

## ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОРГАНІЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НА ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖАХ

*Прокудін Г.С.*, доктор технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, p\_g\_s@ukr.net, orcid.org/0000-0001-9701-8511

*Ремех І.О.*, Національний транспортний університет, Київ, Україна, remekh.inna@gmail.com, orcid.org/0000-0003-3548-6090

## THEORETICAL FUNDAMENTALS OF THE ORGANIZATION OF FREIGHT TRANSPORTATION ON TRANSPORT NETWORKS

*Prokudin G.S.*, Doctor of Technical Sciences, National Transport University, Kyiv, Ukraine, p\_g\_s@ukr.net, orcid.org/0000-0001-9701-8511

*Remekh I.O.*, National Transport University, Kyiv, Ukraine, remekh.inna@gmail.com, orcid.org/0000-0003-3548-6090

**Постановка проблеми.** Найчастіше на практиці вантажні перевезення, як при виконанні внутрішніх [1], так і міжнародних рейсів [2], використовують при плануванні їх маршрутів картосхеми або електронні карти (наприклад Google-карти) розташування пунктів відправлення та доставки вантажів.

Виходячи з цього, задачу організації вантажних перевезень можна розв'язати не тільки на матриці, але і на схемі мережі доріг. Методи розв'язання й у тому й у іншому випадку мають свої переваги та недоліки. Матричний метод досить простий і не вимагає великої кількості обчислень. Зі збільшенням розмірів задачі число ітерацій збільшується приблизно в лінійній залежності від кількості рядків (стовпців). Цей метод варто застосовувати у практичних задачах, оскільки на ньому простіше ставити часткові заборони поставок окремим споживачам, а суто однорідних вантажів, загалом, не існує. Мережевий метод дозволяє врахувати пропускну здатність окремих ділянок мережі, тоді як транспортна задача (ТЗ) у матричній формі враховує лише пропускну здатність вузлів транспортної мережі (ТМ).

Складання матриці кореспонденцій вимагає деякої підготовчої роботи: якщо критерієм оптимальності буде мінімізація транспортної роботи, тобто тонно-кілометрів, то необхідно обчислити відстані від кожного пункту навантаження до кожного пункту вивантаження за альбомом найкоротших відстаней або використати програму знаходження найкоротших шляхів на ТМ. Якщо ж критерієм оптимальності є вартість перевезення в грошовому вираженні, то складання матриці кореспонденцій ускладняється. Для визначення цих показників неможливо використовувати тарифні ставки. Однак підготовчу роботу окупить отримана економія витрат на вантажні перевезення й, крім того, одного разу складена матриця може використовуватися багаторазово.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Існуючі класичні методи розв'язання транспортних задач в їх мережевому представленні, такі як метод потенціалів на дорожньо-транспортній мережі [3, 4], дуже слабо піддаються формалізації, орієнтовані на транспортні задачі малої розмірності і як наслідок не часто застосовуються на практиці.

Більш перспективним напрямом при вирішенні завдань такого типу є підхід, заснований на перетворенні мережевого подання вантажних перевезень на матричне [5] з наступним знаходженням оптимальних планів транспортування вантажів за допомогою сучасних методів та засобів інформаційних технологій [6].

Є два найпоширеніших методи розв'язування ТЗ в мережевій формі: метод скорочення непогодженостей або умовно оптимальних планів А.Л. Лур'є; метод послідовного поліпшення плану Л.В. Канторовича і М.К. Гавурина, який ми і розглянемо в задачі, сформульованій без врахування пропускну здатності транспортних комунікацій.

**Виклад основного матеріалу.** Підготовча робота на ТМ потребує менше часу, якщо навантаження і вивантаження відбувається у вузлах. Тоді для розв'язання всіх задач потрібно один раз скласти макет мережі із зазначенням відстані (довжини кожної ділянки) або вартості перевезення по ній. Якщо навантаження і вивантаження планується ще й на проміжних пунктах, кожному з них

також позначають як вузол. При цьому на мережі буде стільки вузлів, скільки є пунктів, включаючи і проміжні. Назвемо вузли вершинами мережі, а ділянки – ланками або ребрами. Деякі вершини можуть поєднуватися одна з одною ланками. ТМ, на якій розв'язується ТЗ, може мати форму звичайної залізничної мережі, на кожній ланці (ділянці) якої позначена її довжина або вартість перевезення вантажів. Якщо остання на кожній ланці в обох напрямках однакова, мережа називається симетричною. При визначенні мінімального пробігу вантажів мережа завжди симетрична, оскільки відстань від станції  $A$  до станції  $B$  дорівнює відстані від станції  $B$  до станції  $A$ , чого не можна сказати про авіаційні перевезення вантажів. Якщо ж вартість перевезення на кожній ланці мережі різна залежно від напрямку (туди або назад), вершини  $A$   $B$  з'єднують двома орієнтованими дугами з однобічним рухом. Кожній дузі при цьому надається відповідна вартість перевезення [7].

Необхідно розрізнити поняття ланки (ребра) і дуги. Дуга завжди пов'язана з орієнтацією і по ній можливий рух тільки в одному напрямку. Надалі, з'єднуючи дві вершини однією лінією, будемо припускати, що це дві дуги з зустрічним однобічним рухом – це особливо важливо в задачах з обмеженнями пропускної здатності, де рівні вартості або відстані однієї ланки можуть поступово перетворюватися в різні.

Нехай задана ТМ з  $n$  вершинами  $m$  дугами. Позначимо множину постачальників через  $A$ , споживачів через  $B$ , а множину проміжних вершин через  $C$ . Для кожної дуги  $ij$  задана вартість перевезення одиниці вантажу по ній  $c_{ij}$  і її пропускна здатність  $d_{ij}$ . Нехай  $a_i$  – потужність постачальника  $i \in A$ ,  $b_j$  – попит споживача  $j \in B$ . Потрібно з'єднати споживачів з постачальниками за таких умов:

$$\sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\sum_k x_{ik} - \sum_l x_{li} = a_i \quad (i \in A), \quad (2)$$

$$\sum_l x_{jk} - \sum_k x_{lj} = b_j \quad (j \in B), \quad (3)$$

$$\sum_k x_{rk} - \sum_l x_{lr} = 0 \quad (r \in C), \quad (4)$$

$$x_{ij} \leq d_{ij}, \quad (5)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad (6)$$

$$\sum_{i \in A} a_i = \sum_{j \in B} b_j, \quad (7)$$

де  $x_{ij}$  – обсяг вантажу, перевезеного по дузі  $ij$ ;

$k$  – дуги, що виходять із вузла  $i(j)$  і входять в вузол  $k$ ;

$l$  – дуги, що йдуть до вузла  $i(j)$  з вузла  $l$ .

На рис. 1 зображена симетрична транспортна мережа з 12 вершинами і 18 ланками. На кожній ланці проставлене число, яке характеризує вартість перевезення по ній. У круглих дужках біля кожної вершини зазначено обсяги відправлення ( $\square$ ) і прибуття ( $\square$ ) вантажу (відповідно зі знаком „+” та „-”). У деяких вузлах ( $\bigcirc$ ) (проміжних) навантаження або вивантаження може й не бути.

**К р о к 1** – укладання початкового плану, в якому весь вантаж потрібно відправити й усі потреби вершин прибуття задовольнити. Стрілками показаний напрямок вантажопотоків, а числами – їхні обсяги.

Порахуємо вартість реалізації цього плану відповідно до (1):

$$Z_0 = 80 \times 250 + 30 \times 170 + 70 \times 110 + 50 \times 40 + 40 \times 100 + 80 \times 100 + 60 \times 75 + 50 \times 50 + 60 \times 60 + 40 \times 60 + 70 \times 40 = 62600 \text{ одиниць вартості (о.в.).}$$

**К р о к 2** – присвоєння потенціалів вершинам. Умови оптимальності плану такі самі, як і при розв'язуванні задачі в матричній формі методом потенціалів, а саме:

$$v_j - v_i \leq c_{ij}, \text{ якщо } x_{ij} = 0, \quad (8)$$

$$v_j - v_i = c_{ij}, \text{ якщо } x_{ij} > 0. \quad (9)$$

Присвоюємо одній із вершин, наприклад  $1$ , будь-який досить великий потенціал, щоб уникнути негативних чисел (у нашому випадку це 100). Просуваючись дугами в напрямку

проходження вантажопотоку, додаємо до потенціалу попередньої вершини величину вартості ланки; рухаючись проти потоку, відповідну вартість із потоку віднімаємо.

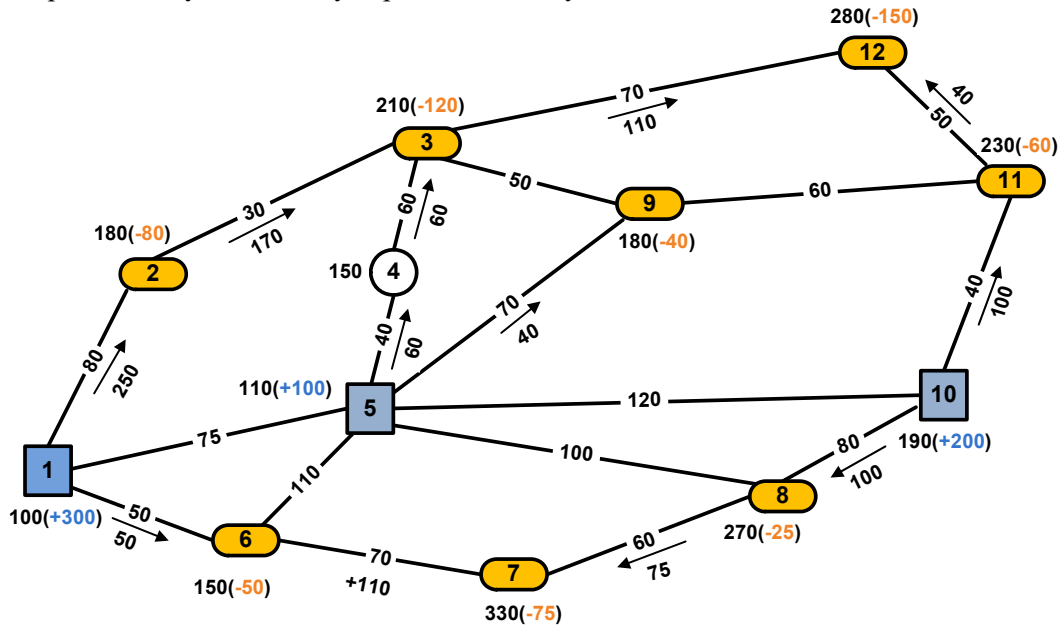


Рисунок 1 – Початковий план перевезень вантажу  
Figure 1 – Initial cargo transportation plan

Потенціал вершини 2 =  $100 + 80 = 180$ ;

-||-

3 =  $180 + 30 = 210$ ;

-||-

4 =  $210 - 60 = 150$ ;

-||-

5 =  $150 - 40 = 110$  і т.д.

Продовжуємо це доти, поки потенціали не будуть присвоєні всім вершинам мережі. Потім перевіряємо умови оптимальності плану (8) на всіх дугах без вантажопотоку.

Дуга 1-5 =  $110 - 100 = 10 < 75$ ;

-||-

5-6 =  $150 - 110 = 40 < 110$ ;

-||-

5-8 =  $270 - 110 = 160 > 100$  (на 60);

-||-

5-10 =  $190 - 110 = 80 < 120$ ;

-||-

6-7 =  $330 - 150 = 180 > 70$  (на 110);

-||-

9-3 =  $210 - 180 = 30 < 50$ ;

-||-

9-11 =  $230 - 180 = 50 < 60$ .

Невідповідності напишемо навпроти відповідної дуги зі знаком «+». У нашій задачі умову (8) порушено на дугах 5-8 (+60) і 6-7 (+110).

**К р о к 3** – вибираємо дугу 6-7 з найбільшим порушенням. Величина його позитивна, отже, необхідно направити вантажопотік у напрямку від меншого потенціалу до більшого. Знаходимо замкнутий контур, до якого входять дуги з потоком і обрана дуга з порушенням, причому це можна зробити єдиним способом. У нашому випадку цей єдиний контур складається з дуг 6-7, 8-7, 10-8, 10-11, 11-12, 3-12, 2-3, 1-2, 1-6. Просуваючись контуром від меншого потенціалу дуги з порушенням 6-7 до більшого (у нас проти годинникової стрілки), знаходимо дугу 8-7 з мінімальним зустрічним вантажопотоком 75 одиниць. Додаємо цю величину до всіх попутних потоків і віднімаємо її з усіх зустрічних. Поліпшений план показаний на рис. 2, а його реалізація становить:

$$Z_1 = 80 \times 175 + 30 \times 95 + 70 \times 35 + 50 \times 115 + 40 \times 175 + 80 \times 25 + 70 \times 75 + 50 \times 125 + 60 \times 60 + 40 \times 60 + 70 \times 40 = 54350 \text{ о.в.}$$

Вартість поліпшеного плану можна ще обчислити так: відняти від значення вартості попереднього плану добуток максимальної величини невідповідності умові оптимального плану (8) на одній з дуг мережі на величину мінімального зустрічного потоку на одній з дуг побудованого замкнутого контуру, тобто у нашому випадку:

$$Z_1 = Z_0 - 110 \times 75 = 62600 - 8250 = 54350 \text{ о.в.}$$

Кроки 2 і 3 почергово повторюють доти, доки не стане дуг з порушенням умови (8). Надалі, на кроці 2 не потрібно знову присвоювати потенціали всім вершинам мережі, а досить виправити їх

лише в тих вершин, куди вантажопотік підійшов з іншого напрямку. У нашому випадку це стосується лише вершини 7 (див. рис. 2).

Після виправлення плану залишилося порушення на дузі 5–8. Замкнутий контур складається тепер з таких дуг: 5–8, 10–8, 10–11, 11–12, 12–3, 4–3, 5–4.

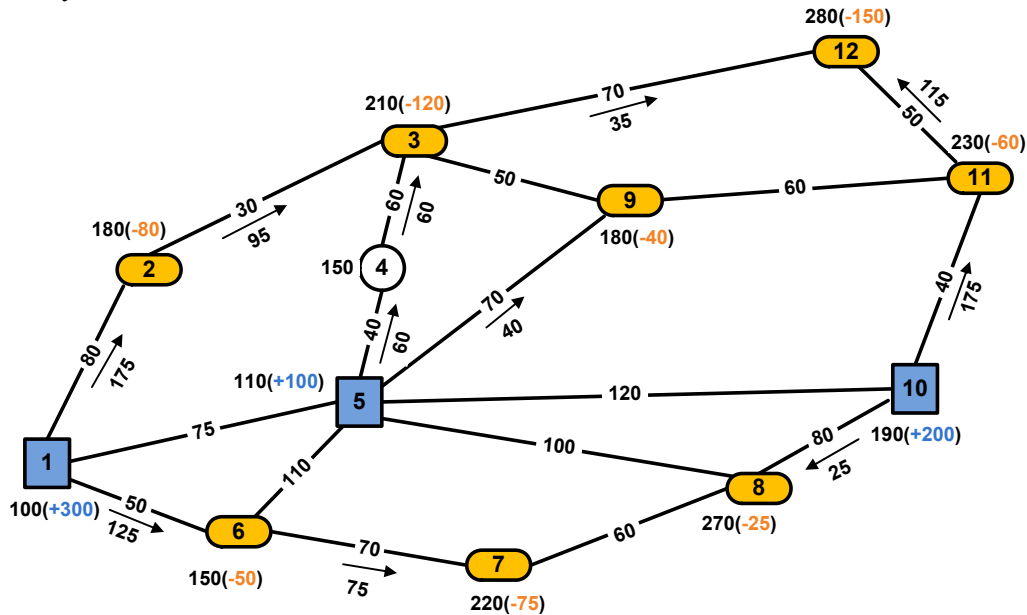


Рисунок 2 – Поліпшений план перевезень вантажу  
Figure 2 – Improved cargo transportation plan

Напрямок руху – проти годинникової стрілки. Мінімальний зустрічний потік дорівнює 25 о.в. на дузі 10–8. Новий план показаний на рис. 3 є оптимальним, тому що немає на жодній дузі порушень умови (8).

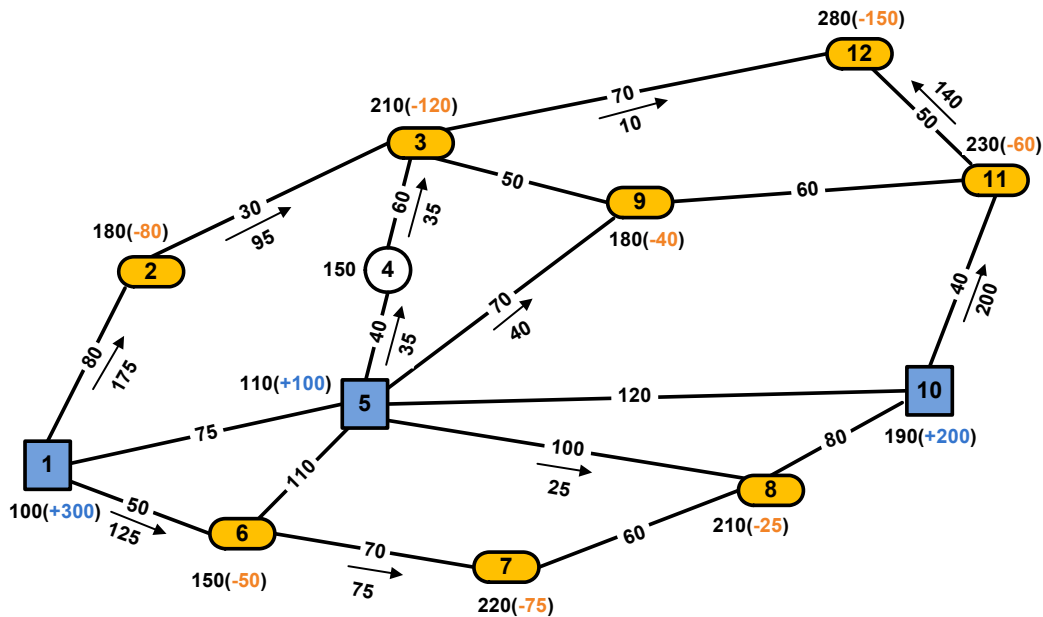


Рисунок 3 – Оптимальний план перевезень вантажу  
Figure 3 – Optimal cargo transportation plan

Вартість його реалізації становить:

$$Z_2 = Z_1 - 60 \times 25 = 54350 - 1500 = 52850 \text{ о.в.}$$

За дві ітерації отримана економія порівняно з початковим планом в  $110 \times 75 + 60 \times 25 = 9750$  о.в. (наприклад, ткм).

Зобразимо на рис. 4 тільки дуги, по яких проходять вантажопотоки. У цій частині мережі немає жодного замкнутого контуру і вона називається деревом.

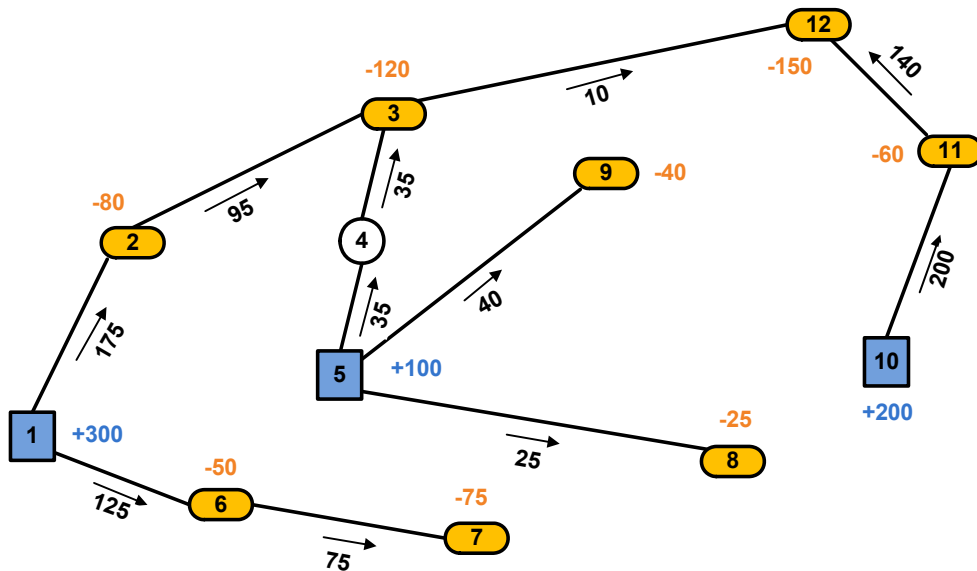


Рисунок 4 – Вантажопотоки оптимального плану перевезень  
 Figure 4 – Cargo flows of the optimal transportation plan

Необхідно навести два важливих правила [8]:

- в оптимальному плані перевезень одного вантажу на мережі без обмежень пропускної здатності завжди утвориться дерево з кількістю ланок  $n-1$ , де  $n$  – число вершин на мережі;
- на мережі, яка є деревом, планувати перевезення досить просто: потрібно дотримуватися тільки однієї умови – не допускати зустрічних перевезень. Тому, розв'язуючи закриті транспортні задачі (тобто, задачі зі збалансованими пропозицією та попитом продукції), частину мережі, яка є деревом, можна замінити крапкою.

Дерево, утворене дугами з вантажопотоком, називатимемо базисом; дуги, з яких воно утворене, – базисними, а інші дуги – небазисними. Правило, аналогічне ТЗ в матричній формі: завжди можна знайти оптимальне рішення, що є базисним. Тому початковий план перевезень також повинен бути базисним і не мати замкнутих контурів.

Випадок виродження. У деяких задачах дуги з вантажопотоками можуть утворити два дерева, не з'єднаних один з одним. Тоді їх об'єднують дугою з нескінченно малим або нульовим потоком, яку додають до базису, і за нею визначають потенціали. Оптимальний план перевезень для такої ситуації показаний на рис. 5.

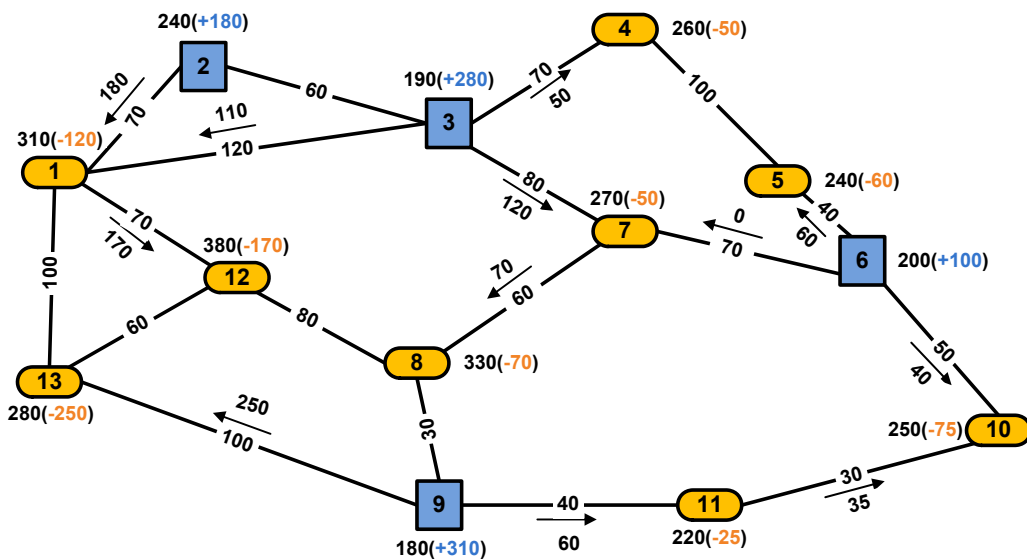


Рисунок 5 – Випадок виродження плану перевезень  
 Figure 5 – The case of degeneracy of the transportation plan

Вартість його реалізації становить:

$$Z_{opt} = 70 \times 180 + 120 \times 110 + 70 \times 170 + 70 \times 50 + 80 \times 120 + 60 \times 70 + 40 \times 60 + 50 \times 40 + 30 \times 35 + 40 \times 60 + 100 \times 250 = 87850 \text{ о.в.}$$

Однак перевірити його на оптимальність можна лише присвоївши всім вершинам потенціали. Базисні дуги 6–5, 6–10, 9–11, 9–13 утворюють дерево, непов'язане з іншим деревом, складеним також із базисних дуг 2–1, 3–1, 1–12, 3–4, 3–7, 7–8. Щоб об'єднати їх, спрямуємо нульовий потік по дузі 6–7 і почнемо присвоювати потенціали від вершини 6, якій призначимо потенціал 200.

Виявлено два порушення умови оптимальності (8) на небазисних дугах 13–12 і 9–8; ми обираємо останнє з максимальним значенням невідповідності (+120, див. рис. 5). У цьому випадку потік необхідно спрямувати від вершини 9 до вершини 8. Замкнутий контур укладатиметься, відповідно, з дуг 9–8, 7–8, 6–7, 6–10, 11–10 і 9–11. Мінімальний зустрічний потік дорівнює 0.

Переміщаємо нульовий потік з дуги 6–7 на дугу 9–8 і перераховуємо потенціали, як показано на рис. 6. Порушень умови (8) на мережі більше немає, отже, запропонований план перевезень оптимальний.

На небазисній дузі 4–5 різниця потенціалів вершин (240–140) дорівнює вартості перевезень на цій дузі (100), отже є ще одне альтернативне рішення зі здійснення перевезень вантажу. Ми знайдемо його, якщо побудуємо замкнутий контур, до якого входить ця небазисна дуга 4–5, а саме: 4–5, 65, 6–10, 11–10, 9–11, 9–8, 7–8, 3–7 і 3–4 і зробимо відповідний перерозподіл вантажопотоків (рис. 7).

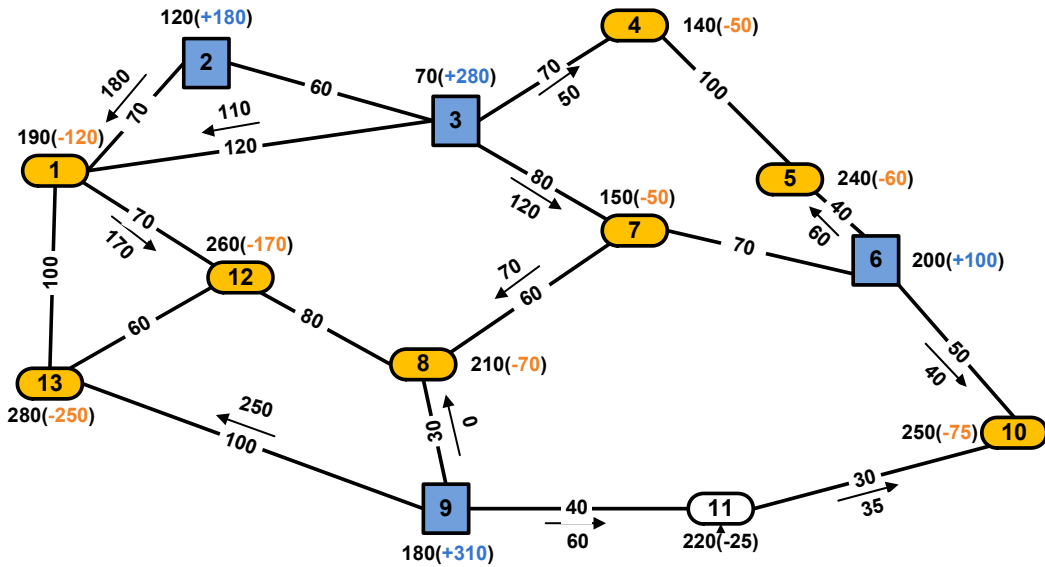


Рисунок 6 – Усунення випадку виродження плану перевезень  
Figure 6 – Elimination of the case of degeneracy of the transportation plan

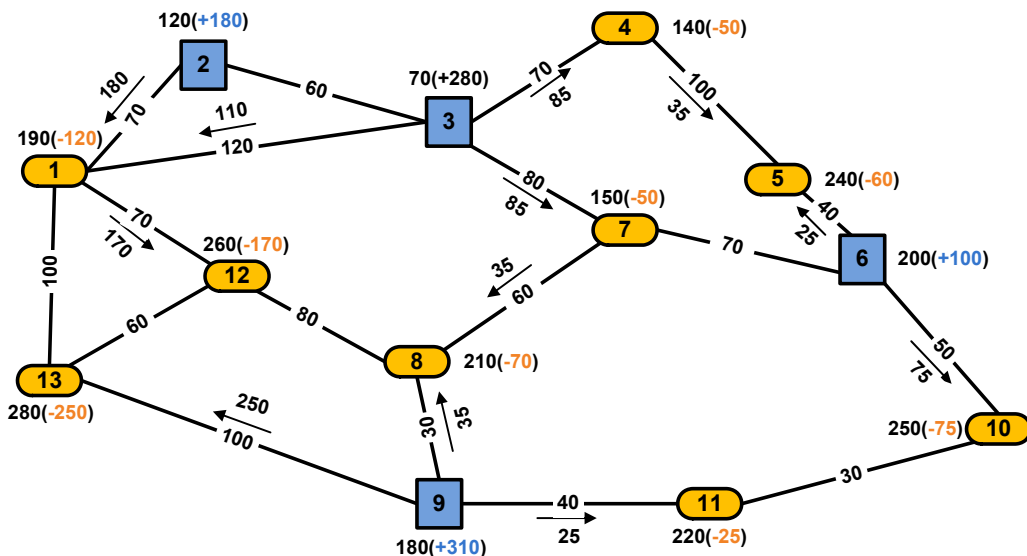


Рисунок 7 – Альтернативний оптимальний план перевезень  
Figure 7 – Alternative optimal transportation plan

Вартість його реалізації також становить 87850 о.в.:

$$Z_{\text{opt}} = 70 \times 180 + 120 \times 110 + 70 \times 170 + 70 \times 85 + 80 \times 85 + 100 \times 35 + 40 \times 25 + 50 \times 75 + 30 \times 35 + 60 \times 35 + 40 \times 25 + 100 \times 250 = 87850 \text{ о.в.}$$

**Висновки.** На основі розгляду теоретичних засад організації вантажних перевезень на транспортних мережах отримані результати, які полягають в наступному:

1. Сформульована загальна математична модель представлення вантажних перевезень на транспортних мережах припускає два найпоширеніших методи розв'язування ТЗ в мережевій формі: метод скорочення непогодженостей або умовно оптимальних планів А.Л. Лур'є та метод послідовного поліпшення плану Л.В. Канторовича і М.К. Гавурина, який і був розглянутий в задачі, сформульованій без врахування пропускної здатності транспортних комунікацій.

2. Задачу організації вантажних перевезень можна розв'язати не тільки в матриці, але і на схемі мережі доріг, тобто на ТМ. Методи розв'язання її у тому й у іншому випадку мають свої переваги та недоліки. Матричний метод досить простий і не вимагає великої кількості обчислень. Зі збільшенням розмірів задачі число ітерацій збільшується приблизно в лінійній залежності від кількості рядків (стовпців). Цей метод варто застосовувати у практичних задачах, оскільки на ньому простіше ставити часткові заборони поставок окремим споживачам, а суто однорідних вантажів, загалом, не існує. Мережевий метод дозволяє врахувати пропускну здатність окремих ділянок мережі, тоді як ТЗ у матричній формі враховує лише пропускну здатність вузлів ТМ.

3. Організація вантажних перевезень на ТМ одного виду вантажу без обмежень пропускної здатності включає наступні кроки:

*крок 1* – укладання початкового плану, в якому весь вантаж потрібно відправити й усі потреби споживачів задовольнити;

*крок 2* – присвоєння потенціалів вершинам;

*крок 3* – вибір незавантаженої дуги з найбільшим порушенням умови оптимальності. Величина його позитивна, отже, необхідно направити вантажопотік у напрямку від меншого потенціалу до більшого. Знаходимо замкнутий контур, до якого входять дуги з потоком і обрана дуга з порушенням, причому це можна зробити єдиним способом. Просуваючись контуром від меншого потенціалу дуги з порушенням до більшого, знаходимо дугу з мінімальним зустрічним вантажопотоком. Додаємо цю величину до всіх попутних потоків і віднімаємо її з усіх зустрічних.

*Кроки 2 і 3* почергово повторюють доти, доки не стане дуг з порушенням умови оптимальності.

4. Плануючи перевезення на ТМ без обмежень пропускної здатності, фактичну пропускну здатність окремих дуг не враховують, хоча можливо, що окремі з них матимуть навантаження, з яким не впораються. Якщо ж і з'являться перевантажені ділянки, то витрати на спрямування вантажопотоків повз них кружним шляхом будуть невеликими. Тому планування перевезень одного вантажу на мережі без обмежень пропускної здатності мають велике практичне значення, а на мережі з обмеженнями пропускної здатності – лише методичне. Дійсно, важко собі уявити, щоб один вантаж міг повністю заповнити пропускну здатність дуги.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Мосьпан Н.В. Формування стратегій автотранспортних підприємств по обслуговуванню разових замовлень на перевезення вантажів у міжміському сполученні : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.22.01 – транспортні системи, ХНАДУ. – Харків, 2018. – 212 с.

2. Прокудін Г.С., Ремех І.О., Майданик К.О. Ефективність застосування системи тягових плечей при перевезенні вантажів у міжнародному сполученні. Systemy i srodki transportu samochodowego. Monografia nr 10. [monographia] pod redakcja naukowa K. Lejdy Politechnika Rzeszowska. Rzeszow. 2017. №10. С.79–86.

3. Кунда Н.Т. Дослідження операцій у транспортних системах. Навчальний посібник для студентів напряму «Транспортні технології» вищих навчальних закладів. – К.: Видавничий дім «Слово», 2008. – 400 с.

4. Воркут А.И. Грузовые автомобильные перевозки. Київ : Вища школа, 1986. 447 с.

5. Прокудін Г.С., Чупайленко О.А., Дудник О.С., Пилипенко Ю.В. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на науковий твір № 92194 «Метод перетворення мережевих моделей процесу вантажних перевезень у матричні моделі». Київ: Мінекономрозвитку України, 20.09.2019. 5 с.

6. Прокудін Г.С. Моделі і методи оптимізації перевезень у транспортних системах. Київ : НТУ, 2006. 224 с.

7. Prokudin G., Chupaylenko O., Dudnik A., Dudnik O, Omarov D. Improvement of the Methods for Determining Optimal Characteristics of Transportation Networks / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. N. 6/3 (84). P. 54-61. (ISSN 1729-3774, DOI:10.15587/1729-4061.2016.85211).

8. Prokudin G., Chupaylenko O., Dudnik O., Dudnik A., Prokudin O., Svatko V. Application of Information Technologies for the Optimization of Itinerary when Delivering Cargo by Automobile Transport / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. N. 2/3 (92). P. 51-59. (ISSN 1729-3774, DOI:10.15587/1729-4061.2016.85211).

## REFERENCES

1. Mospan, N.V. (2018). Formuvannia strategii avtotransportnykh pidpriemstv po obslugovuvanniu razovykh zamovlen na perevezennia vantazhiv u mizhmiskomu spoluchenni. [Formation of strategies of motor transport enterprises on service of one-time orders for transportation of cargoes in long-distance communication]. – KhNADU. Kharkiv. – 212 p. [in Ukrainian].

2. Prokudin, G.S., Remekh, I.O., Maidanyk, K.O. (2017). Efektyvnist zastosuvannia systemy tiagovykh plechei pri perevezennia vantazhiv u mizhnarodnomu spoluchenni. [The effectiveness of the traction arm system in the transportation of goods in international traffic]. – Politechnika Rzeszowska. Rzeszow. № 10. – P.79-86. [in Ukrainian].

3. Kunda, N.T. (2008). Doslidzhennia operatsii u transportnykh systemakh [Operations research in transport systems]. – Vydavnychi dim «Slovo». Kyiv. – 400 p. [in Ukrainian].

4. Vorkut, A.I. (1986). Gruzovye avtomobilnye perezozki. [Freight road transport]. – Higher School. Kyiv. – 447 p. [in Russian].

5. Prokudin, G.S., Chupaylenko, O.A., Dudnik, O.S., Pilipenko, Yu.V. (2019). Svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskogo prava na naukovyi tvir № 92194 «Metod peretvorennia merezhevykh modelei protsesu vantazhnykh perevezen u matrychni modeli». [Certificate of copyright registration for a scientific work № 92194 «Method of converting network models of the freight process into matrix models»]. – Minekonomrozvytku of Ukraine Kyiv. – 5 p. [in Ukrainian].

6. Prokudin, G.S. (2006). Modeli i metody optymizatsii perevezen u transportnykh systemakh. [Models and methods of traffic optimization in transport systems]. – NTU. Kyiv. – 224 p. [in Ukrainian].

7. Prokudin, G., Chupaylenko, O., Dudnik, A., , O, Omarov, D. (2016). Udoskonalennia metodiv vyznachennia optymalykh kharakterystyk transportnykh merezh. [Improvement of the Methods for Determining Optimal Characteristics of Transportation Networks]. Skhidnoevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnologii – Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. № 6/3 (84). – P. 54-61. [in English].

8. Prokudin, G., Chupaylenko, O., Dudnik, O., Dudnik, A., Prokudin, O., Svatko, V. (2018). Zastosuvannia informatsiinykh tekhnologii dlia optymizatsii marshrutu dostavky vantazhiv avtomobilnym transportom. [Application of Information Technologies for the Optimization of Itinerary when Delivering Cargo by Automobile Transport]. Skhidnoevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnologii – Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. № 2/3 (92). – P. 51-59. [in English].

## РЕФЕРАТ

Прокудін Г.С. Теоретичні основи організації вантажних перевезень на транспортних мережах / Г.С. Прокудін, І.О. Ремех // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий журнал. – К.: НТУ, 2022. – Вип. 3 (53).

У даній статті наведено опис теоретичних основ організації вантажних перевезень на транспортних мережах. Задачу організації вантажних перевезень можна розв'язати не тільки на матриці, але і на схемі мережі доріг. Методи розв'язання й у тому й у іншому випадку мають свої переваги та недоліки. Матричний метод досить простий і не вимагає великої кількості обчислень. Зі збільшенням розмірів задачі число ітерацій збільшується приблизно в лінійній залежності від кількості постачальників (споживачів) вантажу. Цей метод варто застосовувати у практичних задачах, оскільки на ньому простіше ставити часткові заборони поставок окремим споживачам, а суто однорідних вантажів, загалом, не існує. Мережевий метод дозволяє врахувати пропускну здатність окремих ділянок мережі, тоді як транспортна задача у матричній формі враховує лише пропускну здатність вузлів транспортної мережі.

Об'єкт дослідження – процес управління вантажними перевезеннями на транспортних мережах.

Мета роботи – вивчення особливостей прийняття рішень з управління вантажними перевезеннями на транспортних мережах одного виду вантажу без обмежень пропускну здатності.



Методи дослідження – метод послідовного поліпшення плану вантажних перевезень на транспортних мережах одного виду вантажу без обмежень пропускну здатності.

Сформульована загальна математична модель представлення вантажних перевезень на транспортних мережах припускає два найпоширеніших методи розв'язування транспортної задачі в мережевій формі: метод скорочення непогодженостей або умовно оптимальних планів А.Л. Лур'є та метод послідовного поліпшення плану Л.В. Канторовича і М.К. Гавурина, який і був розглянутий в задачі, сформульованій без врахування пропускну здатності транспортних комунікацій.

Організація вантажних перевезень на транспортних мережах одного виду вантажу без обмежень пропускну здатності включає наступні кроки: *перший крок* – укладання початкового плану, в якому весь вантаж потрібно відправити й усі потреби споживачів задовольнити; *другий крок* – присвоєння потенціалів вершинам; *третій крок* – вибір незавантаженої дуги з найбільшим порушенням умови оптимальності. Величина його позитивна, отже, необхідно направити вантажопотік у напрямку від меншого потенціалу до більшого. Знаходимо замкнутий контур, до якого входять дуги з потоком і обрана дуга з порушенням, причому це можна зробити єдиним способом. Просуваючись контуром від меншого потенціалу дуги з порушенням до більшого, знаходимо дугу з мінімальним зустрічним вантажопотоком. Додаємо цю величину до всіх попутних потоків і віднімаємо її з усіх зустрічних. *Другий і третій кроки* почергово повторюють доти, доки не стане дуг з порушенням умови оптимальності.

Плануючи перевезення на транспортній мережі без обмежень пропускну здатності, фактичну пропускну здатність окремих дуг не враховують, хоча можливо, що окремі з них матимуть навантаження, з яким не впораються. Якщо ж і з'являться перевантажені ділянки, то витрати на спрямування вантажопотоків повз них кружним шляхом будуть. Тому планування перевезень одного вантажу на мережі без обмежень пропускну здатності мають велике практичне значення, а на мережі з обмеженнями пропускну здатності – лише методичне. Дійсно, важко собі уявити, щоб один вантаж міг повністю заповнити пропускну здатність дуги.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ВАНТАЖНІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ, ТРАНСПОРТНА МЕРЕЖА, МЕТОД ПОСЛІДОВНОГО ПОЛІПШЕННЯ ПЛАНУ, ОПТИМІЗАЦІЯ, ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ.

#### ABSTRACT

Prokudin G.S., Remekh I.O. Theoretical foundations of the organization of freight transportation on transport networks. Visnyk National Transport University. Series «Technical Sciences». Scientific journal. – K.: National Transport University, 2022. – Issue 3 (53).

This article provides a description of the theoretical foundations of the organization of freight transportation on transport networks. The task of organizing freight transportation can be solved not only on the matrix, but also on the diagram of the road network. Solution methods in both cases have their advantages and disadvantages. The matrix method is quite simple and does not require a large number of calculations. As the size of the problem increases, the number of iterations increases approximately linearly depending on the number of suppliers (consumers) of the cargo. This method should be used in practical tasks, since it is easier to set partial bans on deliveries to individual consumers, and purely homogeneous cargoes, in general, do not exist. The network method allows you to take into account the bandwidth of individual sections of the network, while the transport problem in the matrix form takes into account only the bandwidth of the nodes of the transport network.

The object of the study is the process of managing freight transportation on transport networks.

The purpose of the work is to study the features of decision-making in the management of freight transportation on transport networks of one type of cargo without capacity limitations.

Research methods – a method of successive improvement of the cargo transportation plan on transport networks of one type of cargo without capacity limitations.

The formulated general mathematical model of the representation of freight transportation on transport networks assumes two most common methods of solving transport problem in network form: the method of reducing disagreements or conditionally optimal plans by A.L. Lurie and the method of sequential improvement of the plan of L.V. Kantorovich and M.K. Gavurin, which was considered in the problem formulated without taking into account the throughput of transport communications.

The organization of cargo transportation on transport networks of one type of cargo without limitations of throughput includes the following steps: the first step is to draw up an initial plan, in which all the cargo must be sent and all the needs of consumers must be satisfied; the second step is the assignment of potentials to the vertices; the third step is the selection of the unloaded arc with the greatest violation of the optimality condition. Its value is positive, therefore, it is necessary to direct the cargo flow in the direction

from a lower potential to a higher one. We find a closed circuit, which includes arcs with a flow and a selected arc with a violation, and this can be done in the only way. Moving along the contour from the lower potential of the arc with a violation to the higher one, we find the arc with the minimum oncoming cargo flow. We add this value to all passing streams and subtract it from all opposing streams. The second and third steps are alternately repeated until there are arcs with a violation of the optimality condition.

When planning transportation on a transport network without capacity restrictions, the actual capacity of individual arcs is not taken into account, although it is possible that some of them will have a load that they cannot cope with. If congested areas appear, then the costs of diverting freight flows past them in a roundabout way will be small. Therefore, planning the transportation of one cargo on networks without bandwidth limitations is of great practical importance, and on networks with bandwidth limitations – only methodical. Indeed, it is difficult to imagine that one cargo could completely fill the carrying capacity of the arc.

**KEY WORDS:** FREIGHT TRANSPORTATION, TRANSPORT NETWORK, METHOD OF SEQUENTIAL IMPROVEMENT OF THE PLAN, OPTIMIZATION, THREAD CAPACITY.

**АВТОРИ:**

Прокудін Георгій Семенович, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри міжнародних перевезень та митного контролю, e-mail: p\_g\_s@ukr.net, тел. +38(063) 327-02-43, Україна, 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1, к. 430а, orcid.org/0000-0001-9701-8511

Ремех Інна Олександрівна, PhD-аспірант, Національний транспортний університет, асистент кафедри міжнародних перевезень та митного контролю, e-mail: remekh.inna@gmail.com, тел. +38(096) 920-01-92, Україна, 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1, к. 437, orcid.org/0000-0003-3548-6090

**AUTORS:**

Prokudin G.S. Doctor of Technical Sciences, Professor, National Transport University, Head of the Department of International Transportation and Customs Control, e-mail: p\_g\_s@ukr.net, +38(063)327- 02-43, Ukraine, 01010, Kyiv, Omelianovycha-Pavlenka Str., 1, of. 430a, orcid.org/0000-0001-9701-8511

Remekh I.O., PhD candidate, National Transport University, assistant of the department of international transportation and customs control, e-mail: remekh.inna@gmail.com, phone +38(096) 920-01-92, Ukraine, 01010, Kyiv, Omelyanovycha-Pavlenka str., 1, k. 437, orcid.org/0000-0003-3548-6090

**РЕЦЕНЗЕНТИ:**

Мямлін Сергій Віталійович, доктор технічних наук, професор, департамент розвитку і технічної політики АТ «Укрзалізниця», директор, Київ, Україна

Поліщук Володимир Петрович, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри транспортних систем та безпеки дорожнього руху, Київ, Україна

**REVIEWER:**

Miamlin S.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Development and Technical Policy of JSC «Ukrzaliznytsia», Director, Kyiv, Ukraine

Polishchuk V.P., Doctor of Technical Sciences, Professor, National Transport University, Head of the Department of Transport Systems and Road Traffic Safety, Kyiv, Ukraine