

УДК 519.854

В. С. Дзундза, Г. Й. Михальчук

Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара

ПРОГРАМНА СИСТЕМА РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ МАРШРУТИЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Розглянуто задачу маршрутизації транспортних засобів з часовими вікнами та можливістю кількарізних виїздів транспортних засобів. Запропоновано алгоритм розв'язання задачі. Розроблено програмне забезпечення для побудови маршрутів.

Ключові слова: *маршрутизація транспортних засобів; багаторейсова задача маршрутизації; задача маршрутизації з часовими вікнами; евристичні алгоритми.*

Рассмотрена задача маршрутизации транспортных средств с временными окнами и возможностью многократных выездов транспортных средств. Предложен алгоритм решения задачи. Разработано программное обеспечение для построения маршрутов.

Ключевые слова: *маршрутизация транспортных средств; многорейсовая задача маршрутизации; задача маршрутизации с временными окнами; эвристические алгоритмы.*

The article discusses the Vehicle Routing Problem with Time Windows and Multiple Trips. The algorithm problem's decision was offered. Software for creation of routes was developed.

Keywords: *vehicle routing problem; multiple trips vehicle routing problem; vehicle routing problem with time windows; heuristics.*

Постановка проблеми. Задачі маршрутизації транспортних засобів (Vehicle Routing Problem – VRP) виникають у різних сферах людської діяльності: доставка товару від постачальника замовникам, доставка біоматеріалу від медичних офісів до лабораторного комплексу, транспортування сировини до підприємства та багато інших. Ефективне планування маршрутів дозволяє, з одного боку, забезпечити своєчасне обслуговування клієнтів, з іншого – зменшити витрати на перевезення.

Через різні умови, потреби та обмеження при плануванні маршрутів задача маршрутизації набула багатьох певних варіацій. В роботі розглянуто задачу маршрутизації транспортних засобів з

© Дзундза В. С., Михальчук Г. Й., 2017

часовими вікнами та можливістю кількарізкового виїзду транспортних засобів (Vehicle Routing Problem with Time Windows and Multiple Trips – MTVRPTW). Роботу спрямовано на розробку та реалізацію алгоритму розв'язання цієї задачі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед різновидів задач маршрутизації найбільш дослідженою є задача маршрутизації транспортних засобів з часовими вікнами (Vehicle Routing Problem with Time Windows – VRPTW). У задачах цього класу для кожного клієнта задано певний часовий інтервал, протягом якого транспортний засіб має відвідати клієнта. В роботі [1] наведено докладний аналіз методів та алгоритмів розв'язання VRPTW.

На практиці часто виникає потреба будувати маршрути з можливістю повторного виїзду машини для обслуговування клієнтів. Цей клас задач відомий як багаторейсові задачі маршрутизації (Vehicle Routing Problem with Multiple Trips – MTVRP). Розглядаються комбінації MTVRP з іншими варіантами задач маршрутизації. В роботі [3] запропоновано метод розв'язання багаторейсової задачі маршрутизації з часовими вікнами та можливістю зворотного транзиту (Vehicle Routing Problem with Backhaul, Multiple Trips and Time Window – VRPBMTTW). У цій модифікації враховано можливість повернути частину раніше завезеного вантажу на склад. Актуальною є проблема побудови маршрутів, коли товари поступають на склад протягом дня і мають бути розвезені замовникам. Це означає, що не всі товари доступні на початку горизонту планування. В роботі [4] розглянуто таку задачу з можливістю здійснення багатьох рейсів. Варіант VRP, де замовники розподілені на зони, а транспортний засіб може здійснювати декілька рейсів, досліджено в [5]. Підходи до розв'язання різних варіацій задачі маршрутизації суттєво відрізняються.

Постановка задачі. Задано набір транспортних засобів, один склад, набір клієнтів. Задача полягає у побудові мінімального за витратами плану перевезень будь-якого товару від складу до клієнтів за додаткових обмежень.

1. Кожна одиниця транспорту має обмежену вантажність.
2. Для кожного клієнта задано інтервал часу, протягом якого він очікує на отримання замовлення.
3. Кожен транспортний засіб може здійснювати декілька рейсів.

Основний матеріал. Розглянемо математичну постановку задачі. Позначимо через N кількість клієнтів, яких треба відвідати. Розв'язок задачі маршрутизації транспорту можна подати у вигляді орієнтованого графа $G = (V', A)$,

де $V' = \{V\} \cup \{0, n+1\}$ – множина вершин, що об'єднує множину клієнтів $\{V\}$ та склад, звідки виїжджають і де закінчують свій шлях транспортні засоби;

A – множина спрямованих дуг.

Кожна дуга (i, j) відповідає відстані між точками i та j ($i, j \in V', i \neq j$). З кожною дугою (i, j) будемо асоціювати вартість c_{ij} та час t_{ij} , які можуть включати час, необхідний для обслуговування клієнта i .

Також задано набір транспортних засобів K , де кожна одиниця транспорту має свою вантажність q_k ($\forall k \in K$).

Кожен клієнт i визначає розмір вантажу, який він очікує отримати d_i . Кожен клієнт i має часове вікно $[a_i, b_i]$. Транспортний засіб має прийти до замовника раніше часу b_i . Він може прийти раніше a_i , але клієнт не обслуговуватиметься раніше. Депо також має часове вікно $[a_0, b_0]$. Транспортні засоби не можуть покинути депо раніше часу a_0 і повинні повернутися назад до, або під час b_{n+1} .

Передбачається, що $q_k, a_i, b_i, d_i, c_{ij}$ невід'ємні цілі числа, а t_{ij} передбачаються додатними цілими числами. Передбачається, що нерівність трикутна виконується як для c_{ij} , так і для t_{ij} .

Модель містить два набори змінних розв'язку x_{ijk} та s_{ik} . Для кожної дуги (i, j) , де $i \neq j, i \neq n+1, j \neq 0$, і кожного транспортного засобу k ми визначаємо $x_{ijk} = 1$ тоді і тільки тоді, коли k -й транспортний засіб переїжджає із i -го пункту в j -й. Змінна розв'язку s_{ik} визначається для кожної вершини i та кожного транспортного засобу k , та позначає час, коли транспортний засіб k почав обслуговувати клієнта i . Припускаємо $a_0 = 0$, а тому і $s_{0k} = 0$ для усіх k .

Згідно з [2], математичну модель VRPTW визначимо таким чином:

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} c_{ij} x_{ijk} \rightarrow \min,$$

причому

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V} x_{ijk} = 1, \forall i \in V, \quad (1)$$

$$\sum_{i \in V} d_i \sum_{j \in V} x_{ijk} \leq q_k, \forall k \in K, \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0jk} = 1, \forall k \in K, \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ihk} - \sum_{j \in V} x_{hjk} = 0, \forall h \in V, \forall k \in K, \quad (5)$$

$$s_{ik} + t_{ij} - K(1 - x_{ijk}) \leq s_{jk}, \forall i, j \in V, \forall k \in K, \quad (6)$$

$$a_i \leq s_{ik} \leq b_i, \forall i \in V, \forall k \in K, \quad (7)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in V, \forall k \in K. \quad (8)$$

Умова (1) гарантує, що кожен клієнт має бути відвіданий один раз, умова (2) означає, що не буде перевищено вантажність жодного транспортного засобу. Наступні три рівності (3), (4) і (5) гарантують, що кожен транспортний засіб починає маршрут в депо 0, обслуговує клієнтів і закінчує маршрут у депо $n+1$. Нерівність (6) стверджує, що транспортний засіб k не може прийти до j раніше ніж $s_{ik} + t_{ik}$, якщо він їде з вузла i до вузла j . Нарешті обмеження (7) гарантує, що часові вікна враховані, а (8) вказує можливі значення змінних, які використовуються.

У багаторейсовій задачі маршрутизації передбачається можливість здійснення декількох рейсів кожним транспортним засобом. Виділимо дві цілі: мінімізація використаних транспортних засобів, мінімізація загальної довжини маршрутів. Первісною будемо вважати мінімізацію кількості транспортних засобів.

Розроблено двоетапний алгоритм вирішення задачі MTVRPTW. На першому етапі будується початковий розв'язок, на другому – здійснюється покращення отриманого розв'язку.

Етап конструювання початкового розв'язку ґрунтується на евристичному алгоритмі Соломона II [1]. Евристика II виконує побудову маршрутів послідовно включаючи у поточний маршрут клієнтів, які найменше «погіршують» маршрут з точки зору загальної довжини та часу.

Основною ідеєю запропонованого в роботі алгоритму побудови початкового розв'язку є максимальне заповнення розкладу поточного

транспортного засобу перед тим як починати використовувати наступний транспортний засіб.

Загалом алгоритм конструювання маршруту можна описати в такий спосіб:

1. Для поточного транспортного засобу будуємо маршрут за допомогою евристики II Соломона, з урахуванням часових вікон та обмежень вантажопідйомності автомобіля.
2. Після того як транспортний засіб повернувся до депо, перевіряємо чи є необслуговані клієнти, яких він встигає обслуговувати.
3. Якщо такі клієнти є, то переходимо до кроку 1.
4. Якщо таких клієнтів немає, то вважаємо поточний транспортний засіб «використаним», беремо наступний транспортний засіб і переходимо до кроку 1.

Другий етап роботи алгоритму полягає в оптимізації побудованих маршрутів. Поширеним підходом до покращення початкового розв'язку є застосування методів локального пошуку. В основі таких методів лежить поняття околу припустимого розв'язку. Околом розв'язку Z є набір $N(Z)$ розв'язків, які можуть бути отримані за допомогою модифікації R . Більшість ітеративних методів покращення рішення, що використовуються у транспортній логістиці, пов'язані з заміною ребер. Під околом маршруту R розуміється множина маршрутів, що отримані з маршруту R заміною набору k його ребер іншим набором k ребер. Такі заміни називаються k -обміном, або k -opt. Після того як новий розв'язок визначено, він порівнюється з поточним розв'язком. Якщо новий розв'язок кращий, він замінює поточний розв'язок.

В роботі застосовано 2-opt алгоритм (рис. 1). Здійснюється заміна двох несуміжних ребер $(i, i+1)$ та $(j, j+1)$ двома ребрами (i, j) та $(i+1, j+1)$, причому частина маршруту між вершинами $i+1$ та j проходиться у зворотному напрямку. Для визначення нового розв'язку використовується стратегія прийняття найкращого (best-accepted), за якою розглядаються усі сусіди і вибирається найкращий з них.

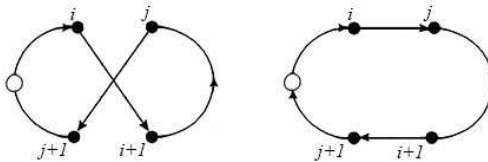


Рисунок 1 – 2-opt обмін

Розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє вирішувати як базову задачу маршрутизації, так і її варіанти, що отримані за рахунок додавання умов у вигляді часових вікон та множинних виїздів. На рис. 2 наведено результати роботи програми для MTRVP.

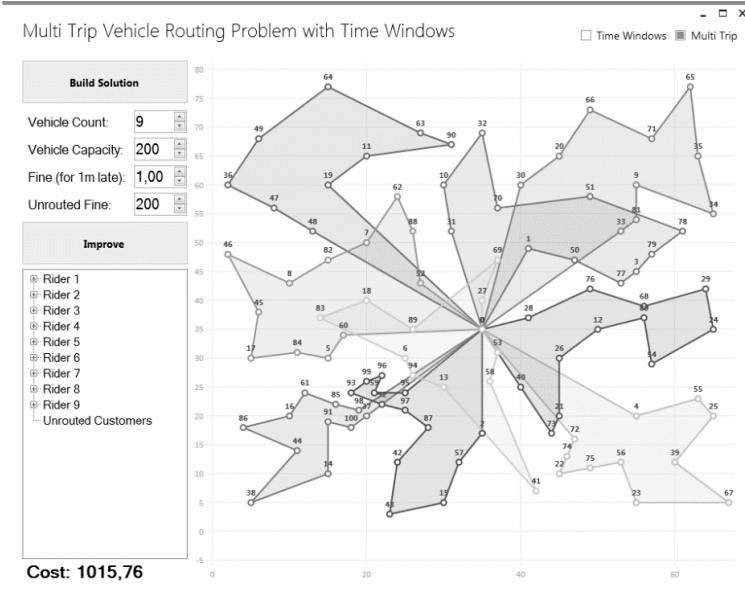


Рисунок 2 – Результат роботи програми для MTRVP

Результатом роботи програми є множина перестановок, що визначає порядок обслуговування клієнтів, множина машин, що призначені на кожен маршрут, а також вартість побудованих маршрутів. У разі, коли транспортних засобів не вистачає для побудови припустимого розв'язку, програма повертає множину клієнтів, які не будуть обслуговані.

Для оцінки якості отриманих розв'язків проведено тестування програми на 56 еталонних задачах Соломона [7] для VRPTW. В таблиці 1 наведено кількість машин (K) та довжину побудованого розв'язку (L) для деяких тестових задач.

Таблиця 1 – Результати розв’язання тестових задач Соломона

Проблема	Кращі відомі розв’язки		Отримані розв’язки без МТ		Отримані розв’язки з МТ	
	К	L	К	L	К	L
RC101.25	4	461,1	4	482,3	4	482,3
RC102.25	3	351,8	3	352,9	3	352,9
RC103.25	3	332,8	3	347,2	3	347,2
RC108.25	3	294,5	3	313,9	3	313,9
RC206.25	3	324,0	3	368, 2	2	413,5
C101.25	3	191,3	3	191,8	3	240,1
R101.25	8	617,1	8	630,4	8	630,4
R105.25	6	530,5	6	600,3	6	600,3

Висновки. Розглянуто розширену задачу маршрутизації транспортних засобів, у якій враховуються часові вікна та можливість множинних виїздів транспортних засобів. Запропоновано алгоритм її розв’язання, який є розширенням евристики вставки ІІ Соломона, та дозволяє максимально заповнити розклад кожного задіяного транспортного засобу. Створено програмне забезпечення, яке дозволяє вирішувати базову задачу маршрутизації та її модифікації, що отримані за рахунок додавання додаткових умов у вигляді часових вікон та множинних виїздів. Проведено порівняння отриманих за допомогою програми результатів розв’язання еталонних проблем Соломона, з найкращими відомими результатами. Отримані результати показали, що розв’язки, в яких дозволялася відправка автомобілів на маршрут більш ніж один раз протягом дня, у ряді випадків давали більш якісні результати з точки зору мінімізації кількості автомобілів.

Бібліографічні посилання

1. Bräysy O., Gendreau M. Vehicle Routing Problem with Time Windows, Part I: Route Construction and Local Search Algorithms // *Transportation Science*. 2005. 39. P. 104–118.
2. Solomon M.M. Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints // *Operations Research*. 1987. 35. P. 254–265.
3. Ong J. O. Suprayogi Vehicle Routing Problem with Backhaul, Multiple Trips and Time Window // *Jurnal Teknik Industri*. 2011. 13. P. 1–10.

4. Cattaruzza D., Absi N., Feillet D., Guyon O., Libeaut X. The Multi Trip Vehicle Routing Problem with Time Windows and Release Dates // 10th Metaheuristics International Conference (MIC 2013). Aug 2013. Singapore.

5. Crainic T. G., Gajpal Y., Gendreau M. Multi-Zone Multi-Trip Vehicle Routing with Time Windows // CIRRIELT. 2012. 36. 34 p.

6. Cordeau J. F., Deaulniers G., Desrosiers J., Solomon M. M., Soumis F. VRP with time windows. In: Toth P., Vigo D. (eds.) The Vehicle Routing Problem. Monographs on Discrete Mathematics and Applications, vol. 9. SIAM, Philadelphia. 2002. P. 157–193.

7. VRPTW benchmark problems – URL: <http://w.cba.neu.edu/~msolomon/problems.htm>

Надійшла до редколегії 01.08.2017