

УДК 629.42

ВИБІР ВАРІАНТІВ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОКОМОТИВІВ З УРАХУВАННЯМ ОПТИМАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Д-р техн. наук О. С. Крашенінін, канд. техн. наук О. О. Шапатіна,
аспіранти Залата А. С., Д. О. Мацегора, О. В. Лагерева, магістрант М. В. Васильєв

CHOICE OF OPTIONS OF LOCOMOTIVE CHARACTERISTICS TAKING INTO ACCOUNT OPTIMUM EFFICIENCY

D. Sc. (Tech.) O. S. Krashenin, PhD (Tech.) O. O. Shapatina, postgraduate students
A. Zalata, D. O. Matsegora, O. V. Lagereva, master's student M. V. Vasiliev

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.204.2023.283990>



Анотація. Насиченість локомотивного парку залізниць різними серіями локомотивів не завжди відповідає їхньому ефективному використанню при закладених у них особливих характеристиках.

У статті розглянуто процедуру формування вимог до характеристик локомотивів на основі критерію ефективності.

При перевірці умов відповідних заміщень для безрозмірних шкал часткових показників локомотивів визначено ефективну множину деяких рішень, на підставі якої формується оптимальне рішення з вибору характеристик локомотивів для конкретних умов використання.

На підставі конкретних даних показана процедура з прийняття рішень щодо деяких характеристик локомотивів.

Ключові слова: безрозмірна шкала, функція ефективності, метод заміщення, експерт, експлуатація локомотивів, експлуатаційні параметри, паливна економічність.

Abstract. The saturation of the locomotive park of railways with various series of locomotives does not always correspond to their effective use given their inherent special characteristics.

Modern conditions require all participants in design, construction, operation and repair to make correct and well-founded decisions. The variety of series of locomotives, which provide different requirements of economic activity, is not always the basis of their effective operation. This especially applies to locomotives that are purchased abroad.

As the experience of their operation has shown, they are not always adapted to the real conditions of operation in our country. This is, first of all, their intensive exploitation and the lack of adaptability of the repair base to maintenance and repair of rolling stock.

On the other hand, the capacity range, for example, of the freight locomotives that were purchased, does not correspond to the traditional ones, which take into account both the length of the warehouse and the length of the receiving-departing routes, etc.

In our country, sufficient experience has been accumulated and there were appropriate conditions for a comprehensive coverage of the tasks of both design and construction of locomotives for the provision of industrial enterprises in freight transportation, as well as the population in intercity and suburban transportation.

Unfortunately, there are many factors that currently make even the minimal needs for updating both the locomotive fleet and the modernization of the operational and repair activities of railway enterprises impossible. In these conditions, perhaps the most important task is the correct, justified choice of locomotive characteristics, taking into account its technical condition.

The article deals with the procedure of forming requirements for the characteristics of locomotives based on the efficiency criterion.

Based on the verification of the conditions of the corresponding substitutions for the dimensionless scales of the pure indicators of the locomotives, an effective set of some solutions is determined, on the basis of which the optimal solution is formed for the selection of locomotive characteristics for specific conditions of use.

Based on specific data shown decision-making procedures regarding some characteristics of locomotives.

Keywords: *dimensionless scales, efficiency function, substitution method, expert.*

Вступ. Сучасні умови потребують від усіх учасників, хто забезпечують проєктування, будівництво, експлуатацію і ремонт, прийняття правильних і обґрунтованих рішень.

Різноманітність серій локомотивів, що забезпечують різні вимоги господарської діяльності, не завжди є основою їхньої ефективної роботи. Особливо це стосується локомотивів, закуповуваних за кордоном.

Як показав досвід, вони не завжди пристосовані до реальних умов експлуатації, що склалися в нашій країні. Це насамперед інтенсивна їхня експлуатація і непристосованість ремонтної бази до проведення технічного обслуговування (ТО), поточного ремонту (ПР) рухомого складу.

З іншого боку, діапазон потужностей, наприклад вантажних локомотивів, що були закуплені, не відповідає традиційним, які враховують як довжину складу, так і довжину приймально-відправних шляхів і т. д.

У нашій країні накопичений достатній досвід і наявні відповідні умови для всебічного охоплення завдань як з проєктування, так будови локомотивів для забезпечення промислових підприємств у вантажних перевезеннях, а населення в міжміських і приміських перевезеннях.

На жаль, є багато факторів, що зараз унеможливають навіть мінімальні потреби як в оновленні локомотивного парку, так і осучасненні експлуатаційної та ремонтної діяльності господарств залізниць.

За цих умов чи не найголовнішим завданням є правильний, обґрунтований вибір характеристик локомотивів з урахуванням його технічного стану.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За роки незалежності на рівні держави і галузі було прийнято багато управлінських і стратегічних рішень, направлених на відродження і розвиток галузі [1-3]. Ці заходи дали деякий імпульс розвитку залізничної галузі, але темпи їхнього запровадження та інерційність управлінської системи не дали змогу повною мірою реалізувати намічені цілі.

Багато в чому цьому сприяла недовіра і неврахування науково-дослідних розробок, що ігнорувались практикою.

Разом з тим фундаментальні та інженерні дослідження суттєво могли б дати імпульс розвитку галузі.

Так, у роботах [4-8] розглянуто теоретичні і практичні питання ефективності врахування в системі показників роботи транспорту принципів життєвого циклу.

А в роботах [9-12] розглядаються тенденції, що треба враховувати при виготовленні, технічному обслуговуванні та ремонті рухомого складу.

Значну кількість публікацій присвячено проблемам модернізації тягового рухомого складу [13-15], у яких сформульовано питання вибору і принципи оцінювання ефективності модернізації.

Слід зазначити, що наукові підходи, які розглядаються в інших дослідженнях [16-18], переважно залежать від зваженості і правильності прийняття практичних рішень.

Урахування цих факторів обумовлює актуальність питань, що розглядаються в статті.

Мета і завдання дослідження. Мета дослідження полягає в розробленні методики вибору варіантів характеристик локомотивів з урахуванням досягнення їхньої оптимальної ефективності.

У такій постановці були сформульовані етапи реалізації поставленої мети:

1. Вибрати множину оцінок, що характеризують ефективність прийнятого рішення.

2. Оцінити часткові відносні показники неоднорідної природи, які характеризують властивості локомотива.

3. Використовуючи спеціальні алгоритми, визначити значення функції ефективності.

Основна частина дослідження. За умови, коли оцінювані об'єкти або їхні характеристики суб'єктивні і отримати необхідні дані щодо них шляхом об'єктивних вимірювань неможливо (наприклад за допомогою вимірювальних пристроїв, що діють на основі фізичних законів), для прийняття рішень необхідно використовувати методи експертного оцінювання [18, 19].

Особливо це стосується питань, пов'язаних з проєктуванням або модернізацією локомотивів.

У цьому випадку за оцінками експертів (ЕК), отриманими за результатами контрольних подань множини елементів, апроксимують деяку числову функцію, яка кожному елементу (характеристиці) оцінювання $d \in D$ ставить у відповідність деяке число, величина якого виявляє перевагу певного елемента (з досягненням мети дії, умови проведення, витратами і т. д.). Таку функцію називають функцією ефективності.

При використанні цієї функції задають попередні елементи і орієнтовні коефіцієнти важливості γ_i .

Розв'язується оптимізаційна задача і визначається розв'язок u^* . ЕК аналізує отримані значення показника функції

ефективності $W_i(u^*)$ і за необхідності корегує коефіцієнти важливості або обирає інший вид функції.

При виборі можливих варіантів сполучення характеристик локомотивів обираємо функцію ефективності $W_e(x(e))$, що упорядковує за призначенням будь-які векторні оцінки [19]:

$$x, y \in X : x \geq y \Rightarrow W_e(x) \geq W_e(y). \quad (1)$$

Задачу вибору оптимального розв'язку можна звести до такої оптимізаційної задачі:

$$u : \max_{u \in U} W_e(x(u)). \quad (2)$$

У більшості випадків використовують адитивну форму функцій ефективності

$$W_e(x) = \sum_{i=1}^m f_i(x_i), \quad (3)$$

де x_i – оцінка i -ї компоненти векторного показника ефективності;

$f_i(x_i)$ – часткова функція ефективності за i -ю компонентою векторного показника.

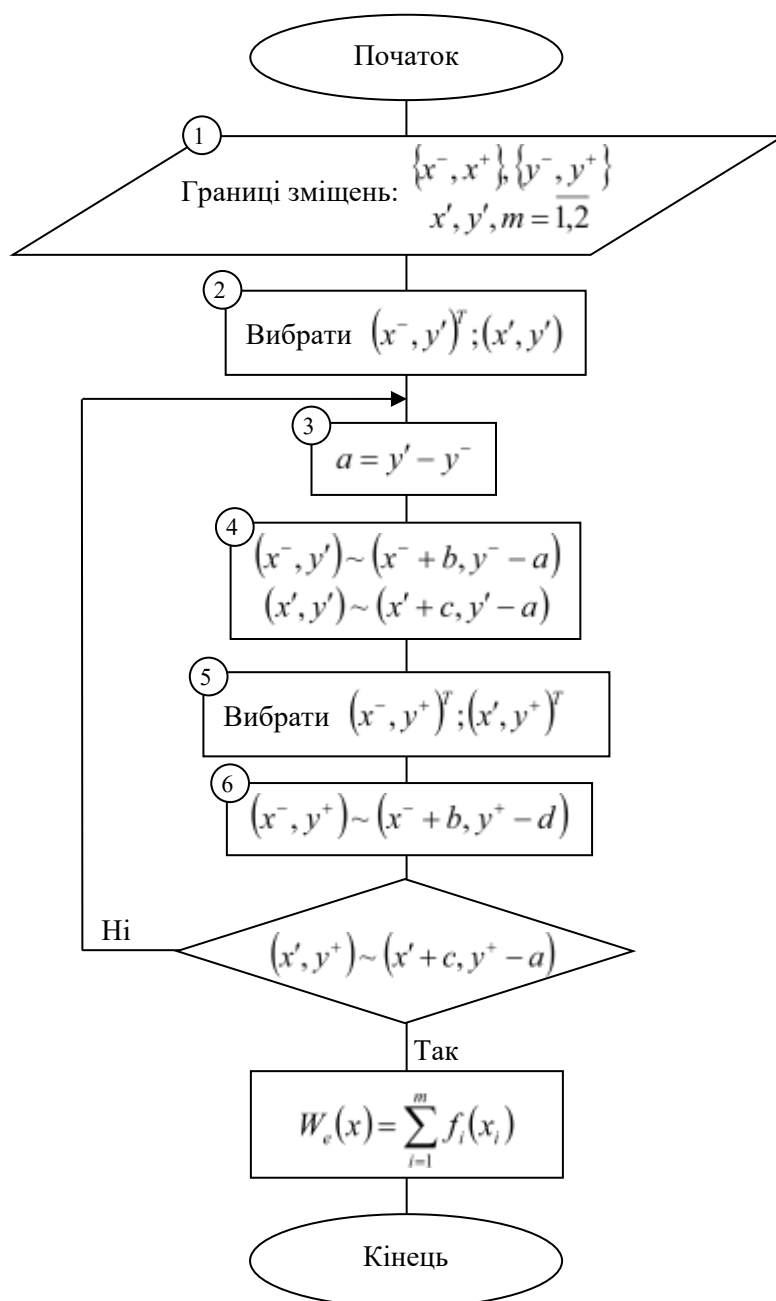
Для двовірної задачі ($m = 2$) необхідно виконати умови відповідних заміщень.

Структурна схема алгоритму заміщень наведена на рис. 1.

Розглянемо реалізацію цього алгоритму при прийнятті рішення щодо вибору діапазону двох характеристик проєктованого локомотива.

Будемо його характеризувати такими показниками W з компонентами: W_1 – дальністю переміщення вантажів без екіпірування паливом, W_2 – зчіпною масою.

Визначимо функцію ефективності для прийняття рішення щодо варіанта проєкту, який можна реалізувати для конкретних умов експлуатації.

Рис. 1. Структурна схема алгоритму заміщення при $m = 2$

Оскільки часткові показники неоднорідні, то попередньо переведемо їх у єдину безрозмірну шкалу за виразом

$$W_i = \frac{W_i^0}{W_i^{PP}},$$

де W_i^0 – вихідний показник, наприклад середньостатистичний для певного проєкту локомотива;

W_i^{PP} – потрібний показник, наприклад значення найкращого зразка.

Задамося значеннями показників недовмінованого проєкту локомотива в межах

$$X = \{x_1^-, x_1^+\} \cdot \{x_2^-, x_2^+\},$$

де $x_1^- = 60, x_1^+ = 120, x_2^- = 30, x_2^+ = 100$.

За допомогою алгоритму перевіряємо виконання умови відповідності заміщення.

Розіб'ємо область значення показників на дві частини граничними точками $x_1^1 = 80, x_2^1 = 70$.

Обираємо величину $a = 20\%$ і запрошуємо експерта (ЕК) вказати, наскільки треба збільшити значення x_1 (дальність поїздки без екіпірування паливом), щоб компенсувати зменшення зчіпної маси локомотива в точці $(60, 70)^T$ (рис. 2), ЕК дає таку рекомендацію:

1. $(60, 70)^T \rightarrow (ЕК)$: при $x_2 \downarrow a = 20\% \sim x_1 \uparrow b = 15\% \Rightarrow (75, 50)^T$. Аналогічно для точки $(80, 70)^T$.
2. $(80, 70)^T \rightarrow (ЕК)$: при $x_2 \downarrow a = 20\% \sim x_1 \uparrow b = 20\% \Rightarrow (100, 50)^T$.
3. $(60, 100)^T \rightarrow (ЕК)$: при $x_2 \downarrow a = 20\% \sim x_1 \uparrow b = 15\% \Rightarrow (75, 80)^T$.
4. $(80, 100)^T \rightarrow (ЕК)$: при $x_2 \downarrow a = 20\% \sim x_1 \uparrow b = 20\% \Rightarrow (100, 80)^T$.

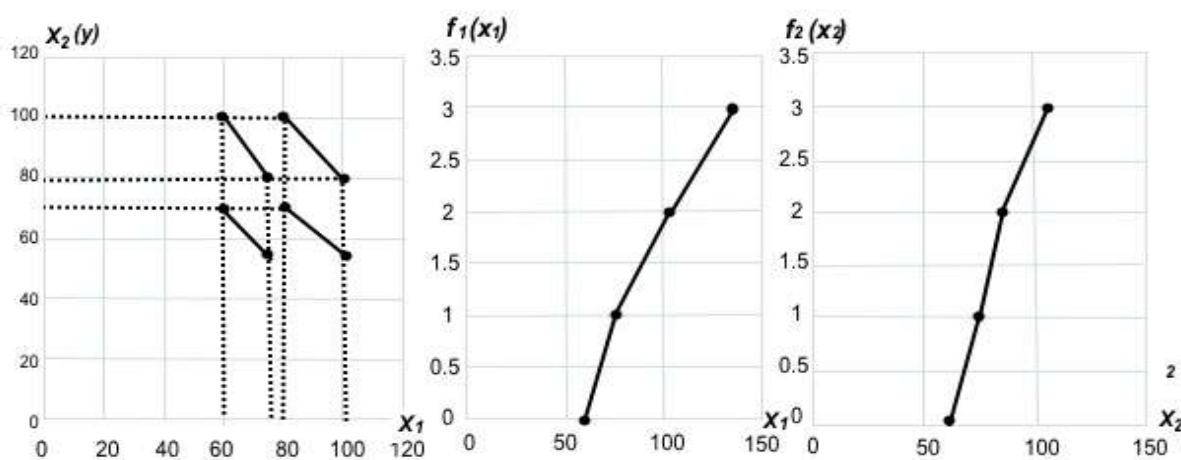


Рис. 2. Схема побудови функції ефективності

Після виконання умови відповідності переходимо до побудови функції ефективності в адаптивній формі за алгоритмом 2, структурна схема якого наведена на рис. 3.

Приймаємо $f_1(60)=f_2(30)=0$ і обираємо за порадою ЕК $a_1=15$, тоді $f_1(60+15)=f_2(75)$.

Відповідно до вимог п. 4 алгоритму 2, за порадою з ЕК, визначаємо b_2^0 з виразу

$$b_2^0 : (x_1^- = 60, x_2^- = 30, y_2^0 = 70)^T \sim (y_1^0 = 75, x_2^- = 30)^T,$$

$$ЕК : b_2^0 = 40\% \Rightarrow f_2(30 + 40) = f_2(70) = 1.$$

Згідно з п. 5 алгоритму 2, за порадою ЕК, визначаємо $b_1^{(1)}$ з виразу

$$b_1^{(1)} : (75, 70)^T \sim (75 + b_1^{(1)}, 30); ЕК : b_1^{(1)} = 30\% \Rightarrow f_1(75 + 30) = f_1(105) = 2.$$

Перевіряємо умову: $y_1^{(k)} = 105 \leq x_1^+ = 120 \Rightarrow K = 2$.

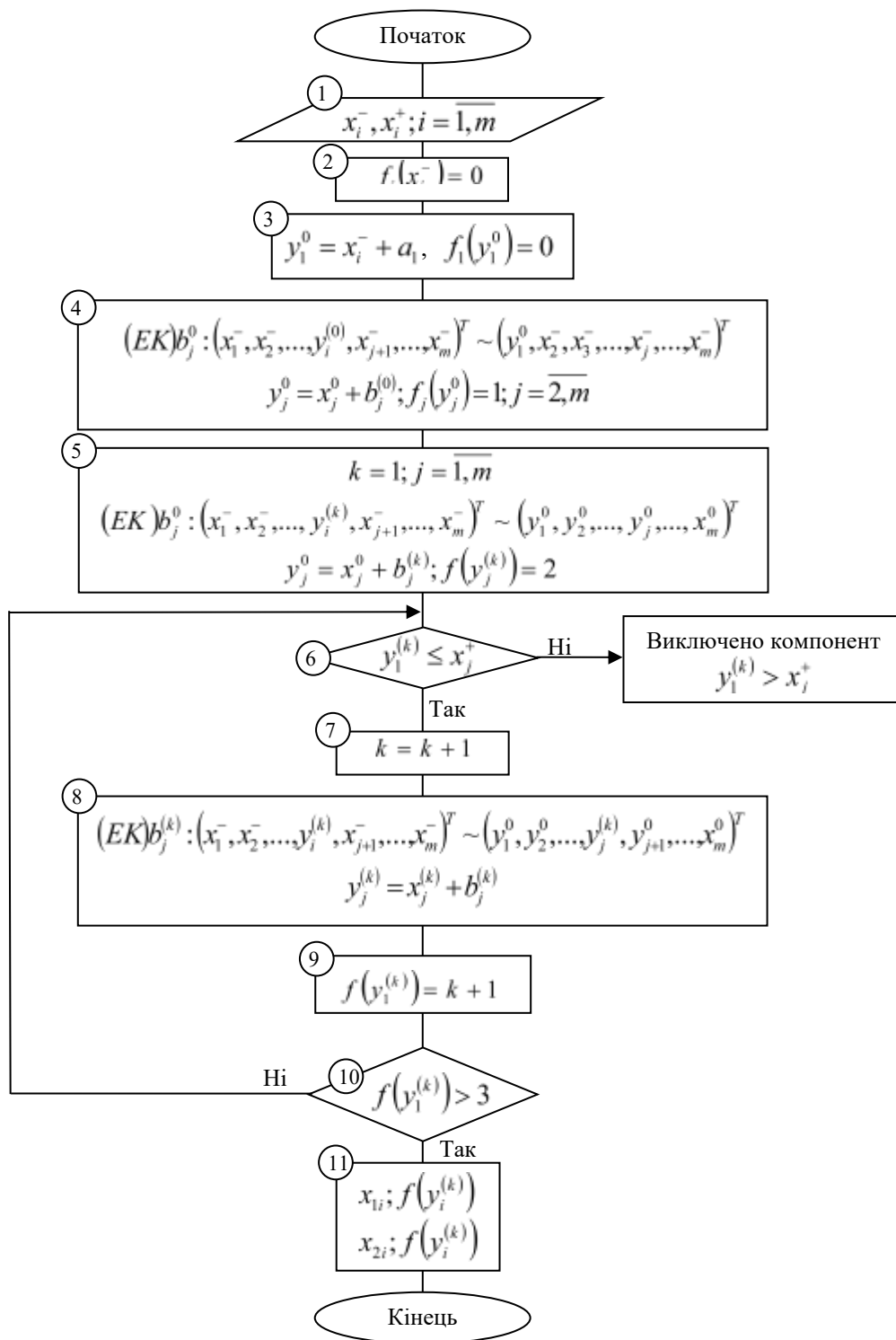


Рис. 3. Структурна схема алгоритму сумісного шкалювання

Побудовані функції ефективності дають змогу визначити оптимальні варіанти проекту з декількох альтернативних.

Так, нехай треба порівняти $W_e^1(105, 85)$ і $W_e^1(120, 70)$.

$$W_e^1 = (105, 85) = f_1(105) + f_2(85) = 2 + 2 = 4.$$

$$W_e^1 = (120, 70) = f_1(120) + f_2(70) = 2,5 + 1 = 3,5,$$

тобто кращим є перший варіант W_e^1 .

До умов попереднього прикладу введемо додатковий частковий відносний показник W_3 – економічність локомотива.

Нормовану функцію ефективності побудуємо за допомогою алгоритму 3, структурна схема якого наведена на рис. 4.

Цей алгоритм, на відміну від алгоритму 2, не має введення процедури усереднення показників u_i для пошуку часткової ефективності $f_i(y_i)$.

Реалізацію цього алгоритму розглянемо на такому прикладі.

За даними ЕК отримана інформація відносно часткових характеристик локомотивів [19]:

$$\begin{aligned} W_1 - \text{дальність перевезень} & \quad \{x_1^- = 60, x_1^+ = 110\} & x_1^1 = 80; \\ W_2 - \text{зчіпна маса локомотива} & \quad \{x_2^- = 30, x_2^+ = 100\} & x_2^1 = 70; \\ W_3 - \text{економічність локомотива} & \quad \{x_3^- = 70, x_3^+ = 130\} & x_3^1 = 100. \end{aligned}$$

Згідно з п. 2 алгоритму 3

$$f_1(x_1^- = 60) = f_2(x_2^- = 30) = f_3(x_3^- = 70) = 0;$$

$$f_1(x_1^+ = 120) = f_2(x_2^+ = 100) = f_3(x_3^+ = 130) = 1.$$

Вибираємо граничні точки $x_1^1 = 80, x_2^1 = 70, x_3^1 = 100$.

Згідно з п. 4 алгоритму 3 будуємо $f_1(x_1)$.

Прийmemo

$$\begin{aligned} y^- = 60, & \quad y^+ = 120, & y_A = 60, & \quad y_{II} = 60, & k = 1 \\ (x_1^-) & \quad (x_1^+) & (y_A = y^-) & \quad (y_{II} = y^+) \end{aligned};$$

$$y^{(1)} = y^{(k=1)} = \frac{60 + 120}{2} = 90.$$

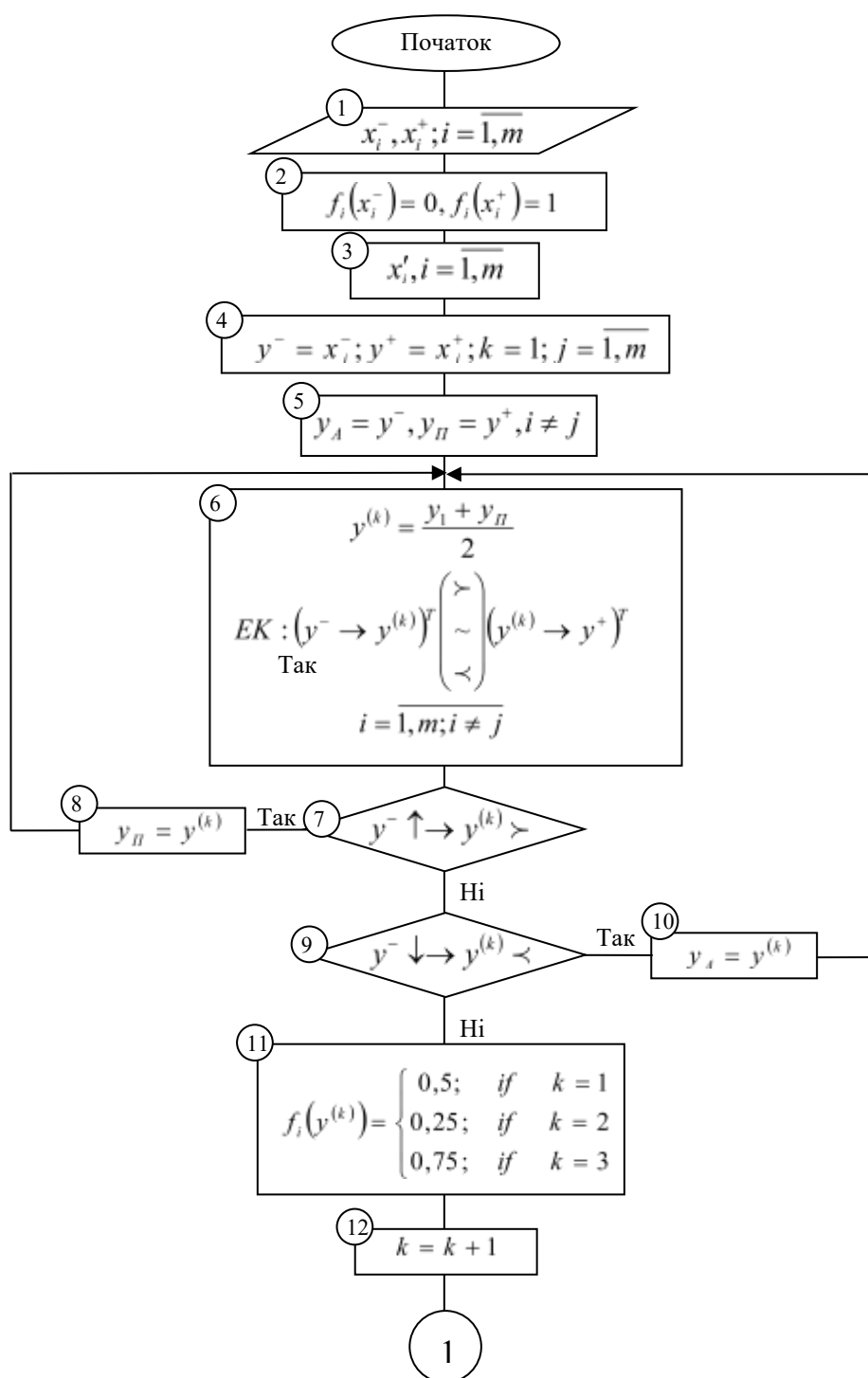


Рис. 4. Структурна схема алгоритму 3 побудови нормованої часткової ефективності (початок)

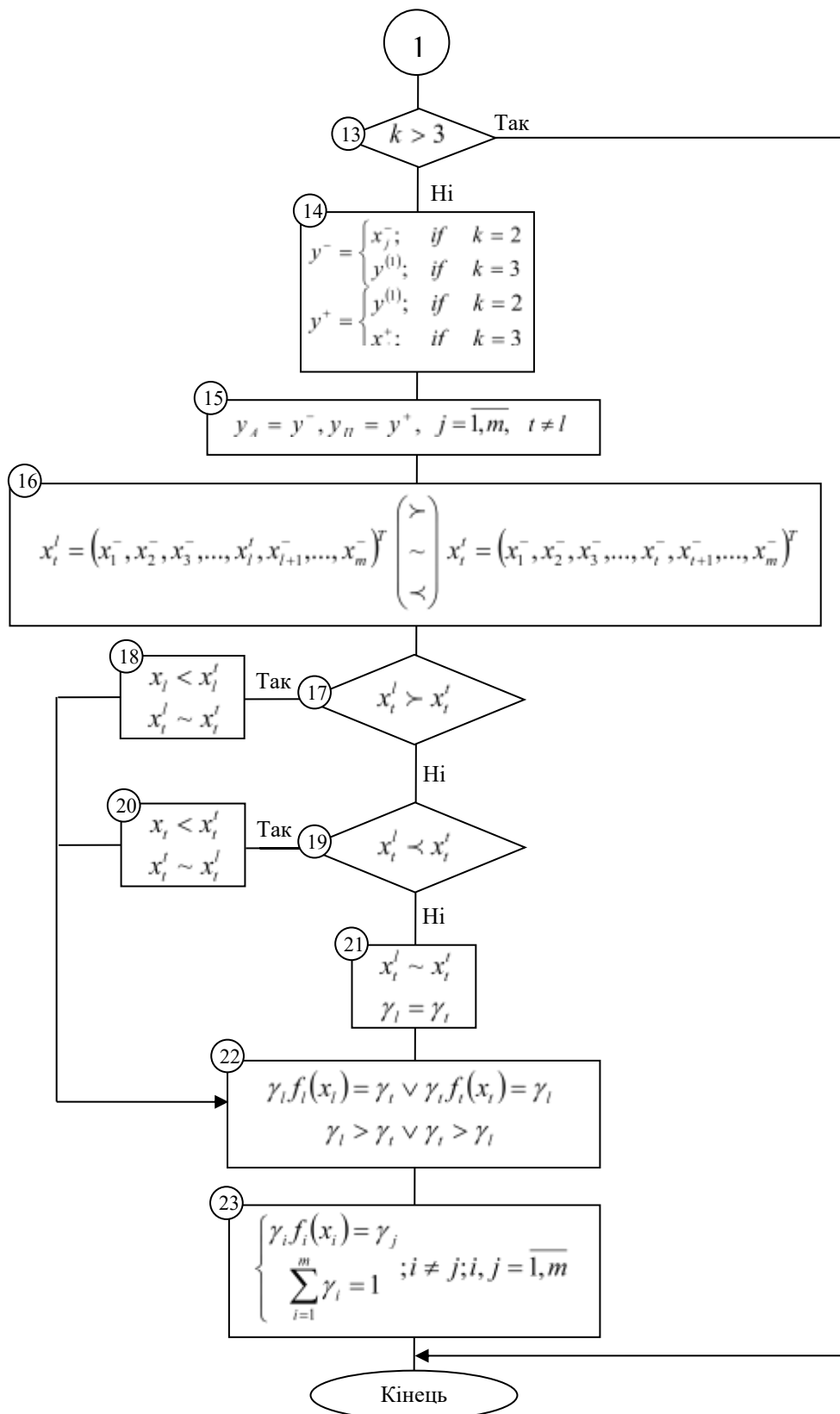


Рис. 4. Структурна схема алгоритму 3 побудови нормованої часткової ефективності (продовження)

Оскільки отримана інформація від EK $y = 60 \rightarrow y^{(1)} = 90$ переважно (\uparrow), то $y^{(1)} = 90 \rightarrow y^+ = 120$.

$$\text{Приймаємо } y_{II} = y^{(1)} = 90 \Rightarrow y^{(1)} = \frac{60+90}{2} = 75.$$

Від EK отримана інформація $y^- = 60 \rightarrow y^{(1)} = 75$ (\downarrow) $y^{(1)} = 75 \rightarrow y^+ = 120$.

$$y_{II} = y^{(1)} = 75 \Rightarrow y^{(1)} = \frac{75+90}{2} = 82,5 = 83.$$

Від EK отримана інформація

$$y^- = 60 \rightarrow y^{(1)} = 83 \sim 83 \rightarrow 120 \Rightarrow f_1(y^{(1)}) = f_1(83) = 0,5.$$

Тоді приймаємо $k=2$: $y^- = x_1^- = 60, y^+ = y^{(1)} = 83$ і згідно з п. 4 алгоритму 3 маємо $y_L = y^- = 60, y_{II} = y^+ = 83$.

А згідно з п. 6 алгоритму 3

$$y^{(2)} = \frac{y_L + y_{II}}{2} = \frac{60+83}{2} \approx 70, f_1(70) = 0,25.$$

Приймаємо $k=3$:

$$y^- = y^{(1)} = 83, y^+ = x_1^+ = 120 \Rightarrow y_L = y^-; y_{II} = y^+.$$

$$y^{(3)} = \frac{83+120}{2} \approx 105, f_1(105) = 0,75.$$

Приймаємо $j=2$: $y^- = 30, y^+ = 100, y_L = 30, y_{II} = 100, k=1$

$$y^{(1)} = y^{(k=1)} = \frac{30+100}{2} = 65.$$

Від EK отримана інформація

$$y^- = 30 \rightarrow y^{(1)} = 65 \quad (\succ) \quad y^{(1)} = 65 \rightarrow y^+ = 100.$$

$$y_{II} = y^{(1)} = 65 \Rightarrow y^{(1)} = \frac{30+65}{2} = 47.$$

Від EK отримана інформація

$$y^- = 30 \rightarrow y^{(1)} = 47 \quad (\succ) \quad y^{(1)} = 47 \rightarrow y^+ = 100.$$

$$y_{II} = y^{(1)} = 47 \Rightarrow y^{(1)} = \frac{47+100}{2} = 74 \Rightarrow f_1(y^{(1)}) = f_1(74) = 0,5.$$

Приймаємо $k=2$: $y^- = x_1^- = 30, y^+ = y^{(1)} = 74$ і згідно з п. 4 алгоритму 3 маємо $y_L = y^- = 30, y_{II} = y^+ = 74$.

Тоді

$$y^{(2)} = \frac{y_L + y_{II}}{2} = \frac{30+74}{2} = 52, \quad f_1(52) = 0,25.$$

Приймаємо $k=3$: $y^- = y^{(1)} = 74, y^+ = x_1^+ = 100 \Rightarrow y_L = y^-, y_{II} = y^+$.

Тоді

$$y^{(3)} = \frac{y_L + y_{II}}{2} = \frac{74+100}{2} = 87, \quad f_1(87) = 0,75.$$

Приймаємо $j=3$: $y^- = 70, y^+ = 130, y_L = 70, y_{II} = 130, k=1$

$$y^{(1)} = y^{(k=1)} = \frac{70+130}{2} = 100.$$

Від ЕК отримуємо інформацію

$$y^- = 70 \rightarrow y^{(1)} = 100 \quad (\prec) \quad y^{(1)} = 100 \rightarrow y^+ = 130.$$

Приймаємо $y_{II} = y^{(1)} = 100 \Rightarrow y^{(1)} = \frac{100+130}{2} = 115.$

Від ЕК отримуємо інформацію $y^- = 70 \rightarrow y^{(1)} = 115 \quad (\succ) \quad y^{(1)} = 115 \rightarrow y^+ = 130.$

Тоді

$$y_{II} = y^{(1)} = 115 \Rightarrow y^{(1)} = \frac{70+115}{2} = 93 \Rightarrow f_1(y^{(1)}) = f_1(93) = 0,5.$$

Приймаємо $k=2$: $y^- = x_1^- = 70, y^+ = y^{(1)} = 93$ і згідно з п. 4 алгоритму 3 $y_L = y^- = 70, y_{II} = y^+ = 93.$

Розрахуємо $y^{(2)} = \frac{y_L + y_{II}}{2} = \frac{70+93}{2} = 82.$

Приймаємо $k=3$: $y^- = y^{(1)} = 93, y^+ = x_1^+ = 130 \Rightarrow y_L = y^-, y_{II} = y^+.$

Тоді

$$y^{(3)} = \frac{93+130}{2} = 111, \quad f_1(111) = 0,75.$$

За отриманими даними будемо функцію ефективності методом половинного ділення (рис. 5).

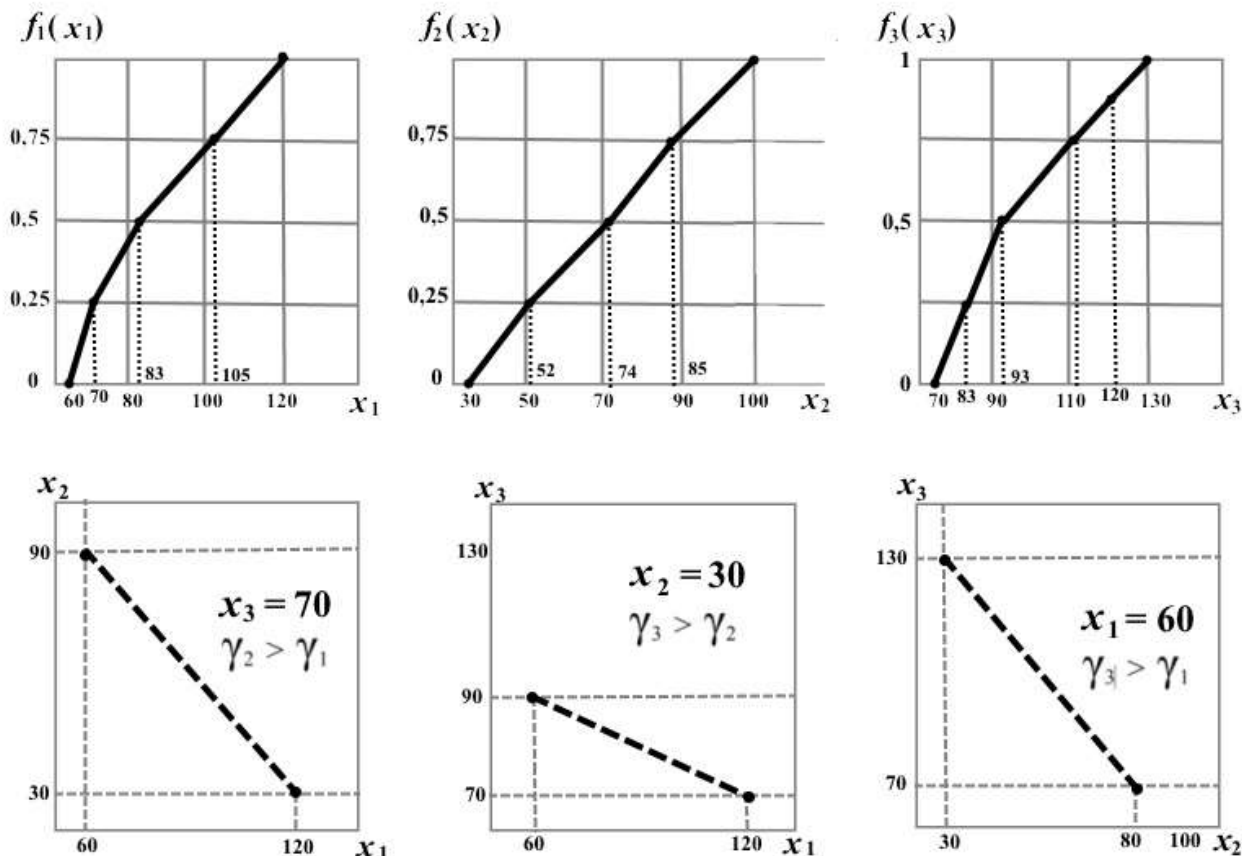


Рис. 5. Функція часткової ефективності методом половинного ділення

За інформацією EK ,

$$x_+^1 = (120, 30, 70)^T \prec x_+^2 = (60, 100, 70)^T \sim (60, 90, 70)^T \Rightarrow \gamma_2 f_2(90) = \gamma_1,$$

$$x_+^1 = (120, 30, 70)^T \prec x_+^3 = (60, 30, 130)^T \sim (60, 30, 70)^T \Rightarrow \gamma_3 f_3(90) = \gamma_1,$$

$$x_+^1 = (60, 100, 70)^T \succ x_+^3 = (60, 30, 130)^T \sim (60, 80, 70)^T \Rightarrow \gamma_2 f_2(80) = \gamma_3.$$

Використовуючи дані часткових функцій ефективності, наведені на рис. 5, розв'яжемо систему лінійних рівнянь,

отриманих після диференціювання нормованої функції:

$$\min \varphi(T) = \min \left((0,73 \cdot \gamma_2 - \gamma_1)^2 + (0,37 \cdot \gamma_3 - \gamma_1)^2 + (0,6 \cdot \gamma_2 - \gamma_3)^2 + (\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1)^2 \right).$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi(T)}{\partial \gamma_1} = -2(0,73\gamma_2 - \gamma_1) - 2(0,37\gamma_3 - \gamma_1) + 2(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1) = 0 \\ \frac{\partial \varphi(T)}{\partial \gamma_2} = 2(0,73\gamma_2 - \gamma_1) \cdot 0,73 + 2(0,6\gamma_2 - \gamma_3) \cdot 0,6 + 2(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1) = 0 \\ \frac{\partial \varphi(T)}{\partial \gamma_3} = -2(0,37\gamma_3 - \gamma_1) \cdot 0,37 - 2(0,6\gamma_2 - \gamma_3) + 2(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} -0,73\gamma_2 + \gamma_1 - 0,37\gamma_3 + \gamma_1 + \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1 = 0 \\ 0,73 \cdot 0,73\gamma_2 - \gamma_1 \cdot 0,73 + 0,6 \cdot 0,6\gamma_2 - \gamma_3 \cdot 0,6 + \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1 = 0 \\ 0,37 \cdot 0,37\gamma_3 - \gamma_1 \cdot 0,37 - 0,6\gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 3\gamma_1 + 0,27\gamma_2 + 0,63\gamma_3 - 1 = 0 \\ 0,27\gamma_1 + 1,8929\gamma_2 + 0,4\gamma_3 - 1 = 0 \\ 0,63\gamma_1 + 0,4\gamma_2 + 2,1369\gamma_3 - 1 = 0 \end{cases}.$$

Після розв'язання системи отримуємо $\gamma_1 = 0,23$, $\gamma_2 = 0,44$, $\gamma_3 = 0,33$.

Тобто при проєктуванні або модернізації локомотивів пріоритет формування його характеристик має бути відповідно до значень вагових коефіцієнтів $\gamma_2 > \gamma_3 > \gamma_1$, а саме, по-перше, вибору зчпної маси локомотива; по-друге, його

економічності і далі запасу палива для забезпечення дальності перевезень без доєкіпірування.

Для отримання вагових коефіцієнтів і корегування часткових функцій ефективності проведемо додатковий аналіз за участі *ЕК*:

$$x_+^{2,3}(60,100,130)^T \sim x_+^1(120,30,70)^T \sim (60,90,70)^T \quad \gamma_2 f_2(90) = \gamma_1,$$

$$x_+^{1,3}(120,30,130)^T \sim x_+^2(60,100,70)^T \sim (60,30,110)^T \quad \gamma_3 f_3(110) = \gamma_2,$$

$$x_+^{1,2}(120,100,70)^T \sim x_+^3(60,30,130)^T \sim (110,30,70)^T \quad \gamma_1 f_1(110) = \gamma_3.$$

Розв'язуємо систему лінійних рівнянь, отриманих шляхом диференціювання нормованої функції:

$$\min \varphi(T) = \min \left((\gamma_2 f_2(90) - \gamma_1)^2 + (\gamma_3 f_3(110) - \gamma_2)^2 + (\gamma_1 f_1(110) - \gamma_3)^2 + (\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1)^2 \right).$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi(T)}{\partial \gamma_1} = -2(\gamma_2 f_2(90) - \gamma_1) - 2(\gamma_1 f_1(110) - \gamma_3) \cdot f_1(110) + 2(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1) = 0 \\ \frac{\partial \varphi(T)}{\partial \gamma_2} = 2(\gamma_2 f_2(90) - \gamma_1) \cdot f_2(90) + 2(\gamma_3 f_3(110) - \gamma_2) + 2(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1) = 0 \\ \frac{\partial \varphi(T)}{\partial \gamma_3} = 2(\gamma_3 f_3(110) - \gamma_2) \cdot f_3(110) - 2(\gamma_1 f_1(110) - \gamma_3) + 2(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} -0,78\gamma_2 + \gamma_1 - (0,83\gamma_1 - \gamma_3) \cdot 0,83 + \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1 = 0 \\ (0,78\gamma_2 - \gamma_1) \cdot 0,78 + 0,75\gamma_3 + \gamma_2 + \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1 = 0 \\ (0,75\gamma_3 - \gamma_2) \cdot 0,75 - 0,83\gamma_1 + \gamma_3 + \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 2,689\gamma_1 + 8,22\gamma_2 + 0,17\gamma_3 - 1 = 0 \\ 0,22\gamma_1 + 2,608\gamma_2 + 0,25\gamma_3 - 1 = 0 \\ 0,17\gamma_1 + 0,25\gamma_2 + 2,563\gamma_3 - 1 = 0 \end{cases}$$

Тоді $\gamma_1 = 0,324$, $\gamma_2 = 0,323$, $\gamma_3 = 0,337$.

Тобто після уточнення слід формувати пріоритет його характеристик відповідно до значень вагових коефіцієнтів $\gamma_3 > \gamma_1 > \gamma_2$.

Висновки

1. Показано, що для визначення характеристик локомотивів, що проєктуються або модернізуються, доцільно обирати їхні часткові відносні характеристики, які необхідно звести до єдиної безрозмірної шкали. З урахуванням цього показано, що як основні часткові характеристики доцільно обирати дальність перевезень без доекіпірування, зчіпну масу та економічність локомотива.

2. За даними експертних оцінок визначено часткові середньоексплуатаційні характеристики локомотивів і діапазон їхньої зміни, що дало можливість найбільш інформативно оцінювати структуру досягнення ефективності для проєктованих або модернізованих локомотивів, яка визначається з урахуванням часткових функцій ефективності.

3. За спеціальними алгоритмами на конкретних прикладах показана процедура вибору оптимальних часткових відносних характеристик локомотива, які забезпечують його оптимальну ефективність відповідно до оцінених коефіцієнтів переваги $\gamma_3 > \gamma_1 > \gamma_2$.

Список використаних джерел

1. Про залізничний транспорт України: Закон України від 06.09.2019 р. за № 1196-1. URL: https://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=66737 (дата звернення: 13.03.2023).
2. Державна цільова програма реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки (затверджена Постановою КМУ 16.12.2000 р. № 1390 із змінами від 26.10.2011 р. № 1106). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1390-2009-%D0%BF#Text> (дата звернення: 13.03.2023).
3. Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу України на 2008–2020 роки. Київ: ДНДЦ Укрзалізниці, 2009. 299 с.

4. Понтичелли К. Стоимость жизненного цикла железнодорожного подвижного состава: от теории к практике. *Техника железных дорог*. 2009. № 4. 74 с.
5. Тартаковський Е. Д., Уманець М. Г., Аулін Д. О. Визначення життєвого циклу тягового рухомого складу (ТРС). *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2006. Вип. 72. С. 82-86.
6. Крашенінін О. С., Фалендиш А. П. Оцінка життєвого циклу локомотивів. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2001. Вип. 46. С. 55-58.
7. Egamberdiev B., Lee K., Lee J. & Burnashev S. A Study on Life Cycle Cost on Railway Locomotive Systems. *International Journal of Railway*. 2016. Vol. 9(1). P. 10-14.
8. Ochkasov O., Shvets O. & Černiauskaitė L. Usage of Intelligent Technologies in Choosing the Strategy of Technical Maintenance of Locomotives. *Technologijos ir Menas = Technology and Art*. 2017. Vol. 8. P. 68-71.
9. Калабухін Ю. Є., Тартаковський Е. Д. Теоретичні положення оновлення тягового рухомого складу з урахуванням життєвого циклу. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2009. Вип. 111. С. 106-120.
10. Bodnar B., Ochkasov A., Bobyr D. Improving Operation and Maintenance of Locomotives of Ukrainian Railways. *Technologijos ir Menas = Technology and Art*. 2016. № 7. P. 109-114.
11. Klöpffer Ed. W. Background and Future Prospects in Life Cycle Assessment, Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. 262 p.
12. Banar M. and Özdemir A. An evaluation of railway passenger transport in Turkey using life cycle assessment and life cycle cost methods. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2015. Vol. 41. P. 88-105.
13. Bismark R. D. K. Agbelie, Samuel Labi, Kumares C. Sinha. Estimating the marginal costs of bridge damage due to overweight vehicles using a modified equivalent-vehicle methodology and in-service data on life-cycle costs and usage. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2017. Vol. 95. P. 275-288.
14. Johannes Auer, Niki Bey, Johannes-Marius Schäfer. Combined Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing in the Eco-Care-Matrix: A case study on the performance of a modernized manufacturing system for glass containers. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 141. P. 99-109.
15. Carvalhaes B. B., Rosa R. A., D'Agosto M. A., Ribeiro G. M. A method to measure the eco-efficiency of diesel locomotive. *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*. 2017. Vol. 51. P. 29-42.
16. Калабухін Ю. Є., Фалендиш А. П. Визначення економії експлуатаційних витрат маневрових тепловозів. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2003. Вип. 54. С. 127-132.
17. Douglas H., Roberts C., Hillmanssen S., Schmid F. An assessment of available measures to reduce traction energy use in railway networks. *Energy Convers Manag*. 2015. 106:1149–1165.
18. Калабухін Ю. Є. Методологія та результати оцінки техніко-економічних показників використання сучасних маневрових тепловозів для роботи на маневровій горці. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2009. Вип. 110. С. 19-30.
19. Gurov S. V., Utkin L. V. Reliability and optimization of systems with periodic modifications in the probability and possibility contexts, *Microelectron. Reliab*. 1997. Vol. 37, No. 5. P. 801-808

Крашенінін Олександр Семенович, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0001-7462-3372. Тел.: +38 (097) 9917099. E-mail: krashenin@kart.edu.ua.

Шапатіна Ольга Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0002-9185-6212. Тел.: +38 (066) 8124889. E-mail: shapatina.uvkr@kart.edu.ua.

Залата Андрій Сергійович, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0003-0557-795X. Тел.: +38 (097) 710-69-81. E-mail: zalata.ac@gmail.com

Мацегора Дмитро Олександрович, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (066) 1445612. E-mail: macegoradmitry@gmail.com.

Лагерева Олена Володимирівна, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (066) 0905604. E-mail: lagereva@kart.edu.ua.

Васильєв Максим Віталійович, магістрант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (095) 2414985. E-mail: maksvasilev1995@gmail.com.

Krashenin Olexsandr Semenovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Operation and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0001-7462-3372.

Tel.: +38 (097) 9917099. E-mail: krashenin@kart.edu.ua.

Shapatina Olha Olexsandrivna, PhD (Tech), associate professor of department of management of freight and commercial work, Ukraine state university of railway transport. Tel.: ORCID ID: 0000-0002-9185-6212.

Tel.: +38 (066) 8124889. E-mail: shapatina.uvkr@kart.edu.ua.

Zalata Andrii, postgraduate student, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0003-0557-795X. Tel.: +38 (097) 710-69-81. E-mail: zalata.ac@gmail.com

Matsegora Dmytro Olexsandrovich, postgraduate student Department of Operation and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (066) 1445612. E-mail: macegoradmitry@gmail.com.

Lagereva Olena Volodymyrivna, postgraduate student Department of Operation and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (066) 0905604. E-mail: lagereva@kart.edu.ua.

Vasilev Maksim Vitaliyovych, master's student Department of Operation and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (095) 2414985. E-mail: maksvasilev1995@gmail.com.

Статтю прийнято 08.06.2023 р.