

М. Б. КУРГАН (ДПТ)

## **ВИЗНАЧЕННЯ КРИТЕРІЇВ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРИ ПЕРЕБУДОВІ ДІЛЯНКИ ЗАЛІЗНИЦІ ДЛЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ШВИДКІСНОГО РУХУ ПОЇЗДІВ**

Запропонований новий підхід до розподілу ділянок залізниць на об'єкти оптимізації дозволяє використовувати неадитивні критерії в залежності від поставленої задачі.

Предложенный новый подход к разделению участков железных дорог на объекты оптимизации позволяет использовать неаддитивные критерии в зависимости от поставленной задачи.

The proposed new approach to division of railway sections into the optimization objects allows to use non-additive criteria, depending on the task set up.

### **Вступ**

Як показує практика, одночасна перебудова великої кількості об'єктів на напрямках, що підлягають реконструкції, неможлива з безлічі різних причин, основними з яких є обмеження фінансових і матеріально-технічних ресурсів. Звідси виникає задача вибору оптимальної послідовності реконструкції лінії при обмежених ресурсах. При цьому важливо не тільки раціонально розподілити капітальні вкладення по ділянках, що входять у міжнародні транспортні коридори, але й ефективно їх використовувати.

Сформульовані в Цільовій комплексній програмі пропозиції є дотепер прогресивними і заперечень в основному не викликають. Однак у викладеній до неї методиці [1] залишається найменше проробленим принципово важливе питання про розподіл залізничної лінії на ділянки оптимізації. Правильне вирішення цього питання має і теоретичне, і практичне значення, бо від нього залежить вибір критерію і кінцевий результат оптимізації.

У роботі [1] передбачалась глобальна оптимізація з встановленням максимальної швидкості руху на перегонах і станціях і не розглядалась локальна оптимізація з визначенням швидкості в границях кожного бар'єрного місця.

### **Постановка задачі**

Метою роботи є обґрунтування принципово іншого підходу до розподілу ділянки транспортного коридору на об'єкти оптимізації, що дозволяє використовувати різні критерії оптимізації (неадитивні) в залежності від поставленої задачі.

Локальна оптимізація передбачає можливість встановлення максимально допустимої

швидкості не тільки у межах кожного перегону, але й по кожному об'єкту (бар'єрному місцю). Вирішення такої задачі є значно складнішим уже тому, що необхідно розглядати взаємозалежні ділянки (об'єкти). Для таких ділянок характерним є те, що скорочення часу руху поїзда, отримане на кожній ділянці після усунення обмеження швидкості руху, не дорівнює виграшу в часі, якщо зняти всі обмеження швидкості. Тобто отримати достовірні вихідні дані можна тільки після виконання тягових розрахунків при різних комбінаціях зняття обмежень швидкостей (усунення бар'єрних місць). Таких комбінацій навіть у межах перегону виникає досить багато, а у межах залізниці такий об'єм розрахунків за прийнятний термін часу не під силу навіть сучасним комп'ютерам. Відзначені протиріччя між теоретичними передумовами і практичними рекомендаціями вимагають або розробки більш обґрунтованого принципу розподілу лінії на ділянки, або принципово іншого підходу при виборі раціональних ділянок перебудови лінії.

### **Аналіз принципів розподілу залізниці на ділянки (об'єкти) для визначення оптимальної стратегії підвищення швидкостей руху**

У практиці вирішення оптимізаційних задач намітилася тенденція призначати довжину ділянки оптимізації не менше довжини перегону. Це обумовлено необхідністю враховувати в критерії оптимізації експлуатаційної складової, на величину якої, крім інших факторів, впливає обрис профілю перегону в цілому. Тому проста розбивка всієї ділянки оптимізації на окремі ланки вважалася в загальному випадку непринятною [2].

Якщо ж допустити розподіл залізниці на окремі ланки для подальшої оптимізації, то виявилось, що спосіб сполучення ланок залежить від багатьох факторів. Розрізняють такі основні два випадки.

**Незалежні ділянки**, коли рішення, прийняте в межах  $i$ -ї ділянки, не впливає на результати, прийняті на  $(i + 1)$ -й ділянці. Випадок можливий, коли критерій може вважатися *адитивним*.

**Взаємозалежні ділянки** при *неадитивному* критерії. Рішення оптимізаційної задачі в цьому випадку є дуже складним. При усуненні близько розташованих бар'єрних місць на ділянці залізничної лінії локальна оптимізація в межах ланки (об'єкта) не дозволить одержати оптимального рішення в цілому через наявність геометричного і технічного зв'язку між об'єктами суміжних ділянок оптимізації, а також через те, що експлуатаційна складова є глобальною функцією поздовжнього профілю лінії.

При постановці задачі в теоретичному плані розробники «Програми» [1] справедливо мали на увазі розподіл лінії на ділянки за умови їхньої взаємної незалежності, що дозволяло приймати рішення як по кожній ділянці окремо, так і в сукупності по всіх ділянках лінії. Однак практичні рекомендації авторів щодо розподілу лінії на відрізки між осями роздільних пунктів або на роздільні пункти і перегони йдуть врозріз із принципом їхньої взаємної незалежності, що може привести до неправильних результатів рішення задачі. Так, наприклад, подання лінії як сукупності послідовно розташованих ділянок: роздільний пункт-перегін-роздільний пункт-перегін і т. д. може бути прийнято лише як наближений розподіл залізниці на ланки, оскільки сусідні ділянки в більшості випадків є залежними за швидкістю [2].

У подальших дослідженнях [3–5] були сформульовані вимоги до розподілу лінії на незалежні ділянки, що припускають:

– взаємну незалежність ділянок по швидкості пасажирських поїздів, тобто наявність обмежень швидкості в межах даної ділянки не впливає на рівні швидкостей на сусідніх з нею (ліворуч і праворуч) ділянках;

– взаємну незалежність ділянок за умови провадження робіт – роботи з перебудови лінії для підвищення швидкості поїздів (зняття обмежень) на виділених сусідніх ділянках можна здійснювати незалежно одна від одної, тобто технологічно ці роботи не зв'язані.

Перша вимога підлягає обов'язковому виконанню. Друга – не є настільки жорсткою, вона може бути врахована на більш пізній стадії, коли по сформованому оптимальному варіанту перебудови лінії здійснюється ув'язування послідовності й термінів виконання різних видів робіт зі зняттям обмежень швидкості пасажирських поїздів.

Перераховані вимоги не накладають ніяких обмежень ні на довжину ділянки, ні на присутність (чи, навпаки, відсутність) у межах однієї ділянки одночасно роздільного пункту і перегону, тобто в межі однієї ділянки можуть бути включені одночасно роздільний пункт (чи пункти) і перегін (чи його частина) чи, навпаки, роздільний пункт і перегін одночасно не включаються. Насамперед це залежить від обрисів кривої швидкості, побудованої за умови повного використання потужності локомотива, і наявності обмежень швидкості (сполучення їхніх рівнів і взаємного розташування).

Сформульовані пропозиції щодо розподілу лінії на незалежні ділянки припускають побудову кривої швидкості пасажирського поїзда  $V(S)$  з нанесенням максимально допустимої швидкості  $V_{\max}$  (глобальне обмеження) і локальних обмежень  $V_{\text{обм}} < V_{\max}$ , обумовлених параметрами і технічним станом споруд і пристроїв дороги.

Аналіз розміщення існуючих обмежень швидкості руху пасажирських поїздів по довжині залізничної лінії показує, що за методикою [1] на одних ділянках скорочення часу руху пов'язано із завищеними капіталовкладеннями, а на інших – капітальні вкладення практично не приводять до підвищення швидкості.

Розрахунки витрат на усунення бар'єрних місць показують, що при розбивці ділянки на перегони й станції довжина останніх невелика (в середньому 2...2,5 км), вигреш у скороченні часу руху поїзда при підвищенні швидкості складає 0,1...0,3 хв. Великий обсяг робіт припадає на короткі ділянки, а тому такий підхід робить недоцільним реконструкцію станцій.

### **Математична модель раціональної реконструкції залізниці при неадитивному критерії**

Представимо локальну ділянку залізниці як набір об'єктів  $\omega_i$ . Характеристиками кожного об'єкта є такі параметри:

- рівень швидкості руху, що відповідає існуючому стану об'єкта,  $V_{\min}$ ;

- рівень швидкості руху, що буде можливий після реконструкції об'єкта,  $V_{\max}$  ;
- вартість реконструкції об'єкта  $C_0$  для переходу від швидкості  $V_{\min}$  до швидкості  $V_{\max}$  ;
- скорочення часу руху, що дасть реконструкція об'єкта,  $\Delta t$  .

Нехай  $\Omega$  – множина об'єктів  $\omega_i$ . Тоді задача зводиться до визначення такої підмножини  $U$ , щоб реконструкція обраних об'єктів забезпечувала скорочення часу не менше заданого, а її вартість при цьому була мінімальна. Сказане можна записати у такий спосіб.

Знайти  $U \subseteq \Omega$  так, щоб

$$\begin{cases} K(U) \rightarrow \min, \\ \Delta t(U) \geq \Delta T, \end{cases} \quad (1)$$

де  $K(U)$  – вартість реконструкції набору об'єктів  $U$ ,  $K(U) = \sum_{\omega \in U} C_0(\omega)$ ;  $\Delta t(U)$  – скорочення часу руху за рахунок реконструкції набору об'єктів  $U$ .

Визначення величини  $\Delta t(U)$  є складною задачею, тому що об'єкти, розташовані відносно недалеко один від одного, будуть чинити взаємовплив при визначенні відповідних величин  $\Delta t(\omega_i)$  (рис. 1). Тому функцію скорочення часу

$\Delta t(U)$  неправильно розглядати як суму скорочень часу по кожному об'єкту. У більшості випадків вигравш часу від усунення обмеження залежить від того, на якій швидкості поїзд наближається до бар'єрного місця і яку може набрати швидкість після його проходження. Тому під час рішення задачі оптимізації для кожного з набору об'єктів  $U$ , що розглядалися, значення функції  $\Delta t(\omega_i)$  визначалися в процесі виконання тягових розрахунків. Було встановлено, що  $\Delta t(U) > \sum_{\omega \in U} \Delta t(\omega)$ .

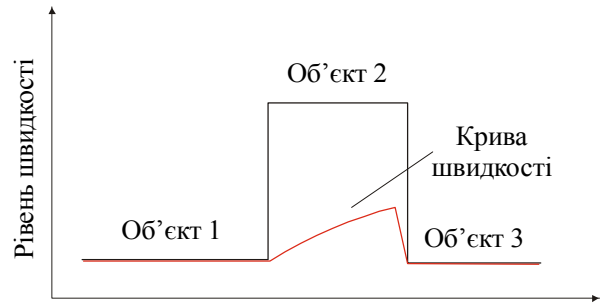


Рис. 1. Вплив близько розташованих об'єктів на визначення функції  $\Delta t(U)$

Далі, на конкретному прикладі (рис. 2) показано вирішення оптимізаційної задачі із застосуванням функції множини [8] за методикою, викладеною в роботі [9].

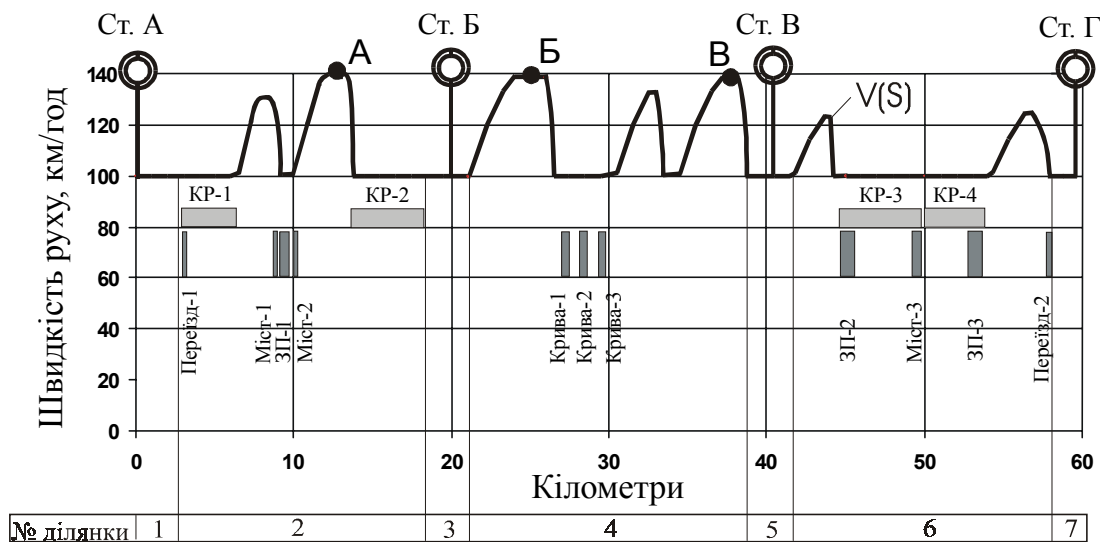


Рис. 2. Бар'єрні місця й крива швидкості  $V(S)$  на дільниці, що складається з трьох перегонів

За результатами розрахунків побудована залежність скорочення часу  $\Delta t_i$  від об'ємів інвестування  $K_i$ , рис. 3. Користуючись представленим графіком, можна встановити ефект, тобто скорочення часу руху поїзда в залежності від

розміру вкладаних на реконструкцію капіталовкладень. Так, при виділенні інвестицій у розмірі 10,0 млн грн можна отримати скорочення часу руху поїзда, що дорівнює 5 хв, при інвестиціях 20 млн грн – скорочення часу

10 хв, при 40 млн грн – 15 хв. Використовуючи графік, приведений на рис. 3, можна вирішити й обернену задачу, тобто за заданим скорочен-

ням часу, наприклад 14 хв, по графіку визначити потрібні кошти – 30 млн грн і далі знайти їх оптимальне розподілення по ділянках.

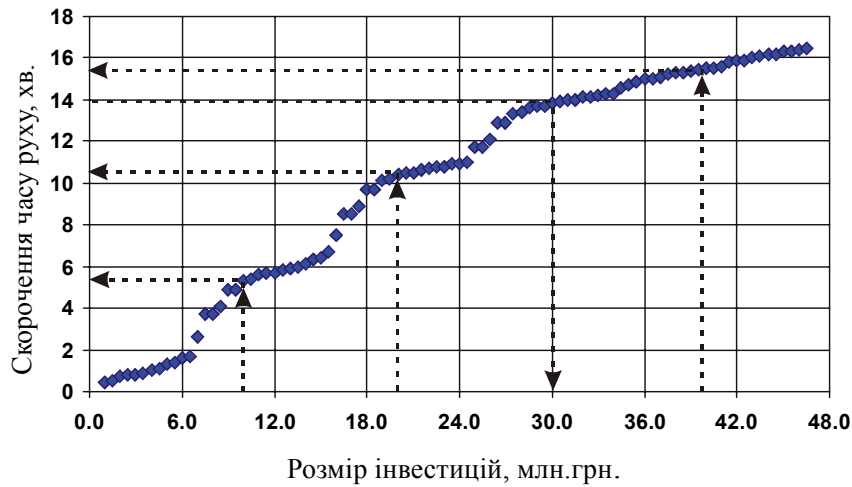


Рис. 3. Залежність скорочення часу руху пасажирського поїзда від об'ємів інвестування

У прикладних задачах динамічного програмування [10] графік  $\Delta t_i(K_i)$ , представлений на рис. 3, називають *функцією корисності*. Форма цієї кривої визначається двома важливими економічними умовами. По-перше, невеликі розміри виділяемих коштів (ресурсів), у сутності, не дають ніяких доходів і, по-друге, подальше збільшення коштів приводить, у кінці кінців, до ефекту насиченості.

В задачах оптимізації велике значення має вибір критеріїв ефективності. Їх можна звести до чотирьох груп:

- технічна ефективність;
- безпека і надійність;
- економічні показники;
- час руху або економія часу (табл. 1) [6; 7].

Таблиця 1

**Види критеріїв оцінки варіантів**

Класифікація груп критеріїв	Види критеріїв оцінки варіантів
1. Технічна ефективність (міра якості функціонування транспорту)	Пропускна здатність; провізна здатність; швидкість і терміни доставки вантажів; маневреність транспорту; потреба в паливі та ін.
2. Безпека і надійність	Безпека і регулярність руху; схоронність вантажів і навколишнього середовища; збереження здатності виконувати транспортні функції
3. Економічні показники (витрати у грошовому вираженні)	Собівартість перевезень; потрібні капітальні вкладення; вартість вантажної маси, що знаходиться в процесі транспортування; збиток, що наноситься навколишньому середовищу; тарифи на перевезення вантажів і пасажирів
4. Час руху або економія часу	Час руху поїзда; час обороту локомотива; час обороту вагона та ін.

Нижче показані підходи, дотримуючись яких можна використовувати той чи інший критерій, що відповідає цілям поставленої задачі при проведенні оптимізації.

Так, в економічних показниках одержують відображення практично всі сторони роботи транспорту. Собівартість перевезень визначається за формулою

$$C_o = \frac{\sum E}{\sum ql + \sum pl}, \quad (2)$$

де  $\sum E$  – сумарні експлуатаційні витрати, грн;  
 $\sum ql$  – вантажообіг, млн т·км;  $\sum pl$  – пасажирообіг, млн пас·км.

Із формули (2) випливає, що одним із шляхів зниження собівартості перевезень  $C_o$  є зменшення експлуатаційних витрат. Складові частини, з яких утворюються загальні витрати, включають в себе фонд оплати праці, витрати на паливо, електроенергію й матеріали, амортизаційні витрати, капітальний ремонт та інші роботи. Спі-

вставлення цих складових витрат на залізницях України за останні п'ять років показало, що відбувся суттєвий перерозподіл витрат [6].

Специфічною особливістю залізничного транспорту є те, що дизельне паливо й електроенергія виступають тут у ролі сировини для виробництва транспортної продукції. Витрати енергії на тягу поїздів є однією з основних статей витрат, пов'язаних з рухом. В свою чергу, витрати електроенергії залежать від механічної роботи сили тяги локомотива, яка витрачається якнайбільше на ділянках обмеження швидкості

руху. Чим менше таких обмежень, тим менше протяжність розгонів і гальмувань і, як наслідок, дешевше вартість пробігу поїзда.

Розглянемо застосування різних критеріїв на прикладі, що представлений на рис. 1. Перший критерій – це скорочення часу руху  $\Delta t$ , другий – економія механічної роботи сили тяги локомотива  $\Delta R_M$ . У кожному випадку фінансування однакове і складає 20 млн грн. Результати оптимізації з переліком набору об'єктів, що підлягають реконструкції, наведені в табл. 2 і 3.

Таблиця 2

**Оптимізація за часом руху поїзда**

$K$ , млн грн	$\Delta t$ , хв	Найменування бар'єрних місць
0,4	0,1	ЗП1
0,5	0,6	ЗП2, ЗП1
0,9	0,8	ЗП1, Крив3
1,7	1,4	ЗП1, Крив3
2,9	2,1	ЗП1, Крив3, Крив1
4,0	2,2	ЗП2, ЗП1, ЗП3, КР4
5,9	3,5	ЗП1, Крив3, Крив1, КР2
7,0	3,9	ЗП2, ЗП1, ЗП3, КР4, КР3
9,0	4,0	ЗП2, ЗП1, ЗП3, КР4, КР3, М1 М2
10,3	5,7	ЗП1, Крив3, Крив1, КР2, КР1, Крив2
12,0	6,0	ЗП2, ЗП1, ЗП3, КР4, КР3, М1, М2, КР2
13,3	6,8	ЗП1, Крив3, Крив1, КР2, КР1, Крив2, КР3
15,7	7,6	ЗП1, Крив3, Крив1, КР2, КР1, Крив2, КР3, КР4
16,1	8,3	ЗП1, Крив3, Крив1, КР2, КР1, Крив2, КР3, КР4, ЗП2
16,1	8,7	ЗП2, ЗП1, ЗП3, КР4, КР3, М1, М2, КР2, КР1, Крив3
16,7	9,0	ЗП1, Крив3, Крив1, КР2, КР1, Крив2, КР3, КР4, ЗП2, ЗП3
17,3	9,4	ЗП2, ЗП1, ЗП3, КР4, КР3, М1, М2, КР2, КР1, Крив3, Крив1
19,3	9,6	ЗП1, Крив3, Крив1, КР2, КР1, Крив2, КР3, КР4, ЗП2, ЗП3, Пер1 Пер2 М1
20,0	10,9	ЗП2, ЗП1, ЗП3, КР4, КР3, М1, М2, КР2, КР1, Крив3, Крив1, Крив2, М2

За даними табл. 2 побудовані графіки вартості скорочення 1 хв часу руху поїзда з локомотивом ЧС4 і ЧС8 (маса поїзда 1000 т). Наявність часто розташованих бар'єрних місць

(див. рис. 2), що утримують підвищення швидкості, не дає змоги повністю реалізувати потужність локомотива ЧС8, тому криві на рис. 4 майже співпадають.

### Оптимізація за часом руху

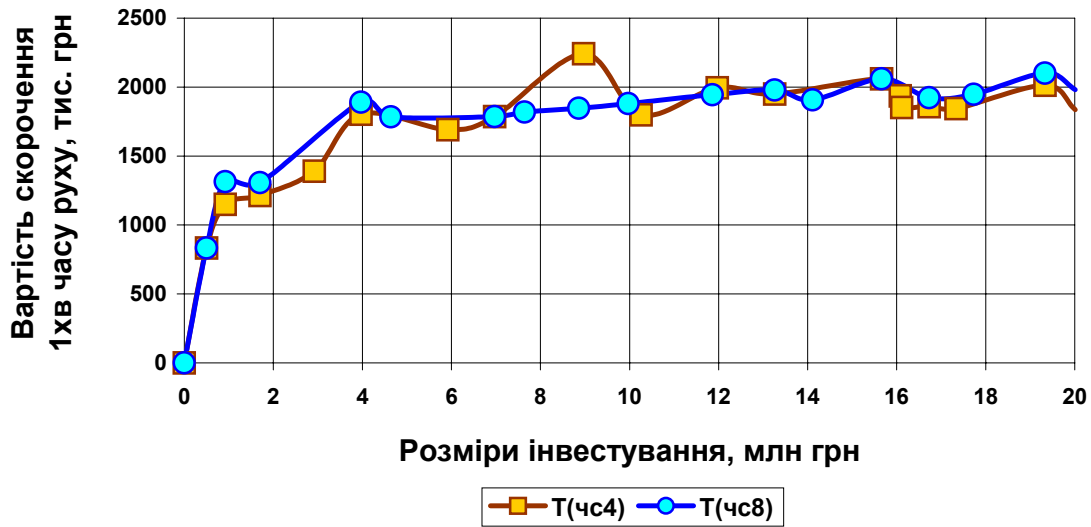


Рис. 4. Оптимізація за часом руху поїзда з локомотивом ЧС4 і ЧС8

У табл. 3 наведені результати оптимізації, коли як критерій розглядається не скорочення часу, а витрати механічної роботи сили тяги локомотива, що в кінцевому підсумку впливає

на витрати електроенергії і вартість пробігу поїзда.

Перелік об'єктів, що наведений в табл. 2 і 3, відповідає рис. 2.

Таблиця 3

### Оптимізація за механічною роботою локомотива

$K$ , млн грн	$\Delta R_M$ , т·км	Найменування бар'єрних місць
0,4	3	ЗП2
1,6	46	ЗП2, ЗП1, ЗП3
4,8	111	ЗП2, ЗП1, ЗП3, М1, М2, Крив3
6,0	158	ЗП2, ЗП1, ЗП3, М1, М2, Крив3, Крив1
11,1	212	ЗП2, ЗП1, ЗП3, М1, М2, Крив3, Крив1, М2, Крив2, КР4
15,6	223	ЗП1, Крив3, Крив1, Крив2, ЗП2, ЗП3, Пер1, Пер2, М1, М2, М3, КР4, КР1
18,6	237	ЗП1, Крив3, Крив1, Крив2, ЗП2, ЗП3, Пер1, Пер2, М1, М2, М3, КР4, КР1, КР2
20,0	291	ЗП2, ЗП1, ЗП3, М1, М2, Крив3, Крив1, М2, Крив2, КР4, КР3, КР2, КР1

За даними табл. 3 побудовані графіки вартості 1 т·км механічної роботи сили тяги локомотива при руханні поїзда з локомотивом ЧС4 і ЧС8. Як впливає з графіків (рис. 5), вартість одиниці механічної роботи для більш потужного локомотива ЧС8 менша на 25...30 % при відповідних інвестуваннях.

Далі розглядається варіант тільки з локомотивом ЧС4. На рис. 6–8 показані залежності скорочення часу руху поїзда, економії механічної роботи сили тяги, електроенергії й вартості пробігу поїзда від розміру виділених на реконструкцію інвестицій. На цих же рисунках представлені розрахункові формули, що отримані за результатами апроксимації.

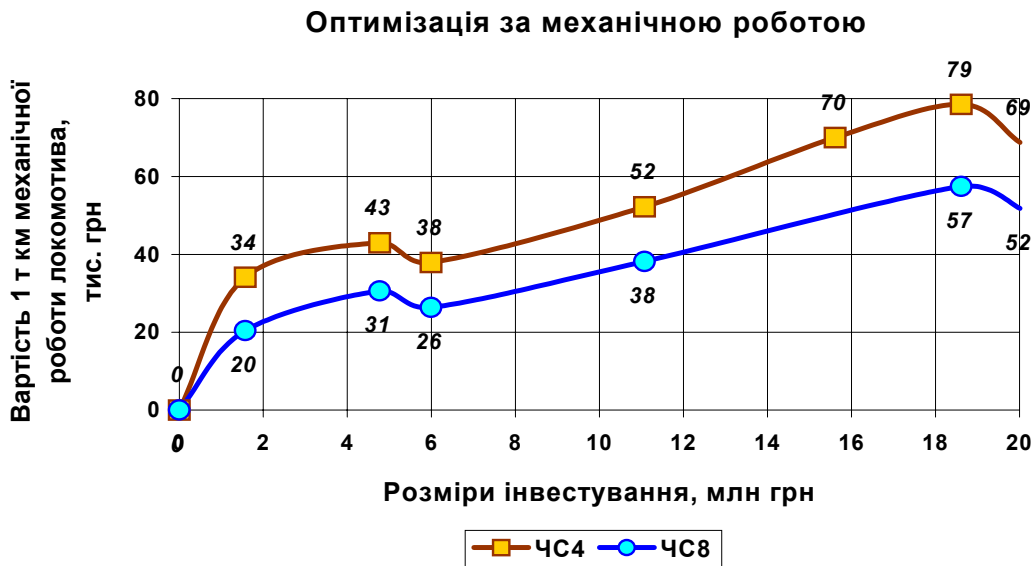


Рис. 5. Оптимізація за механічною роботою сили тяги локомотивів ЧС4 і ЧС8

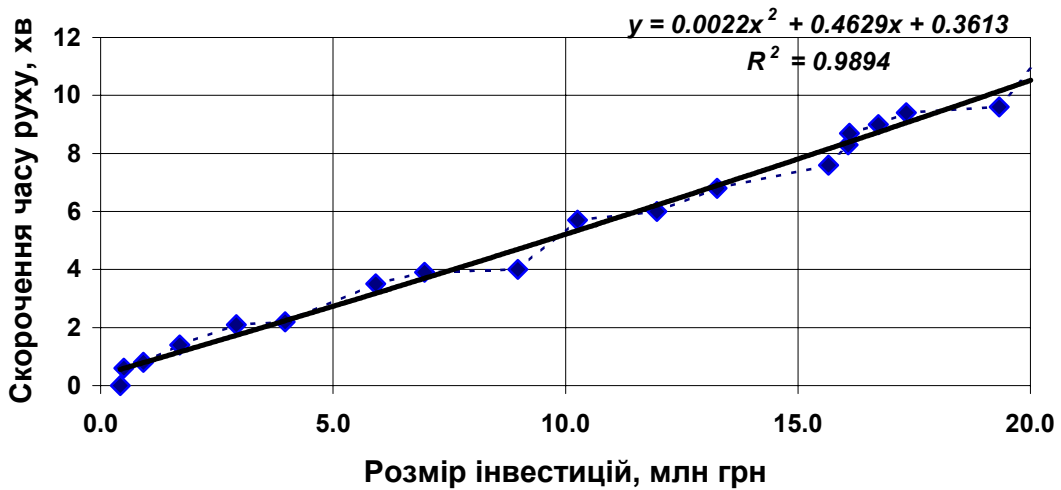


Рис. 6. Залежність скорочення часу руху від розмірів інвестицій на реконструкцію

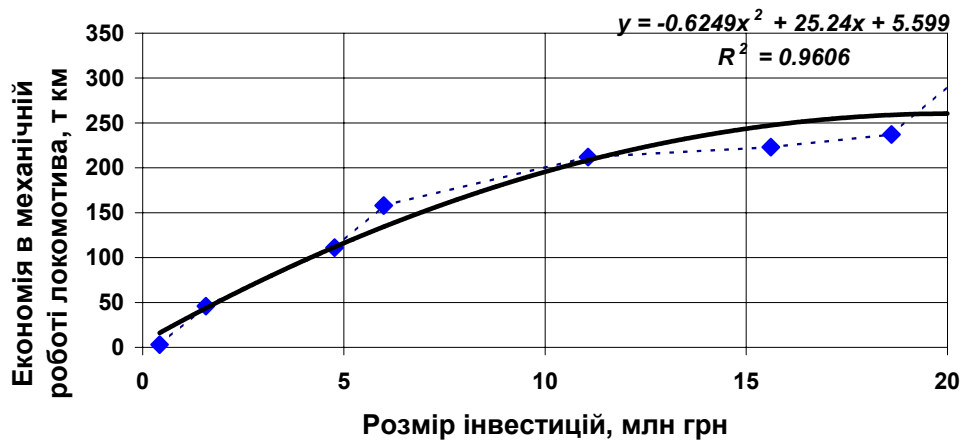


Рис. 7. Залежність економії в механічній роботі сили тяги локомотива від розмірів інвестицій на реконструкцію

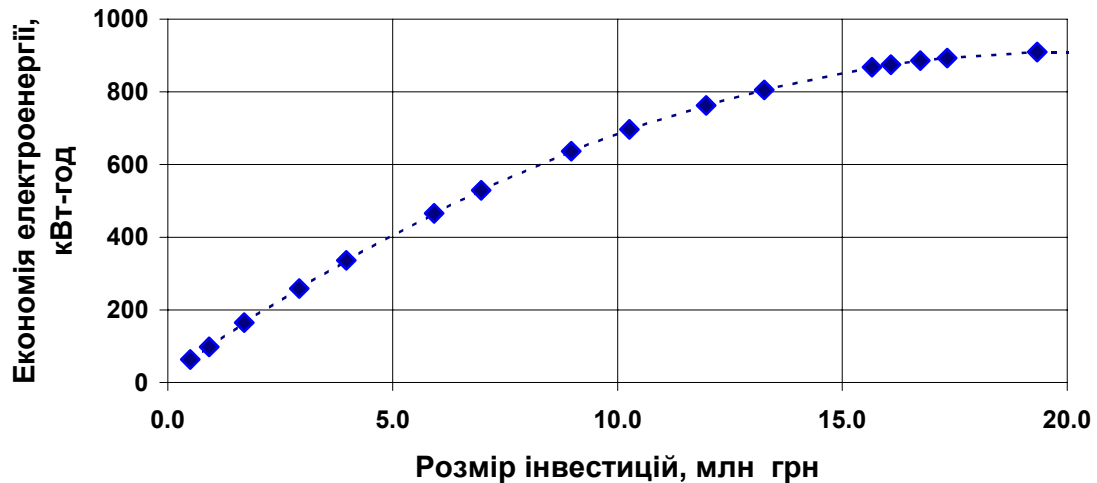


Рис. 8. Залежність економії електроенергії від проведених заходів з реконструкції дільниці, що виражається через розміри інвестицій

Експлуатаційні витрати, зв'язані з пробігом поїздів, пропорційні витратам енергії ( $e_1$ ), пробігу ( $e_2$ ) і часу руху з урахуванням простоїв поїздів ( $e_3$ ):

$$e = e_1 + e_2 + e_3, \quad (3)$$

де

$$e_1 = a_l R_l + a_c R_c + a_A A;$$

$$e_2 = La_{ns} 10^{-3} + mL a_{ns} 10^{-3} + (P + Q)La_{pl} 10^{-6};$$

$$e_3 = t_{MH} a_{MH} + t_{Mh} a_{Mh} + mt_{nH} a_{nH} 10^{-3}.$$

У доданків, що входять до формули (3):  $a_l$ ,  $a_c$ ,  $a_A$ ,  $a_{ns}$ ,  $a_{pl}$ ,  $a_{MH}$ ,  $a_{Mh}$ ,  $a_{nH}$  – одиничні

норми витрат на відповідний вимірник прийняті за даними [11] і відкориговані до курсу цін 2004 р.;  $R_l$ ,  $R_c$ ,  $A$  – відповідно механічна робота сили тяги локомотива, робота сил опору і витрати електроенергії, визначаються програмно при тягових розрахунках;  $t_{MH}$ ,  $t_{Mh}$ ,  $t_{nH}$  – відповідно час руху, простою локомотивів і роботи локомотивних бригад, руху і простою вагонів;  $m$  – кількість вагонів у поїзді.

Після проведення реконструкції експлуатаційні витрати зменшуються і досягається економія  $\Delta e$ , яка буде тим більшою, чим більше ліквідовано бар'єрних місць, що обмежували швидкість руху поїздів (рис. 9).

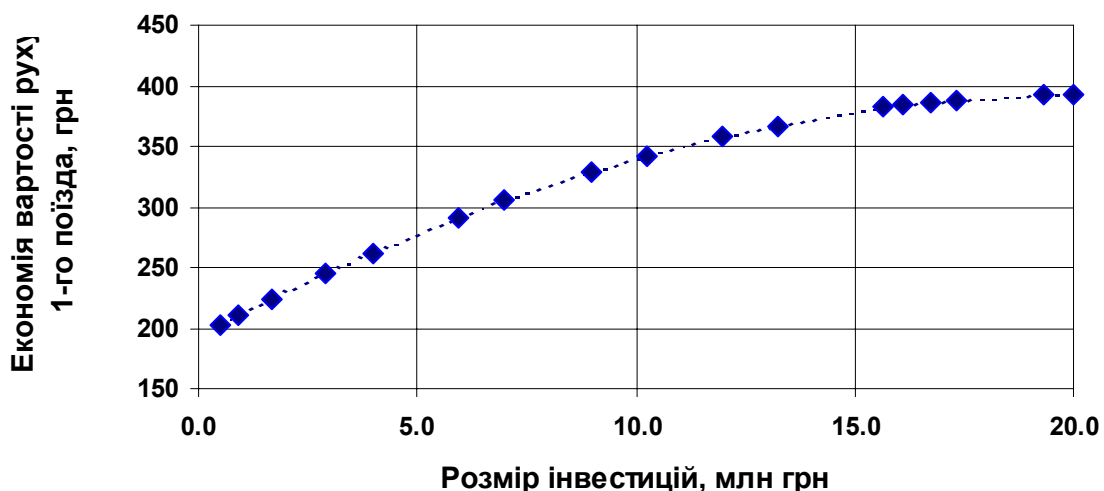


Рис. 9. Залежність економії вартості пробігу поїзда від розмірів інвестицій, що виділяються на реконструкцію дільниці

При відомій кількості поїздів можна визначити щорічну економію в експлуатаційних витратах

$\Delta E_t$ , а потім і термін окупності інвестицій  $T_{ок}$  (часовий період від початку реалізації проекту), за



який інвестиційні вкладення  $K_{інв}$  покриваються економією в експлуатаційній діяльності:

$$\sum_{t=0}^{T_{ок}} \Delta E_t \eta_t = K_{інв}, \quad (4)$$

де  $\eta_t$  – коефіцієнт дисконтування різночасових витрат.

Аналіз складових частин формули (4) показує, що при оптимізації може розглядатись і такий критерій.

Застосування нових підходів до оптимізації дозволяє як критерій використовувати різні показники в залежності від того, яка ставиться мета – економія часу руху чи витрат електроенергії, окупність інвестицій в заданий термін тощо.

### Висновки

1. Різні методи оптимальної перебудови існуючої лінії для підвищення швидкості руху поїздів, які використовувались раніше, припускають, що критерій оптимізації адитивний, тобто складається із суми одержуваного ефекту на кожній ділянці. Однак традиційний розподіл лінії на ділянки станція – перегін – станція – ..., який приймався в 90-х роках у цільовій комплексній програмі союзного значення «Прогрес», може бути прийнятий лише як наближений, оскільки сусідні ділянки в більшості випадків є залежними за швидкістю руху поїзда.

2. Інші способи розподілу лінії на ділянки, наприклад по кривій швидкості  $V(S)$ , припускають, що ділянки оптимізації є незалежними одна від одної за швидкістю руху поїздів, тобто наявність обмежень швидкості в межах даної ділянки не впливає на рівень швидкості на сусідніх з нею ділянках ліворуч і праворуч. Критерій оптимізації приймається також адитивним. Такий підхід вимагає розробки складної техніко-економічної моделі, щоб на кожному бар'єрному місці розглядати різні комбінації зняття обмежень швидкості, розраховувати для них потрібні капіталовкладення, визначати скорочення часу руху та інші експлуатаційні показники, що робить вирішення задачі надзвичайно трудомістким. До недоліків такого підходу слід віднести й те, що незалежні ділянки оптимізації призначаються по кривій швидкості пасажирського поїзда  $V(S)$ , положення якої не є постійним, тому що залежить від параметрів самого поїзда, напрямку руху й інших факторів.

3. Запропонований в даній роботі новий метод вибору оптимальної стратегії реконструкції ділянок залізничної лінії транспортних коридорів базується на принципово іншому підході, що виключає розподіл лінії на незалежні ділянки оптимізації, тому що алгоритм оптимізації містить, крім математич-

них методів, виконання тягових розрахунків з використанням реальних даних (файлів) про поздовжній профіль, план лінії й обмеження швидкості. Використання тягових розрахунків як складової методу оптимізації дозволило як основні критерії розглядати широке коло функцій корисності, таких як скорочення часу руху поїзда, зменшення механічної роботи локомотива чи витрат електроенергії, економії експлуатаційних витрат на рух поїзда.

### БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Гавриленков А. В., Иванов Г. Г., Макушкина Е. А. Оптимальная стратегия повышения скорости движения поездов // Межвуз. сб. науч. тр. / МИИТ, 1986. – Вып. 771. – С. 9–12.
2. Турбин И. В. К проблеме оптимизации постоянных устройств линейных транспортных объектов / Межвуз. сб. науч. тр. – МИИТ, 1981. – Вып. 688. – С. 17–22.
3. Копыленко В. А. Техничко-экономическая модель задачи оптимального переустройства эксплуатируемой линии для повышения скорости поездов // Межвуз. сб. науч. тр. / МИИТ, 1986. – Вып. 771. – С. 50–66.
4. Джаббаров С. Т. Деление линии на участки для оптимизации переустройства при введении скоростного движения // Межвуз. сб. науч. тр. – Д., 1989. – С. 60–63.
5. Игнатова Ж. А., Карпов М. И., Матвиенко А. А. Влияние распределения локальных ограничений на повышение скоростей движения пассажирских поездов // Межвуз. сб. науч. тр. – Д., 1989. – С. 63–66.
6. Корженевич И. П., Курган М. Б., Савченко В. В. Деякі економічні аспекти впровадження швидкісного руху на залізницях України // Транспорт: Зб. наук. пр. ДІТУ. – Д., 2001. – Вып. 8. – С. 74–82.
7. Курган Н. Б. Выбор мероприятий, обеспечивающих повышение скорости при ограниченных капитальных вложениях // Ресурсосберегающие технологии в транспортном и гидротехническом строительстве: Межвуз. сб. науч. тр. – Д.: Арт-Прес, 1997. – Вып. 4. – С. 151–153.
8. Босов А. А. Применение функций множества в инженерных и экономических задачах // Транспорт: Зб. наук. пр. ДІТУ. – Д., 2002. – Вып. 12. – С. 20–29.
9. Курган М. Б. Розробка метода оптимальної перебудови ділянки залізниці для організації швидкісного руху поїздів // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – Вып. 1. – С. 66–73.
10. Венцель Е. С. Элементы динамического программирования. – М.: Наука, 1964.
11. Методические указания по сравнению вариантов проектных решений железнодорожных линий, станций и узлов. – М.: Оргтрансстрой, 1988. – 468 с.

Надійшла до редколегії 02.02.04.