

ОПТИМІЗАЦІЇ ПОШУКУ ШЛЯХІВ ПО ГРАФУ В ДИНАМІЧНІЙ ЗАДАЧІ КОМІВОЯЖЕРА МЕТОДОМ МОДИФІКОВАНОГО МУРАШИНОГО АЛГОРИТМУ

В.Д. ДАНЧУК, В.В. СВАТКО

Запропоновано метод розв'язку задачі пошуку мінімального шляху по графу на основі застосування модифікованого мурашиного алгоритму, в якому довжина ребер двонаправленого орієнтованого графу — змінна величина. З метою оптимізації параметрів імовірно-пропорційного пошуку мінімальної довжини ребер по графу використовується метод локального пошуку.

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

Нині ефективність функціонування більшості підприємств визначається рівнем застосування логістики. Логістика посідає значне місце під час перебудови механізмів господарювання в сучасних ринкових умовах.

Потрібно також зазначити, що задачі маршрутизації є ключовими в галузі транспортних перевезень та логістики. Відомо [1, 2], що в більшості сегментів ринку доставка товару додає до його вартості суму, яка прирівнюється до вартості самого товару. Поряд із цим зауважимо, що використання комп'ютерних методів оптимізації такої доставки виражається економією часто не менше 5–20 % від загальної його вартості.

Проте до теперішнього часу існуючі методи розв'язання задач дискретної оптимізації процесів, що відбуваються в логістичних системах, не є досконалими і не дають однозначних рішень [3, 4].

Також останнім часом розробляються принципово нові наукові підходи розв'язку задач дискретної оптимізації, які базуються на використанні квазіінтелектуальних методів.

Так, наприклад, вважається перспективним застосування для розв'язку транспортних задач та задач складської логістики квазіінтелектуальних методів оптимізації, зокрема методу, який базується на механізмах самоорганізації поведінки мурашиної колонії [5–7].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для перевірки коректності застосування відповідних методів, що розробляються, часто використовується задача комівояжера, як одна з найрепрезентативніших транспортних задач. За умовою цієї задачі необхідно обійти всі вузли з доставки товару та повернутися у вихідне положення. При цьому довжина шляху має бути найкоротшою. Тут довжина маршруту буде зале-

жати від порядку обходу. Кількість варіантів обходу надзвичайно велика навіть за невеликої кількості вузлів. Відомо [6, 8], що за допомогою методів, які базуються на описі поведінки мурашиних колоній, вирішують складні комбінаторні задачі, не зважаючи на те, що окремо кожна мураха веде себе досить просто, рух якої можна описати аналітично. Саме тому моделювання поведінки мурашиної колонії вважається перспективним у вирішенні транспортних проблем.

Мета роботи — розробка ефективного методу оптимізації пошуку шляхів по графу в динамічній задачі комівояжера методом модифікованого мурашиного алгоритму.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Задача комівояжера — одна з основних задач комбінаторної оптимізації, що має широке прикладне застосування. Фактично не існує алгоритмів, що забезпечують одержання якісних її розв'язків особливо при малих часових затратах [4].

Задачу комівояжера можна представити як задачу мінімізації витрат, в якій цільовою функцією будуть транспортні витрати, що знаходяться в прямій залежності від довжини пройденого шляху (маршруту). Саме тому цільовою функцією може бути сумарна довжина пройденого шляху.

Автоматизація задачі комівояжера на сьогодні вирішена не повністю, у зв'язку з тим, що методи, які застосовуються для її розв'язку неефективні.

Результатом постійного пошуку найефективніших методів розв'язку задачі комівояжера стало використання біонічних алгоритмів, у тому числі, еволюційних та генетичних [9, 10]. Відмінністю мурашиних алгоритмів є їх робота з набором альтернативних розв'язків та часткова незалежність від конкретного виду цільової функції. Результати деяких експериментальних досліджень довели високу продуктивність цих алгоритмів, а на деяких контрольних прикладах — їх беззаперечну перевагу над існуючими методами.

Нехай локальні правила поведінки мурах при виборі маршруту описуються таким чином [11]:

- Мурахи мають власну «пам'ять». Оскільки кожне місто може бути відвідане лише один раз, то в кожній мурахи є список вже відвіданих міст — список заборон. Нехай $J_{i,k}$ — список міст, які необхідно відвідати мурашиному агенту k , що знаходиться в місті i .
- Мурахи мають «зір» — видимість є евристичним бажанням відвідати місто j , якщо мураха знаходиться в місті i . Вважатимемо, що видимість зворотно пропорційна відстані між містами $\eta_{ij} = 1/D_{ij}$.
- Мурахи здатні розпізнавати запахи. Вони можуть відчувати слід феромону, що підтверджує бажання відвідати місто j з міста i на основі досвіду інших мурах. Кількість феромону на ребрі (i, j) у момент часу t позначимо через $\tau_{ij}(t)$.
- На основі цього можна сформулювати ймовірно-пропорційне правило, яке визначає ймовірність переходу k -ї мурахи з міста i у місто j :

$$\begin{cases} P_{ij,k}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in J_{i,k}} [\tau_{il}(t)]^\alpha [\eta_{il}]^\beta}, & j \in J_{i,k}, \\ P_{ij,k}(t) = 0, & j \notin J_{i,k}, \end{cases} \quad (1)$$

де α, β — параметри, що задають ваги сліду феромону; при $\alpha = 0$ алгоритм вироджується до жадібного алгоритму (буде обране найближче місто).

Під час виконання алгоритму, який описується формулами (1–4), правило (1) не змінюється, але у двох різних мурах значення ймовірності переходу будуть відрізнятися, тому що вони мають різний список дозволених міст.

- Проїшовши ребро (i, j) , мураха відкладає на ньому деяку кількість феромону, яка має бути пов'язана з оптимальністю зробленого вибору. Нехай $T_k(t)$ — шлях, який пройшла мураха k до моменту часу t , $L_k(t)$ — довжина цього шляху, а Q — параметр, що має значення порядку довжини оптимального шляху. У цьому випадку кількість відкладеного феромону може бути задано у вигляді:

$$\Delta \tau_{ij,k}(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k(t)}, & (i, j) \in T_k(t), \\ 0, & (i, j) \notin T_k(t). \end{cases} \quad (2)$$

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

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-p)\tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t); \quad \Delta \tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij,k}(t), \quad (3)$$

де m — кількість мурах у колонії.

На початку розв'язку кількість феромону на ребрах прийматиметься рівною невеликій кількості. Загальна кількість мурах залишається постійною та рівною кількості міст. Кожна мураха починає маршрут зі свого міста [11].

Додаткова модифікація алгоритму можлива у випадку введення так званих «елітних» мурах, котрі підсилюють ребра найкращого маршруту, знайденого на початку роботи алгоритму. Позначимо через T^* найкращий поточний шлях через L^* — його довжину. Тоді, якщо в колонії є e елітних мурах, то ребра маршруту отримають додаткову кількість феромону

$$\Delta \tau_e = e Q / L^*. \quad (4)$$

Багаторазовість взаємодії реалізується ітераційним пошуком маршруту комівояжера одночасно декількома мурахами згідно з [12]. З метою підвищення ефективності застосування методу мурашиного алгоритму для розв'язку задачі комівояжера запропоновано його модифікацію, пов'язану із застосуванням оптимізації управляючих параметрів (α, β, ρ) шляхом використання методу локального пошуку.

Інтерпретуючи задачу комівояжера до реальних обставин, можна сказати, що цільовою функцією є найкоротший знайдений маршрут. Кількість місць призначення (а в реальній задачі йдеться про склади або супермаркети з доставки товарів) змінюється в залежності від потреби від 5 до 15. Таким чином кількість вершин графу визначає кількість складів, які необхідно відвідати транспортному засобу для того, щоб доставити товар. Окрім того, місце виїзду та повернення транспортного засобу може відбуватись з будь-якого складу. Тому кількість вершин графу збігається з кількістю складів, в які необхідно розвезти товар, а ребра між цими вершинами являють собою відстані між цими складами. Отже, отримуємо матрицю відстаней визначеної розмірності. У такому вигляді ми можемо говорити про класичну задачу комівояжера.

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

В якості тестової системи використовувалась робоча станція з процесором Intel® Celeron® D CPU 3.06 ГГц та 512 МБ оперативної пам'яті. У межах запропонованого алгоритму розроблено програмний комплекс на мові Delphi 7.

Перед початком запуску роботи алгоритму приймаються такі умови:

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

Побудова маршруту транспортного засобу здійснюється покроково шляхом вибору наступного пункту до того часу, доки не будуть пройдені всі міста. З самого початку маршрут починається з міста, а його список пройдених міст порожній. Мураха обирає наступне місто зі списку доступних, після чого оновлюється цільова функція, тобто пройдена відстань. Після чого знову здійснюється вибір наступного доступного міста. Мураха повертається у вихідне місто, у випадку проходження всіх міст. Сумарна довжина маршруту розраховується як значення цільової функції повного маршруту, пройденого мурахою. Алгоритм мурашиних колоній будує повний маршрут

для поточної мурахи, перед тим як наступна мураха почне свій рух. Це продовжується до того часу, доки раніше визначена кількість мурах не побудує свої маршрути.

Для проведення порівняльного аналізу визначеної задачі в роботі використовувались реальні дані про місця розташування складів, транспортні засоби, відстані між цими об'єктами, а також середні швидкості. Алгоритм мурашиної колонії було застосовано для пошуку найкоротшого шляху, а також для пошуку найшвидшого шляху під час доставки товарів до покупців.

Матриця відстаней між складами та підприємством ЗАТ «Птахофабрика Київська» наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Матриця відстаней між складами та ЗАТ «Птахофабрика Київська» (у км)

Склади	ЗАТ «Птахофабрика Київська»	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
		ЗАТ «Птахофабрика Київська»	0	17	16	28	17	23	19	25	15	32	16	34	15
1	17	0	15	20	5	6	2	23	8	15	15	16	10	9	15
2	16	15	0	16	10	21	17	14	13	22	1	24	15	17	20
3	28	20	16	0	25	21	18	2	28	6	16	8	30	13	8
4	17	5	10	25	0	11	7	28	3	20	10	21	5	14	20
5	23	6	21	21	11	0	3	24	14	16	21	17	16	10	16
6	19	2	17	18	7	3	0	21	10	13	17	14	12	7	13
7	25	23	14	2	28	24	21	0	31	7	14	9	32	15	9
8	15	8	13	28	3	14	10	31	0	23	13	24	8	10	15
9	32	15	22	6	20	16	13	7	23	0	22	2	25	9	4
10	16	15	1	16	10	21	17	14	13	22	0	24	10	16	21
11	34	16	24	8	21	17	14	9	24	2	24	0	25	7	3
12	15	10	15	30	5	16	12	32	8	25	10	25	0	18	24
13	25	9	17	13	14	10	7	15	10	9	16	7	18	0	6
14	30	15	20	8	20	16	13	9	15	4	21	3	24	6	0

Відстані між об'єктами є постійними та не змінюються з часом. Граф середніх швидкостей містить інформацію про середню швидкість між двома пунктами призначення (рис. 1). Сам рух із однієї точки в іншу складається з декількох частин різної довжини та різної швидкості. Таким чином, на основі цих даних можна визначити середню швидкість між пунктами призначення.

Середні швидкості між двома пунктами доставки товару є змінною величиною, яка враховує реальну ситуацію на автомобільних шляхах. Тому довжина ребер двонаправленого орієнтованого графу середніх швидкостей є також змінною величиною, а сам граф, враховуючи реальну обстановку на дорогах, змінюється з часом.

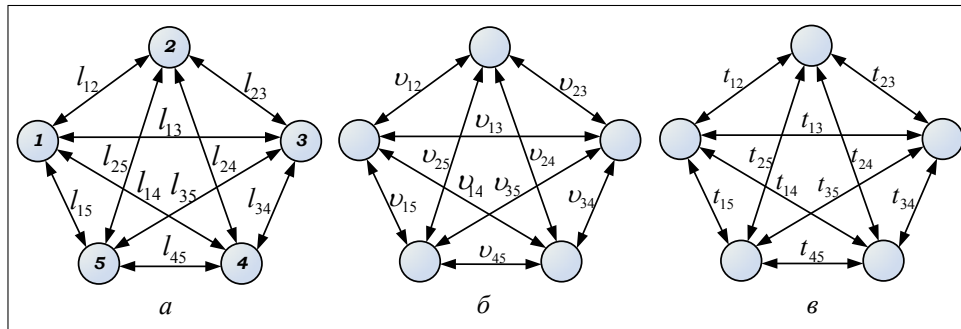


Рис. 1. Двонаправлено орієнтовані графи: а — відстані між об'єктами; б — середні швидкості між об'єктами; в — часові затрати між об'єктами

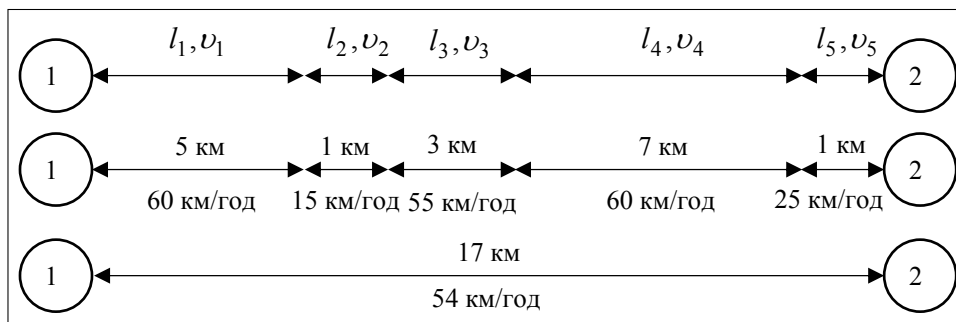


Рис. 2. Визначення середніх швидкостей між пунктами призначення: 1 — ЗАТ «Птахофабрика Київська», 2 — склад 1

Як приклад, на рис. 2 показано визначення середніх швидкостей між пунктами ЗАТ «Птахофабрика Київська» та склад 1. Тут шлях, що сполучає ці пункти, розбивається на п'ять ділянок різної довжини, на яких транспорт має різні середні швидкості. При цьому треба зауважити, що середні значення швидкостей руху транспорту вибирались реальними на основі даних, отриманих за допомогою програмного комплексу GLOBUS. Таким чином будувалась матриця середніх швидкостей між складами підприємства ЗАТ «Птахофабрика Київська», які наведено в табл. 2.

У випадку мінімізації часових витрат на доставку товару цільовою функцією буде мінімізація витрат часу під час проходження визначеного маршруту. Тому, маючи дані про довжини шляхів, що сполучають склади підприємства, а також середні швидкості руху по цих ділянках, ми можемо побудувати відповідну матрицю часових витрат (табл. 3).

Визначення часових витрат виконано за такою формулою:

$$t = \frac{l}{v} 60, \quad (5)$$

де t — час, затрачений на проходження маршруту, хв; l — довжина маршруту, км; v — середня швидкість руху транспортного засобу, км/год.

Для більшої наочності час будемо визначати у хвиликах.

Таблиця 2. Матриця середніх швидкостей між складами та ЗАТ «Птахофабрика Київська» (у км/год)

Склади	ЗАТ «Птахофабрика Київська»	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
		ЗАТ «Птахофабрика Київська»	0	54	49	44	47	44	45	25	15	32	45	44	36
1	54	0	38	55	51	52	53	48	46	55	58	58	51	44	40
2	49	38	0	49	56	38	45	58	38	36	39	42	45	56	45
3	44	55	49	0	52	49	53	55	43	57	46	51	55	58	48
4	47	51	56	52	0	55	58	50	41	43	43	51	47	59	58
5	44	52	38	49	55	0	42	49	47	57	45	52	56	45	51
6	45	53	45	53	58	42	0	55	59	54	54	55	55	43	51
7	25	48	58	55	50	49	55	0	44	49	45	50	40	41	45
8	15	46	38	43	41	47	59	44	0	53	54	43	51	56	57
9	32	55	36	57	43	57	54	49	53	0	45	45	47	52	53
10	45	58	39	46	43	45	54	45	54	45	0	56	54	43	45
11	44	58	42	51	51	52	55	50	43	45	56	0	56	59	60
12	36	51	45	55	47	56	55	40	51	47	54	56	0	33	45
13	25	44	56	58	59	45	43	41	56	52	43	59	33	0	57
14	30	40	45	48	58	51	51	45	57	53	45	60	45	57	0

У табл. 4 наведено результати проведених авторами тестових досліджень застосування модифікованого мурашиного алгоритму для розв'язку задачі комівояжера щодо пошуку мінімальних витрат на доставку товару за критерієм відстаней та часів руху транспорту між вузлами, залежно від загальної кількості вузлів.

При цьому зауважимо, що у випадку пошуку найкоротшого шляху (мінімізація довжини обходу вершин) не приймається до уваги час обходу зазначених вершин. Проведені тестові обчислення вказують на те, що при мінімізації відстані між об'єктами час обходу їх може бути досить великим. Тобто, час роботи транспорту суттєво збільшується, і як результат — збільшуються витрати на доставку цього товару. Тому вважаємо доцільним здійснювати також пошук шляху за критерієм мінімізації часових витрат на доставку товару. Слід відмітити, що під час мінімізації часових витрат, довжина отриманого маршруту дещо більша за довжину маршруту при мінімізації самої довжини маршруту (табл. 4).

Таблиця 3. Матриця часових затрат між складами та ЗАТ «Птахофабрика Київська» (у хв)

Склади	ЗАТ «Птахофабрика Київська»	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
		ЗАТ «Птахофабрика Київська»	0	19	20	38	22	31	25	60	60	60	21	46	25
1	19	0	24	22	6	7	2	29	10	16	16	17	12	12	23
2	20	24	0	20	11	33	23	14	21	37	2	34	20	18	27
3	38	22	20	0	29	26	20	2	39	6	21	9	33	13	10
4	22	6	11	29	0	12	7	34	4	28	14	25	6	14	21
5	31	7	33	26	12	0	4	29	18	17	28	20	17	13	19
6	25	2	23	20	7	4	0	23	10	14	19	15	13	10	15
7	60	29	14	2	34	29	23	0	42	9	19	11	48	22	12
8	60	10	21	39	4	18	10	42	0	26	14	33	9	11	16
9	60	16	37	6	28	17	14	9	26	0	29	3	32	10	5
10	21	16	2	21	14	28	19	19	14	29	0	26	11	22	28
11	46	17	34	9	25	20	15	11	33	3	26	0	27	7	3
12	25	12	20	33	6	17	13	48	9	32	11	27	0	33	32
13	60	12	18	13	14	13	10	22	11	10	22	7	33	0	6
14	60	23	27	10	21	19	15	12	16	5	28	3	32	6	0

Таблиця 4. Порівняльний аналіз пошуку мінімальних затрат під час розв'язку задачі комівояжера

Матриця часових затрат			Матриця відстаней			
Кількість вершин	Затрачений час, хв	Довжина, км	Маршрут	Довжина, км	Затрачений час, хв	Маршрут
5	90	74	5→1→3→4→2→5	74	90	5→1→3→4→2→5
7	99	81	6→7→4→3→1→5→2→6	80	100	7→2→5→1→3→4→6→7
10	101	87	3→1→5→9→2→7→6→10→4→	82	135	9→5→2→7→6→10→4→8→
			→8→3			→3→1→9
13	118	95	6→2→5→9→13→1→11→3→8→	95	119	4→12→10→6→7→2→9→5→
			4→10→12→7→6			→13→1→11→3→8→4
15	133	127	1→2→7→6→13→5→9→14→15→	108	140	10→12→14→2→6→7→9→5→
			10→12→8→4→11→3→1			13→1→11→3→4→8→15→10

Таким чином, аналіз результатів розрахунків показав (табл. 4), що в низці випадків оптимізації пошуку довжини по графу за критерієм відстаней витрати часу на доставку товару можуть бути більшими, ніж ті, які отримано під час оптимізації пошуку довжини по графу за критерієм часу. Також час доставки товару є досить важливим параметром, оскільки в більшості випадків саме час роботи транспорту визначає відповідні витрати.

ВИСНОВКИ

Отже, на прикладі конкретного підприємства проведено кількісний порівняльний аналіз результатів застосування зазначених методів дискретної оптимізації процесів розподіленої складської логістики, а саме, процесів доставки товарів за допомогою транспортних засобів на склади підприємства. Результати аналізу вказують на ефективність використання запропонованого підходу. Крім того, врахування змінної довжини ребер графу дозволяє розв'язувати відповідні логістичні задачі в умовах реального стану руху транспорту по автомобільним дорогам. Отримані результати також вказують на перспективність застосування мурашиного алгоритму до розв'язку задач транспортної логістики, що мають велику розмірність вхідних даних.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ковалев В.П. Эффективность грузовых автомобильных перевозок: Состояние, проблемы, перспективы. — Мн.: Беларусь, 1984. — 112 с.
2. Гаджинский А.М. Логистика: учеб. для высш. и средних специальных учеб. заведений. — М.: ИВЦ «Маркетинг». — 2000. — 375 с.
3. Просветов Г.И. Математические методы в логистике. — М.: РДЛ, 2006. — 272 с.
4. Левитин А.В. Метод грубой силы: Задача коммивояжера // Алгоритмы: введение в разработку и анализ (Introduction to The Design and Analysis of Algorithms). — М.: Вильямс, 2006. — [Гл. 3]. — С. 159–160.
5. Dorigo M. Optimization, Learning and Natural Algorithms. PhD Thesis, Dipartimento di Elettronica, Politecnico Di Milano. — Italy. — 1992. — 140 p.
6. Чураков М., Якушев А. Муравьиные алгоритмы. — 2006. — <http://rain.ifmo.ru/cat/data/theory/unordered/ant-algo-2006/article.pdf>.
7. Dorigo M., Maniezzo V., Colnari A. The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents // IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics. Part B. — 1996. — № 1. — 26. — P. 29–41.
8. Штовба С.Д. Муравьиные алгоритмы // Exponenta Pro. Математика в приложениях. — 2003. — № 4. — С. 70–75.
9. Cantu-Paz E. Efficient and Accurate Parallel Genetic Algorithms. — Lawrence Livermore National Lab, 2000. — 167 p.
10. Gaber J., Bakhouya M. An Immune Inspired-based Optimization Algorithm: Application to the Traveling Salesman Problem // Advanced Modeling and Optimization. — 2007. — 9. — № 1. — P. 105–116.
11. Стороженко А.С., Береза А.А. Применение муравьиного алгоритма для решения задачи коммивояжера // Междунар. науч.-практ. интернет-конф., апрель–июнь. — 2006. — С. 56–59.
12. Goss S., Aron S., Deneubourg J.L. and Pasteels J.M. Self-organized shortcuts in the Argentine // Springer Online Journal Archives 1860-2000. — 1989. — 76. — P. 579–581.

Надійшла 10.06.2010