

МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТУ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В МІСТАХ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНОГО МУРАШИНОГО АЛГОРИТМУ

Данчук В.Д., доктор фізико-математичних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, vdanchuk@ukr.net, orcid.org/0000-0003-3936-4509

Сватко В.В., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, vsvatko83@gmail.com, orcid.org/0000-0002-0712-5688

Богданець Є.І. Національний транспортний університет, Київ, Україна, getman.eugeniy@gmail.com, orcid.org/0000-0002-0474-5910

METHOD OF OPTIMIZING THE ROUTE OF CARGO TRANSPORTATION IN CITIES USING INFORMATION TECHNOLOGIES BASED ON THE MODIFIED ANT ALGORITHM

Danchuk V.D., Dr. Sc. (Phys.-Math.), National Transport University, Kyiv, Ukraine, vdanchuk@ukr.net, orcid.org/0000-0003-3936-4509

Svatko V.V., Ph.D., National Transport University, Kyiv, Ukraine, vsvatko83@gmail.com, orcid.org/0000-0002-0712-5688

Bogdanets Y.I., National Transport University, Kyiv, Ukraine, getman.eugeniy@gmail.com, orcid.org/0000-0002-0474-5910

Вступ. Прискорена автомобілізація в умовах відставання розвитку вулично-дорожніх мереж (ВДМ) мегаполісів призводить до різкого збільшення кількості транспортних засобів на автомобільних дорогах, інтенсифікації дорожнього руху. Це, в свою чергу, суттєво впливає на завантаженість ВДМ, сприяє виникненню заторів та зменшенню швидкості руху транспортних потоків. Тривалі затори на дорогах усе частіше стають причиною не лише часових, але й економічних втрат. Особливо гострим це питання є для підприємств, які доставляють власний товар, наприклад дрібнопартійний, до споживачів без посередників, тобто власним транспортом. У більшості сегментів ринку доставка товару додає до його собівартості суму витрат, яка у деяких випадках наближається до вартості самого товару [1].

Тому, у більшій мірі ефективність функціонування таких підприємств визначається ефективністю застосування транспортної логістики. При цьому часто ключовими тут є вирішення задач маршрутизації з використанням таких методів оптимізації маршрутів, які б ефективно враховували реальну динаміку транспортних потоків на ВДМ.

Отже, актуальність дослідження визначається необхідністю розробки, впровадження та застосування відповідних моделей, методів і програмних засобів щодо оптимізації та управління процесом перевезень в умовах нестаціонарної динаміки транспортних потоків на ВДМ. Використання таких розробок дозволить підвищувати ефективність транспортування товарів в межах великих міст.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як показує аналіз, існуючі на сьогоднішній день методи розв'язання задач дискретної оптимізації транспортних процесів, що відбуваються у логістичних системах, не є досконалими і не дають однозначних рішень. Зокрема, це стосується питань оптимізації маршрутів транспортних перевезень, яким присвячена велика кількість наукових досліджень.

У [2] авторами розглядаються існуючі методи та моделі щодо оцінки ефективності транспортних та різних за видами логістичних операцій в ланцюгах постачання. За результатами аналізу показано, що на сьогодні не існує єдиного підходу для отримання адекватних оцінок ефективності відповідних процесів[2].

На відміну від [2], авторами в [3] проведено детальний аналіз впливу різних методів оптимізації для вирішення задач доставки вантажу в умовах невизначеності попиту. Також у [3] наведено порівняння деяких логістичних стратегій, що застосовуються у транспортних компаніях, для визначення найбільш ефективних за рівнем успіху.

Модель вирішення багатоцільової задачі маршрутизації транспортних засобів з часовими обмеженнями запропоновано в [4]. Ця задача вирішується за допомогою модифікованого генетичного

алгоритму. Оптимальне рішення тут являє собою компроміс між вартістю транспортування товару та розміром автомобільного парку, необхідним для обслуговування клієнтів.

У [5] авторами досліджено процес транспортування вантажів у мережевому представленні з метою удосконалення існуючих методів визначення оптимальних характеристик транспортних мереж. Встановлено вплив показників структури мережі, напрямку руху і пропускної здатності транспортних комунікацій на визначення фактичної щільності руху на транспортній мережі, що перебуває в статичному стані.

У [6] запропоновано новий алгоритм, що дає можливість проведення процедури оптимізації за одночасного розгляду всіх шляхів руху між вузлами графу з урахуванням пропускної здатності кожного з його ребер. Цей метод базується на наведенні графу у вигляді електричної мережі, кожна з ділянок якої має певний опір, що характеризує відповідну пропускну здатність. Запропонований метод, на думку авторів [6], також дозволяє насамперед зосереджуватись на обчисленнях в області проблемних зон і структур високого рівня. Це дозволяє більш ефективно використовувати час обчислень без його витрачання на вирішення несуттєвих питань, але які пов'язані з громіздкими обчисленнями.

Однак, більш глибокий аналіз методу [6] свідчить про те, що тут розв'язання задачі дискретної оптимізації зводиться до розв'язання задачі лінійного алгоритму, пов'язаного з розв'язанням відповідної системи лінійних рівнянь певної розмірності. Тому тут, принаймні, залишається актуальним пошук шляхів розв'язку систем рівнянь максимально можливої розмірності за заданих ресурсів комп'ютерів.

Слід зазначити, що за своєю ідеєю, метод [6] аналогічний методу дискретної оптимізації, що базується на використанні ефектів самоорганізації мурашиних агентів [7]. Класичний метод самоорганізації мурашиної колонії [7] передбачає можливість знаходження оптимального шляху для статичного графу. Тут мурашині агенти, що розташовані в початковий момент часу у вузлах графу, також одночасно рухаються по ребрах орієнтованого графу. Це, врешті решт, дозволяє, з урахуванням особливостей цього методу, значно зменшити час відповідних обчислень. При цьому різноманітні властивості, що приписуються мурашиним агентам, дають можливість вирішувати широкий клас задач дискретної оптимізації з урахуванням багатьох характеристик досліджуваної системи. Зокрема, подальші численні дослідження різних фізичних процесів, які проводились із застосуванням цього методу, вказують на перспективність його використання для розв'язання задач дискретної оптимізації великої розмірності [8]. Це стосується маршрутизації транспортних засобів на ВДМ та магістралях, інформаційних потоків у комп'ютерних мережах тощо.

Наведений аналіз літературних джерел вказує на те, що на теперішній час представлено достатньо великий набір моделей та методів, які застосовують для побудови оптимального маршруту доставки вантажу. Проте більшість із них є застосовними для розв'язання проблем дискретної оптимізації маршруту в задачах транспортної логістики невеликої розмірності та у статичному представленні транспортної мережі без урахування реальної динаміки транспортного потоку на ВДМ. На відміну від цього, результати проведеного аналізу вказують на перспективність використання модифікованого методу самоорганізації мурашиної колонії згідно з [9] для оптимізації маршруту доставки вантажу в умовах нестационарної динаміки транспортних потоків підвищеної щільності.

Метою цієї роботи є розробка методу побудови оптимального маршруту доставки вантажів на основі модифікованого мурашиного алгоритму [9] з урахуванням реальної динаміки транспортних потоків на ВДМ великих міст.

Метод оптимізації маршруту перевезень в містах на основі мурашиного алгоритму

Відповідно до постановки задачі щодо вирішення проблем маршрутизації з урахуванням процесів динаміки транспортного потоку, ВДМ будемо представляти у вигляді двонаправлено орієнтованого зваженого графа. У вузлах такого графа розташовані пункти доставки товару (склади, супермаркети, тощо) зі складу відправника за допомогою транспортного засобу, що рухається у ВДМ міста. Ваги ребер, які з'єднують певну пару вузлів графа, визначають залежно від характеру розв'язуваної задачі. Це можуть бути відстані між пунктами, середні швидкості або середній час, вартість проїзду транспортного засобу в транспортному потоці на певних ділянках мережі. Оптимізація маршрутів руху транспортного засобу здійснювалась за допомогою мурашиного алгоритму в рамках задачі комівояжера. Ця задача формулюється як задача пошуку мінімального за певним параметром замкнутого маршруту по всіх вершинах, які відвідує комівояжер, без повторень на певному зваженому графі з кількістю вершин m [10]. Тут параметрами оптимізації можуть бути довжина маршруту, середня швидкість або середній час, вартість проїзду за маршрутом. Для

зручності будемо вважати, що місце виїзду та повернення транспортного засобу може відбуватись з будь-якого вузла графа.

Слід зазначити, що згідно з [11] операційні витрати за елементами для підприємств, що здійснюють розвезення власного вантажу, розподіляються таким чином: матеріальні витрати, заробітна плата, нарахування на заробітну плату, амортизаційні відрахування та інше. Проаналізувавши дані річної звітності більшості вантажних автомобільних перевізників України, що наведено у [1], отримано наступні частки елементів у загальній структурі операційних витрат: матеріальні витрати – 45 %, заробітна плата – 16 %, нарахування на заробітну плату – 6 %, амортизаційні відрахування – 6 % та інше – 27 %.

Як видно з [1], матеріальні витрати мають найбільший та визначальний вплив на вартість вантажних перевезень. Основною частиною даної групи витрат є паливо, розмір витрат якого залежить, в свою чергу, від пробігу транспортного засобу та часу його використання для доставки вантажу.

Окрім того, заробітна плата водія залежить від часу його роботи. У зв'язку з цим, знаходження оптимального (мінімального) часу доставки вантажу впливає на загальну вартість його доставки.

Для вирішення задач маршрутизації з урахуванням можливості розгляду реальної поведінки транспортного потоку (виникнення заторів, ремонту доріг, аварійних ситуацій тощо) будемо розглядати динамічний двонаправлено орієнтований зважений граф. Ваги ребер в цьому графі визначаються середнім часом проїзду транспортного засобу в транспортному потоці на певних ділянках мережі між пунктами доставки (вузлами графа). Крім того, в класичний алгоритм мурашиної колонії [7] вносяться відповідні модифікації згідно [7, 9]. А саме:

- можливість фіксувати результати оптимізації частково пройденого шляху для розрахунку подальшого маршруту при зміні довжини ребер під час руху;
- циклічний рух колонії змінено на асинхронний рух кожної мурахи з певною швидкістю.

Таким чином, запропонована модифікація мурашиного алгоритму враховує додаткові елементи інтелектуалізації, пов'язані з виключенням з розгляду тих ділянок шляху, на яких час руху транспорту є за відповідним критерієм не виправдано великим. Крім того, існує можливість визначення оптимального маршруту в умовах реального стану транспортного потоку (зміна швидкості руху, затори тощо).

Застосування такого модифікованого методу мурашиного алгоритму для оптимізації маршруту доставки товару з урахуванням динаміки транспортного потоку здійснюється за наступних припущень:

- на всіх ділянках ВДМ рух виділеного транспортного засобу здійснюється в рамках двосмугового двостороннього транспортного потоку;
- у кожній сукупності n_j ділянок ВДМ, що відповідає j -му ребру графу, завжди знайдуться альтернативні варіанти проїзду;
- зміна середнього часу проїзду та середньої швидкості проїзду в основному залежать від змін режимів динаміки транспортного потоку, які не включають в себе зупинки або затримки через дії регулюючих сигналів світлофорів.

Кожен маршрут між будь-якими двома точками в межах мегаполісу має певну кількість альтернатив. Тобто доставити вантаж з однієї точки до іншої можна декількома маршрутами, які відрізняються лише довжиною та середньої швидкістю транспортного потоку на них. У нашому випадку будемо вважати, що середній час проходження по n -му ребру між двома вузлами графу знаходиться наступним чином:

$$t_n = \frac{l_n}{v_n}, t \rightarrow \min, \quad (1)$$

де t_n – середній час, витрачений на проходження n -го ребра, хв.;

l_n – довжина n -го ребра, км;

v_n – середня швидкість руху по n -му ребру, км/год.

Оскільки значення реальної швидкості руху транспортних потоків на кожній ділянці дорожньо-транспортної мережі може змінюватись, то відповідно, значення часу проходження шляху відповідних ділянок ВДМ також є змінною величиною. Таким чином, при побудові оптимального за часом маршруту доставки вантажів враховується інформація про реальний стан ВДМ на момент побудови маршруту. При цьому, зрозуміло, що за деяких граничних значень швидкості руху транспортного потоку на певних ділянках ВДМ можлива перебудова оптимального за часом маршруту руху на ВДМ транспортного засобу для доставки товару у пункти призначення.

Case Study: Застосування методу на прикладі ВДМ м. Києва. Результати імітаційних досліджень

Для апробації запропонованого методу побудови оптимального маршруту доставки вантажу використовувались дані про відстані між пунктами доставки на ВДМ м. Києва (рис. 1) та середні швидкості руху транспортних потоків на відповідних ділянках ВДМ [12,13], які наведені у таблиці 1. Фрагмент ВДМ м. Києва наводився у вигляді двонаправлено орієнтованого зваженого графу.

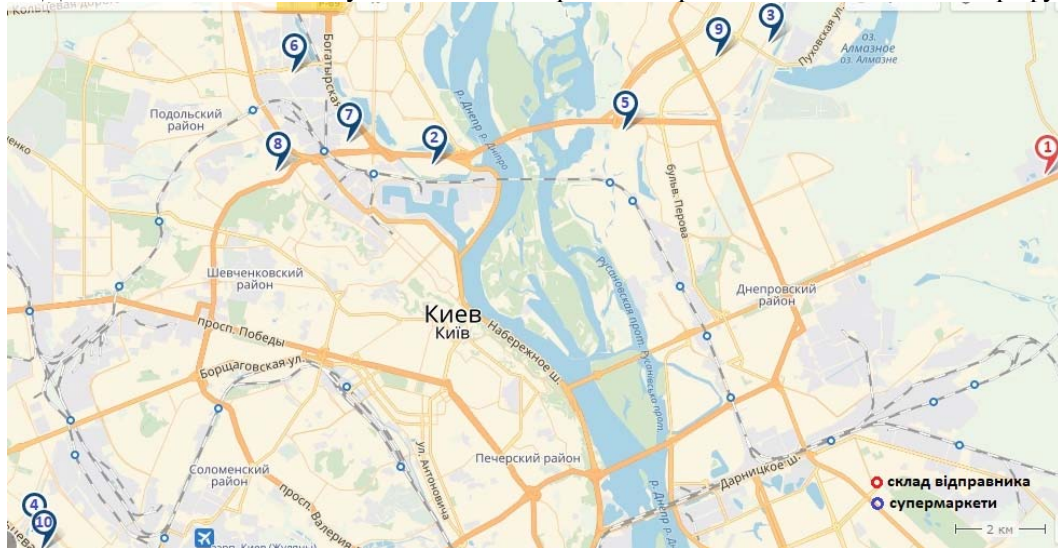


Рисунок 1 – Схема розташування пунктів доставки вантажів на ВДМ м. Києва
Figure 1 – The scheme of the location of cargo delivery points on the URN of Kyiv

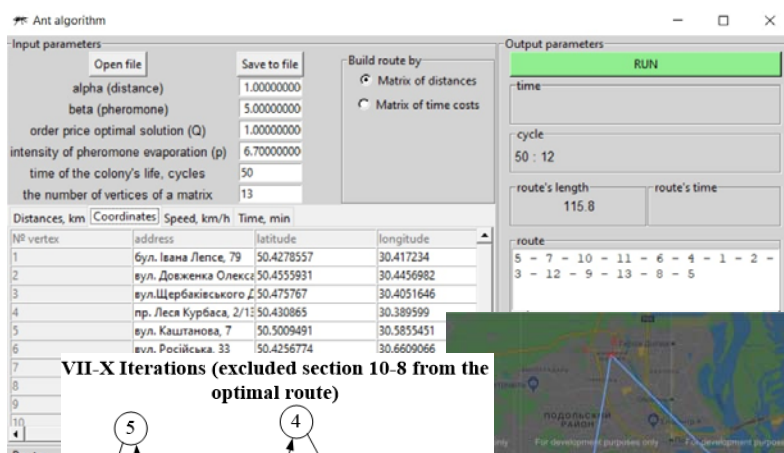
Відповідні імітаційні дослідження щодо побудови оптимального маршруту виконувались згідно з методом, для 5 та 10 вузлів, які визначають пункти доставки вантажу з використанням розробленого програмного забезпечення, що наведено в [9] та на рисунку 2. Середній час проходження кожної ділянки ВДМ визначався з використанням формули (1). За параметри оптимізації вибирались довжина та середній час проїзду за маршрутом.

Таблиця 1 – Дані про відстані та середні швидкості між пунктами доставки товару на ВДМ м. Києва [12,13]

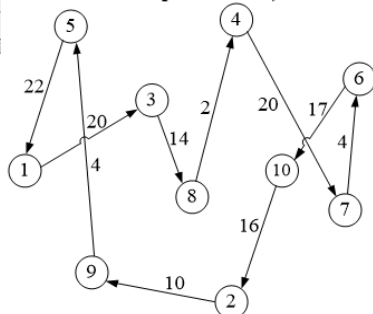
Table 1 – Data on distances and average speeds between goods delivery points on the URN of Kyiv [12,13]

Точки між об'єктами		Значення середніх швидкостей руху транспортного потоку, км/год									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Значення відстаней між точками, км	1	0	54	49	44	47	44	45	25	15	32
	2	17	0	38	55	51	52	53	48	46	55
	3	16	15	0	49	56	38	45	58	38	36
	4	28	20	16	0	52	49	53	55	43	57
	5	17	5	10	25	0	55	58	50	41	43
	6	23	6	21	21	11	0	42	49	47	57
	7	19	2	17	18	7	3	0	55	59	54
	8	25	23	14	2	28	24	21	0	44	49
	9	15	8	13	28	3	14	10	31	0	53
	10	32	15	22	6	20	16	13	7	23	0

* Під головною діагоналлю наведено відстані між будь-якими двома пунктами доставки, а над головною діагоналлю матриці – середні швидкості транспортного засобу між ними.



VII-X Iterations (excluded section 10-8 from the optimal route)



Route: 1 - 3 - 8 - 4 - 7 - 6 - 10 - 2 - 9 - 5 - 1
L = 112 km; T = 129 min

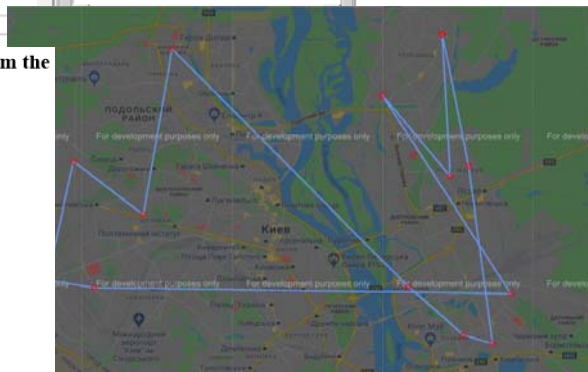


Рисунок 2 – Розроблене програмне забезпечення пошуку оптимального маршруту доставки вантажу на базі модифікованого мурашиного алгоритму
Figure 2 – Developed software for finding the optimal cargo delivery route based on a modified ant algorithm

Побудова оптимального маршруту доставки вантажу на ВДМ м. Києва з урахуванням реальної динаміки транспортних потоків.

Відомо [14], що одними з основних макроскопічних параметрів, які описують динаміку транспортного потоку, є інтенсивність руху, щільність та середня швидкість транспортних засобів, що утворюють потік. Часто, для якісного опису станів динаміки транспортного потоку, розглядають відносні показники, які відповідають цим параметрам, а саме, коефіцієнт завантаження Z , коефіцієнт щільності ρ та коефіцієнт швидкості C руху транспортного потоку. Тоді, залежно від певних граничних значень цих показників, усі можливі стани транспортного потоку розділяють на певні режими руху, які згідно з [14] отримали назву рівнів зручності. Відповідно до [14] виділяють п'ять рівнів зручності, які наведені у таблиці 2.

Слід зауважити, що класифікація режимів руху, наведена в [14], не є єдиною [11], проте для якісної інтерпретації результатів імітаційного моделювання в даній роботі її можна вважати цілком прийнятною. При цьому, тут для зручності вибирався один показник, а саме: коефіцієнт швидкості C .

Таблиця 2 – Класифікація режимів руху транспортного потоку за рівнями зручності згідно з [14]

Table 2 – Classification of traffic flow modes by levels of convenience according to [14]

Рівень зручності	Z	C	ρ	Режим руху транспортного потоку
А	< 0,2	> 0,9	< 0,1	Вільний рух автомобілів з max швидкістю
Б	0,20–0,45	0,70–0,90	0,10–0,30	Частково зв'язаний, автомобілі рухаються малими групами
В	0,45–0,70	0,55–0,70	0,30–0,70	Зв'язаний рух, автомобілі рухаються великими групами
Г	0,7–1,0	0,40–0,55	0,70–1,00	Щільний рух, автомобілі рухаються колоною з малою швидкістю, виникають затори
Д	> 1,0	< 0,4	–	Повна зупинка руху, затори

Тоді, використовуючи дані про фактичні середні швидкості транспортного потоку та швидкості транспортного потоку при вільному русі на певних ділянках ВДМ м. Києва згідно з [12], коефіцієнт швидкості проходження n -го ребра графа C_n , що відповідає певній ділянці або сукупності ділянок ВДМ, можна визначити за наступною формулою [12]:

$$C_n = \frac{v_n}{v_{Bn}}, \quad (2)$$

де v_n – середня швидкість руху транспортного потоку на n -му ребрі в рамках відповідного режиму руху; v_{Bn} – середня швидкість вільного руху транспортного потоку на n -му ребрі.

При проведенні досліджень, як вихідний, вибрано оптимальний маршрут, отриманий при виконанні процедури оптимізації за часом для незмінних початкових швидкостей на ребрах, взятих з [12], для графу з 10 вузлами. Крім того, для однозначності вважалось, що середня швидкість руху транспортних потоків внаслідок змін умов руху може одночасно змінюватись на трьох ділянках вихідного оптимального маршруту. Для цього були вибрані ділянки між вузлами 2-7, 10-8 та 4-3 (рисунок 3а, червоні лінії). У вихідному оптимальному маршруті середні швидкості і час руху транспортних потоків на цих ділянках ВДМ становили відповідно 53 км/год і 2 хв., 49 км/год і 9 хв., 49 км/год і 20 хв. Для якісної інтерпретації результатів оптимізації використовувались значення коефіцієнтів швидкості для цих ділянок, що розраховувались за формулою (2). При цьому, значення середньої швидкості вільного руху транспортного потоку на ділянці 2-7 ВДМ становило 59 км/год, тобто обмежувалось максимально дозволеним значенням швидкості руху в Києві. Для ділянок 10-8 та 4-3 ВДМ м. Києва значення середньої швидкості вільного руху транспортного потоку складало 50 км/год, що обмежується відповідними дорожніми знаками та [15].

Результати проведених імітаційних досліджень наведені в таблиці 3. Тут v_{2-7} , v_{10-8} , v_{4-3} , t_{2-7} , t_{10-8} , t_{4-3} та C_{2-7} , C_{10-8} , C_{4-3} – значення швидкостей, часів проїзду та коефіцієнтів швидкостей ділянок 2-7, 10-8, 4-3 відповідно; T – час проїзду за оптимізованим маршрутом, L – довжина оптимізованого за часом маршруту. На рисунку 3 показані етапи формування оптимізованого за часом маршруту після кожної ітерації, пов'язаної із зменшенням швидкості на зазначених ділянках ВДМ.

Таблиця 3 – Результати побудови оптимального за часом маршруту для 10 вузлів за одночасної зміни середньої швидкості руху на ділянках ВДМ 2-7, 10-8 та 4-3

Table 3 – The results of the construction of the time-optimal route for 10 nodes with simultaneous changes in the average speed of traffic on sections of URN 2-7, 10-8 and 4-3

Іт. опт.	v_{2-7} , км/ГОД	t_{2-7} , хв	C_{2-7}	v_{10-8} , км/ГОД	t_{10-8} , хв	C_{10-8}	v_{4-3} , км/ГОД	t_{4-3} , хв	C_{4-3}	Маршрут	T , хв	L , км
1	53	2	0,90	49	9	0,98	49	20	0,98	1-5-9-2-7-6-10-8-4-3-1	110	90
2	45	3	0,76	45	9	0,90	45	21	0,90	1-5-9-2-7-6-10-8-4-3-1	112	90
										1-2-5-9-7-6-10-8-4-3-1	112	95
3	40	3	0,68	40	11	0,80	40	24	0,80	1-2-5-9-7-6-10-8-4-3-1	117	95
4	35	3	0,59	35	12	0,70	35	27	0,70	1-2-5-9-7-6-10-8-4-3-1	121	95
										1-3-5-9-2-7-6-10-8-4-1	121	87
5	30	4	0,51	30	14	0,60	30	32	0,60	1-3-5-9-7-6-10-8-4-2-1	123	104
6	25	5	0,42	25	17	0,50	25	38	0,50	1-3-5-9-7-6-10-8-4-2-1	126	104
7	20	6	0,34	20	21	0,40	20	48	0,40	1-3-8-4-7-6-10-2-9-5-1	129	112
8	15	8	0,25	15	28	0,30	15	64	0,30	1-3-8-4-7-6-10-2-9-5-1	129	112
9	10	12	0,17	10	42	0,20	10	96	0,20	1-3-8-4-7-6-10-2-9-5-1	129	112
10	5	24	0,08	5	84	0,10	5	192	0,10	1-3-8-4-7-6-10-2-9-5-1	129	112

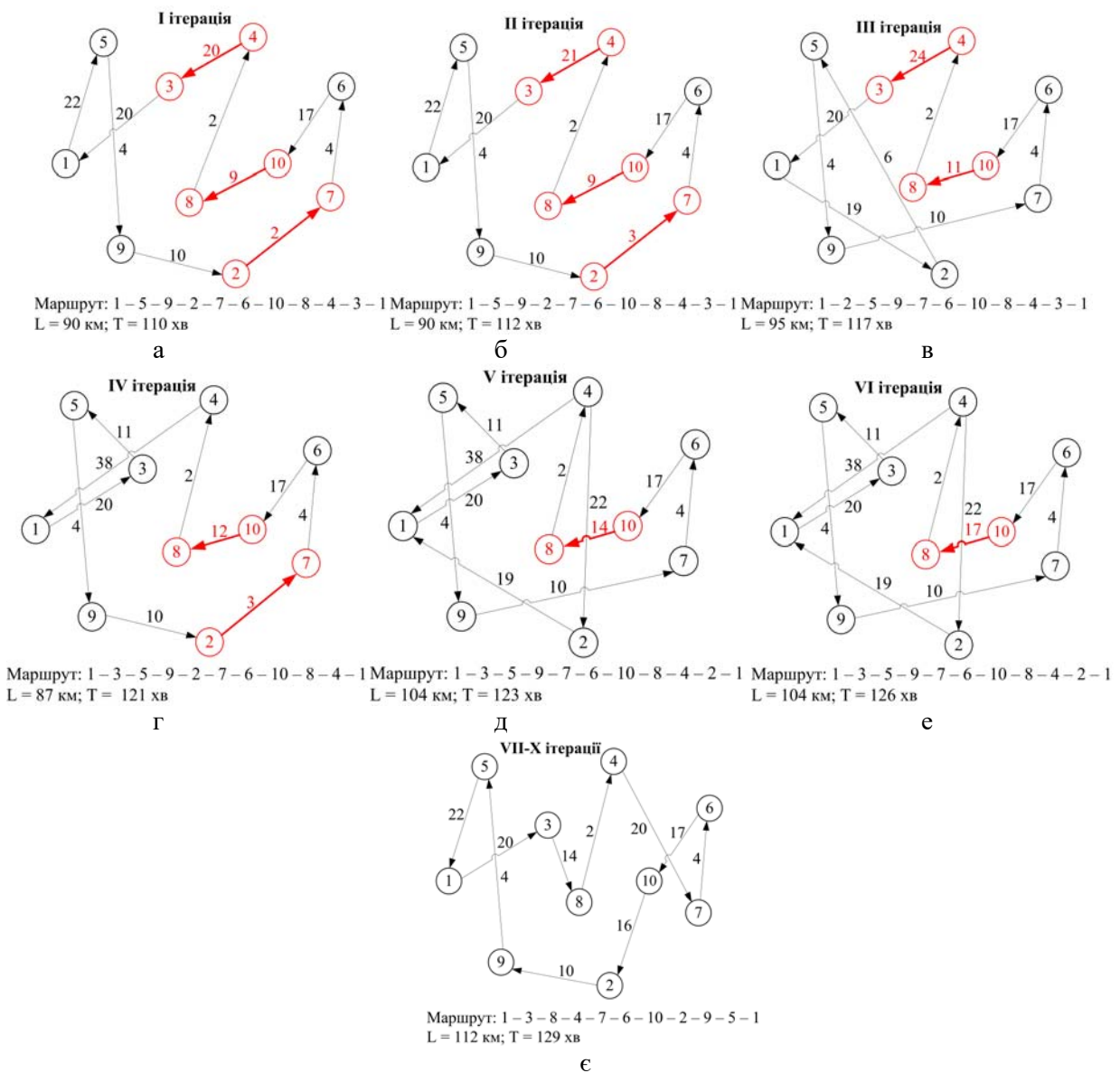


Рисунок 3 – Побудова оптимального маршруту при поступовій зміні швидкості руху на ділянках 2-7, 10-8 та 4-3 ВДМ для 10 вузлів. Червоним кольором показані ділянки ВДМ, на яких відбувається зміна середньої швидкості транспортного потоку
 Figure 3 – Construction of the optimal route with a gradual change in speed on sections 2-7, 10-8 and 4-3 of the URN for 10 nodes. Sections of URN where the average speed of the traffic flow changes are shown in red

Як видно з таблиці 3 (відповідні значення коефіцієнтів швидкостей для модельних ділянок 0,90 і 0,98), вихідний оптимальний за часом маршрут (рисунок 3, а) реалізується, коли на всіх трьох ділянках ВДМ здійснюється вільний рух автомобілів, що відповідає рівню зручності А (таблиця 2). Після другої ітерації оптимізації за часом, коли на ділянці 2-7 вже відбувається частково зв'язаний рух, а на інших двох залишається вільний рух автомобілів, зменшення швидкості на відповідних ділянках призводить до виникнення двох альтернативних оптимальних маршрутів (T = 112 хв), перший з яких відповідає вихідному, а другий трансформується так, що з нього вилучається ділянка ВДМ 2-7, на якій змінився режим руху автомобілів (таблиця 3, 2, рисунок 3, б, в). При цьому, довжина шляху для другого альтернативного маршруту більша, ніж для вихідного (95 км і 90 км відповідно). Вочевидь, коли час проходження маршрутів однаковий, а довжина маршруту різна, мабуть, більш прийнятним можна вважати той маршрут, довжина якого менша. Аналогічна ситуація з двома альтернативними маршрутами спостерігається під час четвертої ітерації (з однаковим часом проїзду за оптимізованим маршрутом T = 121 хв, але різними довжинами L 95 км і 87 км відповідно), коли на всіх трьох ділянках 2-7, 10-8, 4-3 здійснюється практично зв'язаний рух, де автомобілі рухаються великими групами (таблиця 3, таблиця 2, рисунок 3в, рисунок 3г). При цьому, що цікаво, з

кожного з цих маршрутів вилучається одна, але різна ділянка, на яких в рамках представленої моделі відбувається зменшення середньої швидкості (для одного – ділянка 2-7, для іншого – ділянка 10-8).

Під час наступної, п'ятої ітерації оптимізації за часом, що відповідає стану ВДМ, де на ділянці 2-7 спостерігається щільний рух автомобілів колоною з малою швидкістю і з великою імовірністю виникнення затору, а на двох інших – зв'язаний рух автомобілів (таблиці 2, 3), здійснюється така перебудова оптимального за часом маршруту, коли в ньому залишається тільки одна з трьох ділянок (ділянка 10-8), де в рамках нашої моделі змінюється середня швидкість транспортного потоку (таблиця 3, рисунок 3, д).

Відповідно, починаючи з сьомої ітерації оптимізації, де зменшення середніх швидкостей транспортних потоків на модельних ділянках ВДМ досягають значень, що відповідають значенням коефіцієнтів швидкості 0,33 та 0,4, тобто режиму виникнення на них заторів (таблиці 2, 3), сформований оптимальний маршрут вже не містить в собі ці ділянки ВДМ (таблиця 3, рисунок 3, е). І, зрозуміло, що подальші зменшення середніх швидкостей на них вже не призводить до перебудови оптимального маршруту (таблиця 3, рисунок 3, е).

Висновки. Запропоновано метод оптимізації маршрутів доставки вантажу у великих містах в умовах нестаціонарної динаміки транспортних потоків на ділянках ВДМ. В рамках цього методу мережа наводиться у вигляді двонаправлено орієнтованого зваженого графа. Метод базується на використанні модифікованого мурашиного алгоритму. Основним елементом модифікації є те, що реалізована можливість асинхронного руху агентів мурашиної колонії з певною швидкістю. Крім цього, також можливе фіксування результатів оптимізації частково пройденого шляху для розрахунку подальшого маршруту за зміни умов руху цих агентів. Це дозволяє здійснювати управління процесом оптимізації маршруту з урахуванням динамічного стану ВДМ, що пов'язаний із суттєвими змінами швидкості руху транспортних засобів на певних ділянках цієї мережі. Ці зміни швидкості можуть бути обумовлені підвищенням завантаженості ділянок ВДМ, виникненням заторів, аварійних ситуацій тощо. Метод дозволяє здійснювати процес оптимізації як за часом, так і довжиною маршруту. Для перевірки коректності використання модифікованого мурашиного алгоритму проводились тестові дослідження оптимізації маршруту за довжиною з використанням методу повного перебору та методу гілок та меж. Отримані результати досліджень у повній мірі збігаються з такими, які отримані за допомогою модифікованого мурашиного алгоритму.

Для апробації запропонованого методу здійснені імітаційні моделювання процесів оптимізації маршруту в рамках задачі комівояжера на прикладі ВДМ м. Києва. При проведенні моделювання було виявлено низку ефектів. Ці ефекти пов'язані з перебудовою оптимальних маршрутів при зменшенні середніх швидкостей руху транспортних засобів на модельних ділянках ВДМ до певних граничних значень, які відповідають певним режимам руху транспортних потоків. Аналіз виявлених ефектів дозволив сформулювати деякі методичні рекомендації щодо прийняття управлінських рішень з питань раціональної організації перевезень вантажів.

На підставі аналізу результатів імітаційних досліджень доведена можливість використання методу для вирішення задач ефективного управління процесом перевезень в мегаполісах. Зокрема, застосування цього методу може бути корисним при формуванні оптимальних маршрутів доставки вантажу в онлайн-режимі з урахуванням реального стану руху транспорту на відповідних ділянках ВДМ.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Статистика цін на вантажні перевезення по Україні URL: http://deguz.com/price_statistics
2. Lukinskiy, V. Methods of evaluating transportation and logistics operations in supply chains / V. Lukinskiy, V. Dobromirov // Transport and Telecommunication, 2016. V. 17. P. 55-59.
3. Balasescu, S. Optimization methods for supply chain activities / S. Balasescu, M. Balasescu // Bulletin of the Transilvania University of Brasov Series V: Economic Sciences, 2014. V. 7(56). P.9-16.
4. Qingyou, Y. The Optimization of Transportation Costs in Logistics Enterprises with Time-Window Constraints / Yan Qingyou, Qian Zhang // Discrete Dynamics in Nature and Society, 2015. V. 2015. P. 10-15.
5. Prokudin G. Improvement of the Methods for Determining Optimal Characteristics of Transportation Networks / G. Prokudin, O. Chupaylenko, O. Dudnik, A. Dudnik, D. Omarov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2016. V. 6/3 (84). P. 54-61.
6. Knight, H. New algorithm can dramatically streamline solutions to the 'max flow' problem // MIT News, 2014. P. 21–26.

7. Штовба С.Д. Муравьиные алгоритмы // *Exponenta Pro. Математика в приложениях*. 2003, №4. С.70–75.
8. Zhaoyuan, W. A Modified Ant Colony Optimization Algorithm for Network Coding Resource Minimization / W. Zhaoyuan, X. Huanlai, L. Tianrui // *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2016. V. 20 (3). P. 325-342.
9. Danchuk, V. An Improvement in Ant Algorithm Method for Optimizing a Transport Route with Regard to Traffic Flow / V. Danchuk, O. Bakulich, V.Svatko // *Procedia Engineering*, 2017. V. 187. P. 425-434.
10. Данчук, В.Д. Оптимізація пошуку шляхів по графу в динамічній задачі комівояжера методом модифікованого мурашиного алгоритму / В.Д. Данчук, В.В. Сватко // *Системні дослідження та інформаційні технології НТУУ «КПІ»*, 2012. № 2. С. 78-86.
11. Наказ Міністерства транспорту України від 05.02.2001 р. N 65 «Про затвердження Методичних рекомендацій з формування собівартості перевезень (робіт, послуг) на транспорті» URL: <http://uazakon.com/document/spart34/inx34634.htm>
12. Карта міста Києва для побудови маршрутів по Україні URL: <https://www.google.com.ua/maps/>
13. Ресурс спостереження за частиною ділянок ВДМ м. Києва URL: <http://videoprobki.ua>.
14. Лобанов, Е.М. Пропускная способность автомобильных дорог / Е.М. Лобанов, В.В. Сильянов, Ю.М. Ситников, Л.Н. Сапегин. // М.: Транспорт, 1970. 152 с.
15. Постанова Кабінету Міністрів України від 10.11.2017 № 883 «Про внесення змін до Правил дорожнього руху» URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/883-2017-%D0%BF>

REFERENCES

1. Statystyka tsin na vantazhni perevezennia po Ukraini [Statistics of prices for freight transportation in Ukraine]. Available at: http://degruz.com/price_statistics (Accessed 20 June 2022).
2. Lukinskiy, V. Methods of evaluating transportation and logistics operations in supply chains / V. Lukinskiy, V. Dobromirov // *Transport and Telecommunication*, 2016. V. 17. P. 55-59.
3. Balasescu, S. Optimization methods for supply chain activities / S. Balasescu, M. Balasescu // *Bulletin of the Transilvania University of Brasov Series V: Economic Sciences*, 2014. V. 7(56). P.9-16.
4. Qingyou, Y. The Optimization of Transportation Costs in Logistics Enterprises with Time-Window Constraints / Yan Qingyou, Qian Zhang // *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2015. V. 2015. P. 10-15.
5. Prokudin G. Improvement of the Methods for Determining Optimal Characteristics of Transportation Networks / G. Prokudin, O. Chupaylenko, O. Dudnik, A. Dudnik, D. Omarov // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016. V. 6/3 (84). P. 54-61.
6. Knight, H. New algorithm can dramatically streamline solutions to the ‘max flow’ problem // *MIT News*, 2014. P. 21–26.
7. Shtovba S.D. Murashyni alhorytmy [Ant algorithm]. *Exponenta Pro. Matematyka v prylozheniakh* [Exponenta Pro. Mathematics in applications], 2003, issue 4, pp.70-75.
8. Zhaoyuan, W. A Modified Ant Colony Optimization Algorithm for Network Coding Resource Minimization / W. Zhaoyuan, X. Huanlai, L. Tianrui // *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2016. V. 20 (3). P. 325-342.
9. Danchuk, V. An Improvement in Ant Algorithm Method for Optimizing a Transport Route with Regard to Traffic Flow / V. Danchuk, O. Bakulich, V.Svatko // *Procedia Engineering*, 2017. V. 187. P. 425-434.
10. Danchuk, V.D., Svatko, V.V. Optymizatsiia poshuku shliakhiv po hrafu v dynamichnii zadachi komivoiazhera metodom modyfikovanoho murashynoho alhorytmu [Optimization of the search for paths along the graph in the dynamic problem of the traveling salesman using the method of the modified ant algorithm]. *Systemni doslidzhennia ta informatsiini tekhnolohii NTUU «KPI»* [System research and information technologies of NTUU "KPI"], 2012, issue 2, pp.78-86.
11. Nakaz Ministerstva transportu Ukrainy vid 05.02.2001 r. N 65 «Pro zatverdzhennia Metodychnykh rekomendatsii z formuvannia sobivartosti perevezen (robit, posluh) na transporti» [Order of the Ministry of Transport of Ukraine dated February 5, 2001 No. 65 "On the approval of Methodological recommendations on the formation of the cost of transportation (works, services) in transport"]. Available at: <http://uazakon.com/document/spart34/inx34634.htm> (Accessed 20 June 2022).
12. Karta mista Kyieva dlia pobudovy marshrutiv po Ukraini [Map of the city of Kyiv for building routes across Ukraine]. Available at: <https://www.google.com.ua/maps/> (Accessed 20 June 2022).
13. Resurs sposterezhennia za chastynoiu dilianok VDM m. Kyieva [A resource for monitoring part of the URN sites in Kyiv]. Available at: <http://videoprobki.ua> (Accessed 20 June 2022).

14. Lobanov, E.M., Sylianov, V.V., Sytnykov, Yu.M., Sapehyn, L.N. *Propusknaia sposobnost avtomobylnikh doroh* [Carrying capacity of highways]. M.: Transport, 1970, 152 p.

15. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 10.11.2017 № 883 «Pro vnesennia zmin do Pravyl dorozhnoho rukhu» [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated November 10, 2017 No. 883 "On Amendments to the Traffic Rules"]. Available at: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/883-2017-%D0%BF> (Accessed 20 June 2022).

РЕФЕРАТ

Данчук В.Д. Метод оптимізації маршруту вантажних перевезень в містах з використанням інформаційних технологій на основі модифікованого мурашиного алгоритму / В.Д. Данчук, В.В. Сватко, Є. І. Богданець // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий журнал. – К.: НТУ, 2022. – Вип. 3 (53).

Для вирішення проблем маршрутизації вантажних перевезень у великих містах в умовах нестационарної динаміки транспортних потоків на ділянках вулично-дорожньої мережі (ВДМ) запропоновано метод оптимізації маршруту на мережі у вигляді двонаправлено орієнтованого зваженого графа. Метод базується на використанні модифікованого мурашиного алгоритму. Основним елементом модифікації є те, що реалізована можливість асинхронного руху агентів мурашиної колонії з певною швидкістю. Крім цього, також можливе фіксування результатів оптимізації частково пройденого шляху для розрахунку подальшого маршруту при зміні умов руху цих агентів. Це дозволяє здійснювати управління процесом оптимізації маршруту з урахуванням динамічного стану ВДМ, що пов'язаний із суттєвими змінами швидкості руху транспортних засобів на певних ділянках цієї мережі. Ці зміни швидкості можуть бути обумовлені підвищенням завантаженості ділянок ВДМ, виникненням заторів, аварійних ситуацій тощо.

Для апробації запропонованого методу здійснені з використанням розробленого програмного забезпечення імітаційні моделювання процесів оптимізації маршруту в рамках задачі комівояжера на прикладі ВДМ м. Києва. При проведенні моделювання було виявлено низку ефектів. Ці ефекти пов'язані з перебудовою оптимальних маршрутів при зменшенні середніх швидкостей руху транспортних засобів на модельних ділянках ВДМ до певних граничних значень, які відповідають певним режимам руху транспортних потоків. Аналіз виявлених ефектів дозволив сформулювати деякі методичні рекомендації щодо прийняття управлінських рішень з питань раціональної організації перевезень вантажів. На підставі аналізу результатів імітаційних досліджень доведена можливість використання методу для вирішення задач ефективного управління процесом перевезень у мегаполісах. Зокрема, застосування цього методу може бути корисним при формуванні оптимальних маршрутів доставки вантажу в онлайн режимі з урахуванням реального стану руху транспорту на ділянках ВДМ

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ТРАНСПОРТНИЙ ПОТІК, ВУЛИЧНО-ДОРОЖНЯ МЕРЕЖА, ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, МУРАШИНИЙ АЛГОРИТМ.

ABSTRACT

Danchuk V.D., Svatko V.V., Bogdanets Y.I. Developing the method of optimizing the route of cargo transportation in cities using information technologies based on the modified ant algorithm. *Visnyk National Transport University. Series «Technical Sciences»*. Scientific journal. – Kyiv: National Transport University, 2022. – Issue 3 (53).

To solve the problems of freight routing in large cities in conditions of non-stationary dynamics of traffic flows on sections of the urban road network (URN), a method of optimizing the route on the network in the form of a bidirectionally oriented weighted graph is proposed. The method is based on the use of a modified ant algorithm. The main element of the modification is that the possibility of asynchronous movement of ant colony agents at a certain speed is realized. In addition, it is also possible to record the results of the optimization of the partially traveled path to calculate the further route when changing the traffic conditions of these agents. This allows you to manage the process of optimizing the route taking into account the dynamic state of the URN, which is associated with significant changes in the speed of vehicles in certain sections of the network. These changes in speed may be due to increased load on the URN areas, the occurrence of congestion, emergencies, and so on.

To test the proposed method, simulations of route optimization processes within the problem of a salesman on the example of the URN in Kyiv were performed using developed software. A number of effects were revealed during the simulation. These effects are associated with the restructuring of optimal routes while reducing the average vehicle speeds on the model sections of the URN to certain limit values

that correspond to certain modes of traffic flow. The analysis of the identified effects allowed to formulate some methodological recommendations for making management decisions on the rational organization of cargo transportation. Based on the analysis of the results of simulation research, the possibility of using the method to solve problems of effective management of the transportation process in megacities is proved. In particular, the application of this method can be useful in the formation of optimal routes for delivery of goods online, taking into account the real state of traffic in the areas of URN.

KEYWORDS: TRAFFIC FLOW, URBAN ROAD NETWORK, INFORMATION TECHNOLOGY, SOFTWARE, ANT ALGORITHM.

АВТОРИ:

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

Сватко Віталій Володимирович, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри інформаційних систем і технологій, e-mail: vsvatko83@gmail.com, тел. +380672351170, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 347а, orcid.org/0000-0002-0712-5688.

Богданець Євгеній Іванович, Національний транспортний університет, аспірант кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки, e-mail: getman.eugeny@gmail.com, тел. +380935155298, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Бойчука, 42, к. 202.

AUTHORS:

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

Svatko V.V., Ph.D., Associate Professor, National Transport University, Associate Professor of the Department of Information Systems and Technology, e-mail: vsvatko83@gmail.com, tel. +380672351170 Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovych-Pavlenko str. 1, of. 347a, orcid.org/0000-0002-0712-5688.

Bogdanets Y.I., National Transport University, PhD student, e-mail: getman.eugeny@gmail.com, tel. +380935155298, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Boychuk str. 42, of. 202.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Костенко А.В., кандидат фізико-математичних наук, доцент, Львівський торговельно-економічний університет, завідувач кафедри комп'ютерних наук, Львів, Україна.

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

REVIEWERS:

Kostenko A.V., PhD (Phys.-Math.), Associate Professor, Lviv University of Trade and Economics, Head of the Department of Computer Science, Lviv, Ukraine.

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