УДК 65.012.2
JEL C 690
ORCID ID: 0000-0003-2176-1135
DOI https://doi.org/10.17721/tppe.2022.45.10

Голованенко М.В., канд. екон. наук, доц.
КНУ імені Тараса Шевченка

ПОШУК РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ МАРШРУТИЗАЦІЇ ТРАНСПОРТУ З ОБМЕЖЕННЯМ ВАНТАЖОПІДЙОМНОСТІ (CVRP)

Розглянуто проблему розв'язування задачі маршрутизації транспорту з обмеженням вантажопідйомності (CVRP) за допомогою оптимізаційного пакету Google OR-Tools. Запропоновано інтерфейс на основі Dash-компонентів, який дозволяє забезпечити введення необхідної для постановки та розв'язку задачі інформації в форматі файлів Microsoft Excel, а також забезпечити візуалізацію визначених оптимізаційним пакетом маршрутів у графічному вигляді. Використання розробленого сервісу також дозволяє здійснювати автоматичну побудову матриці відстаней, якщо вхідна інформація про мережу пунктів логістичної системи представлена у вигляді координат розташування цих пунктів.

Ключові слова: *логістика, задача маршрутизації транспорту з обмеженням вантажопідйомності (CVRP), Dash-компоненти, Google OR-Tools.*

Постановка проблеми. Активна фаза агресії проти України спричинила додаткове навантаження на логістичні мережі, які зіткнулися зі значними викликами. Ефективна реакція на ці виклики потребує від логістичних компаній оптимізації їх бізнес-процесів на різних рівнях. Одним з аспектів, що потребує оптимального вирішення, є задача маршрутизації транспорту з обмеженням вантажопідйомності (CVRP). Вказана задача тривалий час відома як невирішена наукова проблема. Хоча універсальний метод, що гарантує пошук оптимального розв'язку цієї задачі досі не запропоновано, існує чимало методів, які дозволяють знайти рішення, достатньою ефективні для застосування в практиці діяльності логістичних компаній. Одним з пакетів, що містить програмну реалізацію існуючих методів розв'язку CVRP, є пакет OR-Tools корпорації Google.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Задача маршрутизації транспорту з обмеженням вантажопідйомності (CVRP) є актуальною науковою проблемою, про що свідчить значна кількість публікацій на цю тематику. Хоча ця задача вперше була сформульована в роботі Данціга Г.Б., Рамсера Дж.Х. ще у 1959 році [1], на сьогоднішній день значна кількість дослідників продовжує пошук її оптимального розв'язку й працює над вдосконаленням відповідного методичного інструментарію. Так, ряд авторів для розв'язку задачі маршрутизації транспорту з обмеженням вантажопідйомності працюють над розвитком методу пошуку ядра [2, 3]. Інші

дослідники вбачають перспективним застосування гібридного генетичного пошуку [4], вдосконалених алгоритмів апроксимації [5], багатоцільового підходу [6] тощо.

Вказані теоретичні та методичні напрацювання оперативно втілюються у різного роду програмних засобах, серед яких можна виділити пакет Google OR-Tools, що містить модуль для вирішення задачі маршрутизації транспорту з обмеженнями на вантажопідйомність транспортних засобів (CVRP) [7].

Невирішені частини проблеми. Попри наявність незаперечних переваг пакету Google OR-Tools, він не позбавлений ряду методичних та технічних особливостей, які перешкоджають його ефективному використанню для вирішення як бізнес, та і навчальних задач. В частині бізнес-задач проблема вирішується професійними розробниками, які пропонують зацікавленим компаніям-користувачам комерційні програмні продукти. Проте, на думку автора, важливим також є опанування майбутніми фахівцями (зокрема, й економічного профілю), що будуть вирішувати логістичні задачі, сучасного оптимізаційного інструментарію. В цій частині існує ряд перешкод, а саме, відсутність інтерфейсу введення даних у зручному форматі (наприклад, у поширеному форматі електронних таблиць Microsoft Excel), відсутність можливості графічної візуалізації розв'язку та ряд інших обмежень пакету.

Отже, **метою** даної роботи є вирішення методичних та технічних проблем застосування пакету Google OR-Tools для розв'язування задачі маршрутизації транспорту з обмеженням вантажопідйомності (CVRP) шляхом розробки окремого онлайн-сервісу.

Методологія дослідження. Для розробки онлайн-сервісу, здатного вирішити визначені проблеми, було обрано популярне на даний час серед дослідників програмне середовище Python. Для побудови графічного інтерфейсу використано Dash-компоненти, які орієнтовані на вирішення задач в сфері обробки даних [8]. В разі, якщо вхідна інформація про мережу пунктів логістичної системи представлена у вигляді координат розташування цих пунктів, розроблений сервіс дозволяє автоматично побудувати два варіанти матриць відстаней – за методом Евклідових відстаней та за методом відстаней Манхетенських кварталів. Для вирішення задачі маршрутизації транспорту з обмеженнями на вантажопідйомність транспортних засобів (CVRP) застосовується оптимізаційний пакет Google OR-Tools [7]. Розроблений онлайн-сервіс дозволяє знаходити розв'язок задачі за даними користувача про координати розташування пунктів логістичної мережі або матрицю відстаней між ними. Разом з тим, для ілюстрації можливостей сервісу можна скористатися стандартним варіантом мережі, який представлено корпорацією Google.

Для розміщення сервісу обрано Google Cloud Platform, чим обумовлюється специфіка веб-адреси цього сервісу, оскільки частково вона генерується автоматично платформою.

Результати дослідження. Доступ до онлайн-сервісу здійснюється за посиланням https://cvrp-pyofygtpma-lz.a.run.app/ [9]. Технічно з цим сервісом можна працювати як з комп'ютера, так і з мобільних пристроїв. При завантаженні сайту відображається ряд опцій, що відображають стандартні налаштування сервісу. До них відноситься:

- тип вхідних даних (координати пунктів або матриця відстаней). За замовчанням обрано матрицю відстаней;
- кількість транспортних засобів (за замовчанням – 4);
- стандартна вантажопідйомність (за замовчанням – 15);
- тип відстані (якщо «тип вхідних даних» обрано «Координати пунктів», тоді можна обрати один зі способів побудови матриці попарних відстаней між пунктами - відстань Манхетенських кварталів або Евклідова відстань).

Розглянемо роботу сервісу на прикладі стандартного варіанту мережі, який представлено корпорацією Google. Для цього тип вхідних даних оберемо «Координати пунктів» й натиснемо кнопку «СТАНДАРТНИЙ ПРИКЛАД». В результаті буде заповнено таблицю з координатами пунктів мережі, потребою в обсягах перевезення вантажу кожного з пунктів (крім центрального депо, яке має номер «0» - для нього й потреба вказана нульова), а також зображено графічний вигляд розташування пунктів цієї мережі (рис. 1).

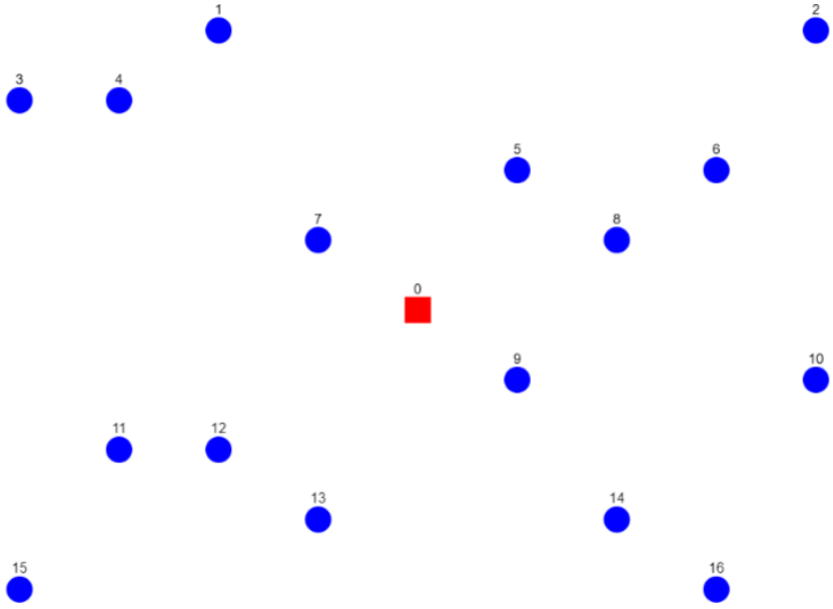


Рис. 1. Розташування пунктів логістичної мережі.

Джерело: побудовано автором за даними ілюстративного прикладу корпорації Google [7]

Як видно з ілюстрації на рис. 1, центральне депо представлене квадратом, а відділення – колами. Наведена на ілюстрації структура мережі є доволі простою й для неї можна пробувати визначити оптимальні маршрути навіть еврістичним шляхом. В разі, якби були відсутні обмеження по вантажопідйомності транспортних засобів, такі розв'язки цілком могли б бути доволі ефективними. Проте для того, щоб програмно знайти розв'язок задачі, слід натиснути кнопку «ОБЧИСЛИТИ МАРШРУТ». В результаті буде заповнено таблицю зі схемою маршрутів руху кожного з доступних транспортних засобів. Проте більш наочно розглядати графічну візуалізацію розв'язку, для чого треба натиснути кнопку «ЗОБРАЗИТИ МАРШРУТ». Результат наведено на рис. 2.

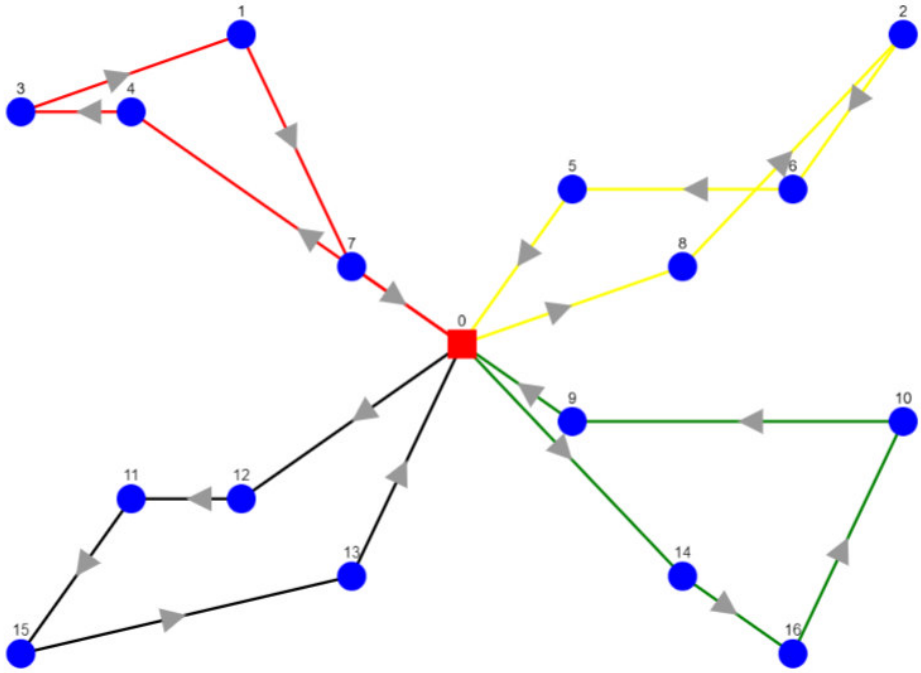


Рис. 2. Розв'язок CVRP для чотирьох автомобілів з матрицею відстаней, побудованої методом Манхетенських кварталів.

Джерело: побудовано автором за даними ілюстративного прикладу корпорації Google [7]

На рис. 2 представлено розв'язок CVRP для чотирьох автомобілів з матрицею відстаней, побудованою методом Манхетенських кварталів. Також сервісом видається інформація про загальну відстань цих маршрутів, яка для даного варіанту становить 6208. Виникає питання, як вплине зміна способу оцінювання відстаней на загальну довжину маршрутів і чи зміниться сама схема маршрутів? Для відповіді на нього слід змінити опцію «тип відстані» на варіант «Евклідова відстань», після чого натиснути кнопки «ОБЧИСЛИТИ МАРШРУТ» та «ЗОБРАЗИТИ МАРШРУТ».

В результаті очікувано зміниться загальна відстань цих маршрутів, яка для варіанту оцінювання за Евклідовою відстанню становитиме 4715. Таке істотне скорочення загальної довжини маршрутів пояснюється тим, що Евклідова відстань дає найменшу оцінку відстані між кожною парою пунктів.

Проте, крім зміни загальної довжини маршрутів, також відбулися зміни самих маршрутів. Для аналізу характеру цих змін слід звернутися до рис. 3.

Як видно з порівняння рис. 2 та рис. 3, зміни торкнулися маршруту, що обслуговує відділення з номерами 2, 5, 6 та 8. Змінився напрямок руху транспортного засобу. Так, якщо для маршруту, отриманого для відстаней Манхетенських кварталів першим відвідувалося відділення 8, а 5 – останнім, то для маршруту за методом відстані Евкліда навпаки, першим відвідується відділення 5, а 8 – останнім.

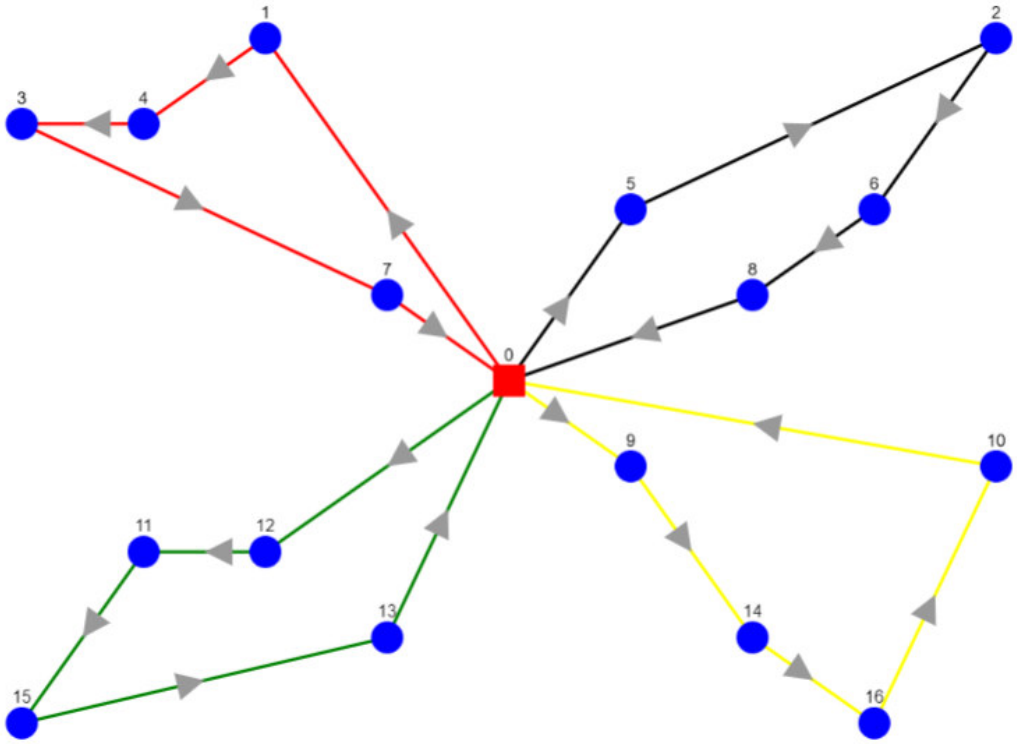


Рис. 3. Розв'язок CVRP для чотирьох автомобілів з матрицею Евклідових відстаней.

Джерело: побудовано автором за даними ілюстративного прикладу корпорації Google [7]

Наступне питання, що заслуговує на увагу – це питання щодо того, як вплине збільшення вантажопідйомності транспортних засобів на загальну довжину маршрутів та їх характер. Для відповіді на нього збільшимо стандартну вантажопідйомність до 20 й натиснемо кнопки «ОБЧИСЛИТИ МАРШРУТ» та «ЗОБРАЗИТИ МАРШРУТ».

Отриманий результат свідчить, що відбулося скорочення загальної довжини маршрутів. А саме, вона зменшиться на 62 до 4653.

Вигляд схеми маршрутів для збільшеної вантажопідйомності до 20 наведено на рис. 4.

Як видно з рис. 4, два з маршрутів принципових змін не зазнали, змінився лише напрямок руху по них (йдеться про маршрути, що охоплюють пункти «1, 3, 4, 7» та «11, 12, 13, 15»). Два інших маршрути зазнали істотних змін.

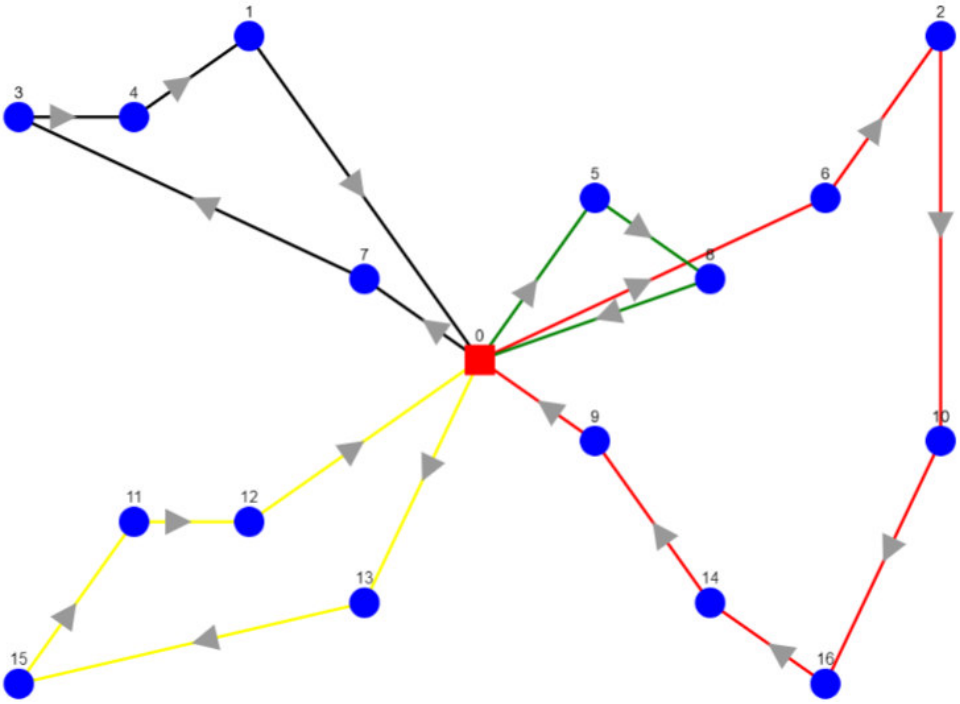


Рис. 4. Розв’язок CVRP для чотирьох автомобілів з матрицею Евклідових відстаней зі збільшеною вантажопідйомністю.

Джерело: побудовано автором за даними ілюстративного прикладу корпорації Google [7]

Отже, розглянутий матеріал проілюстрував простоту використання розробленого онлайн-сервісу, який дозволяє розв’язувати CVRP з використанням пакету Google OR-Tools.

До переваг вказаного сервісу відноситься:

- можливість розгляду стандартного ілюстративного прикладу без необхідності надання вхідної інформації (це може бути корисним в разі роботи з мобільних пристроїв);
- можливість введення вхідних даних шляхом завантаження файлу в форматі Microsoft Excel;
- можливість використання в якості вхідних даних як координат пунктів логістичної мережі, так і матриці відстаней між ними;
- можливість оцінювання відстаней між пунктами двома методами (в разі використання в якості вхідної інформації координат пунктів);
- можливість графічної візуалізації результатів розв’язку, в тому числі й відновлення системи координат мережі пунктів за даними матриці відстаней. Щоправда в останньому випадку таке відновлення, попри збереження інформації про структуру мережі (тобто взаємне розташування пунктів мережі), може призводити до хибної орієнтації цієї мережі на площині;

- можливість доступу й роботи з сервісом як на комп'ютерах, так і на мобільних енергоефективних пристроях, що актуально в умовах цілеспрямовано створюваної агресором енергетичної кризи в Україні;
- україномовний інтерфейс користувача.

Таким чином, вказаний сервіс може бути корисним для ознайомлення з сучасним оптимізаційним інструментарієм в сфері маршрутизації транспорту.

Перспективи подальших досліджень. Попри зазначені переваги розробленого сервісу й оптимізаційного пакету Google OR-Tools, на якому він базується, перспективи подальших досліджень полягають у вирішенні окремих нерозв'язаних технічних проблем. До них можна віднести проблему неподільності вантажів, які очікують на перевезення у відділеннях. Для розглянутого ілюстративного прикладу вказана проблема не була актуальна, оскільки вантажопідйомність транспортного засобу була більше обсягів вантажів на кожному з відділень мережі. Проте на практиці це може виявиться не так. Тоді розв'язок знайдено не буде й уникнути цього можна лише шляхом попередньої обробки інформаційного масиву за рамками онлайн сервісу. Крім того, в налаштуваннях сервісу не винесено вибір методу пошуку оптимального розв'язку, що могло би бути корисним для порівняльного аналізу ефективності застосування різних методів.

Література

1. Dantzig, G.B.; Ramser, J.H. The truck dispatching problem. Manag. Sci. 1959, 6, 80–91..
2. Borčinová, Z. Kernel Search for the Capacitated Vehicle Routing Problem. Appl. Sci. 2022, 12, 11421. https://doi.org/10.3390/app122211421
3. Archetti, C.; Guastaroba, G.; Huerta-Muñoz, D.L.; Speranza, M.G. A kernel search heuristic for the multivehicle inventory routing problem. Int. Trans. Oper. Res. 2021, 28, 2984–3013.
4. Simensen, Martin & Hasle, Geir & Stålhane, Magnus. (2022). Combining hybrid genetic search with ruin-and-recreate for solving the capacitated vehicle routing problem. Journal of Heuristics. 28. 1-45. 10.1007/s10732-022-09500-9.
5. Zhao, Jingyang & Xiao, Mingyu. (2022). Improved Approximation Algorithms for Capacitated Vehicle Routing with Fixed Capacity [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/364953762_Improved_Approximation_Algorithms_for_Capacitated_Vehicle_Routing_with_Fixed_Capacity .
6. Altinoz, Mehmet & Altınöz, Tolga. (2022). Multiobjective problem modeling of the capacitated vehicle routing problem with urgency in a pandemic period. Neural Computing and Applications. 1-18. 10.1007/s00521-022-07921-y.
7. Google OR-Tools [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://developers.google.com/optimization/routing/cvrp
8. Сайт інтерфейсних компонетів Dash [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://dash.plotly.com/introduction
9. Сайт онлайн-сервісу розв'язування задачі маршрутизації транспорту з обмеженням вантажопідйомності (CVRP) [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://cvrp-pyofygtpma-lz.a.run.app/

References.

1. Dantzig, G.B.; Ramser, J.H. The truck dispatching problem. Manag. Sci. 1959, 6, 80–91..

2. Borčinová, Z. Kernel Search for the Capacitated Vehicle Routing Problem. Appl. Sci. 2022, 12, 11421. https://doi.org/10.3390/app122211421
3. Archetti, C.; Guastaroba, G.; Huerta-Muñoz, D.L.; Speranza, M.G. A kernel search heuristic for the multivehicle inventory routing problem. Int. Trans. Oper. Res. 2021, 28, 2984–3013.
4. Simensen, Martin & Hasle, Geir & Stålhane, Magnus. (2022). Combining hybrid genetic search with ruin-and-recreate for solving the capacitated vehicle routing problem. Journal of Heuristics. 28. 1-45. 10.1007/s10732-022-09500-9.
5. Zhao, Jingyang & Xiao, Mingyu. (2022). Improved Approximation Algorithms for Capacitated Vehicle Routing with Fixed Capacity [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/364953762_Improved_Approximation_Algorithms_for_Capacitated_Vehicle_Routing_with_Fixed_Capacity .
6. Altinoz, Mehmet & Altınöz, Tolga. (2022). Multiobjective problem modeling of the capacitated vehicle routing problem with urgency in a pandemic period. Neural Computing and Applications. 1-18. 10.1007/s00521-022-07921-y.
7. Google OR-Tools [Elektronnyi resurs]. - Rezhym dostupu: https://developers.google.com/optimization/routing/cvrp
8. Sait interfeisnykh komponetiv Dash [Elektronnyi resurs]. - Rezhym dostupu: https://dash.plotly.com/introduction
9. Sait onlain-servisu rozviazuvannia zadachi marshrutyzatsii transportu z obmezhenniam vantazhopidiomnosti (CVRP) [Elektronnyi resurs]. - Rezhym dostupu: https://cvrp-pyofygtpma-lz.a.run.app/

Golovanenko M., Ph.D., Associate Professor
Taras Shevchenko National University of Kyiv

SEARCH FOR A SOLUTION OF THE CAPACITATED VEHICLE ROUTING PROBLEM (CVRP)

This paper focuses on the capacitated vehicle routing problem (CVRP), which is a challenging optimization problem faced by logistics companies. The objective of CVRP is to determine the optimal routing of a fleet of vehicles to deliver goods to a set of customers, subject to various constraints such as vehicle capacity and distance. The optimization of CVRP can lead to significant cost savings for logistics companies, which is why it has received a lot of attention from researchers and practitioners.

To solve the CVRP, the author has proposed an interface based on Dash components, which allows users to input information necessary for setting up and solving the problem in the format of Microsoft Excel files. The service accommodates both the coordinates of the logistics network points and the matrix of distances between them as input data. The graphical visualization of the routes determined by the optimization package is also provided, making it easy for users to interpret the results.

One of the key features of the service is its ability to automatically construct the distance matrix, which can be a time-consuming and error-prone process when done manually. The input data for the network of logistics points can be presented in the form of coordinates, and the service can estimate distances in two ways - the method of distances of Manhattan blocks and the method of Euclidean distances. This flexibility allows users to choose the most appropriate method for their particular use case.

The service is hosted on the Google Cloud Platform, which enables users to access and work with it from energy-efficient mobile devices as well as computers. This is particularly important in the context of the energy crisis caused by the aggressor in Ukraine, where energy efficiency is critical. The service's accessibility from energy-efficient devices makes it a valuable tool for users seeking to optimize their operations in the face of energy constraints.

Keywords: *logistics, CVRP, Dash-components, Google OR-Tools*