

## АЛГОРИТМ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ЦИКЛІВ МІЖМІСЬКИХ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

© Оліскевич М. С., 2017

Розглянуто задачу оптимізації транспортних циклів міжміських велико-гуртових перевезень вантажів, які складаються з декількох поїздок. Запропоновано часову модель у вигляді графу станів транспортної системи, а також алгоритм її впорядкування. Описано можливість пошуку взаємно скоординованих маршрутів довільної кількості транспортних засобів і досягнення мінімального їх простоювання при повному виключенні марних пробігів. Показано, що алгоритм дає гарантований точний розв’язок оптимізаційної задачі.

Ключові слова: транспортний цикл, координація, розклад руху, затримки.

M. Oliskevych

## THE OPTIMIZING ALGORITHM OF LONG-DISTANCE FREIGHT TRANSPORTATION CYCLES

The problem of optimizing long-distance transport cycles of large wholesale transport of goods which consists of several trips is considered in the article. A time scheduling model as a transportation system states graph and algorithm of its ordering is presented. There was described the possibility of finding of mutually coordinated transport routes with any number of vehicles and achieve a minimum of downtime with complete exclusion of idle runs. It is shown that the algorithm provides guaranteed definitive solution of the optimization problem.

Keywords: transport cycle, coordination, schedule, delays.

**Формулювання проблеми.** Автомобільні вантажні перевізники, які спеціалізуються на міжміських поїздах, часто стикаються з проблемами простоювання рухомого складу в очікуванні чергового гурту вантажів для відправлення або з марним пробігом автомобілів до наступного завантаження. Обидві ситуації знижують продуктивність парку машин. Для того, щоб запобігти цьому, логістичні служби автомобільних підприємств шукають інформацію про попит на перевезення з прогнозуванням його на тривалий період. Однак знайдені замовлення часто є неузгодженими в часі. Для їх виконання без затримок потрібен відповідний розклад роботи транспортних засобів. Відомі методи його складання є не цілком придатними, оскільки вони не дають можливості визначити оптимальну послідовність транспортних операцій при заданих директивних термінах виконання замовлень і обґрунтуванні доцільної кількості залучених одиниць транспорту та їх завантаження. Такі задачі не дають гарантованого оптимального розкладу за критерієм мінімальних часових затримок. У статті запропоновано вирішення такої проблеми, а також методику і відповідний алгоритм побудови оптимальних взаємопов’язаних транспортних циклів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Оптимізацію транспортних циклів донедавна здійснювали при розв’язуванні транспортної задачі. Зміст її класичного формулювання та модифікацій – це оптимізація вантажопотоків за різними критеріями, зокрема загального вантажообігу, тривалості, витрати коштів та інших ресурсів тощо [1]. У цих задачах накладались додаткові обмеження, наприклад, на пропускну спроможність доріг транспортної мережі. Однак, у більшості з них вантажопотоки розглядали абстраговано від автомобілепотоків, тобто до уваги брали лише ймовірні часові затримки товароруку, а непродуктивні простоювання рухомого складу не

розглядали. Переважна більшість публікацій, які стосуються оптимізації вантажопотоків, обмежена розглядом їх у статистиці – обсяги запасів та потреба у доставці вантажів не залежать від початку й тривалості виконання перевезень. В умовах сучасного конкурентного середовища для конкретного перевізника такі умови задачі не відповідають реальності. Адже навіть за відомого прогнозу замовлень на перевезення для них встановлені часові обмеження. Крім того, далеко не усі вантажі можна вважати однорідними, тобто такими, які з однаковим успіхом можуть бути доставлені споживачеві від будь-якого відправника. Зрештою, якщо вантажопотоки розглядати абстраговано від автомобілепотоків, як було в усіх попередніх дослідженнях, то це спричиняє появу транспортних циклах марного пробігу, що для магістральних вантажних перевезень неприпустимо.

Перевезення вантажів на магістральній мережі без марного пробігу, коли наперед відомі замовлення, середня тривалість виконання, директивні терміни їх виконання, наперед задано кількість залучених транспортних засобів, можна розглядати як багатостадійну систему обслуговування з нефіксованими маршрутами. Для її впорядкування розроблені методи побудови оптимального за швидкодією розкладу без затримок [2]. В окремих випадках задачі побудови таких розкладів є NP-складними в сильному змісті, тобто можуть бути розв'язані із застосуванням евристичних методів [3]. Однак, навіть за такого формулювання проблема ефективного використання магістрального автотранспорту не відповідає реальним виробничим умовам. Основні відмінності: циклічний характер виникнення замовлень і терміну їх виконання; довільна кількість транспортних засобів, задіяних в процесі перевезення; директивні терміни не лише виконання замовлень, а й виникнення запасів вантажів. Ці додаткові умови, з одного боку, ускладнюють алгоритм розв'язання задачі, з іншого – зменшують поле можливих розв'язків.

Побудові розкладу руху автомобілів, які ґрунтуються на оптимальних циклах, присвячено чимало праць. В усіх зроблено висновок, що оптимальний за швидкістю доставки вантажів розклад не гарантує ефективного використання автомобілів [4, 5].

Складанню розкладу руху залізничних потягів присвячені роботи М. Притули та Я. Слейка та інших, які слушно зауважили, що побудова розкладу групи транспортних засобів, здатних до взаємодії, є задачею, яка складно піддається алгоритмізації. Її необхідно розглядати для кожного гурту транспортних засобів, які пов'язані спільною виробничою задачею. У тих випадках, коли оптимальний графік руху для всіх потягів одної групи не завжди збігається з оптимальним розкладом кожного потяга зокрема, варто складну нелінійну задачу розглядати в її конкретних модифікаціях, які є простими і більш придатними для автоматизованого розв'язування [6].

**Формулювання мети.** Метою роботи є розроблення методики і відповідного алгоритму побудови розкладу роботи взаємопов'язаних автопоїздів на магістральних перевезеннях, за циклічного характеру вантажопотоків, який був би максимально наближеним до реальних виробничих умов – з одного боку, та придатним до автоматизації процесу його побудови. Цей розклад має ґрунтуватися насамперед на оптимальних транспортних циклах.

**Виклад основного матеріалу.** Оптимізація транспортного циклу має вигляд такої задачі. Дано транспортну мережу, що складається з  $n$  пунктів, між деякими з яких є безпосереднє сполучення, яке можна оцінити середнім часом  $t_{ij}$ ,  $i, j = 1, \bar{n}$  переміщення автотранспортного засобу (АТЗ). Якщо сполучення немає, то  $t_{ij} = +\infty$ . Цю мережу можна зобразити у вигляді графу  $G(Q, V, U)$ , де  $Q \subset \{q_0, q_1 \mathbf{K} q_n, q_{n+1}\}$  – множина вершин, які відображають операції стосовно транспортних пунктів, включно з двома фіктивними  $q_0$  – формальний початок транспортного циклу,  $q_{n+1}$  – завершення циклу;  $V, U$  – множина ребер та дуг, які відображають часові зв'язки операцій [7]. Часовий зв'язок  $t_{0,j}$  означає обмеження на тривалість циклу утворення гурту вантажів, готових до відправлення, а  $t_{i,n+1}$  – обмеження на тривалість циклу доставки вантажу до  $i$ -го пункту. Впродовж деякого періоду  $T=t_{0,5}$  є відомий прогноз потенційних вантажопотоків на цій мережі у вигляді матриці  $\|q_{i,j}\| \geq 0$ , де  $i$  – номер відправника,  $j$  – номер споживача вантажів. При цьому розмір гурту для відправлення є не меншим, ніж вантажність заданих транспортних засобів:

$q_{i,j} \geq q_n$ . У реальних виробничих умовах відправлення вантажів може бути здійснено одним з трьох способів: 1) без використання складу, за системою “саме вчасно»; 2) з використанням достатньо великого складу, що дає змогу виконувати завантаження у довільний час, коли автомобіль прибуває у пункт відправлення; 3) з використанням обмеженого складу, – в цьому разі вантажі можуть перебувати в пункті відправлення впродовж обмеженого періоду. Для першого випадку існують достатньо ефективні методи побудови детермінованих, точних розкладів за такого порядку відправлення вантажів [2]. Другий спосіб є тривіальним стосовно поставленої мети. Адже затримки доставки вантажів не можуть бути обмеженнями для руху автомобілів, тому що вони можуть прибувати і відбувати з транспортного пункту у будь-який момент часу. Також декілька транспортних засобів, які обслуговують задані вантажопотоки, не пов’язані в часі. Найцікавіший третій спосіб. Він має окреме формулювання, за якого кожен вантажопотік може виникнути періодично зі сталим, або змінним тактом, та є обмеженням для часу прибуття АТЗ під завантаження. До умов задачі додаються такі дані: множина тактів вихідних вантажопотоків  $\{t_{0,1}, \mathbf{K} t_{0,n}\}$  та інтервалів часу, коли ці вантажопотоки можуть зароджуватись впродовж кожного циклу:  $\Delta_{i,j}$ . Враховуючи циклічний характер джерел вантажопотоків, можна обчислити директивні моменти часу, коли виникає готовий до відправки гурт вантажів, а саме:

момент початку:

$$q_{0,i}^{b,k} = (k-1) \cdot t_{0,i}, \quad (1)$$

момент закінчення:

$$q_{0,i}^{e,k} = (k-1) \cdot t_{0,i} + \Delta_{0,i}, \quad (2)$$

де  $k$  – номер циклічного періоду, коли виникає гурт вантажів для перевезення;  $i$  – номер пункту відправлення.

Згідно з (1) і (2), завантаження і доставка вантажів можуть початись не раніше термінів початку  $q_{0,i}^{b,1}, q_{0,i}^{b,2}, \mathbf{K} q_{0,i}^{b,k}$  та завершення  $q_{0,i}^{e,1}, q_{0,i}^{e,2}, \mathbf{K} q_{0,i}^{e,k}$  в  $i$ -му пункті. Якщо АТЗ встигає після  $q_{0,i}^{b,1}$  і до моменту  $q_{0,i}^{e,1}$   $l$ -го періоду прибути під завантаження у  $i$ -й пункт, то він не простоюватиме. Якщо ж момент прибуття автомобіля  $eb_{ij} < q_{0,i}^{b,l}$ , або  $eb_{ij} > q_{0,i}^{e,l}$ , то завантаження потрібно очікувати, і це супроводжуватиметься затримками, відповідно:

$$d_i^{l+1} = q_{0,i}^{b,l+1} - eb_{i,j}, \quad (3)$$

$$d_i^l = eb_{i,j} - q_{0,i}^{e,l}. \quad (4)$$

Прибуття АТЗ під завантаження залежить від того, яку попередню транспортну роботу він виконував, як він скоординований з іншими транспортними засобами, тобто від розкладу виконання транспортно-технологічних операцій. Для того, щоб його скласти, сформульовано таку задачу математичного нелінійного програмування. Якщо у графі  $G$  можна знайти декілька різних шляхів, які починаються з вершини  $q_0$ , проходять через його проміжні вершини так, що повторно заходять в одну і ту саму вершину, тільки по іншому зв’язку і завершуються у вершині  $q_{n+1}$  так, що усі шляхи відображають задані вантажопотоки  $q_{i,j}$ , то існують, очевидно, такі шляхи, які забезпечують мінімальне значення критерію – сумарних затримок усіх АТЗ, які беруть участь у циклі:

$$D_\Sigma = \sum_{i=0}^{n+1} d_i \rightarrow \min. \quad (5)$$

Для пошуку шляхів у графі  $G$  використано змінні  $x_{i,j}$  – кількість поїздок, які автомобіль з вантажністю  $q_n$  повинен зробити від  $i$ -го до  $j$ -го пункту,  $x_{i,j} \in \{0,1\}$ , виконуючи перевезення  $q_{i,j}$ . За значенням бінарної змінної  $x_{i,j}$  можна визначити усі шляхи від фіктивної 0-ї до  $n+1$ -ї вершини графу. Обмеження: тривалість будь-якого циклу має бути не більшою, ніж час прогнозування:

$$\sum_{i=0}^{n+1} \sum_{j=0}^{n+1} t_{i,j} \cdot x_{i,j} \leq T. \quad (6)$$

Обмеження на змінні:

$$\sum_{j=1}^n x_{i,j} - \sum_{i=1}^n x_{i,j} = 0, \quad (7)$$

яке означає, що кількість потоків, які входять до будь-якої вершини, крім кінцевої, дорівнює кількості потоків, які виходять з цієї вершини;

$$\sum_{j=0}^{n+1} x_{0,j} = R, \quad (8)$$

означає, що кількість потоків, які виходять з нульової вершини, дорівнює кількості транспортних засобів, які задано цілим числом  $R$  :

$$\sum_{i=0}^n x_{i,n-1} = -R \quad (9)$$

означає кількість потоків, які входять в кінцеву вершину, дорівнює числу  $R$  , взятому з мінусом:

$$x_{i,j} \geq \frac{q_{i,j}}{q_n}, \quad (10)$$

обмеження на мінімальну кількість поїздок від  $i$ -го до  $j$ -го споживача, яка забезпечить виконання відомого транспортного завдання (обсягу перевезень).

У результаті розв'язання задачі з обмеженнями (6)–(10) можна отримати оптимальну послідовність операцій доставки вантажів за критерієм (5). Числове значення цього критерію залежить лише від кількості ланцюгів операцій, черговості їх виконання, кількості паралельних ланцюгів, що визначається вибором доцільного фронту АТЗ  $R$ . Така велика кількість рішень, які потрібно прийняти для оптимізації циклу є причиною складності алгоритму, який кваліфікують у таких випадках як NP-складну задачу [2]. Для отримання гарантованого точного оптимуму було застосовано інтерактивний підхід, а також неформальні ознаки оптимальності.

Алгоритм складається з таких кроків.

1. Початкові дані: матриці  $\|q_{ij}\|$ ,  $\|t_{ij}\|$  та вектори  $(q_{0,i}^{b,k})$ ,  $(q_{0,i}^{e,k})$ . Задано мінімальне значення часу виконання циклу  $T$ , максимально можлива кількість АТЗ, залучених до процесу –  $R$ .

2. Знайти значення змінних  $x_{ij}$ , для яких виконуються умови (6)–(10). Для цього можна застосувати метод математичного програмування, наприклад, градієнтний [8]. Критерій обчислюють за виразами (3)–(5).

3. Визначити числові значення моментів найбільш раннього початку виконання операцій перевезення  $eb_{ij}$  та найбільш раннього їх завершення  $ef_{ij}$ . Приймають початкове значення  $k=1$ . Якщо момент початку будь-якої операції є менший, ніж будь-яке число з інтервалу  $[q_{0,j}^{b,k}; q_{0,j}^{e,k}]$ , то переходять до наступного значення  $k$ .

4. Повторити крок 3 для нового значення  $k$ . Якщо умова моменту початку операції виконується, то обчислюють часову затримку виконання операції за виразом (3) або (4).

5. Якщо  $R > 1$ , то визначити усі ланцюги, які беруть початок у вершині  $q_0$  і завершуються у  $q_{n+1}$ . Обчислюють тривалість кожного ланцюга як окремого транспортного циклу, враховуючи, що зміщення в часі, а отже, збільшення часової затримки виконання будь-якої транспортної операції у циклічній системі відповідно зменшує часову затримку виконання іншої, з нею пов'язаної операції. Тому можна застосувати для обчислення реальної тривалості циклу вираз:

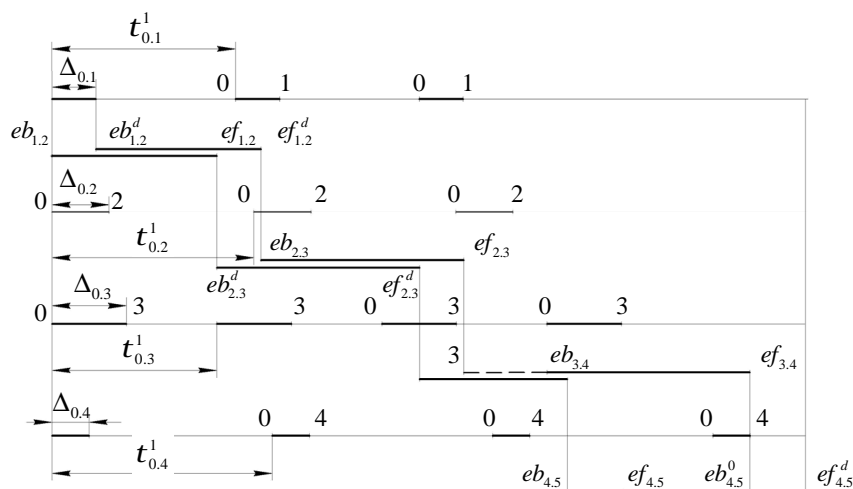
$$T_{0,g} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m t_{i,j,g} + d_{i,g}, \text{ де } i=1 \dots m \text{ – номери операцій, які входять до знайденого } g\text{-го ланцюга.}$$

Серед усіх знайдених ланцюгів визначають той, для якого  $T_{0,g}$  – максимальне. Порівнюють це значення із заданим директивним терміном циклу  $T$ . Якщо  $T_{0,g} > T$ , то переходять до кроку 1 і збільшують число  $R$  на одиницю. Якщо ні – до кроку 6.

6. Обчислюють такі значення моментів початку виконання транспортно-технологічних операцій, за яких вони відповідатимуть умові їх співвідношення з початком відправки вантажів. Ці моменти фактично визначають шуканий розклад оптимального транспортного циклу.

Приклад побудованого розкладу у вигляді циклограми обслуговування чотирьох вантажопотоків  $q_{1,2}$ ,  $q_{2,1}$ ,  $q_{2,3}$ ,  $q_{3,4}$ , за  $R=1$  і циклічного характеру виникнення вантажопотоків, подано на рисунку. На схемі подано два аналогічних ланцюги операцій, один з яких не має прив'язки до

циклів виникнення вантажопотоків, які задано тактами  $t_{0,i}^k$ . Інший заданий моментами початку операцій, що скоординовані відносно цих циклів. Ці моменти на рисунку позначено індексом  $d$ . Ланцюг, зміщений праворуч за віссю часу, не є нерозривним, на відміну від свого аналога.



Циклограма оптимального транспортного циклу одного АТЗ

З рисунка видно, що операції першого ланцюга можна класифікувати як такі, для яких  $q_{0,i}^{b,k} < eb_{i,j} < q_{0,i}^{e,k}$ . Їх можна виконувати без затримки, з резервом часу  $E = q_{0,i}^{e,k} - eb_{i,j} > 0$ . На рисунку це – операції 2 і 3. Інші – із затримкою  $D = eb_{i,j} - q_{0,i}^{b,k} < 0$ . Незалежно від того, як зміщувати в часі моменти початку операцій, сумарне значення  $E + D = const$ . Отже знайдений розклад дає гарантований оптимум (5) і його не можна покращити додатковими коректуваннями. Завжди буде такий варіант розкладу, для якого  $D \rightarrow 0$ , а  $E \rightarrow \max$ . Отримані оптимальні цикли дають змогу обґрунтувати необхідний обсяг інформації про майбутні замовлення. Так, з рисунка 1 видно, що для заданого розкладу достатній час прогнозу для пункту 1 –  $\tau_{0,1}$ , 2 –  $2 \cdot \tau_{0,2}$ , 3 –  $3 \cdot \tau_{0,3}$ ; 4 –  $4 \cdot \tau_{0,1}$ .

**Висновки.** Загальні затримки автотранспортних засобів впродовж циклу залежать від структури маршруту, кількості транспортних засобів, які беруть участь у циклі, тривалості прогнозу. Запропонований алгоритм розроблення розкладу враховує усі ці чинники і, на відміну від відомих методик, дає гарантований оптимум. Він є ближчим до практичних проблем перевізників, а також придатним для використання в автоматизованих системах керування транспортними системами.

1. Прокудін Г. С. Розв'язання нестандартних транспортних задач про призначення / Г. С. Прокудін // Оптимизация производственных процессов: Сб. науч. трудов. – Севастополь: СевНТУ. – 2007. – № 10. – С. 111–115. 2. Танаев В. С. Теория расписаний. Многостадийные системы / В. С. Танаев, Ю. Н. Сотсков, В. А. Струевич. – М.: Наука, Гл 1989. – 328 с. 3. Кузьмінський Р.Д. Алгоритм структурного моделювання прямоочних технологічних процесів розбирання та складання./ Р.Д. Кузьмінський, Р.Д. Кульчицький-Жигайло // Організаційно-технологічна взаємодія підприємств АПК в процесі ремонту сільськогосподарської техніки. – Львів: Львів. с.-г. ін-т, 1991. – С. 12–20. 4. Васильева Е. М., Нелинейные транспортные задачи на сетях / Е. М. Васильева, Б. Ю. Левит, В. Н. Лившиц. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 138 с. 5. Давідіч Ю. О. Розробка графіка руху транспортних засобів при організації вантажних перевезень: навч. посіб. / Ю. О. Давідіч. – Х: ХНАМГ, 2010. – 345 с. 6. Притула Н. Нелінійні транспортні задачі на зважених графах / Н. Притула, Я. Єлейко, М. Притула // Вісник Львів. ун-ту. – Сер. прикл. матем. та інформ. – 2006. – Вип. 11. – С. 244–254. 7. Оліскевич М. С. Оптимізація транспортних циклів залежно від обсягу прогнозованих вантажопотоків / М. Оліскевич // Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2013. – № 5 (194). – Ч. 1 – С. 140–145. 8. Зайченко Ю. П. Дослідження операцій: підручник / Ю. П. Зайченко – К.: Слово, 2006. – 816 с.