

Г. Я. МОЗОЛЕВИЧ, Д. М. КОЗАЧЕНКО, Ю. В. ЧИБІСОВ (Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна),  
В. О. МОЗОЛЕВИЧ (ДВНЗ ДТРЕК)

## ПІДВИЩЕННЯ КОНКУРЕНТОСПРОМОЖНОСТІ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ЗА РАХУНОК УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ ВАНТАЖНИХ ПОЇЗДОПОТОКІВ

В статті запропоновано за рахунок управління параметрами маси та довжини поїздів зменшити загальні витрати учасників логістичного ланцюгу вантажопотоків.

*Ключові слова:* маса та довжина поїздів, конкурентоспроможність залізниць.

В статье предложено за счет управления параметрами веса и длины поездов уменьшить общие затраты участников логистической цепи грузопотоков.

*Ключевые слова:* вес и длина поездов, конкурентоспособность железнодорожных дорог.

There was suggested the possible way of reduction of the total cost of the participants of the logistical chain by means of the controlling the parameters of the mass and length of the trains.

*Key words:* mass and length of the trains, competitiveness of the railways.

Сучасні умови функціонування залізничного транспорту України характеризуються постійною зміною структури й обсягів вантажів та поїздопотоків при наявності резервів пропускної спроможності більшості дільниць залізничних напрямків перевезень. В зв'язку з цим зростає важливість проблеми вибору раціональних параметрів маси та довжини поїздів з метою зменшення експлуатаційних витрат залізниць та витрат клієнтів як єдиної системи.

Залізничний транспорт одночасно працює в ринкових умовах конкуренції з іншими видами транспорту, і в той же час, згідно закону України про транспорт, його головним завданням є своєчасне, повне і якісне задоволення потреб населення та суспільного виробництва в перевезеннях. При цьому залізничний транспорт виступає монополістом в масових перевезеннях видобувної, металургійної та хімічної промисловості. Його особливістю є значна частка витрат на утримання інфраструктури, що не залежить від обсягів роботи. Це визначає необхідність пошуку шляхів адаптації залізниць до наслідків коливальних вантажопотоків та зміни їх структури.

Визначення раціональних параметрів поїздопотоків є складною оптимізаційною задачею, що не отримала остаточного вирішення і в даний час. У зв'язку з цим проблема підвищення конкурентоспроможності залізниць в області вантажних перевезень за рахунок управління параметрами поїздопотоків, є досить актуальною.

Норми маси та довжини поїздів являються найважливішим техніко-експлуатаційними показниками, від яких залежать наявна провізна і пропускна спроможність залізничних ліній, витрати електроенергії та палива, собівартість перевезень, швидкість доставки вантажів, потреба у вагонному і локомотивному парках.

В наукових роботах використовувалися різні методи рішення зазначеної задачі та різні критерії оптимальності [1-4]. Критеріями запропоновано використовувати прямі експлуатаційні витрати при наявному рівні технічного оснащення залізничних дільниць, приведені вагоно-години, що в тому числі враховують енергетичні та часові витрати локомотивного парку через коефіцієнти приведення. Основним способом вибору параметрів вантажних поїздів є формування повносоставних або повновагових поїздів за умов існуючих технічних обмежень, що в першу чергу стосуються тягових властивостей поїзних локомотивів та довжиною приймально-відправних колій. В ринкових умовах при оптимізації параметрів поїздопотоків на напрямках використовувались й інші підходи щодо визначення критерію оптимізації, окрім власних витрат залізниць. Так, в деяких роботах наводиться обґрунтування зменшення маси та довжини поїздів для прискорення пропуску контейнерних або контрейлерних поїздів, чи окремих вантажних відправок за додаткову плату. Недоліками цих методів є використання не досконалих моделей та методів, що враховують не всі елементи транспортного процесу.

Задача визначення раціональних параметрів вантажних поїздопотоків на залізничних напрямках розглядається як задача векторної оптимізації із двома невідомими – масою  $Q$  (т) та довжиною поїздів  $m$  (ваг). Критерієм оптимізації по Парето виступають витрати учасників логістичного ланцюгу вантажопотоків:

$$\begin{bmatrix} E_3(m, Q) \\ E_{кл}(m, Q) \end{bmatrix} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $E_3$  - витрати залізниці на переміщення поїздопотоків на напрямку;

$E_{кл}$  - витрати клієнтів, пов'язані із параметрами поїздопотоків.

Витрати залізниці на пропуск поїздопотоків складаються із наступних складових:

$$E_3 = E_{проб} + E_{лок} + E_{лок-бр} + E_{ст}, \quad (2)$$

де  $E_{проб}$  - витрати на пробіг поїздів заданої маси та довжини, що припадають на витрати електроенергії чи дизельного палива;

$E_{лок}$  - витрати, що припадають на локомотиво-години роботи для пропуску заданого вагонопотоку;

$E_{лок-бр}$  - витрати на утримання локомотивних бригад;

$E_{ст}$  - витрати станцій, пов'язані із формуванням та переробкою поїздопотоків.

Витрати клієнтів складаються із витрат на закупівлю вантажів, що постійно знаходяться в процесі транспортування  $E_{вант}$  та витрат на зберігання вантажів на складах відправників та одержувачів  $E_{зб}$ .

Всі вищезазначені витрати розглядаються як функції двох параметрів  $m$  та  $Q$  при постійних значеннях інших параметрів, таких як добовий вагонопотік по напрямку  $A$  ваг/добу, наявна пропускна спроможність  $N_n$ , максимальна довжина приймально-відправних колій  $l_{кол}$ , максимальна маса поїздів на дільницях напрямку при існуючих поїзних локомотивах  $Q_{макс}$ , т, добовий вантажопотік на напрямку  $P_{вант}$  т/добу, доля порожнього вагонопотоку в переважно порожньому напрямку  $\alpha_{пор}$ , обсяги пасажирського руху при літньому та не літньому графіку руху поїздів  $N_{пас}$ , поїздів/добу, середня тара вагонів,  $q_t$ , т, середня вантажопідйомність вагонів,  $q_{ваг}$ , т/ваг, локомотивний парк  $W_l$ .

Витрати клієнтів на закупівлю вантажів розраховуються за формулою:

$$E_{ван} = A \alpha_{нав} q c_t d_{ст} t_{дост} \left[ 1 + \frac{t_{напр}^*(m^*; Q^*)}{t_{напр}(m_{ст}; Q_{ст})} \right], \quad (3)$$

де  $A$  – добовий вагонопотік в одному напрямку, складає;

$\alpha_{нав}$  – доля навантажених вагонів від загального вагонопотоку;

$q$  – середнє навантаження вагону на напрямку;

$c_t$  – середньозважена вартість однієї тонни вантажу;

$d_{ст}$  – дисконтна ставка, коливається в межах 7,5...10 % в останні роки;

$t_{дост}$  – середня тривалість знаходження вантажу в русі від станції завантаження до станції призначення;

$t_{напр}^*(m^*; Q^*)$  – тривалість знаходження вантажу на напрямку при змінених параметрах поїздопотоків  $m^*$  та  $Q^*$ ;

$t_{напр}(m_{ст}; Q_{ст})$  – тривалість знаходження вантажу на напрямку при існуючих стандартах параметрів поїздопотоків.

Витрати на зберігання вантажу змінюються пропорційно величинам партій доставок  $m$  (рис. 1), що відповідає кількості вагонів у складах поїздів. Розрахувати ці витрати для окремого склада можна за формулою:

$$E_{зб} = 0,5 m c_s T, \quad (4)$$

де  $c_s$  – середні витрати на зберігання вантажу, грн./год;

$T$  – середня тривалість споживання однієї партії вантажу, год. Очевидно, що цей параметр пропорційний величині партій  $m$ .

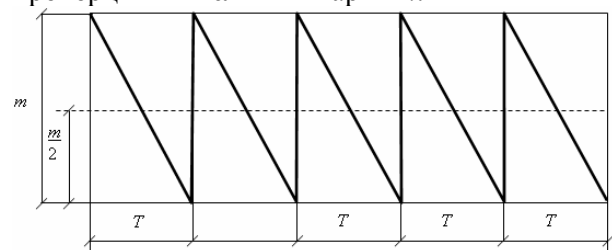


Рис. 1. Зміна обсягів вантажів, що зберігаються на складах

Система обмежень параметрів функції складається з наступних рівнянь та нерівностей.

Обмеження по наявній пропускній спроможності дільниць напрямку:

$$N_n \geq N_{вантj} + N_{пасj} \cdot \epsilon_{пас} + N_{збj} (\epsilon_{зб} - 1), \quad (5)$$

де  $N_{\text{вант } j}$ ,  $N_{\text{пас } j}$ ,  $N_{\text{зб } j}$  - кількість вантажних, пасажирських та збірних поїздів на  $j$ -му напрямку;

$\varepsilon_{\text{пас}}$ ,  $\varepsilon_{\text{зб}}$  - коефіцієнти зняття вантажних поїздів пасажирськими та збірними відповідно.

Коефіцієнти зйому, в свою чергу, також залежать від параметрів поїздопотоків. Відповідно до [5, 6] для двоколіїних дільниць з пасажирським рухом до 60 пар поїздів на добу

$$\varepsilon_{\text{пас}} = \frac{t_{\text{ван}}(1-\Delta)(0,8-0,005n_{\text{пс}})}{I} + 1,3, \quad (6)$$

та при більш значних розмірах руху пасажирських поїздів

$$\varepsilon_{\text{пас}} = \frac{t_{\text{ван}}(1-\Delta)(0,8-0,005n_{\text{пс}})}{I} + \frac{1,5}{n_{\text{пс}}} + 1, \quad (7)$$

де  $t_{\text{ван}}$  - тривалість руху вантажного поїзду через обмежуючий перегін, хв.;

$\Delta$  - співвідношення чистого часу руху пасажирських та вантажних поїздів на розрахунковій дільниці;

$n_{\text{пс}}$  - загальна кількість пасажирських поїздів на дільниці;

$I$  - розрахунковий міжпоїзний інтервал на дільниці, хв.

Параметр  $I$  залежить від [5] тривалості руху поїздів по розрахунковим блок-ділянкам  $t_{\text{бли } i}$ ,  $i = \{1..4\}$ , їх довжини  $l_{\text{бли } i}$  та довжини  $l_{n1}$  та  $l_{n2}$  суміжних поїздів, що рухаються по перегону:

$$I = t_{\text{бли } 1} \frac{l_{n1}}{l_{\text{бли } 1}} + t_{\text{бли } 2} + t_{\text{бли } 3} + t_{\text{бли } 4} \frac{l_{n2}}{l_{\text{бли } 4}}. \quad (8)$$

Для аналізу форми області допустимих значень ОДЗ параметрів поїздопотоків проведено факторний експеримент. При цьому для визначення  $t_{\text{бли } i} = f(Q, m)$  використовувались тягові розрахунки на одній з дільниць напрямку перевезень.

Наступним обмеженням виступає відповідність добового обсягу вагонопотоків добовому поїздопотокі

$$A = mN_{\text{вант}}. \quad (9)$$

Обмеження по довжині приймально-відправних колій

$$l_{\text{лок}} + m \cdot l_{\text{ваг}} + a \leq l_{\text{кол}}, \quad (10)$$

де  $l_{\text{лок}}$  - довжина поїзного локомотиву на напрямку, м;

$l_{\text{ваг}}$  - середня довжина вагону, м;

$a$  - допуск на неточність зупинки поїзда, м.

Обмеження по силі тяги поїзних локомотивів

$$Q_{\text{бр}} = \frac{F_{\text{кр}} - P(\omega_0' + i_p)}{\omega_0'' + i_p} \geq Q \quad (11)$$

$F_{\text{кр}}$  - розрахункова сила тяги локомотива, кгс;

$\omega_0'$  - основний питомий опір руху локомотива, кгс/тс;

$i_p$  - керівний ухил, ‰;

$P$  - розрахункова маса локомотива, тс;

$\omega_0''$  - основний питомий опір руху вантажних вагонів, кгс/тс.

Обмеження по обсягам перевезених вантажів

$$(1 - \alpha_{\text{пор}})N_{\text{вант } j}(Q - mq_m) = P_{\text{вант } j}. \quad (12)$$

Обмеження по вантажопідйомності вагонів

$$0 \leq \frac{Q}{m} - q_m \leq q_{\text{ваг}}. \quad (13)$$

Обмеження по локомотивному парку

$$\frac{N_{\text{вант}}O_{\text{л}}}{24} \leq W_{\text{л}}, \quad (14)$$

де  $O_{\text{л}}$  - оборот локомотиву.

Для дослідження параметрів поїздопотоків обрано вантажонапружений залізничний напрямок Ясинувата – Нижньодніпровськ-Вузол, що розташований у межах Донецької та Придніпровської залізниць. Загальна довжина напрямку складає 256 км. Через несприятливий профіль на напрямку виконується підштовхування поїздів на дільницях. Керівний уклон в парному напрямку складає 9,8 ‰, в непарному – 9 ‰.

На рис. 2 показана область допустимих значень параметрів поїздопотоків. Обмеження (5') та (5'') відповідають не літнім та літнім розмірам руху пасажирських поїздів на напрямку. Конус, утворений обмеженнями (12-13), пояснюється співвідношенням випадкових параметрів  $m$  та  $Q$ . Величина кута при вершині пропорційна долі порожнього вагонопотоку на напрямку. Обмеження (14) паралельне обмеженням (5) та коливається в межах між (5') та (5'') в оперативних умовах через перерозподіл локомотивного парку з суміжних напрямків.

Для визначення витрат клієнтів  $E_{\text{вант}}$  та  $E_{\text{зб}}$  виконано статистичний збір інформації про

структуру, обсяги та вартість вантажопотоків, що перевозились на вантажонапруженому напрямку Ясинувата – Нижньодніпровськ-Вузол. На рис. 3 наведено розподіл вантажопотоків по роду вантажів в парному та непарному напрямі перевезень. Переважну частину вантажів складають масові перевезення видобувної, металургійної, будівельної та аграрної промисловості.

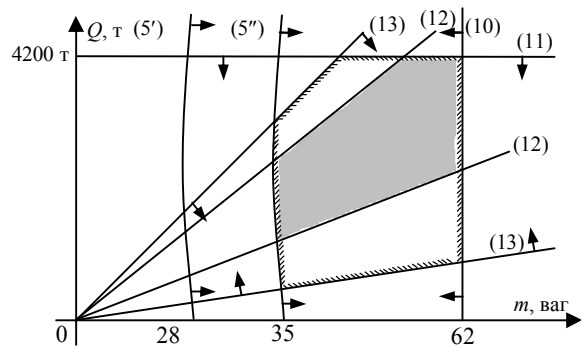


Рис. 2. Область допустимих значень параметрів поїздопотоків

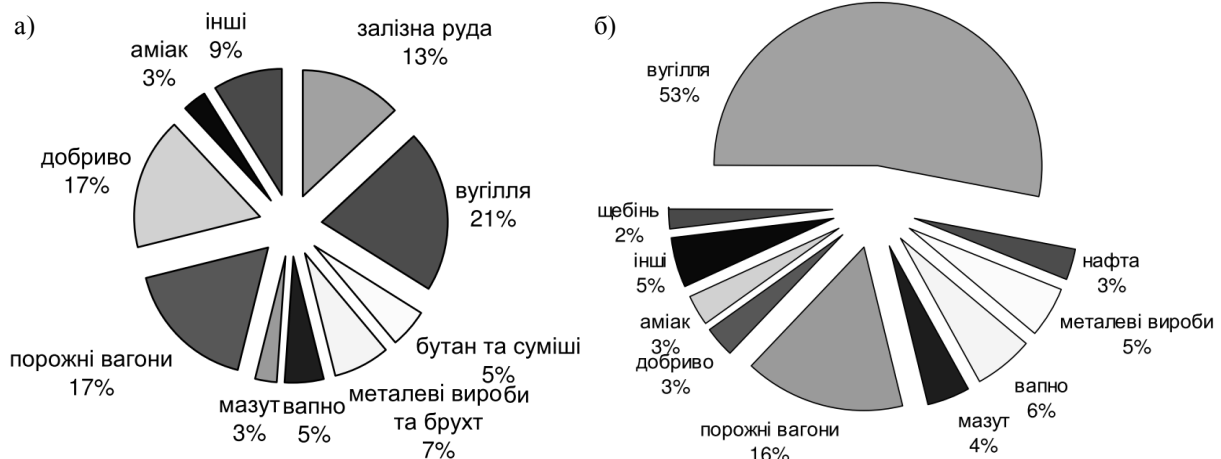


Рис. 3 – Діаграма структури вантажопотоків на напрямку Ясинувата - Нижньодніпровськ-Вузол: а) парний напрямок; б) непарний напрямок

Середньозважена вартість однієї тонни вантажу визначена за формулою:

$$C_v = \sum_{j=1}^k \alpha_j c_{вантj}, \quad (15)$$

де  $j$  - род вантажів;

$\alpha_j$  - доля вантажів  $j$ -го роду від загального обсягу вантажопотоку;

$c_{вантj}$  - середня вартість  $j$ -го вантажу протягом року.

Аналіз зміни структури вантажопотоків показав, що в останнє десятиріччя відбувається зміна кон'юнктури ринку вантажних перевезень. Одночасно з цим змінюється попит та пропозиція на окремі товари, що перевозилися залізницями України, деякі групи вантажів стали транспортуватись іншими видами транспорту або перевозитись шляхами в обхід території України. На рис. 4 показано динаміку зміни обсягів вантажів та собівартості їх однієї тонни.

Аналіз зміни вартості масових вантажів, що перевозилися залізницями з 2002 по 2010 р., показав значні коливання, що пояснюються зміною попиту та обсягів споживання тих чи

інших вантажів на ринку України. Між середньозваженою вартістю та обсягами перевезень було встановлено тісний кореляційний зв'язок  $R_{c_v \sum Q} = 0,77$ .

Дослідження впливу параметрів поїздопотоків на витрати залізниці для вантажонапруженого напрямку проведено з використанням моделі роботи залізничного напрямку [7]. В моделі він розглядається як багатоканальна багатозафазна система масового обслуговування СМО. Закони розподілення випадкових величин параметрів поїздопотоків напрямку детально представлені в [8].

Виконані розрахунки показали, що параметри поїздопотоків, що задовольняють умову (1), значно залежать від собівартості вантажів, які перевозяться на напрямку. Загальні витрати учасників процесу перевезень досягають мінімального значення при зменшенні довжини поїздів до 45-52 вагонів у складі в залежності від співвідношення витрат на перевезення та вартості перевезених вантажів.

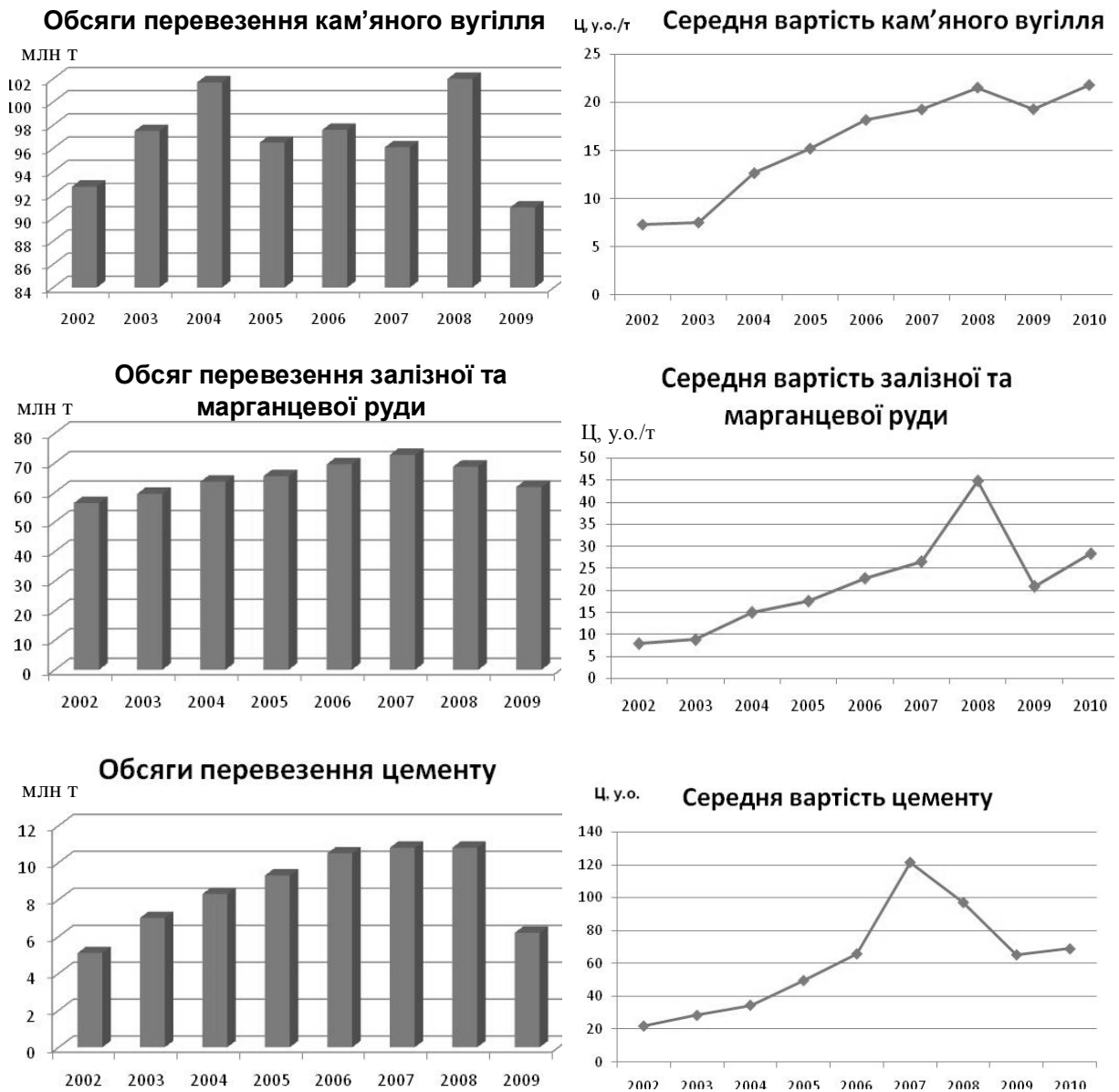


Рис. 4. Діаграма зміни обсягів вантажопотоків залізниць України за родом вантажів

Розв'язок задачі векторної оптимізації полягає у пошуку усіх пар параметрів поїздопотоків, які задовольняють умові (1) при будь-якому співвідношенні витрат між собою  $t = \frac{C_3}{C_{кл}}$ . При двох невідомих значеннях  $m$  та  $Q$ , вони повинні задовольняти наступну систему диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} \frac{\partial E_3(m, Q)}{\partial m} + t \frac{\partial E_{кл}(m, Q)}{\partial m} = 0, \\ \frac{\partial E_3(m, Q)}{\partial Q} + t \frac{\partial E_{кл}(m, Q)}{\partial Q} = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Розв'язок цієї системи рівнянь для функцій витрат вантажонапруженого напрямку залізничних перевезень отримано з використанням

програмного засобу *Maple 7*.

Так, при  $t \notin \{1, 5; 4, 5\}$  значення оптимальних параметрів поїздопотоків знаходяться на границі ОДЗ, при  $\forall t \in \{1, 5; 4, 5\}$  рішення буде мати вигляд деякої кривої (рис. 5) при сталому значенні параметру  $t$ . Необхідно зазначити, що рішення представляє собою можливі пари стандартних параметрів поїздопотоків, що задавалися б в тих чи інших випадках на напрямку, а справжні експлуатаційні значення  $\tilde{m}$  та  $\tilde{Q}$  незначно коливаються в будь-якій точці отриманої функції  $Q = f(m) \forall t \in \{1, 5; 4, 5\}$ .

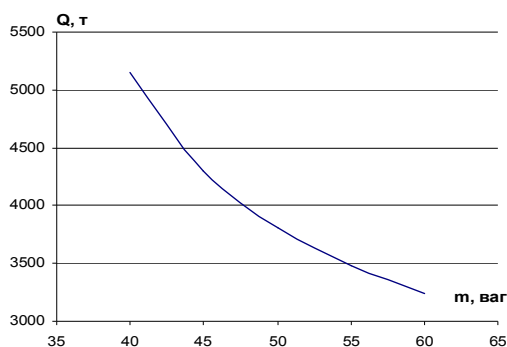


Рис. 5. Рішення задачі оптимізації при  $t = const$ .

Співвідношення витрат залізниці та її клієнтів при різних значеннях параметру  $t$  представлені на рис. 6. Обмеження співвідношення витрат учасників логістичного ланцюгу вантажопотоків викликано обмеженнями, що накладаються на параметри поїздопотоків (5)–(14).

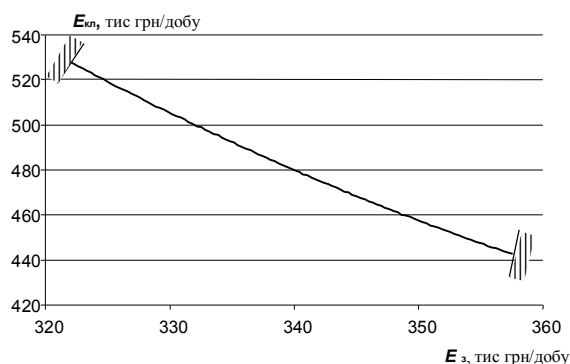


Рис. 6. Рішення задачі оптимізації при  $t \in \{1,5; 4,5\}$ .

Отже, при зменшенні обсягів перевезень на залізниці виникає проблема прискорення руху поїздопотоків в зв'язку із збільшенням тривалості простою вагонів на технічних станціях під накопиченням. В цей період часу відбувається зменшення вартості вантажної маси, що транспортується, і тому її перевезення може бути виконано в більш довші строки із максимально можливим збільшенням довжини та маси поїздів та відповідним зменшенням як експлуатаційних витрат залізниці, так і тарифів на перевезення.

При збільшенні обсягів перевезення відбувається поступове збільшення вартості вантажів, тому в цей час раціональним стає зменшення маси та довжини поїздів, що призведе до прискорення просування поїздопотоків по напрямках з організацією руху неповноскладених поїздів довжиною 45...52 вагонів в залежності від роду вантажопотоків на напрямку та їх обсягу. Значний вплив на вибір параметрів поїздопотоків будуть вже мати обмеження за наяв-

ною кількістю локомотивів, завантаженість діляниць та елементів станцій.

Збільшення експлуатаційних витрат на пропуск поїздопотоків при цьому можна покласти на клієнтів, відповідно збільшивши тарифні ставки. Для напрямку Ясинувата – Нижньодніпровськ-Вузол, збільшивши власні витрати на 40 тис. грн./добу, витрати клієнтів скорочуються на 80 тис. грн. Отже, частково розподіливши скорочення загальних витрат системи між її учасниками, можна отримати синергетичний ефект в розмірі 40 тис. грн./добу. Такий підхід до управління параметрами поїздопотоків підвищить конкурентоспроможність залізниць на транспортному ринку вантажних перевезень.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Тихонов, К. К. Теоретические основы выбора оптимальных весовых норм грузовых поездов [Текст] / К. К. Тихонов. – М.: Транспорт, 1970. – 200 с.
2. Кочнев, Ф. П. Управление эксплуатационной работой железнодорожных дорог [Текст]: Учебное пособие для вузов / Ф. П. Кочнев, И. Б. Сотников. — М.: Транспорт, 1990. – 424 с.
3. Савенко, А. С. Оптимизация массы грузовых поездов на участках [Текст] / А. С. Савенко, Г. И. Музыкаина // Транспорт: Сб. науч. тр. – 2001. – Вып. 8 – Д.: ДИКТ, 2001. – С. 93-97.
4. Крапивный, В. А. Вес поезда. Ориентиры, проблемы, опыт. На основе развития инфраструктуры магистрали [Текст] / В. А. Крапивный, В. А. Анисимов // Железнодорожный транспорт. – 2005. – № 3. – С. 30-36.
5. Інструкція з визначення станційних і міжпоїзних інтервалів [Текст] / Розробники О. Ф. Вергун, Н. В. Липовець, В. О. Лозовий та ін. – К.: Транспорт України, 2001. – 150 с.: іл.
6. Інструкція з розрахунку наявної пропускної спроможності залізниць України [Текст]. Навч.-метод. посіб. / Розробники О. Ф. Вергун та ін. – К.: Транспорт України, 2002. – 376 с.: іл. ISBN 966-7737-10-1/
7. Козаченко, Д. М. Моделювання роботи залізничного напрямку [Текст] / Д. М. Козаченко, Г. Я. Мозолевич, О. В. Власюк // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 28. – Д.: Вид-во ДНУЗТ. – С. 143-148.
8. Козаченко, Д. М. Дослідження параметрів потоків поїздів на залізничних напрямках [Текст] / Д. М. Козаченко, Г. Я. Мозолевич // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 3/5 (45). – С. 17-21.

Надійшла до редколегії 17.11.2011

Прийнята до друку 18.11.2011