

275 ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 656.2

doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310712

© Пархоменко Л.О.¹, Прохоров В.М.²

УТОЧНЕННЯ МОДЕЛІ РОЗРАХУНКУ ПЛАНУ ФОРМУВАННЯ ПОЇЗДІВ ЗА РАХУНОК УРАХУВАННЯ ЕФЕКТУ НАВАНТАЖЕНОСТІ СОРТУВАЛЬНИХ СТАНЦІЙ

Стаття присвячена вдосконаленню математичної моделі розрахунку плану формування поїздів (ПФП) на мережі залізниць АТ «Укрзалізниця». Система організації вагонопотоків на залізничному транспорті базується на стратегічному плануванні на основі ПФП, що дозволяє підвищити ефективність використання вагонів та інфраструктури, зменшити затримки при формуванні поїздів та скоротити тривалість перевезення. Існуючі моделі не відображають певні нюанси процесу формування поїздів на сортувальних станціях в першу чергу тому, що існуючі методи розрахунку ПФП не передбачають використання таких ускладнених моделей. Таке становище фактично створює підґрунтя для наявності високого рівня епістемічної невизначеності в системі управління експлуатаційною роботою підсистеми вантажних залізничних перевезень і гальмує прогрес в цьому напрямку. Запропоноване уточнення моделі у вигляді функції змінного коефіцієнта завантаженості технічних станцій відображає реальний ефект уповільнення переробки вагонопотоків і відповідно додаткових витрат вагоно-годин у випадках, коли технічні станції працюють у навантажених режимах роботи. Для здійснення розрахунків використано автоматизований метод розрахунку ПФП, раніше розроблений одним з авторів даного дослідження, що ґрунтується на застосуванні математичного апарату генетичних алгоритмів. Порівняльний аналіз результатів розрахунків за типовою та вдосконаленою моделями показав, що врахування впливу перевантаженості станцій дозволило скоротити витрати на 405,7 вагоно-годин, або 3,5% від загальних витрат на накопичення та переформування составів. Реалізація даного підходу щодо уточнення моделі, який базується на використанні сучасного методу розрахунку ПФП, може слугувати основою для подальшого вдосконалення методів стратегічного планування перевізного процесу та мінімізації впливу факторів невизначеності. Запропоноване уточнення моделі розрахунку ПФП також представляє теоретичний інтерес як приклад застосування підходу, спрямованого на зменшення рівня невизначеності епістемічного типу в системі управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту.

Ключові слова: план формування поїздів, залізничний транспорт, математична модель, генетичні алгоритми, перевантаженість станцій, епістемічна невизначеність.

L.O. Parkhomenko, V.M. Prokhorov. Refinement of the train formation plan calculation model by considering the effect of switchyard stations' workload. The article is dedicated to improving the mathematical model for calculating the freight train formation plan (TFP) on the railway network of JSC «Ukrzaliznytsia». The system of organizing freight flows in

¹ канд. техн. наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, ORCID: 0000-0003-1647-7746, parkhomenko@kart.edu.ua

² канд. техн. наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, ORCID: 0000-0001-8963-6467, vicmmx@gmail.com

rail transport is based on strategic planning through TFP, which allows increasing the efficiency of using cars and infrastructure, reducing delays in forming trains, and reducing their transportation time. At the same time, the existing TFP calculation models have certain shortcomings, in particular, the complexity of taking into account the numerous factors that influence the process of train formation. This study proposes a refinement of the TFP mathematical model by including the dependence of wagon-hour costs on the function of the variable utilization factor of technical stations. An automated calculation method developed by one of the authors, based on the application of the mathematical apparatus of genetic algorithms, was used for the calculations. A comparative analysis of the calculation results using the standard and improved models showed that taking into account the impact of station congestion allowed reducing costs by 405.7 wagon-hours, or 3.5% of the total costs for train accumulation and reformatting. The application of the proposed refinement of the TFP model allows the railway operator to obtain more accurate and justified planning results, which will contribute to improving the efficiency of wagon flow management. In addition, the implementation of this approach can serve as the basis for further improving the methods of strategic planning of the transportation process and minimizing the impact of uncertainty factors. The proposed refinement of the TFP calculation model has not only a practical focus, but also represents a theoretical example of the application of an approach aimed at reducing the level of epistemic uncertainty in the management system of the operational work of rail transport. The systematic development and implementation of such approaches creates the basis for mitigating the negative impact of factors that represent sources of other types of uncertainty.

Key words: train formation plan, rail transport, mathematical model, genetic algorithms, switchyard station congestion, epistemic uncertainty.

Постановка проблеми. Зниження рівня невизначеності в системі управлінні експлуатаційною роботою залізничного транспорту є критично важливим для підвищення ефективності використання ресурсів, зниження операційних витрат та підвищення якості обслуговування клієнтів. Високий рівень невизначеності як алеаторного, так і епістемічного типу, притаманний транспортному процесу, створює різноманітні проблеми при плануванні перевізного процесу на всіх рівнях системи управління експлуатаційною роботою. Уточнення моделі розрахунку плану формування поїздів дозволить знизити рівень епістемічної невизначеності на стратегічному рівні, та дозволить знизити експлуатаційні витрати на рівні всієї підсистеми вантажних залізничних перевезень за рахунок більш оптимального розподілу роботи між сортувальними станціями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження в галузі управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту протягом останніх років демонструють значну увагу до питань невизначеності і ризику та методів її зниження. Зокрема, дослідження показують, що високий рівень невизначеності істотно негативно впливає на планування та оперативне управління, викликаючи нестабільність, перепростої рухомого складу та збільшення операційних витрат [1-10]. Слід зазначити, що перевізному процесу притаманні фактори невизначеності як алеаторного типу, тобто такі, що пов'язані з випадковістю і стохастичними процесами, так і фактори невизначеності епістемічного типу, пов'язані з неповнотою або нечіткістю інформації, неточністю моделей тощо.

Таким чином, сучасні дослідження підтверджують необхідність та ефективність застосування методів, спрямованих на зниження рівня невизначеності при управлінні транспортними системами і зокрема при управлінні експлуатаційною роботою залізничного транспорту. Однак більшість методів, які застосовуються для вирішення проблеми зменшення рівня невизначеності в контексті задач управління транспортними процесами, відносяться до імовірнісних методів [5, 8-10], таких як, наприклад, стохастичне програмування, робастна оптимізація, байєсовські підходи.

Тобто в наукових дослідженнях превалюють підходи, спрямовані переважно на зниження рівня невизначеностей алеаторного типу. Однак не менш важливим є також розробка підходів, що спрямовані на елімінацію факторів невизначеності епістемічного типу. Одним з таких підходів є уточнення моделей. Уточнення моделей управління залізничною системою, особливо на

стратегічному рівні, – це найбільш швидкий і раціональний шлях до підвищення ефективності перевізного процесу в умовах невизначеності та обмежених ресурсів.

Мета дослідження – зменшення невикористаних простоїв вагонів та забезпечення нормального режиму роботи сортувальних станцій за рахунок уточнення моделі розрахунку плану формування вантажних одногрупних поїздів (ПФП).

Виклад основного матеріалу. ПФП – це комплексна технологічна система, що координує роботу всієї залізничної мережі. Цей план визначає призначення, склад поїздів та груп вагонів на станціях, категорії відправлених поїздів, станції їхнього розформування та розподіл вагонів, включаючи рухомий склад порожніх вагонів. При формуванні вантажних поїздів план враховує численні економічні та технічні аспекти, як-от витрати на підведення вагонів до пунктів навантаження, переробку та простої на станціях, виконання технічних і вантажних операцій, рух поїздів дільницями, утримання інфраструктури та персоналу. Кінцевою метою плану є мінімізація витрат та максимізація доходів залізничної компанії шляхом оптимізації роботи всієї мережі.

ПФП є стратегічним завданням, оскільки передбачає планування перевезень на тривалій період – зазвичай тижні або місяці наперед. При його розробці враховується багато факторів, таких як попит на перевезення, наявність рухомого складу та пропускна спроможність мережі.

Традиційні методики розрахунку оптимального ПФП застосовують критерій мінімізації сумарних вагоно-годин, витрачених на накопичення та переробку вагонів.

Проведене дослідження мало на меті встановити взаємозв'язок між рівнем завантаженості сортувальної станції та тривалістю перебування вагонів на ній. Для цього було використано фактичні дані про перебування вагонів на сортувальній станції протягом трьох місяців. Результати статистичного моделювання наведені на рисунку 1.

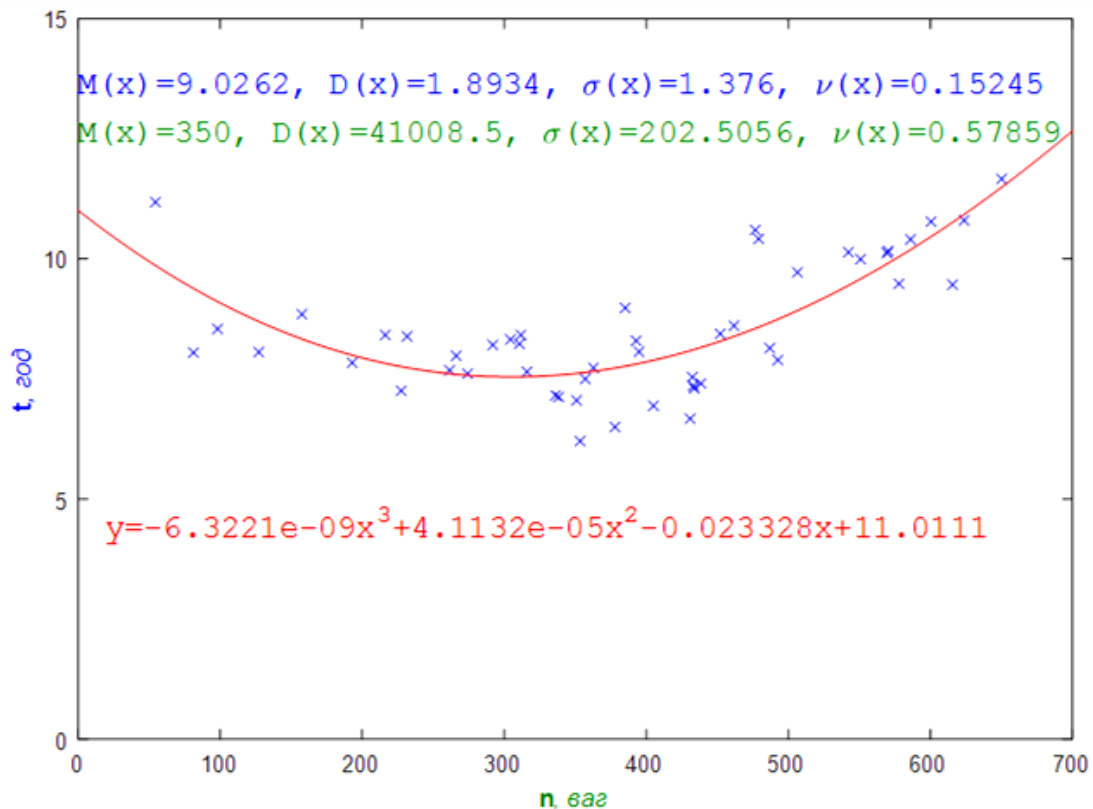


Рис.1 – Залежність середньої тривалості обробки вагона на технічній станції від розміру вагонопотоку, що надходить у переробку

Результати дослідження засвідчили, що збільшення рівня завантаженості станції призводить до зростання часу перебування вагонів на ній. Зокрема, вагони, які надходять на станцію в період її підвищеної завантаженості, в середньому затримуються там на 20% довше, порівняно з вагонами, що прибувають у періоди меншого навантаження.

Поглиблений аналіз показав, що цей ефект пояснюється збільшенням часу очікування вагонами пропуску через станцію, а також більшою тривалістю технологічних процесів перевезення та сортування вагонів в умовах підвищеної завантаженості.

На основі отриманих результатів можна зробити висновок, що взаємозв'язок між часом перебування вагонів на сортувальній станції та рівнем її завантаженості є суттєвим та потребує подальшого дослідження для підвищення ефективності функціонування залізничного транспорту. Результати даного дослідження фактично підтверджують теоретичні положення про режими роботи сортувальних станцій, які можна зустріти в наукових публікаціях [11] (рис. 2).



Рис. 2 – Визначення режимів роботи станції

Тривалість перебування вагонів на сортувальних станціях значною мірою визначається рівнем завантаженості цих станцій [12, 13]. Існує оптимальний обсяг навантаження, при якому ефективність роботи сортувальної станції сягає максимуму.

Як демонструє дослідження, для аналізу залежності часу перебування вагонів на сортувальній станції від її завантаженості доцільно застосовувати метод найменших квадратів. Таким чином, врахування взаємозв'язку між рівнем навантаження сортувальної станції та тривалістю знаходження вагонів на ній є важливим чинником підвищення ефективності функціонування залізничного транспорту. Використання методу найменших квадратів дозволяє отримати цінні дані для вдосконалення процесів планування та організації перевізної діяльності.

Процес формування составів – найбільш складний та трудомісткий технологічний процес на станціях. Складність обумовлена необхідністю багаторазового сортування вагонів, що виникає через обмежену кількість колій для сортування та накопичення вагонів, велику кількість груп вагонів у составі, надання «вікон» для технічного обслуговування та ремонту колій [14, 15].

Наведені міркування дозволяють зробити висновок про існування чіткої залежності між тривалістю непродуктивних простоїв вагонів на технічних, зокрема, сортувальних станціях та рівнем навантаженості цих станцій. Попри можливу складність цієї залежності в реальних умовах, навіть врахування її основних тенденцій сприятиме підвищенню адекватності математичної моделі, на якій ґрунтується процедура розрахунку плану формування поїздів. Це, своєю чергою, дозволить покращити якість ПФП та знизити витрати на організацію вантажних залізничних перевезень уже на стадії стратегічного планування.

На першому етапі доцільно виділити режим роботи станції в умовах перевантаження, оскільки більшість досліджень засвідчили факт збільшення непродуктивних простоїв вагонів при зростанні рівня завантаженості станції. При цьому слід враховувати, що такі простой можуть

виникати як на стадії переробки вагонів у підсистемі прийому, так і під час перебування вагонів у сортувальній підсистемі в процесі накопичення составів.

Теоретично, зі збільшенням обсягів вагонопотоків, що переробляються на станції, середній простій одного вагона в підсистемі накопичення має зменшуватися через прискорення цього процесу. Однак, починаючи з певного рівня завантаженості станції, цього ефекту не спостерігається. Натомість, у підсистемі розформування-формування також відбувається збільшення простоїв вагонів через невідповідність інтенсивностей вхідних та вихідних потоків. До того ж, зростання обсягу вагонопотоку, що надходять на технічну станцію згідно з поточним варіантом ПФП, може супроводжуватися збільшенням кількості призначень, на які станція формує та відправляє поїзди. Отже, підвищення рівня завантаженості станції може відбуватися за практичної відсутності або мінімального рівня ефекту прискорення формування составів та зменшення середнього часу простою вагона під накопиченням.

Ключовим питанням у даному контексті є визначення, на якій саме стадії обробки вагонів необхідно враховувати збільшення часу їх непродуктивного простою та відповідні додаткові витрати вагоно-годин. Очевидно, що ці витрати мають обліковуватись там, де вони реально виникають.

Структура витрат вагоно-годин дещо різниться при переформуванні вагонопотоків і в процесі накопичення составів у підсистемі розформування-формування. Витрати, пов'язані з перебуванням вагонів на станції внаслідок переформування відповідно до поточного варіанта плану формування поїздів, пропорційні потужності цих вагонопотоків. Натомість витрати на накопичення, хоча й можуть збільшуватись через надмірне завантаження станції, практично не залежать від потужностей потоків та загальної кількості вагонів, а лише від кількості призначень, для яких формуються состави.

Отже, необхідно враховувати додаткові витрати вагоно-годин не лише за фактом додаткової переробки потоків, а й безпосередньо в процесі накопичення. Наприклад, якщо значно збільшити потужність місцевого вагонопотоку, який не задіяний у переформуванні, а лише у формуванні составів, то згідно з класичною моделлю розрахунку ПФП величина витрат вагоно-годин не зміниться, оскільки кількість призначень на станції не змінюється. Однак на практиці таке збільшення вагонопотоку, що надходять, може спричинити перевантаження станції, що матиме негативні наслідки у вигляді зростання простоїв через збільшення часу очікування обробки.

Для відсіювання таких недопустимих варіантів ПФП, коли кількість вагонів, що надходять на станцію, перевищує її максимальну переробну спроможність, необхідно запровадити жорсткі обмеження-нерівності. Втім, більшість класичних методів розрахунку ПФП не мають механізмів реалізації таких обмежень. Крім того, може трапитися, що певний варіант плану, який незначно порушує таке обмеження, виявиться значно вигіднішим за інші, однак буде відкинутий через жорстку заборону.

Отже, необхідність врахування додаткових витрат у разі перевантаження технічних станцій є очевидною. Постає питання, який спосіб такого врахування буде найпростішим та достатньо адекватним.

Аналіз показує, що за відсутності перевантаженості станції, залежність витрат вагоно-годин від рівня її завантаженості може бути складною та неоднозначною, зумовленою численними факторами. У такому випадку недоцільно вносити зміни до існуючої моделі розрахунку плану формування поїздів. Натомість, коригування доцільно здійснювати лише стосовно режиму роботи станцій в умовах перевантаження.

Відповідно до наведених міркувань, пропонується застосувати модель, проілюстровану на рисунку 3. Ідея полягає у впровадженні коефіцієнта, що збільшує витрати вагоно-годин залежно від рівня завантаженості станції. Коли завантаження не перевищує наявної переробної спроможності, цей коефіцієнт дорівнює одиниці, тобто не відбувається збільшення витрат. Однак, якщо завантаження перевищує наявну переробну здатність станції або певний емпірично встановлений рівень, після якого починається зростання простоїв вагонів, значення коефіцієнта стає більшим за одиницю. При цьому, чим більшим є перевищення рівня завантаження над переробною спроможністю, тим більшим буде й величина цього коефіцієнта, згідно з лінійною залежністю:

$$\beta(\alpha) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \alpha \leq 1 \\ \alpha, & \text{якщо } \alpha > 1 \end{cases} \quad (1)$$

що можна також записати наступним чином:

$$\beta(\alpha) = \frac{1}{2}(|\alpha - 1| + \alpha + 1). \quad (2)$$

Графік цієї залежності наведений на рисунку 3.

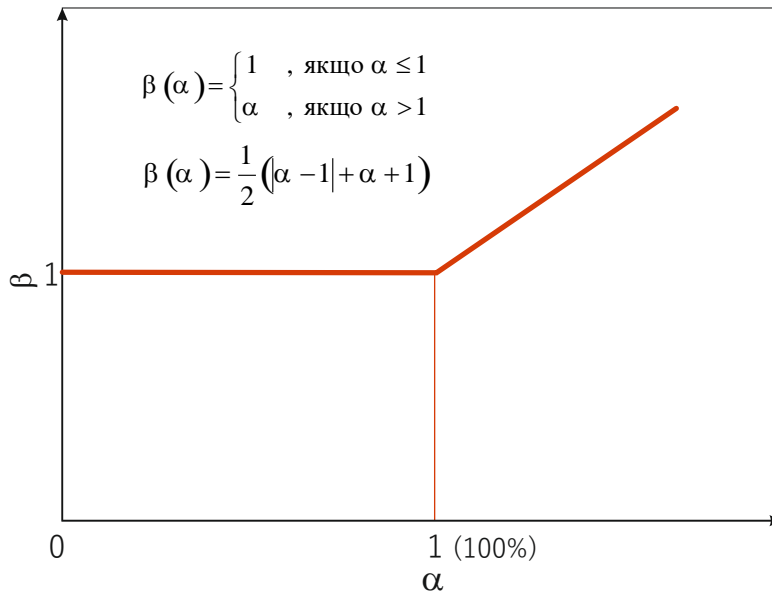


Рис. 3 – Визначення функції коефіцієнту збільшення витрат вагоно-годин

Пропоноване рішення полягає у включенні розробленої функції до складу моделі розрахунку ПФП. Для проведення розрахунків було обрано довільний залізничний полігон, схематично проілюстрований на рисунку 4. Цей рисунок демонструє параметри інфраструктури досліджуваного полігону, а саме: величини параметрів накопичення на технічних станціях (чорним кольором), час, необхідний для переробки одного вагона (не включаючи процес накопичення, позначений синім кольором), а також відстані між технічними станціями. На рисунку 5 наведена топологія і потужності розрахункових вагонопотоків на фоні графу мережі.

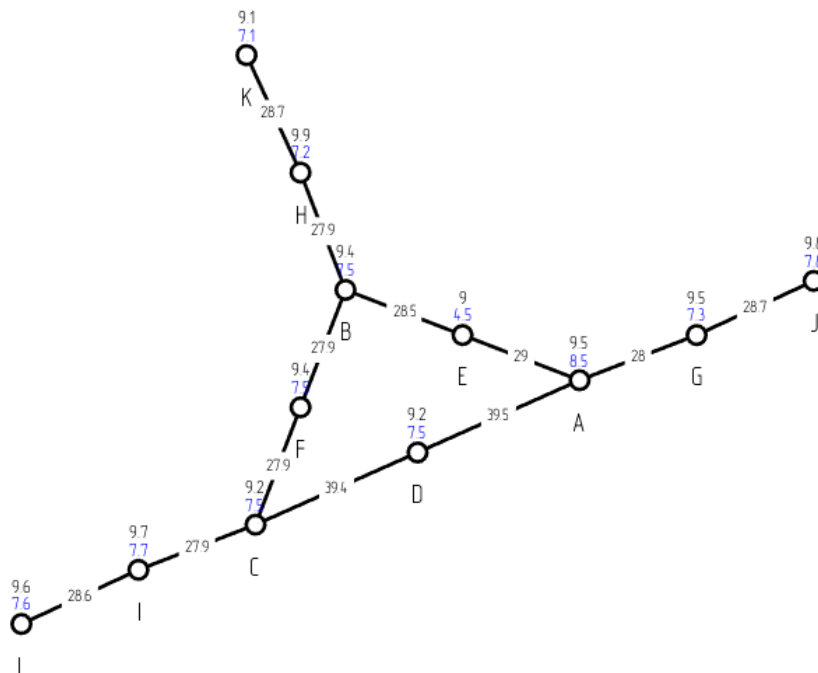


Рис. 4 – Граф залізничного полігону із позначеними параметрами інфраструктури

Отже, використання запропонованої функції в рамках моделі розрахунку ПФП дозволить адекватно врахувати вплив перевантаженості технічних станцій на зростання витрат вагоно-годин, що є важливим для оптимізації процесу формування поїздів на досліджуваному залізничному полігоні.

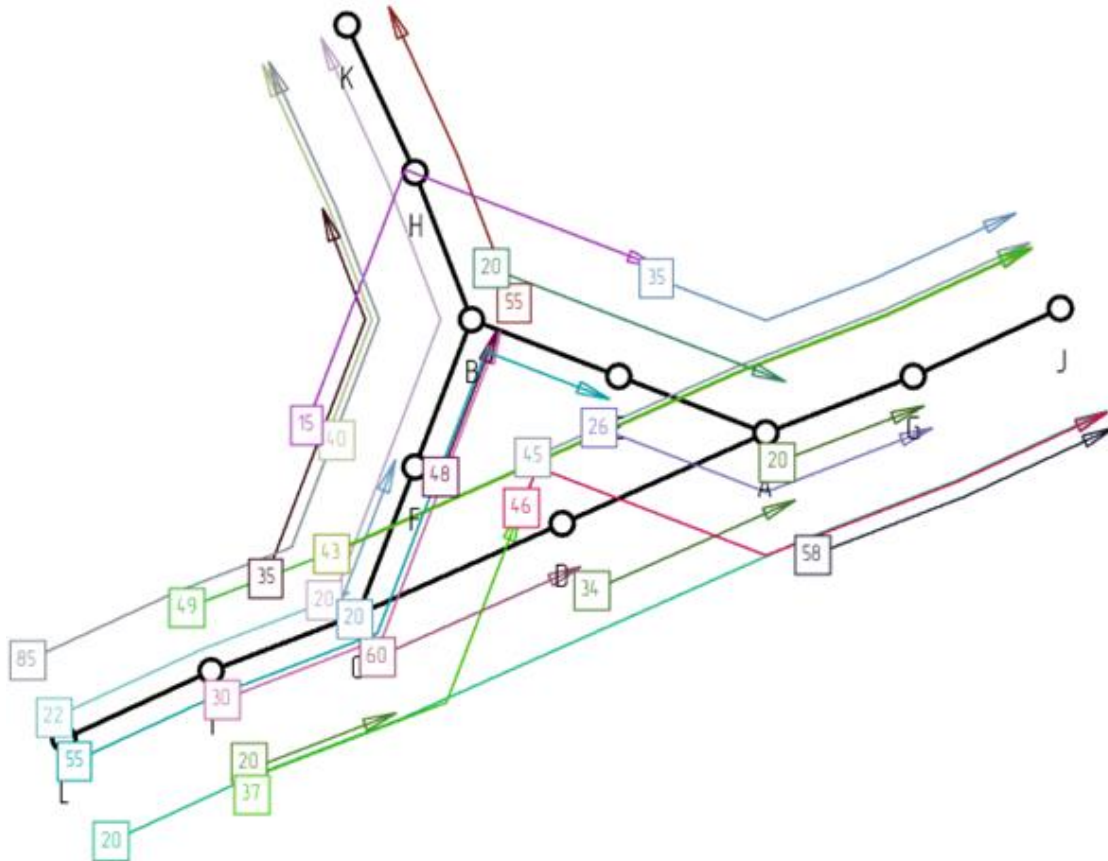


Рис. 5 – Розрахункові потужності струменів вагонопотоків

Розрахунок плану формування поїздів на основі типової моделі. Для здійснення розрахунків було обрано метод, запропонований у [16]. Цей метод був розроблений одним з авторів даного дослідження. Суттєвою перевагою даного методу є те, що він є автоматизованим і базується на застосуванні математичного апарату генетичних алгоритмів. Іншою перевагою даного методу також є те, що він є вільним від спрощень та умовностей класичних методів і дозволяє знаходити такі рішення, які за допомогою класичних методів відшукати фактично неможливо. Таким чином, фактично саме завдяки існуванню даного методу розрахунку ПФП і можливо в повній мірі як дослідити, так і використати на практиці запропоноване уточнення моделі розрахунку ПФП. До того ж даний метод дозволяє здійснювати розрахунки на полігонах, що мають розгалужену мережеву структуру, що є важливим як з теоретичної, так і з практичної точки зору. Таким чином, даний метод дозволяє отримати розрахунки з необхідною точністю, яка фактично залежить лише від обчислювальних потужностей, що використовуються. В таблиці 1 та на рисунку 6 наведено результати розрахунків ПФП за типовою моделлю. Результати цих розрахунків потрібні для їх подальшого порівняння з результатами розрахунків на основі вдосконаленої моделі.

Таблиця 1

Результати розрахунку ПФП на основі типової моделі

№	Струмені у складі напрямів	Початкова станція	Кінцева станція	маршрут	Потужність призначення	Кількість вагонів, для яких маршрут є кінцевим	Кількість вагонів, що переробляються на кінцевій станції	Параметр накопичення призначення	Витрати часу на переробку одного вагона на кінцевій станції маршруту	Витрати на переформування	Витрати на накопичення	В тому числі додаткові витрати на переформування внаслідок перевантаження станції
1	EG,AG	A	G	A,G	46	46	0	9.5	7.3	0	522.5	0
2	DJ,EJ, AJ	A	J	A,G,J	138	138	0	9.5	7.8	0	522.5	0
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	0
5	CD	C	D	C,D	60	60	0	9.2	7.5	0	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	0
8	LJ,CJ,IJ	C	J	C,D,A, G,J	112	112	0	9.2	7.8	0	506	0
9	DJ,DA	D	A	D,A	79	34	45	9.2	8.5	382.5	506	0
10	EJ,EG, BA	E	A	E,A	81	20	61	9	8.5	518.5	495	8.64
11	IB,CK, FK, FE,FB	F	B	F,B	153	78	75	9.4	7.5	562.5	517	140.63
12	FJ	F	J	F,B,E, A,G,J	46	46	0	9.4	7.8	0	517	0
13	IB,IC, IF,IJ	I	C	I,C	136	20	116	9.7	7.5	870	533.5	571.71
14	LJ,LC	L	C	L,I,C	42	22	20	9.6	7.5	150	528	0
15	LE	L	E	L,I,C, F,B,E	55	55	0	9.6	4.5	0	528	0
16	LK	L	K	L,I,C, F,B,H, K	85	85	0	9.6	7.1	0	528	0
	Всього									2948.5	8255.5	720.98
	Значення цільової функції										11204	
	Значення цільової функції, після урахування додаткових витрат, пов'язаних з перевантаженням станцій										11924.98	

Таблиця 2

Результати розрахунку ПФП із урахуванням ефекту перевантаження станцій

№	Струмені у складі напрямів	Початкова станція	Кінцева станція	маршрут	Потужність призначення	Кількість вагонів, для яких маршрут є кінцевим	Кількість вагонів, що переробляються на кінцевій станції	Параметр накопичення призначення	Витрати часу на переробку одного вагона на кінцевій станції маршруту	Витрати на переформування	Витрати на накопичення	В тому числі додаткові витрати на переформування внаслідок перевантаження станції
1	EG, AG	A	G	A,G	46	46	0	9,5	7,3	0	522,5	0
2	DJ,EJ,AJ	A	J	A,G,J	138	138	0	9,5	7,8	0	522,5	0
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	0
5	CD	C	D	C,D	60	60	0	9,2	7,5	0	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	0
8	LJ,CJ	C	J	C,D,A,G,J	63	63	0	9,2	7,8	0	506	0
9	DJ,DA	D	A	D,A	79	34	45	9,2	8,5	382,5	506	0
10	EJ,EG, BA	E	A	E,A	81	20	61	9	8,5	527,14	495	8,64
11	IB,CK, FK,FE, FB	F	B	F,B	153	78	75	9,4	7,5	703,13	517	140,63
12	FJ	F	J	F,B,E,A,G, J	46	46	0	9,4	7,8	0	517	0
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	0
15	LJ,LC	L	C	L,I,C	42	22	20	9,6	7,5	150	528	0
16	LE	L	E	L,I,C,F,B,E	55	55	0	9,6	4,5	0	528	0
17	LK	L	K	L,I,C,F,B, H,K	85	85	0	9,6	7,1	0	528	0
Всього										2730,27	8789	149,27
Значення цільової функції											11519,27	
Сумарні витрати вагоно-годин згідно до варіанту ПФП, отриманого без урахування додаткових витрат, пов'язаних з перевантаженням станцій, після їх урахування											11924,98	
Економія вагоно-годин											405,714	
Економія %											3,522	

Отже, згідно до отриманих результатів сумарна кількість вагоно-годин, що відповідає отриманому варіанту плану, без урахування впливу перевантаженості станцій на величину невиробничого простою вагонів, становить 11204 вагоно-години. Однак, після врахування цього фактора, загальні вагоно-години за даним варіантом плану зростають до 11924,98. Натомість, варіант плану, розрахований із безпосереднім урахуванням впливу перевантаження станцій на невиробничий простій вагонів, має показник цільової функції 11519,27 вагоно-годин.

Таким чином, врахування впливу перевантаження станцій дозволило скоротити витрати на 405,71 вагоно-годин, що становить 3,5% від загальних витрат на накопичення та переформування составів.

Відповідно, включення запропонованої функції до моделі розрахунку ПФП підвищило адекватність моделі та сприяло оптимізації плану формування поїздів.

Висновки

Система організації вагонопотоків на мережі АТ «Укрзалізниця» ґрунтується на стратегічному плануванні у вигляді ПФП.

ПФП дозволяє підвищити ефективність використання вагонів та залізничної інфраструктури, зменшити затримки при формуванні поїздів та скоротити час їх перевезення. Застосування сучасних методів планування сприяє зниженню витрат на перевезення, зростанню продуктивності та якості послуг.

Водночас існуючі моделі розрахунку ПФП мають свої недоліки, зокрема складність врахування численних факторів, що впливають на процес формування поїздів, таких як технічний стан вагонів, зміна ринкових потреб та планування маршрутів. Тому необхідно постійно вдосконалювати методи планування та застосовувати сучасні технології й аналітичні інструменти.

Одним із напрямків удосконалення технології стратегічного планування роботи залізничного транспорту на основі плану формування поїздів є уточнення математичної моделі, що лежить в основі цієї процедури.

Запропоновано включити до моделі розрахунку плану формування поїздів залежність витрат вагоно-годин при переробці вагонопотоків від функції змінного коефіцієнта завантаженості станцій, визначивши її за допомогою шматочно-лінійної функції.

Запропонований підхід до удосконалення системи стратегічного планування шляхом зниження рівня епістемічної невизначеності є можливим лише завдяки існуванню сучасного методу розрахунку ПФП, який був розроблений у [16].

Порівняльні розрахунки з використанням уточненої моделі на основі розробленого методу виконані одним з авторів даного дослідження автоматизованим методом, що базується на використанні математичного апарату генетичних алгоритмів, показали, що врахування впливу перевантаженості станцій дозволило підвищити адекватність моделі та скоротити витрати на 405,7 вагоно-годин (3,5% від загальних).

Таким чином, запропоноване уточнення моделі розрахунку плану формування вантажних поїздів фактично має не лише суто практичну спрямованість, але з теоретичної точки зору представляє собою приклад застосування підходу, спрямованого на зменшення рівня невизначеності епістемічного типу в системі управління експлуатаційною роботою залізничної транспортної системи. Системна розробка і застосування таких підходів дозволить створити підґрунтя для нівелювання негативного впливу факторів, що представляють джерела й інших типів невизначеності.

Перелік використаних джерел:

1. Управління вантажними перевезеннями в умовах ризиків конкурентного середовища / Бех П. В., Нестеренко Г. І., Стрелко О. Г., Музикін М. І. *Системи та технології*. 2021. № 1 (61). С. 85-97. DOI: <https://doi.org/10.32836/2521-6643-2021-1-61.7>.
2. Handling uncertainty in train timetable rescheduling: A review of the literature and future research directions / S. Zhan et al. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2024. Vol. 183. Pp. 1-24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103429>.
3. Govindan K., Fattahi M., Keyvanshokoh E. Supply chain network design under uncertainty: a comprehensive review and future research directions. *European Journal of Operational Research*. 2017. Vol. 263(1). Pp. 108-141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.04.009>.
4. Aghezzaf E. Capacity planning and warehouse location in supply chains with uncertain demands. *Journal of the Operational Research Society*. 2005. Vol. 56(4). Pp. 453-462. DOI: <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601834>.
5. Akbari A. A., Karimi B. A new robust optimization approach for integrated multiechelon, multi-product, multi-period supply chain network design under process uncertainty. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 79(1). Pp. 229-244. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6796-9>.
6. Bidhandi H. M., Yusuff R. M. Integrated supply chain planning under uncertainty using an improved stochastic approach. *Applied Mathematical Modelling*. 2011. Vol. 35(6). Pp. 2618-2630. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.11.042>.

7. Eco-driving in railway lines considering the uncertainty associated with climatological conditions / Blanco-Castillo M., Fernández A., Fernández A., Cucala A. P. *Sustainability*. 2022. Vol. 14(14). Pp. 1-26. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14148645>.
8. Gao Y., Yang L., Li S. Uncertain Models on Railway Transportation Planning Problem. *Applied Mathematical Modelling*. 2015. Vol. 40. Iss. 7-8. Pp. 4921-4934. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.12.016>.
9. Haehn R., Abraham E., Nießen N. Probabilistic Simulation of a Railway Timetable. *20th Symposium on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems ATMOS 2020* : Pisa, Italy, 7-8 September 2020. Vol. 85. Pp. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.4230/OA-SIcs.ATMOS.2020.16>.
10. Corman F., Kocman P. Stochastic prediction of train delays in real-time using Bayesian networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2018. Vol. 95. Pp. 599-615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.07.013>.
11. Гайсинський О. Є. Математична модель дослідження динаміки руху вагонів на сортувальній станції. *Наукові праці Державного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2015. Вип. 165. С. 73-78.
12. Li H., Jin M., He S. Sequencing and scheduling in railway classification yards. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2015. № 2475. С. 72-80. DOI: <https://doi.org/10.3141/2475-09>.
13. Козаченко Д. М., Вернигора Р. В., Горбова О. В. Методи збору даних про функціонування залізничних станцій. *Транспортні системи та технології перевезень* : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Дніпропетровськ. 2014. Вип. 8. С. 58-64. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2014/38087>.
14. Музикіна С. І., Музикін М. І., Нестеренко Г. І. Дослідження пропускної спроможності сортувальної станції. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2016. Вип. 2. С. 47-60. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/67289>.
15. Музикіна Г. І., Болвановська Т. В., Жорова Є. М. Вплив параметрів накопичення вагонів на їх простій на сортувальній станції. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна*. 2008. Вип. 20. С. 198-201.
16. Butko T., Prokhorov V., Chekhunov D. Devising a method for the automated calculation of train formation plan by employing genetic algorithms. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2017. Vol. 85. No. 3. Pt. 1. Pp. 55-61. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.93276>.

References:

1. P.V. Bekh, H.I. Nesterenko, O.H. Strelko, and M.I. Muzykin, «Upravlinnia vantazhny my perevezenniamy v umovakh ryzykiv konkurentnoho seredovyscha» [«Freight management in the conditions of risks of the competitive environment»], *Systemy ta tekhnolohii – Systems and Technologies*, № 1 (61), pp. 85-97, 2021. doi: **10.32836/2521-6643-2021-1-61.7**. (Ukr.)
2. S. Zhan, J. Xie, S.C. Wong, Y. Zhu, and F. Corman, «Handling uncertainty in train timetable re-scheduling: A review of the literature and future research directions», *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 183, pp. 1-24, 2024. doi: **10.1016/j.tre.2024.103429**.
3. K. Govindan, M. Fattahi, and E. Keyvanshokoo, «Supply chain network design under uncertainty: a comprehensive review and future research directions», *European Journal of Operational Research*, vol. 263(1), pp. 108-141, 2017. doi: **10.1016/j.ejor.2017.04.009**.
4. E. Aghezaf, «Capacity planning and warehouse location in supply chains with uncertain demands», *Journal of the Operational Research Society*, vol. 56(4), pp. 453-462, 2005. doi: **10.1057/palgrave.jors.2601834**.
5. A.A. Akbari, and B. Karimi, «A new robust optimization approach for integrated multiechelon, multi-product, multi-period supply chain network design under process uncertainty», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 79(1), pp. 229-244, 2015. doi: **10.1007/s00170-015-6796-9**.
6. H.M. Bidhandi, and R.M. Yusuff, «Integrated supply chain planning under uncertainty using an improved stochastic approach», *Applied Mathematical Modelling*, vol. 35(6), pp. 2618-2630, 2011. doi: **10.1016/j.apm.2010.11.042**.

7. M. Blanco-Castillo, A. Fernández, A. Fernández, and A.P. Cucala, «Eco-driving in railway lines considering the uncertainty associated with climatological conditions», *Sustainability*, vol. 14(14), pp. 1-26, 2022. doi: [10.3390/su14148645](https://doi.org/10.3390/su14148645).
8. Y. Gao, L. Yang, and S. Li, «Uncertain Models on Railway Transportation Planning Problem», *Applied Mathematical Modelling*, vol. 40, iss. 7-8, pp. 4921-4934, 2015. doi: [10.1016/j.apm.2015.12.016](https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.12.016).
9. R. Haehn, E. Abraham, and N. Nießen, «Probabilistic Simulation of a Railway Timetable», in *20th Symposium on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems ATMOS 2020*, Pisa, Italy, 2020, vol. 85, pp. 1-14. doi: [10.4230/OASIS.ATMOS.2020.16](https://doi.org/10.4230/OASIS.ATMOS.2020.16).
10. F. Corman, and P. Kecman, «Stochastic prediction of train delays in real-time using Bayesian networks», *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 95, pp. 599-615, 2018. doi: [10.1016/j.trc.2018.07.013](https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.07.013).
11. O.Ye. Haisynskyi, «Matematychna model doslidzhennia dynamiky rukhu vahoniv na sortuvalnii stantsii» [«Mathematical model of the study of the dynamics of the movement of wagons at the sorting station»], *Naukovi pratsi Derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana – Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, vol. 165, pp. 73-78, 2015. (Ukr.)
12. H. Li, M. Jin, and S. He, «Sequencing and Scheduling in Railway Classification Yards», *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, № 2475, pp. 72-80, 2015. doi: [10.3141/2475-09](https://doi.org/10.3141/2475-09).
13. D.M. Kozachenko, R.V. Vernyhora, and O.V. Horbova, «Metody zboru danykh pro funktsionuvannia zaliznychnykh stantsii» [«Methods of data collection on the functioning of the railway stations»], *Transportni systemy ta tekhnolohii perevezen – Transport systems and transportation technologies*, vol. 8, pp. 58-64, 2014. doi: [10.15802/tstt2014/38087](https://doi.org/10.15802/tstt2014/38087).
14. S.I. Muzykina, M.I. Muzykin, and H.I. Nesterenko, «Doslidzhennia propusknoi spromozhnosti sortuvalnoi stantsii» [«Study of working capacity of the marshalling yard»], *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, vol. 2, pp. 47-60, 2016. doi: [10.15802/stp2016/67289](https://doi.org/10.15802/stp2016/67289).
15. H.I. Muzykina, T.V. Bolvanovska, and Ye.M. Zhorova, «Vplyv parametriv nakopychennia vahoniv na yikh prostii na sortuvalnii stantsii» [«The influence of the parameters of the accumulation of wagons on their ease at the sorting station»], *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu im. aka-demika V. Lazariana – Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, vol. 20, pp. 198-201, 2008.
16. T. Butko, V. Prokhorov, and D. Chekhunov, «Devising a method for the automated calculation of train formation plan by employing genetic algorithms», *Eastern-European journal of enterprise technologies*, vol. 85, no. 3, pt. 1, pp. 55-61, 2017. doi: [10.15587/1729-4061.2017.93276](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.93276).

Стаття надійшла 08.02.2024

Стаття прийнята 13.03.2024

UDC 629:123.066

doi: [10.31498/2225-6733.48.2024.310713](https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310713)

© Yanenko A.*

INTELLIGENT SYSTEM FOR MONITORING THE OPERATIONAL PROPERTIES OF SHIP POWER EQUIPMENT

The peculiarity of monitoring the technical condition of ship vehicles is that during the service life the main energetic installation is not changed, but its continuous maintenance and periodic repairs are carried out. In the organization of such activities, the leading role

* postgraduate student, Kherson State Maritime Academy, Kherson-Odesa, ORCID: 0009-0004-7992-8369, yanenko9494@gmail.com