

УДК 656.212: 681.3

Р.В. Вернигора¹, канд. техн. наук, доц.,
 О.Ю. Папахов², канд. техн. наук, доц.,
 Н.О. Логвінова²

1 – Державний національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, м. Дніпропетровськ, Україна
 2 – Державний вищий навчальний заклад „Національний гірничий університет“, м. Дніпропетровськ, Україна,
 e-mail: papahov0362@mail.ru

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЕРЕВЕЗЕННЯ СИРОВИНИ ТА ГОТОВОЇ ПРОДУКЦІЇ ПІДПРИЄМСТВ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМПЛЕКСУ ЗА ЗАЛІЗНИЧНИМИ НАПРЯМКАМИ З ПАРАЛЕЛЬНИМИ ХОДАМИ

R.V. Vernigora¹, Cand. Sci. (Tech.),
 Associate Professor,
 O.Yu. Papakhov², Cand. Sci. (Tech.),
 Associate Professor,
 N.O. Logvinova²

1 – Academician Lazarian Dnepropetrovsk National University of Railway Transport, Dnipropetrovsk, Ukraine
 2 – State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine,
 e-mail: papahov0362@mail.ru

MATHEMATICAL MODEL OF TRANSPORTATION OF RAW MATERIAL AND FINISHED PRODUCTS OF MINING AND METALLURGICAL ENTERPRISES BY RAILWAY DIRECTIONS WITH PARALLEL MOTION

Мета. Визначення економічно обґрунтованої доцільності розподілу вантажопотоків із сировиною та готовою продукцією підприємства гірничо-металургійного комплексу між ділянками залізничного напрямку з паралельними ходами.

Методика. Методичною основою виконання комплексних досліджень є: аналіз та узагальнення літературних джерел і позитивного досвіду пропуску вантажних поїздів; математичне моделювання поїзної роботи залізничного напрямку з паралельними ходами; методи статистичної, вартісної, аналітичної та експертної оцінки даних щодо стану пропуску вантажних поїздів із сировиною та продукцією підприємств гірничо-металургійного комплексу між ділянками залізничного напрямку з паралельними ходами в оперативних умовах.

Результати. Результатами дослідження є: економічно обґрунтовані в оперативних умовах розміри руху вантажних поїздів із сировиною та готовою продукцією підприємств гірничо-металургійного комплексу по ділянках залізничних напрямків з паралельними ходами при обмеженні їх пропускної спроможності на електрифікованих ділянках в умовах застосування оптового ринку електроенергії.

Наукова новизна. Уперше сформульовано й вирішено оптимізаційну задачу щодо організації поїздопотоків, що перевозять сировину та готову продукцію підприємств гірничо-металургійного комплексу на залізничних напрямках з паралельними ходами в умовах диференційованих тарифів на електроенергію, що дозволяє прискорити доставку вантажів та скоротити витрати залізниці на просування вантажних поїздів. Удосконалено економіко-математичну модель залізничного напрямку з паралельними ходами, що, на відміну від існуючих, дозволяє визначити найбільш раціональний розподіл поїздопотоків із сировиною та готовою продукцією підприємств гірничо-металургійного комплексу по ділянкам напрямків у залежності від експлуатаційної ситуації.

Практична значимість. Розроблені процедури й методи можуть бути використані при створенні автоматизованих систем підтримки прийняття рішень для оперативного розподілу поїздопотоків із сировиною та готовою продукцією підприємств гірничо-металургійного комплексу по паралельним ходам в умовах диференційованих тарифів на електроенергію та швидкісного руху пасажирських поїздів, при розробці автоматизованого робочого місця (АРМ) диспетчерського персоналу оперативно-розпорядчих відділів дирекцій та залізниць.

Ключові слова: *продукція гірничо-металургійного комплексу, перевезення, пропускна спроможність, розміри руху поїздів*

Постановка проблеми. Поставленою задачею є такий розподіл поїздопотоків за ланками залізничної мережі з паралельними ходами, на якій усі поїздопотоків станцій відправлення сировини та готової продукції підприємств гірничо-металургійного комплексу та станцій призначення поєднані між собою аби скоро-

тити строки доставки вантажу, а перевезення були здійснені з мінімальними для залізниці витратами.

У постановці задачі передбачається, що всі вихідні дані про перевезення сировини та готової продукції між підприємствами гірничо-металургійного комплексу та морськими портами Одеського регіону на залізничному напрямку з паралельними ходами: Знам'янка – Помічна – Колосівка – Одеса-

Сортувальна та Знам'янка – Колосівка – Котовськ – Роздільна – Одеса-Сортувальна і техніко-економічні характеристики їх елементів повністю відомі, причому є незмінними у часі. Задача пошуку найвигідніших схем напрямку поїздопотоків за паралельними ходами при незмінній інфраструктурі розглядається у статичній постановці.

Приймаються безпосередньо заданими:

- початкові та кінцеві станції відправлення поїздопотоків із сировиною та готовою продукцією підприємств гірничо-металургійного комплексу напрямку (Знам'янка, Одеса-Сортувальна);

- об'єми поїздопотоків із сировиною та готовою продукцією підприємств гірничо-металургійного комплексу при відправленні з початкових станцій і прибуття на кінцеві станції даного напрямку (Знам'янка, Одеса-Сортувальна);

- існуюча транспортна інфраструктура даного залізничного напрямку з паралельними ходами;

- техніко-економічні характеристики інфраструктури напрямку, що становлять вузли (Знам'янка, Помічна, Колосівка, Одеса-Застава, Котовськ, Роздільна, Одеса-Застава 1, Одеса-Сортувальна) і ланки мережі (перегони напрямку), що включають технічне оснащення та параметри перегонів, залежності витрат на перевезення й переробку поїздопотоків від їх об'єму та структури;

- інтенсивність завантаження елементів мережі нерозподільвальними поїздопотоків, які не можна передавати між паралельними ходами.

Для вирішення поставленої задачі широко використовуються лінійні моделі та методи лінійного програмування. Використання цих методів вимагає, щоб питомою вартістю перевезень на ланці мережі була постійною та не залежала від розмірів вагонопотоків і поїздопотоків. Аналіз вартості перевезення за паралельними ходами показав, що ряду елементів транспортної інфраструктури мережі властиві природні нелінійності: одноколіїні залізничні перегони напрямків мають зупинки поїздів при схрещеннях, кількість яких непропорційна поїздопотоків; викликають нелінійність функцій витрат і обгони вантажних поїздів пасажирськими (прискореними та швидкісними). Нелінійний характер функцій витрат пов'язаний і з істотною нерівнозначністю вартості перевезень у навантаженому й порожньому напрямках.

Аналіз останніх досліджень. При використанні лінійних методів похибка від ігнорування нелінійностей частково зменшується при введенні обмежень пропускної спроможності ланок мережі, тим самим не допускається таке їх завантаження, питомою вартістю перевезення при якій істотно відрізняється від набутих апріорі значень. Однак, при цьому залишаються все ж значні відхилення, особливо ті, що пов'язані з помилками у встановленні порожніх напрямків і чисельних значень величин обмежень пропускної спроможності.

Визначення невіршених раніше проблем. Проаналізовані існуючі нелінійні методи рішення поставленої задачі не вимагають обов'язкового вве-

дення штучних обмежень перевезень і допускають включення до розрахунку функцій витрат на перевезення сировини та готової продукції підприємств гірничо-металургійного комплексу в тому вигляді, який передбачається найбільш реальним економічним процесом.

При незмінному технічному стані елементів мережі додаткові витрати на перевезення кожного подальшого поїзда зазвичай зростають. Тому, з достатньою точністю, витрати з перевезення на напрямку з паралельними ходами, що мають одноколіїні перегони з двоколіїними вставками, можуть бути представлені у вигляді опуклої та неубутної функції, залежної від потужності вантажних і пасажирських поїздопотоків.

Мета та задачі. Метою дослідження є визначення економічно обґрунтованих розмірів руху вантажних поїздів із сировиною та готовою продукцією підприємств гірничо-металургійного комплексу між ділянками залізничного напрямку з паралельними ходами при застосуванні в денний час швидкісного руху пасажирських поїздів на електрифікованих лініях в умовах оптового ринку електроенергії. Задачею дослідження є розподіл поїздопотоків в оперативних умовах поїзної роботи при пропуску вантажних поїздів із сировиною та готовою продукцією підприємств гірничо-металургійного комплексу між ділянками залізничного напрямку з паралельними ходами.

Виклад основного матеріалу. В якості розрахункової схеми приймається транспортна мережа, що складається з транспортних ланок, на яких сконцентровані всі витрати з перевезення, і абстрактних точкових вузлів, що розділяють ці ланки між собою. Така схема при відповідному методі її побудови [1] в достатній мірі адекватна залізничному напрямку з паралельними ходами Знам'янка – Одеса-Сортувальна.

Сформована розширена транспортна мережа, що включає як дійсні ланки, за якими безпосередньо здійснюються перевезення, так і додаткові ланки на перевезення вантажів. Урахувати цю специфіку можливо двоюко: або скласти функції витрат так, щоб зробити надмірно великою вартістю перевезення нерозподільвальних поїздопотоків, або вказати в самій схемі транспортної інфраструктури, по яких ланках не допускається перевезення таких поїздопотоків.

У якості нерозподільвальних поїздопотоків на даній інфраструктурі приймаємо перевезення сировини та готової продукції підприємств гірничо-металургійного комплексу за напрямками: Знам'янка – Берегова (порт „Южний“) через Котовськ, Знам'янка – Одеса-Сортувальна через Котовськ, тому що ці перевезення мають значну додаткову кружність.

Математичне формулювання задачі. На розглянутому полігоні напрямку з паралельними ходами Знам'янка – Одеса задається граф, що складається з R вузлів і N орієнтованих дуг, за якими виконуються перевезення P видів невзаємозамінних поїздопотоків. Зв'язки між вузлами та дугами, а також можливості перевезень по ним різних поїздопотоків описуються за формулою

$$S_p = \left\| s_{ijl} \right\|, \quad (1)$$

де $i=1, 2, \dots, R; j=1, 2, \dots, N; l=1, 2, \dots, P$

$$\left\{ \begin{array}{l} +1, \text{ якщо дуга } j \text{ виходить з вершини } i \text{ і по ній} \\ \text{може здійснюватися перевезення } l \text{ поїздопотоків;} \\ s_{ijl} = -1, \text{ якщо дуга } j \text{ входить у вершину } i \text{ і по} \\ \text{ній може ввозитися } l \text{ поїздопотік;} \\ 0, \text{ в інших випадках.} \end{array} \right.$$

Таким чином S_p представляє по суті багаточарову вектор-матрицю інцидентів вузлів і дуг графа, причому елементами матриць є P -мірні вектори, елементи яких приймають значення $-1, 1$ або 0 . Зручно S_p представляти такими, що також складається з P звичайних матриць інцидентів, кожна з l яких відповідає графові перевезень l роду поїздопотоків.

Кожній вершині графа поставимо у відповідність P -мірний вектор b_i , l координата якого дорівнює об'єму l роду поїздопотоків, що відправляється (при $b_i^j > 0$) з i вершини або що прибуває (при $b_i^j < 0$) в цю вершину.

Уся інформація про об'єми відправлення та прибуття може бути задана за допомогою P -мірного вектор-стовпця $b = \{b_i\}$, кожна i координата якого представляє вектор перевезень (відправлення та прибуття) відповідного i вузла.

Аналогічно завантаження всіх дуг графа всіма видами поїздопотоків може бути задано за допомогою A -мірного вектор-стовпця поїздопотоків x , кожна j координата якого представляє P -мірний вектор усіх видів поїздопотоків на j дузі.

Якщо через F позначити функціонал сумарних витрат на перевезення за паралельними напрямками всіх видів поїздопотоків, то математична модель може бути представлена у вигляді

$$\begin{aligned} \min F(X); & \quad (2) \\ S_p X = b; & \\ X \geq 0. & \end{aligned}$$

У тому випадку, якщо на дугах мережі заданий також вектор нерозподілювального поїздопотоків X^1 , то модель набере наступного вигляду

$$F(X + X^1) = \left[\varphi(x_1 + x_1^1) + \psi(x_2 + x_2^1) \right] \rightarrow \min \quad (3)$$

при обмеженнях

$$x_1 + x_2 = x; \quad S_p X = b; \quad X \geq 0,$$

де X – вектор розподілювального поїздопотоків між напрямками; X^1 – вектор нерозподілювального поїздопотоків між напрямками; b – вектор розподілювальних та нерозподілювальних перевезень.

Модель (2) по суті ідентична (3) з тією лише неістотною відмінністю, що зміщена точка відліку. Функціонал F вважатиметься монотонно зростаючим [2], опуклим та диференційованим.

Побудова початкового допустимого плану перевезення сировини та готової продукції.

Формально допустимий план поїздопотоків нелінійної транспортної задачі може бути знайдений так само, як і в лінійному випадку за будь-яким із відомих алгоритмів лінійного програмування. Проте цей план обов'язково буде опорним, тобто відповідатиме одній з вершин багатогранника обмежень. Для лінійних задач – це перевага, оскільки там процедура поліпшення допустимого плану будується шляхом перебору в певному порядку частини його вершин. Крім того, і це головне, у лінійних задачах оптимальним планом обов'язково є одна з вершин.

Зовсім інше положення в нелінійних мережевих транспортних задачах – тут, навіть при перевезеннях одного виду поїздопотоків і відсутності обмежень пропускної спроможності ланок мережі, в оптимальному плані, зазвичай, існують замкнуті контури з ненульовими об'ємами перевезень на ланках, що входять до цих контурів, тобто оптимальний план не є деревом графа. Тому методи побудови початкового допустимого плану, що застосовується в лінійному випадку, можуть призводити до отримання планів, суттєво далеких від оптимального.

Якщо в оптимальному плані деякі перевезення здійснюються за двома або більше паралельними маршрутами, то диференціальна вартість перевезень за цими напрямками однакова. Іншими словами, процес оптимізації розподілу поїздопотоків по мережі прагне до того, аби всі необхідні перевезення прямували за найкоротшими (у сенсі диференціальних витрат) напрямками від пунктів відправлення до пунктів призначення. Оскільки в нелінійному випадку диференціальні витрати (тобто вартість перевезень „останньої тонни“) істотно залежать від завантаження транспортних ліній, то вказана процедура виконується з відносно малими розмірами безпосередньо розподілювальних на кожному кроці об'ємів перевезень. Тому початковий допустимий план може бути побудований наступним чином.

Розбиваємо весь необхідний вектор перевезень b на M відносно невеликих частин b_s . Тоді

$$b = b_1 + b_2 + \dots + b_s + \dots + b_M.$$

Потім вирішуємо для кожного чергового значення вектора перевезень транспортну задачу при отриманих раніше сумарних завантаженнях мережі, таких, що приймаються за нерозподілювальний потік. Якщо кожна частина b_s буде мала, то можна вважати при оптимізації s задачі, що диференціальні витрати не змінюються. Тому кожна чергова транспортна задача буде лінійною, причому в якості коефіцієнтів цільової функції виступатимуть диференціальні витрати, а вектором обмежень – величина b_s . Пі-

дсумовуючи результати вирішення всіх M допоміжних задач, отримуємо в результаті початковий план X^0 , побудований з використанням диференційованих витрат.

Алгоритм побудови початкового плану виглядає наступним чином

$$X^0 = \sum_{s=1}^{s=M} \tilde{Z}^s, \quad (4)$$

де \tilde{Z}^s – рішення допоміжної задачі лінійного програмування наступного вигляду

$$\min (\text{grad } F(\sum_{s=1}^{s=M} \tilde{Z}^j, Z^s)) \quad (5)$$

за умови $S_p Z^s = b$,

причому $\sum_s b_s = b; Z^0 = 0$.

По суті спроба побудови початкового плану за допомогою алгоритму (4) і (5) базується на передумові про безперервність і монотонність оптимального рішення \tilde{X} від вектора перевезень b . Розглянемо, за яких умов і в якому сенсі ці властивості застосовані до задачі типа (3).

Досліджуємо наступну екстремальну задачу

$$\begin{aligned} \min f(X^k); & \quad (6) \\ A X^k = \sum_{s=1}^{s=k} b_s; & \\ X^k \geq 0. & \end{aligned}$$

При різних $k = 1, 2, \dots, M - 1$ вирішуватиметься задача вигляду (3), але не для всього об'єму перевезень. Необхідно з'ясувати, коли при зміні k від 1 до M послідовність рішень задачі (6*) $\tilde{X}^1, \tilde{X}^2, \dots, \tilde{X}^M$ буде монотонно зростаючою $\tilde{X}^1 < \tilde{X}^2 < \dots < \tilde{X}^M$.

Разом з (6) введемо допоміжні задачі (6*) $s = 1, 2, \dots, M$, вигляду

$$\begin{aligned} \min f(\tilde{X}^{s-1} + y_s); & \quad (6^*) \\ A y_s = b_s; & \\ y_s \geq 0. & \end{aligned}$$

Прийmemo для визначеності $\tilde{X}^0 = 0$.

Для того, щоб послідовність рішень $\tilde{X}^1, \tilde{X}^2, \dots, \tilde{X}^M$ була такою, що монотонно зростає, необхідно та досить аби виконувалася умова

$$\tilde{X}^k = \sum_{s=1}^{s=k} \tilde{y}_s, \quad (7)$$

при цьому $k = 1, 2, \dots, M$, а \tilde{y}_s – рішення задачі (6*).

Для $k = 1$ твердження очевидне, оскільки $\tilde{X}^1 = \tilde{y}_1$.

Тоді $\tilde{X}^k = \tilde{X}^{k-1} + \tilde{y}_k$, а через позитивність (7)

$$\tilde{X}^k \geq \tilde{X}^{k-1}.$$

При побудові початкового плану зручно вектор b розбивати на колінеарні складові, тобто приймати всі $b_s = h_s b$.

$$\min (\text{grad } F(\sum_{j=0}^{s-1} \tilde{Z}^j, Z^s)) \quad (8)$$

за умов

$$\begin{aligned} S_p \cdot Z^s = h_s \cdot b; & \\ Z^s \geq 0; Z^0 = 0; & \\ \sum_{s=1}^{s=M} h_s = 1; h_s \geq 0. & \end{aligned}$$

Умови безперервності й монотонності при розбитті вектора перевезень b на колінеарні складові розглянемо відповідно до задачі

$$\begin{aligned} \min f(X_t); & \quad (9) \\ A \cdot X_t = b \cdot t; & \\ X_t \geq 0. & \end{aligned}$$

Встановимо, коли має місце співвідношення

$$\frac{d\tilde{X}_t}{dt} > 0, \quad (10)$$

де \tilde{X}_t – рішення задачі (9), тобто коли при збільшенні вектора перевезень жодна з компонент оптимального плану не зменшується, а хоч би одна зростає.

Виключимо з розгляду вироджені випадки та припустимо, що рішення в (9) єдине. Тоді, вочевидь, що (10) справедливо, якщо функціонал f лінійний.

Функціонал f однорідний. З однорідності f виходить, що $f(tX) = t^0 f(X)$. Тоді, якщо \tilde{X} єдине рішення (9) при $t = 1$, то для довільного $t > 0$ $\tilde{X}_t = t \cdot \tilde{X}$.

Функція $\varphi(t) = \frac{1}{t} Z_t$ при цьому відповідає умові

$$\varphi(t) \geq 0; A\varphi(t) = A \frac{1}{t} Z_t = b, \quad (11)$$

тобто обмеженням (8) при $t = 1$. Проте

$$f(\varphi(t)) = f\left(\frac{1}{t} Z_t\right) = \frac{1}{t^\alpha} f(Z_t) < \frac{1}{t^\alpha} f(t\tilde{X}) = f(\tilde{X}), \quad (12)$$

що суперечить оптимальності \tilde{X} . Умова однорідності є лише достатньою, але не необхідною.

У тому випадку, якщо неоднорідний функціонал $f \frac{dX_t}{dt}$ не задовольняє умові (9), не можна стверджувати

вати, що навіть при $\max h_s \rightarrow 0$ алгоритм побудови початкового плану, згідно з (6), (12), дає оптимальне рішення задачі (3). Отже, необхідна процедура покращення допустимого, але неоптимального плану.

Алгоритм покращення допустимого плану.

Ідея необхідності направлення поїздопотоків за найкоротшими (у розумінні диференціальної вартості) напрямками може бути використана й на другому етапі, коли потрібно перейти від одного допустимого плану до іншого, більш кращого. Якщо на деякій i -й ітерації отриманий допустимий, але неоптимальний план, то це означає, що деякі поїздопотоки (або їх частина) пішли не тими маршрутами. Тому необхідно зняти деяку частину всіх поїздопотоків і направити їх за вигіднішими маршрутами. Формально перехід від плану $X^i \neq \bar{X}$ до плану X^{i+1} – такому, що $F(X^{i+1}) < F(X^i)$, може бути виконаний за алгоритмом

$$X^{i+1} = (1 - k^i)X^i + \bar{y}^i, \quad (13)$$

де \bar{y}^i – рішення допоміжної задачі лінійного програмування вигляду

$$\begin{aligned} \min & (\text{grad } F(X^i - k^i X^i), \bar{y}^i); \quad (14) \\ S_p \bar{y}^i &= k^i b; \\ \bar{y}^i &\geq 0. \end{aligned}$$

Допустимість вектора X^{i+1} для задачі (3) перевіряється. При досить малих k^i послідовність значень $\{X^i\}$, побудована згідно з алгоритмами (13) і (14), є такою, що монотонно зменшується.

Розглянемо значення різниці

$$\delta^i = F(X^{i+1}) - F(X^i). \quad (15)$$

При досить малих k^i справедливі співвідношенн

$$F(X^{i+1}) = F(X^i - k^i X^i + \bar{y}^i) = F(X^i - k^i X^i) + (\text{grad } F(X^i - k^i X^i), \bar{y}^i) + o(\|\bar{y}^i\|);$$

$$F(X^{i+1}) = (X^i - k^i X^i + k^i X^i) = F(X^i - k^i X^i) + (\text{grad } F(X^i - k^i X^i), k^i X^i) + o(\|k^i X^i\|).$$

Оцінимо величини $o(\|\bar{y}^i\|)$ і $o(\|k^i X^i\|)$. Через обмеженість координат X^i величина $\|X^i\|$ також обмежена, а $o(\|k^i X^i\|)$ може бути замінена на $o(k^i)$.

Для оцінки величини $o(\|\bar{y}^i\|)$ врахуємо, що через диференційоване рішення задачі (14) за параметром

k^i має місце рівність $\bar{y}^i(k^i) = \bar{y}^i(0) + \frac{d\bar{y}^i(0)}{dk^i} k^i + o(k^i)$, але при $k^i = 0$, $\bar{y}^i = 0$ і, отже

$$\|\bar{y}^i\| = \left\| \frac{d\bar{y}^i(0)}{dk^i} \right\| k^i + o(k^i). \quad (16)$$

Правомірність заміни $o(\|\bar{y}^i\|)$ на $o(k^i)$ стає очевидною, якщо врахувати, що при опуклому та монотонно зростаючому характері $F(X)$ $\left\| \frac{d\bar{y}^i}{dk^i} \right\|$ обмежена.

Тепер розглянемо різницю δ^i з урахуванням отриманих оцінок для $o(\|\bar{y}^i\|)$ і $o(\|k^i X^i\|)$

$$\begin{aligned} \delta^i &= (\text{grad } F(X^i - k^i X^i), \bar{y}^i) - \\ &- (\text{grad } F(X^i - k^i X^i), k^i X^i) + o(k^i). \quad (17) \end{aligned}$$

Оскільки \bar{y}^i є рішенням (16), а $k^i X^i$ її неоптимальним планом, то

$$\begin{aligned} \omega^i &= (\text{grad } F(X^i - k^i X^i), \bar{y}^i) - \\ &- (\text{grad } F(X^i - k^i X^i), k^i X^i) < 0. \quad (18) \end{aligned}$$

Неважко побачити, що ця різниця має порядок $o(k^i)$. При безперервності $\text{grad } F$ у точці X^i і неоптимальності плану X^i це витікає з представленого ω^i у вигляді

$$\omega^i = \left[(\text{grad } F(X^i - k^i X^i), \frac{\bar{y}^i}{k^i}) - (\text{grad } F(X^i - k^i X^i), X^i) \right], \quad (19)$$

де $\frac{\bar{y}^i}{k^i}$ і X^i – допустимі й істотно різні плани основної задачі (3).

Якщо виключити особливі випадки (точки порушення безперервності градієнта та інші), то отримаємо $\delta^i < 0$, тобто побудована послідовність $\{X^i\}$, що монотонно зменшується.

Згідно з (14), на кожному кроці покращення плану перевезень фактично вирішується задача пошуку найкоротших відстаней у мережі, довжини дуг якої дорівнюють диференціальним витратам проїзду по ним. Ці витрати від кроку до кроку змінюються, і тому особливо важливе значення для вирішення задачі планування поїздопотоків у мережі великих розмірів має використання швидкодіючих алгоритмів пошуку найкоротших відстаней.

Визначення структури функцій витрат на перевезення. Цільова функція, що використовується в

подальших розрахунках, є сумою витрат на пересування вантажних поїздів по ланках мережі з урахуванням відповідних витрат на переробку поїздів у вузлах мережі. Конкретний же вигляд функцій витрат на перевезення та міру їх деталізації, вимоги до точності наближення до оптимуму та інші визначаються метою рішення задачі.

Вважатимемо, що задача розподілу поїздопотоків розглядається стосовно залізничного напрямку з паралельними ходами Знам'янка – Одеса-Сортувальна, агрегованому відповідним чином до розмірів мережі (12 вузлів і 13 ланок).

Міра агрегації залізничного напрямку мережі визначається можливістю здобуття достовірної інформації про напрямок і розміри поїздопотоків. Мережа агрегується так, щоб усі ділянки, що отримують поїздопотоки, були однорідні на всьому протязі за найважливішими технічними та експлуатаційними показниками, такими як кількість колій, вид тяги, система централізації та блокування (СЦБ), довжина приймально-відправних колій. При цьому пасажирські поїздопотоки вважаються заданими та сталими.

Процес агрегації поширюється й на вихідну інформацію про перевезення. У ній вказується, з якого вузла в якій і в якій кількості слідують вантажні поїздопотоки. Вагова норма поїздів, статичні навантаження на вісь вагонів і міру використання вантажопідйомності приймаються середніми та єдиними для всіх поїздів, що проходять по вибраній ділянці.

Витрати з перевезення вантажів можна розбити на дві складові:

- постійні та незалежні від об'єму перевезень (витрати з обслуговування постійних пристроїв інфраструктури);

- залежні – безпосередньо визначаються інтенсивністю завантаження елементів мережі вантажними та пасажирськими поїздопотоків.

При вирішенні задачі оптимізації постійний доданок у цільовій функції може бути з розрахунку виключено, тому розглядається лише частина витрат, залежна від об'єму перевезень. Значення функціоналу, що виходить, при цьому буде менше повних витрат на деяку константу, але план оптимальних поїздопотоків на кожній ділянці не зміниться.

Витрати на ділянках мережі. Для розрахунків на ЕОМ залежні витрати на кожній транспортній ланці мережі мають бути представлені у вигляді функції від обсягів вантажних поїздопотоків з урахуванням розмірів руху порожніх поїздопотоків по регульовальних завданнях в обох напрямках. Необхідно, щоб ці функції зважали на специфіку кожної ділянки та залежали від вказаних вище найважливіших технічних і експлуатаційних параметрів. До них повинні входити як безпосередньо експлуатаційні витрати, так і капіталовкладення в рухомий склад, вартість вантажної маси.

За основу взято аналітичні вирази з визначення залежних наведених витрат на перевезення вантажу по залізничній ланці, запропоновані й засновані на

методиці [3, 4]. Використані аналітичні формули спираються на гіпотезу рівночисельного обміну, а потужність локомотиву приймається рівною потрібної.

Функції витрат на ланках розбиваються на класи [5] залежно від кількості колій на ділянці таким чином, що функції одного класу розрізняються лише значеннями відповідних коефіцієнтів, залежних від експлуатаційних і технічних параметрів інфраструктури ділянки. Кількістю коефіцієнтів функцій і визначається об'єм інформації для кожної ділянки мережі.

Кількість навантажених поїздів у непарному напрямку більша, ніж у парному, а кількість порожніх вантажних поїздів у непарному напрямку менша, ніж у парному. Тому застосовуємо наступну термінологію: направлення від вузла з меншим номером до вузла з більшим номером назвемо прямим, а протилежне – зворотним, незалежно від їх завантаження. Напрямок, відповідний більшій кількості вантажних поїздів, назвемо навантаженим, а зустрічний – порожнім.

Гіпотеза рівночисельного обміну кількості поїздів, на якій, зазвичай, ґрунтуються функції витрат, дає можливість визначати розміри порожніх поїздопотоків на ланці залежно від розмірів завантажених поїздопотоків. Тому функції витрат розглядаються як функції лише двох аргументів – поїздопотоків в обох напрямках.

Витрати на двоколіїній ділянці та ділянці з двоколіїйними вставками. Витрати на двоколіїній ділянці та ділянці з двоколіїйними вставкам представимо у вигляді двох доданків

$$F(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2) = F_1(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2) + \Delta F_{\text{доо}}^{\text{іа}}(N_{\text{ааі}}), \quad (20)$$

де N_1, N_2 – кількість вантажних поїздів кожного напрямку перевезень; $N_{\text{ааі}} = \max(N_1, N_2)$ – розміри руху навантаженого напрямку перевезень.

Основні витрати $F_1(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2)$ – представляються

$$\hat{A}_1(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2) = \sum_{i=1}^{i=6} C_i. \quad (21)$$

У (21) відповідні доданки мають наступний економічний зміст:

- 1) C_1, C_2 – витрати на механічну роботу з просування поїздопотоків у прямому та зворотному напрямках відповідно;
- 2) C_3 – витрати на механічну роботу з перевезення порожніх поїздопотоків;
- 3) C_4 – витрати, пропорційні часу перевезення;
- 4) C_5 – витрати, пропорційні довжині пробігу;
- 5) C_6 – витрати, пропорційні об'єму вантажу, що перевозиться;
- 6) C_7 – додаткові витрати, пов'язані з додатковим простим поїздопотоків при зміні локомотивів і локо-

мотивних бригад, пов'язаних з обертом чи „переломами“ маси поїздів.

Складова $\Delta F_{\text{доо}}^{\text{іа}}(N_{\text{аіа}})$ – це додаткові витрати, пов'язані з наданням „вікон“ або простоями при неможливості організації безупинного схрещення на одноколійних ділянках з двоколійними вставками. Цей доданок істотно відрізняється від нуля та зростає нелінійно лише при розмірах руху, близьких до пропускну здатності ділянки.

Розглянемо кожну складову витрат. Витрати C_1, C_2 визначаються за формулою

$$C_k = 0,365LN_k \left[P(\omega_0' + i_k^{\text{іа}}) + Q_k(\omega_k'' + i_k^{\text{іа}}) \right] C_{\text{іаі}}, \quad (22)$$

де $k=1$ – кількість поїздів у прямому й $k=2$ – у зворотному напрямку; L – довжина ланки, км; Q_k – маса навантаженого поїзда брутто, т.; P – маса локомотива, т.; N_k – кількість вантажних поїздів даного напрямку; ω_0' – питомий опір руху локомотива, Н/т.; ω_k'' – питомий опір руху навантаженого вагона, Н/т.; $i_k^{\text{іа}}$ – еквівалентний ухил, ‰; $C_{\text{іаі}}$ – витрати на 1 т.-км роботи локомотива з подолання основного опору.

Маса навантаженого поїзда

$$Q_k = \frac{q_k l_{\text{іа}}}{l_{\text{вагони}}}, \quad (23)$$

де q_k – навантаження на вісь навантаженого вагона в даному напрямку, т.; $l_{\text{вагони}}$ – довжина вагона, що доводиться на вісь, м; $l_{\text{іа}}$ – довжина прийнятно-відправних колій, м.

Кількість вантажних поїздів розраховується за формулою

$$N_k = \frac{\tilde{A}_k}{365\gamma_k Q_k}, \quad (24)$$

де \tilde{A}_k – вантажопотік в даному напрямку, т.; $\gamma_k = \frac{Q_{\text{іаі}}}{Q_{\text{аіа}}}$ – відношення середньої маси поїзда нетто до середньої маси поїзда брутто (ця величина приймається рівною $1 - \frac{q_{\text{пор}}}{q_k}$); $q_{\text{іаі}}$ – середнє навантаження на вісь порожнього вагона.

Величини значень ходової швидкості $v_{\text{до}}$, що беруть участь у розрахунках, швидкості на розрахунковому ухилі $v_{\text{іа}}$ і опору ω_0 вважаються постійними.

Опір руху навантаженого вагона залежить від ходової швидкості та навантаження на вісь. Розраховується за формулою [6]

$$\omega_k'' = 0,7 + \frac{3 + 0,1v_{\text{до}} + 0,0025v_{\text{до}}^2}{q_k}, \quad (25)$$

де $v_{\text{до}}$ – ходова швидкість поїзда, км/год; q_k – навантаження на вісь, т./вісь.

Остаточна формула (22) має вигляд

$$C_k = a_k \cdot \tilde{A}_k; \quad k=1, 2., \quad (26)$$

де a_k – коефіцієнт, свій для кожної ланки та напрямку (його значення залежить від довжини ділянки, станційних колій, навантаження на вісь, еквівалентних ухилів і поясної зони).

Витрати на механічну роботу з перевезення порожнього вагонопотоку визначається аналогічно

$$C_3 = 0,365LC_{\text{іаі}} \left[P(\omega_0' + i_k^{\text{іа}}) + Q_1(\omega_1'' + i_k^{\text{іа}}) \right] |N_1 - N_2|, \quad (27)$$

де Q_1 – маса порожнього поїзда, т.; ω_1'' – питомий опір руху порожнього вагона, що визначається за формулою (25) при $q_k = q_i$; $i_k^{\text{іа}}$ – дорівнює $i_1^{\text{іа}}$, якщо порожні вагонопотоки рухаються у прямому напрямку, і $i_2^{\text{іа}}$, якщо у зворотному.

Величина Q_1 визначається з навантаження на вісь порожнього поїзда q_i .

Формулу (27) можливо записати у вигляді

$$C_3 = a_3^k |N_1 - N_2| \quad \text{при } k=1, 2., \quad (28)$$

де a_3^k дорівнює a_3^1 , якщо порожній поїздопотік рухається у прямому напрямку, і a_3^2 , якщо у зворотному напрямку.

Витрати, пов'язані з вартістю локомотиво-годин та вагоно-годин складуть

$$C_4 = \frac{365L}{v_x} \left[2e_{\text{л-год}} \max(N_1 + N_2) + e_{\text{віс-год}} \left(\frac{Q_1}{q_1} N_1 + \frac{Q_2}{q_2} N_2 + \frac{Q_{\text{п}}}{q_{\text{п}}} |N_1 - N_2| \right) \right], \quad (29)$$

де $e_{\text{л-год}}$ – вартість локомотиво-години; $e_{\text{віс-год}}$ – вартість поїздо-години.

Вартість локомотиво-години визначається за формулою

$$e_{\text{л-год}} = e_{\text{аіа-аіа}} + \frac{e_{\text{т}} \bar{M}}{8760}, \quad (30)$$

де $e_{\text{аіа-аіа}}$ – витратна ставка локомотивних бригад; $e_{\text{т}}$ – відрахування від вартості локомотива, що доводиться на 1 Н; \bar{M} – потрібна потужність локомотива.

$$\bar{M} = \max_k \cdot \frac{v_{\delta} \left[Q \cdot (\omega_k'' + i_k^{\delta}) + P(\omega_0' + i_k^{\delta}) \right]}{270}, \quad (31)$$

де i_k^{δ} – керівний ухил для кожного напрямку.

Величини $e_{\delta\delta-\hat{\delta}\hat{\delta}}$ та e_{Γ} приймаються єдиними для всієї мережі напрямку.

Вартість вагоно-години визначається за формулою

$$e_{\text{віс-год}} = 2,57 \cdot 10^{-3} + \frac{12 \cdot \gamma \cdot E \cdot C_{\text{ван}} + (1 - \gamma) \cdot (E + \Delta_{\delta}) \cdot C_{\Gamma}}{8760}, \quad (32)$$

де E – нормативний коефіцієнт ефективності; $C_{\text{ван}}$; C_{Γ} – середня вартість, відповідно, вантажу й тари, грн.; Δ_{δ} – норма реноваційних відрахувань вагонного парку, грн.

Витрати, пропорційні часу перевезення, розраховуються за формулою

$$C_4 = a_{41} \max(N_1, N_2) + a_{42} \tilde{A}_1 + a_{43} \tilde{A}_2 + a_{44} |N_1 - N_2|, \quad (33)$$

де a_{4i} – коефіцієнт, що залежить від керівного ухилу прямого та зворотного напрямків, що приходиться на поїзд, вантажну масу на колесах у прямому та зворотному напрямках, пересуванню порожніх поїздів.

Витрати, пропорційні пробігу поїздів, визначаються за формулою

$$C_5 = 365L \left[\begin{array}{l} 2e_{\text{лок-км}} \max(N_1, N_2) + \\ + e_{\text{віс-км}} \left(\frac{Q_1}{q_1} N_1 + \frac{Q_2}{q_2} N_2 + \frac{Q_{\text{п}}}{q_{\text{п}}} |N_1 - N_2| \right) \end{array} \right], \quad (34)$$

де $e_{\hat{\delta}\hat{\delta}-\hat{\delta}\hat{\delta}}$, $e_{\hat{\delta}\hat{\delta}-\hat{\delta}\hat{\delta}}$ – витрати, віднесені, відповідно, на локомотиво-кілометри та вагоно-кілометри, грн.

Аналогічно попередньому, формулу (34) представимо наступним чином

$$C_5 = a_{51} \max(N_1, N_2) + a_{52} \cdot \Gamma_1 + a_{53} \cdot \Gamma_2 + a_{54} \cdot |N_1 - N_2|, \quad (35)$$

де a_{5i} – коефіцієнт, що залежить від керівного ухилу прямого й зворотного напрямків, що приходиться на поїзд, вантажну масу на колесах у прямому та зворотному напрямках, пересуванню порожніх поїздів.

Витрати, пропорційні об'єму перевезень, визначаються за формулою

$$C_6 = [\tilde{A}_1 + \tilde{A}_2 + 730 \cdot Q_1 \max(N_1, N_2)] e_{\delta\delta-\hat{\delta}\hat{\delta}} \cdot L, \quad (36)$$

де $e_{\delta\delta-\hat{\delta}\hat{\delta}}$ – питомі витрати з перевезення, пропорційні тонно-кілометровій роботі брутто.

Рівняння (36) запишемо в наступному вигляді

$$C_6 = a_{61} (\tilde{A}_1 + \tilde{A}_2) + a_{62} \max(N_1, N_2), \quad (37)$$

де a_{6i} – коефіцієнт витрат, пропорційний обсягу перевезень.

Підсумовуючи ряд наведених вище складових, отримаємо основні витрати з перевезення (20) у наступному вигляді

$$F_1(\Gamma_1, \Gamma_2) = P_1 \cdot \Gamma_1 + P_2 \cdot \Gamma_2 + P_3^k \left| \frac{\Gamma_1}{\lambda_1} + \frac{\Gamma_2}{\lambda_2} \right| + P_4 \cdot \max \left(\frac{\Gamma_1}{\lambda_1}, \frac{\Gamma_2}{\lambda_2} \right), \quad (38)$$

де $\frac{\tilde{A}_k}{\lambda_k} = N_k$ – кількість поїздів вантажного та зворотного напрямків; λ_k – коефіцієнт переходу від розміру вантажопотоку в тоннах до кількості поїздів даного напрямку, що розраховується за формулою

$$\lambda_k = \frac{365 \cdot q_k \cdot l_{i\hat{\delta}}}{l_{\hat{\delta}\hat{\delta}}}. \quad (39)$$

Витрати, що пов'язані зі схрещенням і обгоном вантажних поїздів $\Delta F_{\delta\delta\delta}^{\hat{\delta}\hat{\delta}}(N_{\hat{\delta}\hat{\delta}\hat{\delta}})$ на одноколінійній ділянці з двоколійними вставками, складуть

$$\Delta \hat{A}_{\delta\delta\delta}^{\hat{\delta}\hat{\delta}}(N_{\hat{\delta}\hat{\delta}\hat{\delta}}) = 365 \cdot L \cdot R \cdot (e_1 + e_2), \quad (40)$$

де R – кількість зупинок поїздів із-за схрещень і обгонів; e_1 – витрати, пов'язані з розгоном і гальмуванням поїзда при зупинках; e_2 – втрати, пов'язані з простоем поїзда при схрещеннях.

Висновки. У якості розрахункової схеми прийнято мережу, що складається із транспортних ланок, на яких сконцентровані всі витрати з перевезення, і абстрактних точкових вузлів, що розділяють ланки.

При незмінному технічному стані елементів мережі додаткові витрати на перевезення кожного подальшого поїзда з сировиною та продукцією гірничо-металургійного комплексу зростають. Тому, з достатньою точністю, витрати з перевезення вантажу на напрямку з паралельними ходами, що мають одноколіїні перегони з двоколійними вставками, можуть бути представлені у вигляді монотонно зростаючої та опуклої функції, залежної від потужності вантажних і пасажирських поїздопотоків.

Сформована таким чином розширена мережа, що включає як дійсні ланки, за якими безпосередньо здійснюються перевезення, так і додаткові ланки – функції витрат на перевезення, що представляють собою відповідні залежності витрат на переробку поїздопотоків у вузлах.

В якості опорного плану прийняті існуючі розміри руху вантажних поїздів із сировиною та готовою продукцією підприємств гірничо-металургійного комплексу за паралельними ходами. Для лінійних задач – це перевага, оскільки там процедура покращен-

ня допустимого плану будується шляхом перебору в певному порядку частини його вершин. Крім того, і це головне, у лінійних задачах оптимальним планом обов'язково є одна з вершин.

Експлуатаційні витрати на перевезення, що залежать від розмірів руху вантажних поїздів, розраховують для кожної ділянки напрямку додаванням добутоків одиничних або укрупнених витратних ставок на розмір витрат вимірників на ділянках – окремо в парному та непарному напрямках.

При моделюванні роботи паралельних напрямків враховуються наступні вимірники:

- часові: вагоно-години, локомотиво-години поїзної та маневрової роботи, бригадо-години локомотивних бригад;
- пробіжні: вагоно-кілометри, поїздо-кілометри, локомотиво-кілометри, тонно-кілометри брутто вагонів та локомотивів;
- енергетичні: тонно-кілометри механічної роботи, кіловат-години електроенергії.

Для вирішення задачі ефективного розподілу поїздопотоків із сировиною та готовою продукцією підприємств гірничо-металургійного комплексу за паралельними ходами залізничної мережі використовуються лінійні моделі та методи лінійного програмування. Використання цих методів, як обов'язкову передумову, вимагає, щоб питома вартість перевезень на ланці мережі була постійною й не залежала від розмірів вагонопотоків і поїздопотоків з вантажем.

При моделюванні процесу ефективного розподілу поїздопотоків за паралельними ходами включені наступні витрати:

- витрати на механічну роботу з просування поїздопотоків у прямому та зворотному напрямках;
- витрати на механічну роботу з перевезення порожніх поїздопотоків;
- витрати, пропорційні часу перевезення;
- витрати, пропорційні довжині пробігу поїздів;
- витрати, пропорційні об'єму вантажу, що перевозиться;
- додаткові витрати, пов'язані з простим розподільвальним поїздопотоків на станціях зміни локомотивів чи локомотивних бригад;
- додаткові витрати, пов'язані з простим розподільвальним поїздопотоків на станціях „перелому“ маси поїздів, пов'язані зі зменшенням маси до критичної норми.

Список літератури / References

1. Гибшман А.Е. О размещении грузовых потоков на параллельных ходах [Текст] / А.Е. Гибшман // Вестник ВНИИЖТа. – 1995. – № 6. – С. 3–6.

Gibshman, A.Ye. (1995), “About placing of freight streams on parallel motions”, *Vestnik VNIIZhT*, no.6, pp. 3–6.

2. Левин Д.Ю. Оптимизация потоков поездов [Текст] / Левин Д.Ю. – М.: Транспорт, 1998. – 175 с.

Levin, D.Yu. (1998), *Optimizatsiya potokov poezdov* [Optimization of Train Streams], Transport, Moscow, Russia.

3. Формування логістичної технології просування вантажопотоків за жорсткими нитками графіка руху поїздів [Текст] / Т.В. Бутько, Д.В. Ломотько, А.В. Прохорченко, К.О. Олійник. //Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2009. – Вип. 111. – С. 23–31.

Butko, T.V., Lomotko, D.V., Prokhorchenko, A.V. and Oliinyk, K.O. (2009), “Formation of logistic technology of cargo traffic movement with tight run profile”, *Zbirnyk naukovykh prats UkrDAZT*, no.111, pp. 23–31.

4. Батурич А.П. Организация вагонопотоков в однопутных поездах [Текст] / А.П. Батурич, А.Ф. Бородин, В.В. Панин // Мир транспорта. – 2010. – № 5. – С. 72–77.

Baturin, A.P., Borodin, A.F. and Panin, V.V. (2010), “Organization of car traffic volume”, *Mir transporta*, no.5, pp. 72–77

5. Логвінова Н.О. Методика розподілення вантажних перевезень паралельними ходами на електрифікованих ділянках [Текст] / Н.О. Логвінова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2011. – Вип. 40. – С. 57–59.

Logvinova, N.O. (2011), “Methodology of cargo traffic distribution by parallel motions at electrified railway segments”, *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu im. Lazaryana*, vol. 40, pp. 57–59.

6. Правила тягових расчетов для поезда [Текст] / [П.Т. Гребенюк, А.Н. Долганов, О.А. Некрасов и др.] – М.: Транспорт, 2005. – 287 с.

Grebenyuk, P.T., Dolganov, A.N., Nekrasov, O.A., Lisitsyn, A.L., Stromskiy, P.P., Borovikov, A.P., Chukova, V.G., Grigorenko, V.G. and Pervushina, V.M. (2005), *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty* [Rules of Train Performance Calculation], Transport, Moscow, Russia.

Цель. Определение экономически обоснованной целесообразности распределения грузопотоков с сырьем и готовой продукцией предприятия горно-металлургического комплекса между участками железнодорожного направления с параллельными ходами.

Методика. Методической основой выполнения комплексных исследований является: анализ и обобщение литературных источников и позитивного опыта пропуска грузовых поездов; математическое моделирование поезда железнодорожного направления с параллельными ходами; методы статистической, стоимостной, аналитической и экспертной оценки данных относительно состояния пропуска грузовых поездов с сырьем и продукцией предприятия горно-металлургического комплекса между участками железнодорожного направления с параллельными ходами в оперативных условиях.

Результаты. Результатами исследования являются: экономически обоснованные в оперативных условиях размеры движения грузовых поездов с сырьем и готовой продукцией предприятий горно-металлургического комплекса по участкам железнодорожных направлений с параллельными ходами при ограничении их пропускной способности на электрифицированных участках в условиях применения оптового рынка электроэнергии.

Научная новизна. Впервые сформулирована и решена оптимизационная задача относительно организации поездопотоков, которые перевозят сырье и готовую продукцию предприятий горно-металлургического комплекса на железнодорожных направлениях с параллельными ходами в условиях дифференцированных тарифов на электроэнергию, что позволяет ускорить доставку грузов и сократить расходы железной дороги на продвижение грузовых поездов. Усовершенствованно экономико-математическую модель железнодорожного направления с параллельными ходами, которая, в отличие от существующих, позволяет определить наиболее рациональное распределение поездопотоков с сырьем и готовой продукцией предприятий горно-металлургического комплекса по участкам направлений в зависимости от эксплуатационной ситуации.

Практическая значимость. Разработанные процедура и методы могут быть использованы при создании автоматизированной системы поддержки принятия решений для оперативного распределения поездопотоков с сырьем и готовой продукцией предприятий горно-металлургического комплекса по параллельным ходам в условиях дифференцированных тарифов на электроэнергию и скоростного движения пассажирских поездов, при разработке автоматизированного рабочего места (АРМ) диспетчерского персонала, оперативно предписывающих отделов дирекции и железной дороги.

Ключевые слова: *продукция горно-металлургического комплекса, перевозка, пропускная способность, размеры движения поездов*

Purpose. To determine economically viable rationale of distribution of raw material and goods traffic of an enterprise of mining-metallurgical complex between the railway segments with parallel motions.

Methodology. The methodical basis of the research included: analysis and generalization of literary sources and positive experience of freight train handling; mathematical simulation of train operation at railway segment with parallel motions; the methods of statistical, cost, analytical and expert estimation of information about the state of handling of freight trains with raw material and goods of mining-metallurgical complex enterprises at the railway segments with parallel motions in operating conditions.

Findings. We have substantiated the economically viable freight trains traffic volumes for transportation of raw material and prepared products of mining-metallurgical complex enterprises at the railway segments with parallel motions taking into account the limitation of carrying capacity on the electrified segments in the conditions of electric power wholesale market.

Originality. For the first time we have formulated and solved the problem of optimization of trains handling for transportation of raw material and goods of mining-metallurgical complex enterprises at the railway segments with parallel motions taking into account the differentiated tariffs on electric power. This allows accelerating delivery of cargo and cutting the expenses of railway on freight trains handling. We have improved the economic mathematical model of railway segment with parallel motions, which, unlike existing, allows defining the most rational distribution of trains with raw material and goods depending on the operating situation.

Practical value. The developed procedure and methods can be used for creation of computer-aided system of decision making support for the efficient distribution of trains with raw material and goods of mining-metallurgical complex enterprises at the railway segments with parallel motions taking into account the differentiated tariffs on electric power and high-speed passenger train operation, and for development of workstation (ARM) of train dispatching personnel and efficient directive departments of management and railway.

Keywords: *goods of mining-metallurgical complex enterprises, transportation, carrying capacity, train traffic volume*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук
В.І. Бобровським. Дата надходження рукопису
25.01.13.*