

УДК 656.2

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МАРШРУТИЗАЦІЇ ВАГОНОПОТОКІВ ШЛЯХОМ УРАХУВАННЯ КАТЕГОРІЙНОСТІ ПОЇЗДІВ ПРИ РОЗРАХУНКУ ПЛАНУ ФОРМУВАННЯ В УМОВАХ ЦИФРОВІЗАЦІЇ

Канд. техн. наук В. М. Прохоров, д-р техн. наук Л. А. Пархоменко,
канд. техн. наук Т. Ю. Калашнікова, асп. О. В. Кофанов

INCREASING WAGON FLOW ROUTING BY CONSIDERING TRAIN CATEGORIZATION IN THE TRAIN FORMATION PLAN CALCULATION UNDER DIGITALIZATION CONDITIONS

PhD (Tech.) V. Prokhorov, D.Sc (Tech.) L. Parkhomenko,
PhD (Tech.) T. Kalashnikova, postgrad. O. Kofanov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.371336>



Анотація. Статтю присвячено підвищенню маршрутизації вагонопотоків в умовах цифровізації залізничного транспорту за рахунок виявлення внутрішніх технологічних резервів. Запропоновано модифіковану модель розрахунку плану формування поїздів (ПФП), яка інтегрує диференціацію дільничних швидкостей наскрізних і дільничних поїздів безпосередньо в оптимізаційний алгоритм. Моделювання на розгалуженому полігоні довело, що пряме врахування категорійності поїздів підвищує адекватність розрахунків, забезпечує зміну структури маршрутизації та чисту економію приведених вагоно-годин на рівні 4,5 %. Цей ефект досягнуто навіть за мінімально прийнятої різниці швидкостей у 5 %, хоча в реальних умовах експлуатації ця розбіжність є значно вищою. Розроблений підхід рекомендовано для систем оперативного планування.

Ключові слова: маршрутизація вагонопотоків, план формування поїздів, категорійність поїздів, диференціація дільничних швидкостей, цифровізація.

Abstract. The paper addresses the urgent scientific and practical task of improving freight transportation efficiency and expanding the scope of wagon flow routing across railway networks. Methodological principles for calculating the train formation plan (TFP) frequently rely on simplified classical models aimed exclusively at minimizing station accumulation and processing costs, thereby neglecting complex section movement kinematics. This study demonstrates that a significant potential for increasing transportation efficiency lies in accounting for train categorization and section speed differentiation within automated management systems. The proposed approach integrates the difference in section speeds of through and local freight trains directly into the structure of the mathematical objective function during the automated optimization stage, rather than utilizing it as an isolated post-factum adjustment, allowing a more accurate reflection of modern railway infrastructure operations.

To evaluate the practical feasibility of the developed mathematical apparatus, comprehensive simulation modeling was performed on a network railway polygon using an advanced calculation method specifically designed for branched infrastructure structures. This advanced method enabled

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Прохоров В. М., Пархоменко Л. А.,
Калашнікова Т. Ю., Кофанов О. В., 2026.

precise tracking of wagon flow distribution across multiple interconnected routes. As baseline inputs for the predictive modeling, section speeds were set at 47.5 km/h for through trains and 45 km/h for local

trains, representing a conservative 5 % difference, whereas retrospective analysis of stable operational periods in Ukraine shows actual variations from 50 km/h to 70 km/h and higher. The locomotive-hour to wagon-hour equivalence coefficient was fixed at 375 to ensure precise technological balancing within the objective function.

The digital simulation yielded two distinct TFP variants: the baseline approach resulted in 16 train formation destinations, while the speed-differentiated model expanded the plan to 17 optimal destinations. Comparative analysis demonstrates that post-factum adjustment of a pre-calculated plan provides only nominal cost reductions. In contrast, direct proactive integration of train categorization into the optimization algorithm substantially alters the routing structure, ensuring a net technological savings of 4.5% in total equivalent wagon-hour expenditures. The experimental results prove that speed differentiation during automated calculation brings operational estimates closer to real conditions and uncovers internal capacity reserves. Under ongoing industry digitalization, the dynamic determination of these parameters will further enhance calculation accuracy and TFP quality, making the developed algorithm highly recommended for modern transportation planning systems.

Keywords: wagon flow routing, train formation plan, train categorization, section speed differentiation, digitalization of railway transport.

Вступ. Ефективність організації перевізного процесу на залізничному транспорті в сучасних умовах потребує безперервного пошуку додаткових внутрішніх резервів та оптимізації використання наявних технічних засобів. Тривалий час у сфері розрахунку плану формування поїздів не спостерігають істотного методологічного поступу, а чинні розрахункові моделі залишаються практично незмінними, базуючись на класичних принципах мінімізації витрат вагоно-годин лише на станційне накопичення та переробку. Проте такий спрощений підхід залишає поза увагою значний масив експлуатаційних факторів і резервів, пов'язаних безпосередньо з рухом поїздів і динамікою зміни їхніх параметрів на дільницях. Наявність суттєвого потенціалу для підвищення ефективності перевезень криється у врахуванні багатьох досі не інтегрованих у розрахунки факторів, нелінійності процесів диференціації деяких режимів, які раніше не враховували і не виділяли окремо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тема розвитку методів і моделей розрахунку ПФП теоретично залишається актуальною вже не перше десятиліття. Однак останніми роками

спостерігають підвищення інтересу до цієї теми. Аналіз сучасних досліджень свідчить про велике різноманіття підходів, що, з іншого боку, свідчить про відсутність сталих трендів у напрямках досліджень.

У роботі [1] уперше запропоновано нелінійну МІР-модель (англ. Mixed Integer Programming), яка одночасно визначає план призначення груп вагонів (англ. blocks) для всіх сортувальних станцій мережі. Проте час ходу поїздів у моделі взагалі не фігурує як змінна – ураховують лише вагоно-години простою/накопичення, тож питання про різницю швидкостей типів поїздів у цій постановці в принципі неможливо навіть поставити. У джерелі [2] задачу зведено до мережевої задачі проектування (англ. network design) із величезною кількістю змінних, мінімізовано витрати на переробку та просування вагонів. Однак тривалість ходу відображена лише фіксованим «штрафом за переробку» на дузі, а не реальним часом руху залежно від категорії поїзда, тобто швидкісні відмінності між наскрізними та дільничними поїздами не враховані взагалі. У статті [3] запропоновано евристичний метод VLSN-пошуку (англ. Very Large-Scale Neighborhood), що дає змогу розв'язувати задачу блокування в реальному масштабі

великих мереж США. Поліпшення суто алгоритмічне: модель залишилася тією самою статичною мережею з фіксованим часом ходу по дугах, тож сумнівно, що вона взагалі здатна відобразити ефект від різної ходової швидкості поїздів різних категорій. У роботі [4] запропоновано генетичний алгоритм для тієї ж класичної мережевої постановки блокування, спрямований на прискорення розв'язання NP-складної задачі з мільярдами змінних. Але це знову про метод розв'язання, а не про модель: жодної диференціації швидкостей поїздів не введено, цільова функція та сама – витрати на переробку. У статті [5] маємо пряму аналогію з нашою задачею: одночасно визначають, формувати одноступінні (аналог дільничних) чи двогрупні/наскрізні призначення. Але незрозуміло і сумнівно, чи закладено в модель саме різницю ходових швидкостей – судячи зі структури витрат, ефект від об'єднання груп і тут виражений через вартість переробки вагона, а не через виграш у часі ходу за рахунок вищої швидкості наскрізного поїзда. Розвиток попередньої моделі в бік розв'язання на великих мережах гібридною метаевристикою (ГА + табу-пошук) розглянуто в роботі [6]. Поліпшено обчислюваність, але модельні припущення щодо часу ходу не переглянуто – та сама проблема, що і у статті [5], тільки для більших розмірностей мережі. У джерелі [7] запропоновано точну модель і алгоритм декомпозиції за деревом, що дають змогу знаходити точний розв'язок для великих мереж без переборних евристик. Але модель обмежена лише одноступінними поїздами (без дво- та багатогрупних варіантів), а час ходу знову задано як екзогенний параметр на дузі, без зв'язку зі швидкісною характеристикою категорії поїзда. У статті [8] поєднано задачу маршрутизації вагонопотоків і плану формування в єдину нелінійну модель, розв'язувану методом імітаційного відпалу. Ураховано практичну складність реальної мережі (обмеження місткості станцій і дільниць), але час

перевезення знову закладено як фіксований параметр на дузі – швидкість поїзда як категоріальна характеристика (наскрізний/дільничний) у моделі не диференційована.

Отже, прогрес ішов або в бік удосконалення алгоритмів розв'язання (VLSN, ГА, табу-пошук, точна декомпозиція), або в бік ускладнення структури обмежень, однак дослідники чомусь не звернули уваги навіть на більш прості і природні аспекти цієї задачі, наприклад урахування різниці швидкостей між наскрізними і дільничними поїздами як фактор, що впливає на вибір оптимального плану.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення точності та адекватності експлуатаційних розрахунків для організації вагонопотоків через розвиток математичного апарату оптимізації плану формування вантажних поїздів на основі диференціації їхніх дільничних швидкостей.

Для реалізації такого підходу необхідно скорегувати модель побудови ПФП і змодельовати, проаналізувати результати і зробити висновки про доцільність запропонованого підходу.

Основна частина дослідження. Дільнична швидкість належить до головних експлуатаційних показників, що характеризують ефективність роботи залізничного транспорту. Різниця в дільничних швидкостях між різними категоріями вантажних поїздів є досить суттєвою і зумовлена як технологічними особливостями їхньої роботи, так і технічними параметрами рухомого складу та інфраструктури.

На залізницях України та інших мережах колії ширини 1520 мм дільнична швидкість істотно варіюється для різних типів вантажних поїздів. До основних категорій належать наскрізні, дільничні, збірні, а також прискорені вантажні поїзди.

Зазначений факт доцільно використовувати як додатковий стимул для

підвищення рівня маршрутизації вагонопотоків [9]. Навіть якщо прийняти різницю у швидкостях досить незначною, наприклад на рівні кількох відсотків, потрібно враховувати, що швидкість руху впливає не лише на витрати у вагоно-годинах, але і локомотиво-години. При цьому вартість однієї локомотиво-години в кілька сотень разів перевищує вартість однієї вагоно-години. Отже, очевидно, що врахування цього фактора в розрахунках плану формування поїздів (ПФП) матиме позитивний ефект не лише через наближення математичної моделі до реальних умов, але і як можливість економії часу перебування рухомого складу та відповідних витрат на вантажні перевезення.

Економію часу із просуванням вагонів і локомотивів у складі наскрізних поїздів визначатимуть залежно від різниці в дільничних швидкостях між категоріями поїздів і тривалості їх перебування на дільниці. Відповідна формула для розрахунку цієї економії має враховувати як скорочення часу перебування вагонів у дорозі, так і зменшення локомотиво-годин [9], що забезпечує додатковий економічний ефект:

$$\Delta t_{\text{наск}} = \frac{L_{\text{діл}}}{V_{\text{діл}}} - \frac{L_{\text{діл}}}{V_{\text{наск}}}, \quad (1)$$

де $L_{\text{діл}}$ – довжина дільниці;

$V_{\text{діл}}, V_{\text{наск}}$ – середні дільничні швидкості дільничних і наскрізних поїздів відповідно.

Величину економії витрат, яка припадає на один вагон із просуванням вагонів і локомотивів у складі наскрізних поїздів [9], можна визначити за такою формулою:

$$\Delta B = \Delta t_{\text{наск}} \left(\frac{k_{\text{лок}}}{m} + 1 \right), \quad (2)$$

де $k_{\text{лок}}$ – коефіцієнт приведення локомотиво-годин економії до вагоно-годин;

m – нормативний склад поїзда, що рухається по певній дільниці, ваг.

Для проведення необхідних розрахунків було вибрано умовний залізничний полігон, що налічує 12 технічних станцій, схема якого подана на рис. 1. Тут зображено граф зазначеного полігона, де зафіксовано основні параметри інфраструктури: показники накопичення на технічних станціях, тривалість переробки одного вагона (без урахування часу накопичення, позначено синім кольором), а також відстані між технічними станціями.

Як вихідні дані для наскрізних поїздів було прийнято швидкість 47,5 км/год а для дільничних поїздів – 45 км/год. Тобто швидкість дільничних поїздів було прийнято приблизно лише на 5 % меншою за швидкість наскрізних поїздів, хоча в реальності ці швидкості можуть відрізнятися значно суттєвіше. Так, у довоєнний період в Україні середня швидкість дільничних поїздів досягала максимальних позначок близько 50 км/год, у той же час середня швидкість наскрізних поїздів могла досягати позначок 70 км/год і навіть вище. В умовах подальшої цифровізації ці швидкості можна буде визначати значно швидше, що у свою чергу допоможе підвищити точність розрахунків і якість ПФП.

Також для моделювання коефіцієнт приведення локомотиво-години до вагоно-години прийнято на рівні 375 до одного.

Із застосуванням описаної методики було проведено моделювання без апріорного урахування відмінностей у швидкостях руху дільничних і наскрізних составів та з урахування. Для проведення моделювання був застосований метод, наведений у роботі [10], – це один із найсучасніших методів розрахунку ПФП, саме завдяки його стало можливим проведення моделювання на полігоні, який має розгалужену мережеву структуру.

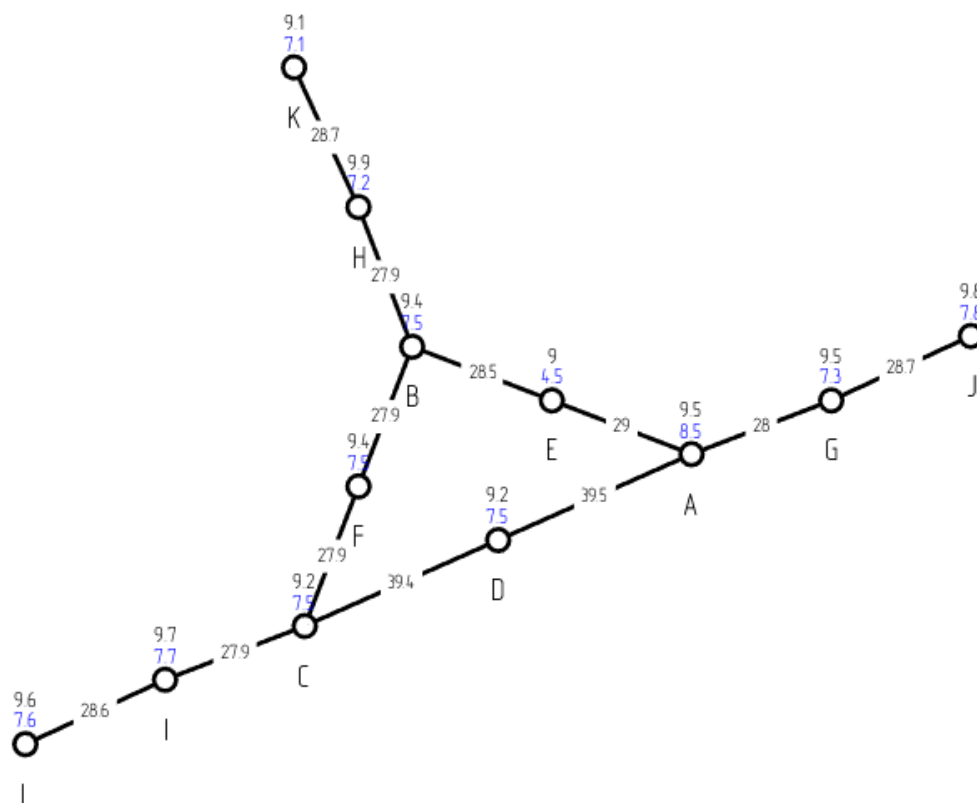


Рис. 1. Граф залізничного полігона з позначеними вихідними даними про довжини ділянок, параметри накопичення та витрати часу на переробку одного вагона на станціях

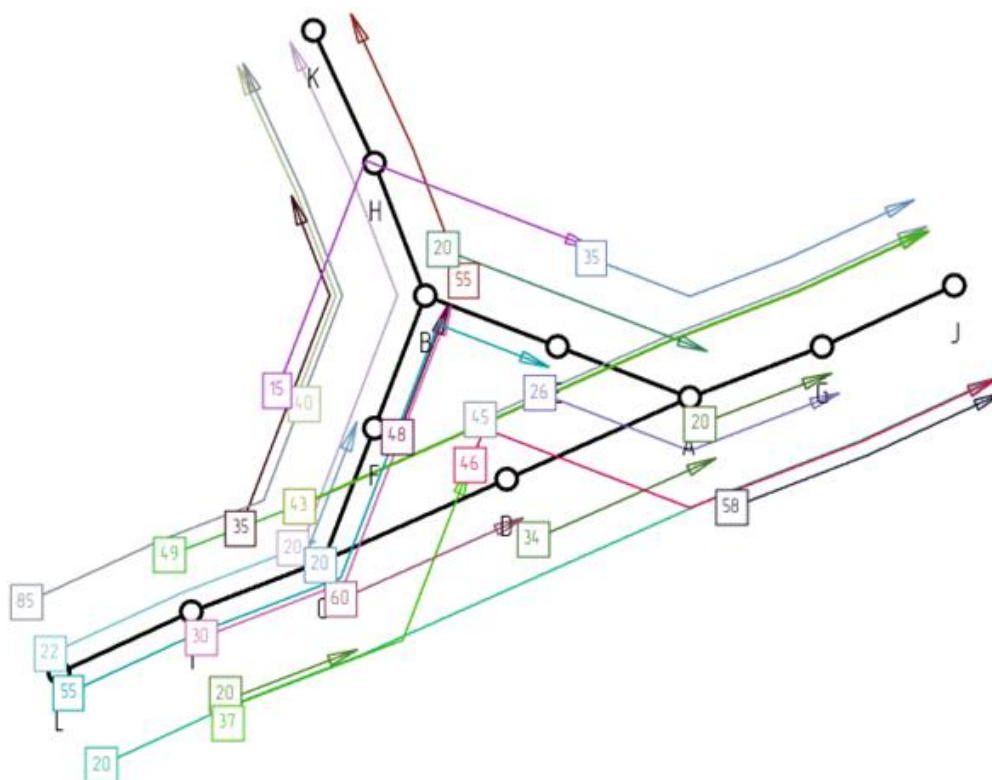


Рис. 2. Розрахункові потужності струменів вагопотоків

У результаті моделювання були отримані два варіанти ПФП, перший (із урахуванням різниці швидкостей) налічував 17 напрямків формування поїздів і другий варіант (без урахування різниці швидкостей) 16 напрямків формування поїздів.

На рис. 3 наведено графік збіжності штрафної функції алгоритму під час моделювання з апіорним урахуванням різниці швидкостей вантажних поїздів різних категорій.

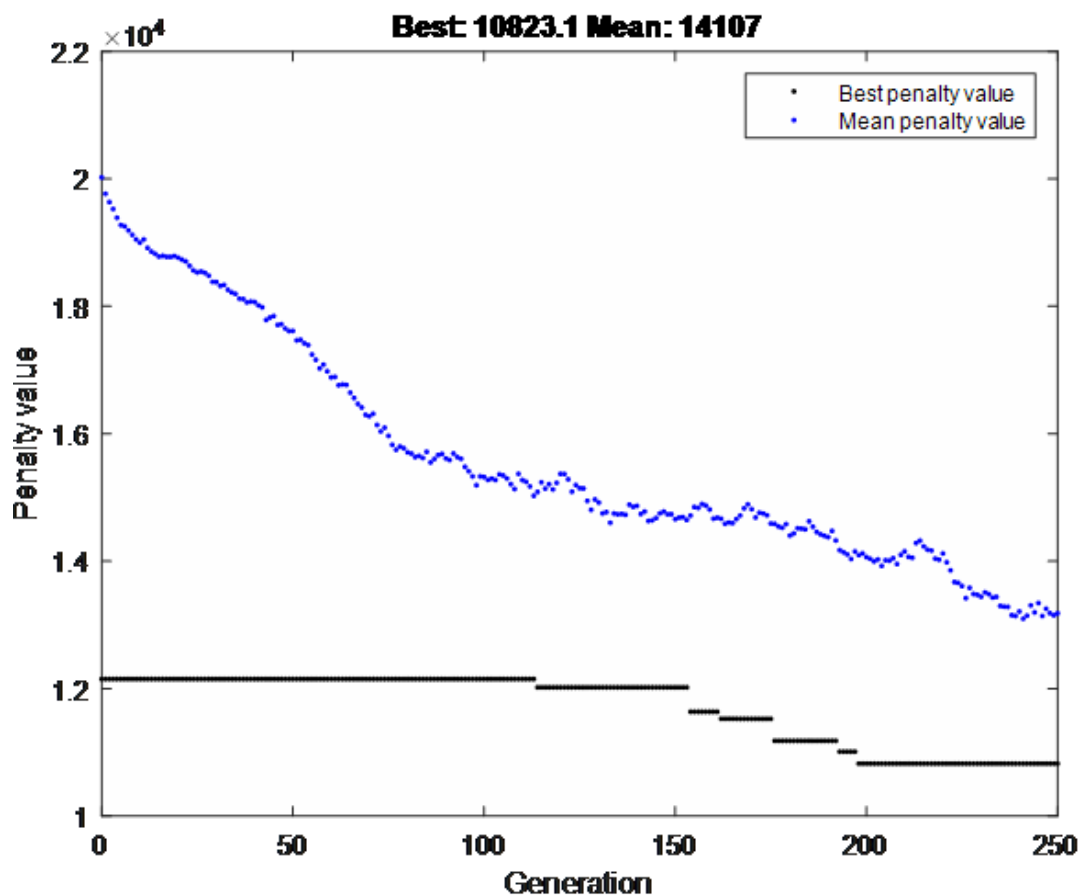


Рис. 3. Динаміка збіжності штрафної функції алгоритму

Результати моделювання з апіорним урахуванням різниці швидкостей наведені в табл. 1.

На рис. 4 наведено отриманий варіант ПФП (з апіорним урахуванням різниці швидкостей вантажних поїздів різних категорій) у графічному вигляді.

У табл. 2 наведено варіант ПФП, отриманий у результаті моделювання без

апіорного урахуванням різниці швидкостей вантажних поїздів різних категорій, також там наведене значення сумарних витрат приведених вагоно-годин, тобто після урахування різниці швидкостей, яке можна назвати величиною фактичних витрат. Також в таблиці порівняно величини фактичних витрат обох варіантів плану і наведено чисельне значення їхньої різниці.

Таблиця 1

Результати розрахунку ПФП з урахуванням різниці у швидкостях

Номер	Струмені у складі напрямків	Початкова станція	Кінцева станція	Маршрут	Потужність призначення	Кількість вагонів, для яких маршрут є кінцевим	Кількість вагонів, що переробляють на кінцевій станції	Параметр накопичення призначення	Витрати часу на переробку одного вагона	Витрати на переформування	Витрати на накопичення	Приведена економія від прослідкування в наскрізному поїзді
1	EG,AG	A	G	A,G	46	46	0	9.5	7.3	0	522.5	0
2	EJ,AJ	A	J	A,G,J	93	93	0	9.5	7.8	0	522.5	52.34807
3	FE,BA	B	E	B,E	35	15	20	9.4	4.5	90	517	0
4	CK,FK,BK	B	K	B,H,K	115	115	0	9.4	7.1	0	517	64.66612
5	LJ,CJ,CD	C	D	C,D	123	60	63	9.2	7.5	472.5	506	0
6	IB,IF,CF,CK	C	F	C,F	107	57	50	9.2	7.5	375	506	0
7	CH	C	H	C,F,B,H	35	35	0	9.2	7.2	0	506	29.08805
8	DA	D	A	D,A	34	34	0	9.2	8.5	0	506	0
9	LJ,DJ,CJ	D	J	D,A,G,J	108	108	0	9.2	7.8	0	506	103.1489
10	EJ,EG,BA	E	A	E,A	81	20	61	9	8.5	518.5	495	0
11	IB,CK,FE,FB,FK	F	B	F,B	153	78	75	9.4	7.5	562.5	517	0
12	FJ	F	J	F,B,E,A,G,J	46	46	0	9.4	7.8	0	517	64.93022
13	IB,IC,IF	I	C	I,C	87	20	67	9.7	7.5	502.5	533.5	0
14	IJ	I	J	I,C,D,A,G,J	49	49	0	9.7	7.8	0	533.5	79.57006
15	LJ,LC	L	C	L,I,C	42	22	20	9.6	7.5	150	528	23.59734
16	LE	L	E	L,I,C,F,B,E	55	55	0	9.6	4.5	0	528	76.95318
17	LK	L	K	L,I,C,F,B,H,K	85	85	0	9.6	7.1	0	528	142.6352
Разом										2671	8789	636.9372
Значення цільової функції										10823.06		

Аналіз отриманих результатів моделювання показує, що за базового розрахунку ПФП без урахування розбіжності середніх дільничних швидкостей наскрізних і дільничних поїздів значення цільової функції становить 11872 приведені вагоно-години. Додаткове врахування цього кінематичного фактора як постфактум-корегування для вже сформованого варіанта

плану дає змогу формально знизити оцінку сумарних витрат до 11277,42 приведених вагоно-годин. Водночас інтеграція різниці дільничних швидкостей безпосередньо в оптимізаційний алгоритм на етапі обчислень забезпечує формування якісно іншої структури вагонопотоків із мінімальним значенням цільової функції – 10823,06 приведених вагоно-годин.

Порівняльний аналіз доводить, що врахування диференціації швидкостей безпосередньо в процесі розрахунку ПФП, а не у вигляді ізольованих додаткових обчислень, не лише підвищує адекватність

експлуатаційної оцінки, але і забезпечує чисту технологічну економію в розмірі 454,4 приведених вагоно-годин, що становить 4,5 % загального обсягу витрат.

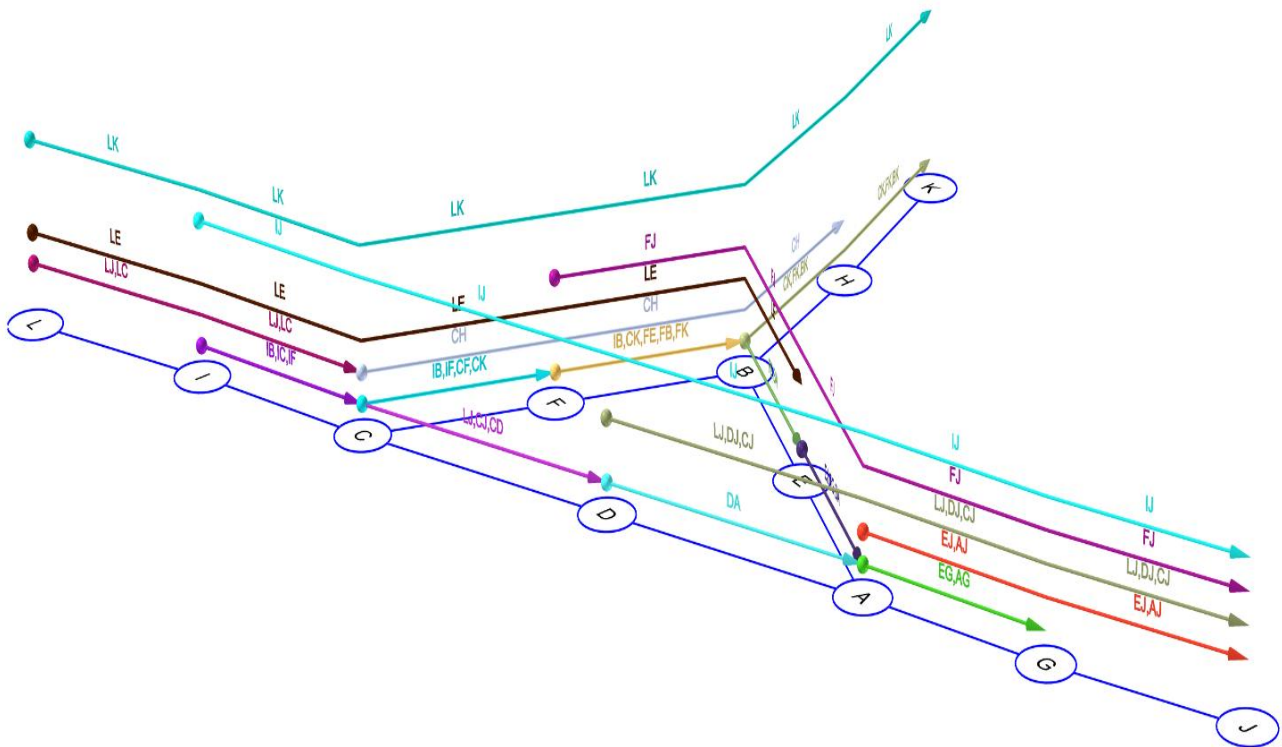


Рис. 4. Графічна інтерпретація отриманого варіанта ПФП

Висновки. У результаті проведеного дослідження вирішено науково-практичну завдання підвищення точності та адекватності експлуатаційних розрахунків для організації вагонопотоків на основі скорегованої моделі плану формування поїздів. Інтеграція диференційованих за категоріями поїздів дільничних швидкостей безпосередньо в оптимізаційний алгоритм розрахунку, на відміну від класичних ізольованих методів, дала змогу забезпечити якісно новий рівень обґрунтування рішень. Результати проведеного моделювання та порівняльний аналіз отриманих варіантів плану

підтверджують високу технологічну та економічну доцільність запропонованого підходу, оскільки пряме врахування кінематичних параметрів руху в процесі обчислень забезпечує чисту економію у розмірі 454,4 приведених вагоно-годин. Отримане зниження сумарних витрат на 4,5 % доводить, що диференціація швидкостей є суттєвим і дієвим внутрішнім резервом підвищення ефективності перевізного процесу, а розроблений математичний апарат може бути рекомендований для впровадження в практику оперативного планування на залізничних полігонах.

Таблиця 2

Результати розрахунку ПФП без урахування різниці у швидкостях

Номер	Струмені у складі напрямів	Початкова станція	Кінцева станція	маршрут	Потужність призначення	Кількість вагонів, для яких маршрут є кінцевим	Кількість вагонів, що переробляють на кінцевій станції	Параметр накопичення призначення	Витрати часу на переробку одного вагона на кінцевій станції маршруту	Витрати на переформування	Витрати на накопичення	Приведена економія від прослідкування в наскрізному поїзді
1	AG,EG	A	G	A,G	46	46	0	9.5	7.3	0	522.5	0
2	LJ,CJ,EJ,AJ,DJ	A	J	A,G,J	201	201	0	9.5	7.8	0	522.5	113.1394
3	FE,BA	B	E	B,E	35	15	20	9.4	4.5	90	517	0
4	CK,BK,FK	B	K	B,H,K	115	115	0	9.4	7.1	0	517	64.66612
5	LJ,CJ,CD	C	D	C,D	123	60	63	9.2	7.5	472.5	506	0
6	IB,CK,IF,CF	C	F	C,F	107	57	50	9.2	7.5	375	506	0
7	CH	C	H	C,F,B,H	35	35	0	9.2	7.2	0	506	29.08805
8	LJ,CJ,DJ,DA	D	A	D,A	142	34	108	9.2	8.5	918	506	0
9	EJ,EG,BA	E	A	E,A	81	20	61	9	8.5	518.5	495	0
10	IB,CK,FK,FE,FB	F	B	F,B	153	78	75	9.4	7.5	562.5	517	0
11	FJ	F	J	F,B,E,A,G,J	46	46	0	9.4	7.8	0	517	64.93022
12	IB,IC,IF	I	C	I,C	87	20	67	9.7	7.5	502.5	533.5	0
13	IJ	I	J	I,C,D,A,G,J	49	49	0	9.7	7.8	0	533.5	79.57006
14	LJ,LC	L	C	L,I,C	42	22	20	9.6	7.5	150	528	23.59734
15	LE	L	E	L,I,C,F,B,E	55	55	0	9.6	4.5	0	528	76.95318
16	LK	L	K	L,I,C,F,B,H,K	85	85	0	9.6	7.1	0	528	142.6352
	Разом									3589	8283	594.5796
	Значення цільової функції										11872.00	
	Сумарні витрати варіанта ПФП, отриманого без урахування різниці у швидкостях, після урахування										11277.42	
	Значення цільової функції варіанта ПФП, отриманого з урахуванням різниці у швидкостях										10823.06	
	Економія у випадку урахування різниці у швидкостях										454.3576	

Список використаних джерел

1. Bodin, L. D., Golden, B. L., Schuster, A. D., & Romig, W. (1980). A model for the blocking of trains. *Transportation Research Part B: Methodological*, 14(1–2), 115–120. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(80\)90037-5](https://doi.org/10.1016/0191-2615(80)90037-5)

2. Barnhart, C., Jin, H., & Vance, P. H. (2000). Railroad blocking: A network design application. *Operations Research*, 48(4), 603–614. <https://doi.org/10.1287/opre.48.4.603.12416>
3. Ahuja, R. K., Jha, K. C., & Liu, J. (2007). Solving real-life railroad blocking problems. *Interfaces*, 37(5), 404–419. <https://doi.org/10.1287/inte.1070.0295>
4. Yaghini, M., Seyedabadi, M., & Khoshraftar, M. M. (2012). A population-based algorithm for the railroad blocking problem. *Journal of Industrial Engineering International*, 8(1), Article 8. <https://doi.org/10.1186/2251-712X-8-8>
5. Xiao, J., & Lin, B. (2016). Comprehensive optimization of the one-block and two-block train formation plan. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 6(3), 218–236. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2016.09.002>
6. Xiao, J., Lin, B., & Wang, J. (2018). Solving the train formation plan network problem of the single-block train and two-block train using a hybrid algorithm of genetic algorithm and tabu search. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 86, 124–146. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.10.006>
7. Chen, C., Dollevoet, T., & Zhao, J. (2018). One-block train formation in large-scale railway networks: An exact model and a tree-based decomposition algorithm. *Transportation Research Part B: Methodological*, 118, 1–30. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.10.003>
8. Lin, B., Zhao, Y., Lin, R., & Liu, C. (2021). Integrating traffic routing optimization and train formation plan using simulated annealing algorithm. *Applied Mathematical Modelling*, 93, 811–830. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.12.031>
9. Прохоров, В. М., Крючков, В. О., & Богдан, Д. Л. (2023, 27–28 листопада). Удосконалення технології організації вагонопотоків за рахунок уточнення моделі плану формування поїздів. Тези доповідей 4-ої міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології» (ITT), Харків, Україна. (с. 46–47).
10. Butko, T., Prokhorov, V., & Chekhunov, D. (2017). Devising a method for the automated calculation of train formation plan by employing genetic algorithms. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(3-85), 55–61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.93276>

References

1. Bodin, L. D., Golden, B. L., Schuster, A. D., & Romig, W. (1980). A model for the blocking of trains. *Transportation Research Part B: Methodological*, 14(1–2), 115–120. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(80\)90037-5](https://doi.org/10.1016/0191-2615(80)90037-5)
2. Barnhart, C., Jin, H., & Vance, P. H. (2000). Railroad blocking: A network design application. *Operations Research*, 48(4), 603–614. <https://doi.org/10.1287/opre.48.4.603.12416>
3. Ahuja, R. K., Jha, K. C., & Liu, J. (2007). Solving real-life railroad blocking problems. *Interfaces*, 37(5), 404–419. <https://doi.org/10.1287/inte.1070.0295>
4. Yaghini, M., Seyedabadi, M., & Khoshraftar, M. M. (2012). A population-based algorithm for the railroad blocking problem. *Journal of Industrial Engineering International*, 8(1), Article 8. <https://doi.org/10.1186/2251-712X-8-8>
5. Xiao, J., & Lin, B. (2016). Comprehensive optimization of the one-block and two-block train formation plan. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 6(3), 218–236. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2016.09.002>
6. Xiao, J., Lin, B., & Wang, J. (2018). Solving the train formation plan network problem of the single-block train and two-block train using a hybrid algorithm of genetic algorithm and tabu search. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 86, 124–146. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.10.006>

7. Chen, C., Dollevoet, T., & Zhao, J. (2018). One-block train formation in large-scale railway networks: An exact model and a tree-based decomposition algorithm. *Transportation Research Part B: Methodological*, 118, 1–30. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.10.003>
 8. Lin, B., Zhao, Y., Lin, R., & Liu, C. (2021). Integrating traffic routing optimization and train formation plan using simulated annealing algorithm. *Applied Mathematical Modelling*, 93, 811–830. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.12.031>
 9. Prokhorov, V. M., Kryuchkov, V. O., & Bohdan, D. L. (2023, November 27–28). *Udoskonalennya tekhnolohiyi orhanizatsiyi vahonopotokiv za rakhunok utochnennya modeli planu formuvannya poyizdiv* [Improvement of car-flow organization technology by clarifying the model of train formation plan] [Conference presentation]. 4th International Scientific and Technical Conference "Intellectual Transport Technologies" (ITT), Kharkiv, Ukraine. (pp. 46–47).
 10. Butko, T., Prokhorov, V., & Chekhunov, D. (2017). Devising a method for the automated calculation of train formation plan by employing genetic algorithms. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(3-85), 55–61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.93276>
-

Прохоров Віктор Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8963-6467>. E-mail: prokhorov@kart.edu.ua.

Пархоменко Лариса Олексіївна, доктор технічних наук, професор кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1647-7746>. E-mail: parhomenko@kart.edu.ua.

Калашнікова Тетяна Юріївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6563-5945>. E-mail: bulavina_ty@ukr.net.

Кофанов Олександр Володимирович, аспірант кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0005-3277-3731>. E-mail: alex.vonafo@gmail.com.

Prokhorov Viktor, PhD (Tech), Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8963-6467>. E-mail: prokhorov@kart.edu.ua.
Parkhomenko Larysa, D.Sc (Tech), Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1647-7746>. E-mail: parhomenko@kart.edu.ua.
Kalashnikova Tetiana, PhD (Tech), Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6563-5945>. E-mail: bulavina_ty@ukr.net.
Kofanov Oleksandr, postgraduate student, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0005-3277-3731>. E-mail: alex.vonafo@gmail.com.

Дата надходження статті: 06.07.2026 р.

Дата прийняття статті до друку: 04.09.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY