithms, that are used depend on intensity of dynamic changes, such method decreases cost of result routes.

Multiagent system for solving dynamic asymmetrical travelling salesman problem in conditions of a partly unknown input data based on applying: developed method to detect and overcome by ant-agent "trap" and "deadlock" critical situations, proposed method of digital marks' values update during moving of agents by links between nodes, proposed organization of system functionality in mode of union two processes: routes search and data transfer. Developed method to overcome discovered negative effect of endless digital marks' values augmentation, which is based on adaptive digital mark's value top limit, enables developed multiagent system recover a search of routes with lower cost even after long term static state of input data. Multiagent system for solving dynamic travelling salesman problem was developed, using ant colony behavior model, technologies of parallel calculations and method of result routes processing; it can output optimal result or quasi-optimal result with difference from optimal less than 2% for symmetrical and asymmetrical travelling salesman problem in less time than existed calculation systems. Method of memory consumption's calculation for both systems was described, calculated results were represented. Test set of travelling salesman tasks from library were solved, which proves achieved efficiency of developed methods and tools in scope of multiagent systems. Developed system with existed system based on Lin-Kernighan Heuristic method were compared, developed multiagent system demonstrates better results by time required for calculation, which is very important for travelling salesman problem tasks of dynamic type.

Key words: dynamic travelling salesman problem, ant colony behavior model, multiagent systems.

Підписано до друку 13.09.2016 р.
Формат 60х90 1/16. Папір офсетний.
Друк на різографі. Умовн. друк. арк. 1,5. Обл.-видав. арк. 0,8.
Тираж 100 прим. Зам. № 106869.

Друк ТзОВ «ЗУКЦ»
79011, м. Львів, вул. Вітовського, 25/10
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 408 від 09.04.2001 р.
тел.+38 (032) 297-06-76