



УДК 004.2

**METHODS OF OPTIMIZING CARGO TRANSPORTATION BY HEAVY-DUTY VEHICLES****МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВАНТАЖІВ ВЕЛИКОВАГОВИМИ ТРАНСПОРТНИМИ ЗАСОБАМИ****Vikovych I.A. / Вікович І.А.***d.t.s., prof. / д.т.н., проф.*

ORCID: 0000-0003-0281-158X

**Prykhodko V.E. / Приходько В.Е.***postgraduate student / аспірант*

ORCID: 0000-0002-7582-1693

*Lviv Polytechnic National University, Lviv, Bandery 12, 79000**Національний університет «Львівська політехніка», Бандери 12, 79000*

**Анотація.** У статті розглядаються методи оптимізації перевезення вантажів великоваговими транспортними засобами, які є ключовим аспектом логістики та транспортної інфраструктури. Оптимізація перевезень спрямована на зниження витрат, підвищення ефективності та безпеки транспортування, а також мінімізацію впливу на довкілля. Аналізуються різні підходи до оптимізації, включаючи маршрутне планування, використання сучасних інформаційних технологій, вдосконалення процесів завантаження і розвантаження, а також застосування новітніх транспортних засобів та обладнання. Особлива увага приділяється математичним моделям і алгоритмам, які дозволяють розробляти оптимальні стратегії перевезень. Досліджуються також нормативно-правові аспекти та стандарти, що впливають на організацію перевезень великоваговими транспортними засобами. Викладені рекомендації та висновки можуть бути корисними для транспортних компаній, логістичних операторів та дослідників у галузі транспортної логістики.

**Ключові слова:** великовагові вантажі, вантажівки, вантажність, перевезення, методи оптимізації, технологій оптимізації перевезення, цільова функція.

**Вступ.**

Транспорт є однією з ключових складових матеріальної бази економічних і правових сфер, відіграючи важливу роль у розвитку економіки будь-якої країни. Він забезпечує перевезення вантажів і пасажирів відповідно до потреб виробництва, що, у свою чергу, сприяє нормальному функціонуванню та розвитку всіх галузей, регіонів і підприємств. Продаж і купівля транспортних послуг на світовому ринку свідчить про участь транспорту в операціях невидимого експорту та імпорту. Хоча продукція транспорту не має фізичної форми, вона є матеріальною за своєю природою, оскільки процес перевезення вимагає використання матеріальних ресурсів.

З розвитком інтеграційних процесів у всьому світі та зміцненням економічних і торговельних відносин, міжнародні перевезення стають все більш важливими. Інтеграція глобальних ринків потребує ефективних та надійних транспортних систем, здатних забезпечити швидке та безпечне переміщення товарів і пасажирів. Сучасні технології та інновації у транспортній сфері сприяють підвищенню ефективності логістичних процесів, зниженню витрат і мінімізації впливу на навколишнє середовище. Таким чином, транспорт є вирішальним фактором у формуванні глобальної економіки та розвитку



міжнародної торгівлі та співробітництва.

Основними завданнями оптимізації логістичних процесів є освоєння методів і механізмів, спрямованих на підвищення ефективності роботи логістичної системи та її окремих елементів. Теоретичні та практичні знання, здобуті під час вивчення цієї дисципліни, сприятимуть формуванню необхідних навичок і компетенцій для оптимізації логістичних процесів, створюючи надійну базу для подальшої підготовки висококваліфікованих фахівців у сфері логістики.

*Джерело: [1,2]*

### **Аналіз літературних даних та постановка проблеми.**

Теоретичні аспекти проблем та практичні підходи до вирішення проблем міжнародних вантажоперевезень були детально досліджені в працях таких вітчизняних науковців, як Воробйов Ю.Л., Дяченко Д.О., Карбанович І.І., Козаченко Д.І., Козіна К.Г., Кір'ян О.І., Кіндій М.В. та інших. У їхніх роботах аналізується сутність операцій і методів міжнародного транспортування та експедирування вантажів, а також чинники, що впливають на міжнародну транспортно-експедиційну діяльність. Незважаючи на це, кожне підприємство, що працює на цьому ринку, повинно розробляти власну систему економічних та організаційних рішень для вдосконалення такої діяльності.

Історія математики та теорії розв'язання задач оптимізації тісно пов'язана з розробкою різних алгоритмів для вирішення актуальних завдань своєї епохи. Поняття алгоритму є одним з ключових у обчислювальній та конструктивній математиці. Алгоритм визначається як формальний припис, що встановлює чітку послідовність дій, спрямованих на досягнення заданої мети або вирішення певної задачі.

Прийнято вважати, що термін "алгоритм" (у своєму ранньому варіанті "алгорифм") походить від імені математика Аль-Хорезмі, який у 825 році описав правила виконання арифметичних дій у десятковій системі числення. У сучасному світі поняття алгоритму та пов'язані з ним проблеми обчислюваності є предметом спеціальної теорії – теорії алгоритмів. З часом зміст цієї теорії став настільки абстрактним, що розуміння відповідних результатів і їх застосування в прикладних задачах стало доступним лише вузькому колу професійних математиків. Тому в завданнях оптимізації використовуються лише загальні висновки цієї теорії.

На додаток до теоретичних знань, розробка ефективних алгоритмів вирішення задач оптимізації потребує застосування сучасних інформаційних технологій та міждисциплінарного підходу, що включає економічний аналіз, моделювання та прогнозування. Це дозволяє розробляти більш точні та дієві рішення для оптимізації логістичних процесів і міжнародних перевезень, забезпечуючи таким чином високу ефективність та конкурентоспроможність підприємств у глобальній економіці.

### **Основні методи оптимізації транспортного процесу**

1. Метод лінійного програмування;
2. Метод «генетичні алгоритми»;
3. Метод «жадібного підходу»;
4. Метод «інтелектуального аналізу даних»;



5. Метод «моделювання та симуляція»; 6. Метод «маршрутизація та планування маршрутів»;

### Цілі дослідження

1. Розробка та впровадження ефективних методів оптимізації перевезення вантажів великоваговими транспортними засобами: підвищення ефективності використання транспортних ресурсів; зниження витрат на перевезення та експлуатацію транспортних засобів; підвищення безпеки та надійності перевезень.
2. Аналіз сучасних тенденцій і технологій у сфері перевезення великовагових вантажів: вивчення новітніх технологій та їх впливу на ефективність логістичних процесів; оцінка потенціалу використання інноваційних рішень у транспортній сфері.
3. Розробка рекомендацій для транспортних компаній з удосконалення процесів перевезення: підготовка практичних порад і методик для покращення організації перевезень; розробка стратегій зниження негативного впливу на довкілля.

*Джерело: [3,5]*

### Задачі дослідження

1. Аналіз існуючих методів та технологій оптимізації перевезення великовагових вантажів: дослідження наукових праць, нормативної бази та практичного досвіду у сфері перевезення великовагових вантажів; визначення основних проблем і викликів, з якими стикаються транспортні компанії.
2. Розробка математичних моделей та алгоритмів оптимізації логістичних процесів: створення моделей для оптимального планування маршрутів і завантаження транспортних засобів; розробка алгоритмів для ефективного розподілу ресурсів і управління транспортними потоками.
3. Оцінка ефективності запропонованих методів і моделей: проведення комп'ютерного моделювання та експериментальних перевірок запропонованих рішень; аналіз результатів та коригування моделей відповідно до отриманих даних.
4. Вивчення впливу зовнішніх факторів на процес перевезення великовагових вантажів: дослідження впливу економічних, екологічних та соціальних факторів на ефективність перевезень; розробка адаптивних стратегій для мінімізації негативного впливу зовнішніх факторів.
5. Моніторинг та оцінка впровадження оптимізаційних методів у реальних умовах: встановлення системи моніторингу для оцінки ефективності впроваджених рішень; аналіз результатів та підготовка звітів з рекомендаціями для подальшого вдосконалення процесів перевезення.

*Джерело: [4,5,6]*

### Оптимізаційна логістична задача

Загалом оптимізаційна логістична задача має виглядає так:

$$\left. \begin{array}{l} y = f(x) \rightarrow \max(\min) \\ x \in X \end{array} \right\} \quad (1)$$

де  $X$  – множина допустимих планів (альтернатив, дій, попередніх варіантів



логістичних рішень);  $f$  – числова функція, визначена на множині  $X$ , яка разом із вимогою максимізації або мінімізації називається цільовою функцією.

Розв'язок оптимізаційної логістичної задачі (1) утворює пара  $X^*$ ,  $y^*$ , де

$X^*$  – множина оптимальних планів,  $y^*$  – оптимальне (максимальне, найбільше або мінімальне, найменше – залежно від оптимізаційної спрямованості) значення цільової функції, що досягається нею на множині допустимих планів  $X$ . Зазвичай обмежуються частковим (а не загальним) розв'язанням задачі, визначаючи лише один серед множини оптимальних планів, а не всю цю множину.

Знаходять розв'язок оптимізаційної логістичної задачі, використовуючи спеціальні математичні методи оптимізації, комп'ютерні програми та засоби обчислювальної техніки на основі належної вихідної інформації.

Довільна оптимізаційна логістична задача містить два складники: цільову функцію та обмеження. Цільова функція формалізує критерій оптимальності, за яким серед альтернативних варіантів логістичних рішень визначається якнайкращий. Обмеження, зі свого боку, визначають множину допустимих альтернатив. Обмеження подаються у вигляді нерівностей та / або рівнянь.

Джерело: [1,2,5]

Здебільшого оптимізаційні логістичні задачі є багатовимірними та узагальнено виглядають так:

$$\left. \begin{aligned} y = f(x_1, \dots, x_n) &\rightarrow \max(\min) \\ g_i(x_1, \dots, x_n) &\leq 0, i = \overline{1, m} \\ h_k(x_1, \dots, x_n) &= 0, k = \overline{1, p} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де  $x_1, \dots, x_n$ , та  $y$  – дійсні змінні (керовані параметри), перші  $n$  з яких є основними та утворюють план  $x = (x_1, \dots, x_n)$  задачі, а остання показує відповідне значення цільової функції;  $f, g_i, i = \overline{1, m}, h_k, k = \overline{1, p}$ , – числові функції змінних  $x_1, \dots, x_n$  (перша функція є цільовою, а інші використовуються з метою відбиття множини допустимих планів).

Якщо у формулі (2) кожна з функцій  $f, g_i, i = \overline{1, m}, h_k, k = \overline{1, p}$ , – лінійна, маємо задачу лінійного програмування; в іншому разі – задача нелінійного програмування. Поширеними оптимізаційними логістичними задачами є лінійні. Нелінійна цільова функція або окремі обмеження зустрічаються у випадках, коли залежності між певними змінними мають нелінійний характер.

Серед обмежень у логістичній оптимізаційній задачі можуть бути особливі, наприклад, обмеження на знак певних змінних або вимоги до їх цілочисельності. Ці обмеження можна розділити на основні, які не виокремлюються, і додаткові, які виокремлюються. Якщо серед додаткових обмежень немає вимог щодо цілочисельності, ми маємо справу з задачею математичного програмування з неперервними змінними. У випадку, коли одна або кілька змінних повинні бути лише цілими числами, ми говоримо про задачу цілочислового математичного програмування. Наприклад, задача про оптимальний план перевезень може бути задачею з неперервними змінними, тоді як задача про вибір місця розташування нового розподільчого центру може бути задачею з цілочисловими змінними. Тип



задачі (лінійний, нелінійний, дискретний) визначає методи її розв'язання, такі як лінійне програмування, цілочислове програмування, нелінійне програмування та інші, залежно від конкретних особливостей задачі.

### Дослідження на основі методу лінійного програмування (Симплекс-метод)

Симплекс-метод є обчислювальною процедурою, що застосовується для рішення задачі лінійного програмування, записаній у стандартному (канонічному) вигляді. У задачі лінійного програмування, записаній у стандартному вигляді, цільова функція повинна бути *мінімізована*, а всі обмеження повинні бути задані у вигляді рівностей з *невід'ємними змінними*. Звести задачу з загального вигляду до канонічного можна за допомогою наступних правил:

а) максимізація цільової функції:  $Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$  рівнозначна *мінімізації* цільової функції, у якій знаки при змінних замінені на протилежні:

$$Z' = -Z = -c_1x_1 - c_2x_2 - \dots - c_nx_n;$$

б) обмеження у вигляді нерівностей « $\leq$ » перетворюються на рівності введенням до них додаткової невід'ємної змінної з коефіцієнтом +1. Наприклад, нерівність  $3x_1 + 2x_2 - x_3 \leq 5$  перетворюється на рівність  $3x_1 + 2x_2 - x_3 + x_4 = 5$ , де нова змінна  $x_4 \geq 0$ ;

в) обмеження у вигляді нерівностей « $\geq$ » перетворюються на рівності введенням до них додаткової невід'ємної змінної з коефіцієнтом -1. Наприклад, нерівність  $5x_1 - x_2 + x_3 \geq 4$  перетворюється на рівність  $5x_1 - x_2 + x_3 - x_5 = 4$ , де нова змінна  $x_5 \geq 0$ ;

г) якщо деяка змінна  $x_k$  може набувати будь-яких значень, а не тільки невід'ємних, її можна привести до виду  $x_k = x'_k - x''_k$ , де  $x'_k \geq 0$  та  $x''_k \geq 0$ .

Таким чином, зведення задачі лінійного програмування до канонічного вигляду може викликати необхідність введення додаткових невід'ємних змінних.

**Базисним допустимим розв'язком** задачі, що має  $n$  змінних та  $m$  обмежень, називається вектор значень незалежних змінних задачі, що задовольняє обмеженням задачі, та у якому  $m$  компонентів є невід'ємними (**базисні** змінні), а інші  $n - m$  компонентів дорівнюють нулю (**вільні** змінні). Базисні змінні утворюють базис. Якщо одна чи декілька з базисних змінних набувають нульового значення, то такий базис називають **виродженням**.

Процес розв'язування задачі лінійного програмування симплекс-методом зручно проводити у так званій **симплекс-таблиці** (таблиця 1).

Джерело: [5, 7]

У стовпчику **Базис** записують базисні змінні поточного базисного допустимого розв'язку (**опорного плану**) задачі у тій послідовності, в якій вони розташовуються у системі обмежень задачі.

У стовпчику **C** (стовпчик вільних членів) записуються відповідні значення базисних змінних поточного опорного плану задачі.



Таблиця 1 — Симплекс-таблиця

| Базис | $C$    | $x_1$    | $x_2$    | ... | $x_n$    |
|-------|--------|----------|----------|-----|----------|
| $x_1$ | $b_1$  | $a_{11}$ | $a_{12}$ | ... | $a_{1n}$ |
| $x_2$ | $b_2$  | $a_{21}$ | $a_{22}$ | ... | $a_{2n}$ |
| ...   | ...    | ...      | ...      | ... | ...      |
| $x_m$ | $b_m$  | ...      | ...      | ... | ...      |
| $-Z$  | $-Z_0$ | $c_1$    | $c_2$    | ... | $c_n$    |

У наступних стовпчиках, кількість яких відповідає кількості змінних задачі (враховуючи додані), записують відповідні коефіцієнти кожного обмеження задачі.

Нижній рядок симплекс-таблиці називається *індексним* рядком. У стовпчику вільних членів цього рядка записують поточне значення цільової функції задачі. У інших стовпчиках цього рядка на початку розв'язування записують коефіцієнти при змінних у цільовій функції задачі.

*Симплекс-алгоритм* розв'язування задачі полягає у виконанні чотирьох кроків:

1) *перевірка поточного опорного плану задачі на оптимальність*. Якщо всі елементи індексного рядка у симплекс-таблиці (за виключенням значення у стовпчику  $C$ ) є *невід'ємними*, то даний опорний план є *оптимальним* розв'язком задачі і процес рішення припиняється. Інакше виконують крок 2;

2) *знаходження змінної для включення до базису*. Відшукують у індексному рядку стовпчик, з мінімальним від'ємним значенням (якщо таких значень декілька, можна вибрати будь-який з них). Цей стовпчик називається *провідним стовпчиком*, а вільна змінна, що відповідає цьому стовпчику, у наступному опорному плані задачі стане базисною;

3) *знаходження змінної для виключення з базису*. Відшукують рядок, якому відповідає найменше додатне відношення чисел зі стовпчика вільних членів  $C$  до відповідних чисел провідного стовпчика. Цей рядок називається *провідним рядком*, а базисна змінна, що відповідає цьому рядку, у наступному опорному плані задачі стане вільною. На перетині провідного рядка та провідного стовпчика знаходиться *провідний елемент*. Зауважимо, що якщо всі елементи провідного рядка від'ємні чи дорівнюють нулю, то задача лінійного програмування не має розв'язку з причини необмеженого зростання цільової функції задачі і процес рішення припиняється.

4) *побудова нового опорного плану задачі*. Перехід до нового опорного плану задачі здійснюють за наступними правилами:

а) коригують набір базисних змінних, записуючи у стовпчику *Базис* замість змінної у провідному рядку змінну з провідного стовпчика;

б) всі значення у провідному рядку ділять на провідний елемент;

в) всі значення у провідному стовпчику заповнюють нулями;

г) інші елементи симплекс-таблиці перераховуються за формулою:

$$HЗ = ПЗ - \frac{EP \cdot EC}{EP}, \quad (3)$$



де НЗ — нове значення елемента; ПЗ — попереднє значення елемента; ЕР — елемент, що стоїть навпроти шуканого у провідному рядку; ЕС — елемент, що стоїть навпроти шуканого у провідному стовпчику; ЕП — провідний елемент.

### Висновки

Оптимізація перевезень великовагових вантажів автотранспортом є надзвичайно важливим завданням у сучасному логістичному середовищі. Для досягнення цієї мети було розглянуто різноманітні методи, спрямовані на підвищення ефективності та економічної доцільності перевезень.

Аналіз існуючих методів, таких як лінійне програмування, генетичні алгоритми, жадібний підхід, інтелектуальний аналіз даних, моделювання та симуляція, маршрутизація та планування маршрутів, дозволив виявити їхню важливість та потенційні переваги в оптимізації логістичних процесів.

Процес дослідження також включав розробку математичних моделей та алгоритмів, спрямованих на оптимальне планування маршрутів і завантаження транспортних засобів, що дозволяє забезпечити оптимальне використання ресурсів та зниження витрат.

Враховуючи вплив зовнішніх факторів, таких як економічні, екологічні та соціальні чинники, були розроблені адаптивні стратегії для мінімізації їхнього негативного впливу на процес перевезень.

Впровадження оптимізаційних методів у реальних умовах вимагає системного моніторингу та оцінки ефективності, щоб забезпечити постійне вдосконалення процесів перевезень. Ретельне вивчення та застосування різноманітних методів оптимізації дозволить підвищити ефективність, безпеку та економічну доцільність перевезень великоваговими автопоїздами

### Література:

1. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень / Р. Н. Кветний, І. В. Богач, О.Р. Бойко та ін. Частина 2. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://posibnyky.vntu.edu.ua/k\\_m/t2/zm2..htm](http://posibnyky.vntu.edu.ua/k_m/t2/zm2..htm) . – Назва з екрану.

2. Ольхова М. В. Сфери раціонального використання автомобільного і залізничного видів транспорту при магістральних перевезеннях пакетованих вантажів: автореферат дис... канд. техн. наук, спец.: 05.22.01 – транспортні системи / Ольхова Марія Володимирівна ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків, 2015. – 22 с.

3. Зелена книга. Міжнародні вантажні автомобільні перевезення. Автори: Зоя Мельник, Марія Гринишин, Андрій Буковський. – Київ: Офіс ефективного регулювання (BRDO), 2020. – 96 с.

4. Ehmke J. Integration of Information and Optimization Models for Routing in City Logistics. Hardcover, XIV, 2012. – 198 p.

5. Вантажні перевезення. Управління вантажною і комерційною роботою: Підручник / С.В. Панченко, А.О. Каграманян, В.С. Блиндюк та ін. – Харків: УкрДУЗТ, 2016. – Ч. 2. – 462 с

6. Вікович,, Р. Зінько, О. Бадейнов, М. Осташук. Математична модель руху триланкового автопоїзда//Журнал "Технічні вісті". – Львів: Вид-во НУЛП, 2021/1(, 2(50). – С. 35–41.



7. Batarlienè, N. (2008). Risk analysis and assessment for transportation of dangerous freight. *Transport*, 23(2), 98–103. ISSN 1648-4142.

**Abstract.** *The article discusses methods for optimizing the transportation of heavy goods using large vehicles, which are a key aspect of logistics and transportation infrastructure. Transportation optimization aims to reduce costs, improve efficiency and safety of transportation, as well as minimize environmental impact. Various approaches to optimization are analyzed, including route planning, the use of modern information technologies, improvement of loading and unloading processes, and the application of advanced transportation vehicles and equipment. Special attention is paid to mathematical models and algorithms that allow for the development of optimal transportation strategies. Regulatory and legal aspects and standards affecting the organization of transportation using large vehicles are also examined. The recommendations and conclusions presented can be useful for transportation companies, logistics operators, and researchers in the field of transportation logistics.*

**Key words:** *heavy goods, trucks, payload, transportation, optimization methods, transportation optimization technologies, objective function.*

Науковий керівник: д.т.н., проф. Вікович І.А.

Стаття відправлена: 22.05.2024 р.

© Приходько В.Е.