

ГАЙДУК Д. А., аспірант

(Український державний університет залізничного транспорту)



Формування моделі функціонування залізничної транспортної мережі в умовах виникнення відмов і недоступності маршруту

Анотація. Незважаючи на відносно стабільні показники виконання графіка руху поїздів в умовах воєнного стану, тривала війна підвищує ризик впливу людського фактора на організацію перевізного процесу через постійний стрес та емоційні навантаження. Тому розвиток наявних і впровадження нових автоматизованих систем для працівників оперативно-диспетчерської ланки є одним із пріоритетних напрямів досліджень. Завдяки автоматизованим системам зменшується ризик введення помилкових даних через реалізацію контролю коректності інформації, що вносить працівник. Подальша обробка інформації дає змогу використовувати її для формування звітів, аналізів, прогнозів тощо, які є необхідними для ухвалення відповідних управлінських рішень. У статті сформовано модель функціонування залізничної мережі в умовах виникнення відмов і недоступності маршруту прямування поїзда на дільниці. Критерієм вибору оптимального альтернативного маршруту є мінімальний час руху поїзда по дільниці серед множини можливих маршрутів з урахуванням визначеної системи обмежень, поданої у вигляді технічних і технологічних параметрів поїздів та інфраструктури. Топологія дільниці перевезень подана у вигляді теорії графів, а можливість проїзду визначена перевіркою виконання логічних умов, що базовані на параметрах, які характеризують станції, перегони та поїзди. Сформовану модель запропоновано реалізувати як підсистему у складі автоматизованої системи керування перевезеннями АСК ВП УЗ Є у вигляді системи підтримки ухвалення рішень на АРМ працівників оперативно-диспетчерської групи. Це сприятиме зменшенню впливу людського фактора для організації перевезень залізничним транспортом з виникненням відхилень у русі поїздів від нормативного графіка руху, а також підвищенню конкурентоспроможності, надійності та якості надання послуг порівняно з іншими видами транспорту.

Ключові слова: залізничні перевезення, альтернативний маршрут, оптимізаційна математична модель, виконання графіка руху поїздів.

Вступ.

В умовах тривалої повномасштабної війни проти України, коли активні бойові дії охоплюють значну територію нашої держави, для процесу перевезень залізничним транспортом як ніколи характерні невизначеність і ризики. У таких умовах особливо важливим фактором є психоемоційний стан працівників, задіяних у перевізному процесі, особливо оперативно-диспетчерської ланки. Постійний стрес, втома, емоційне навантаження тощо підвищують ризик впливу людського фактора на організацію перевізного процесу, що може призвести до значних економічних наслідків. У зв'язку з цим удосконалення існуючих і створення нових автоматизованих систем керування у вигляді системи підтримки ухвалення рішень є актуальним. Впровадження таких систем сприятиме підвищенню надійності функціонування та конкурентоспроможності залізничного транспорту, зменшивши вплив людського фактора на ухвалення рішень.

Постановка проблеми.

Підвищення надійності функціонування та операційної ефективності залізничної транспортної системи в умовах невизначеності та ризиків.

Аналіз досліджень і публікацій.

У статті [1] розглянуто застосування поняття «живучості» відносно транспортної системи як здатність системи зберігати і відновлювати свою функціональність внаслідок впливу деструктивних процесів. За допомогою визначення значення коефіцієнта живучості системи можна визначити вразливість системи та її здатність до відновлення. Роботу авторів [2] присвячено проблемі побудови надійних маршрутів для здійснення інтермодальних перевезень залізницею та автотранспортом в умовах невизначеності. Запропонована оптимізаційна модель спрямована на забезпечення оптимального маршруту через ділянки автомобільних доріг і залізничних сполучень зі зниженням їхньої пропускної спроможності, а також порушення роботи вузлів і терміналів. У роботі [3] на прикладі високошвидкісної залізниці запропоновано модель оптимізації розкладу руху поїздів через пошук оптимального рішення з мінімальною затримкою поїздів і середнім корегуванням графіка руху за технічних і технологічних обмежень. Запропонований метод дає змогу оптимально використовувати вільний у графіку руху від поїздів час та уникати скасування поїздів.

Мета дослідження.

Формування нової підсистеми АСК ВП УЗ-Є у вигляді системи підтримки ухвалення рішень задля забезпечення живучості залізничної транспортної системи в умовах впливу деструктивних факторів і підтримки якості та надійності її функціонування.

Викладення основного матеріалу дослідження.

На основі попередніх досліджень [4] було встановлено, що показник виконання графіка руху для пасажирських і вантажних поїздів складає 90 та 35 % відповідно. Це свідчить про відносну стабільність організації перевізного процесу в умовах воєнного стану. З відправлення виконання графіка для пасажирських поїздів складає 97 %, а для вантажних – 61 %. До факторів, що можуть вплинути на своєчасне відправлення поїзда зі станції, можна віднести:

- несвоєчасність або порушення порядку і тривалості виконання технічних і технологічних операцій із вагонами або складами поїздів (операції з навантаження або вивантаження вантажів, їх кріплення на рухомому складі, очищення вагона від залишків вантажів; огляд вагонів і складів поїздів у комерційному і технічному відношенні; несвоєчасність оформлення перевізних документів; порушення плану формування поїздів через несвоєчасність прибуття поїзда з проміжної станції, забирання з під'їзної колії, виставлення поїзда на відправну колію);

- виявлення та усунення технічних або комерційних несправностей під час огляду состава; технічна несправність тягового рухомого складу (локомотива, моторвагонного рухомого складу);

- порушення нормальної роботи технічних пристроїв автоматики, телемеханіки, зв'язку, контактної мережі;

- відмова в роботі інформаційних систем, як наслідок впливу на своєчасність автоматизованого формування перевізних документів;

- затримки, пов'язані із виникненням транспортних подій і надзвичайних ситуацій або ліквідацією їхніх наслідків; сторонні втручання в діяльність залізничного транспорту.

Щодо показника прибуття на станцію призначення, то 91 % пасажирських і 49 % вантажних поїздів прибувають за графіком. Причинами несвоєчасного прибуття на кінцеву станцію можуть бути:

- технічна несправність рухомого складу на шляху прямування;

- недотримання перегінного часу, закладеного графіком руху поїздів (обмеження швидкості руху на дільниці, запобігання наїзду);

- вихід із ладу технічних пристроїв на перегоні (відсутність напруги контактної мережі, несправність блокування);

- порушення виконання технологічних операцій (зайнятість колії приймання поїзда іншим

поїздом, ворожість маршрутів, відправлення неперіоритетного поїзда);

- вплив затримки поїзда для відправлення зі станції формування.

Перелік причин не є вичерпним, і, узагальнюючи, можна лише підкреслити різноманітність факторів, які мають вплив на рух поїзда за графіком. Ризик виникнення причин обумовлений від моменту підготовки состава поїзда до перевезень і до прибуття на станцію призначення. Джерелом можуть бути як відхилення з технічних причин, так і вплив людського фактора. Відхилення від графіка руху поїздів для підприємства спричиняє не лише операційні та репутаційні ризики, але й фінансові. З метою їх мінімізації виникає необхідність побудови оптимального варіанта пропускання поїздів на дільниці.

Побудова моделі потребує отримання значної кількості інформації, яка буде виступати вихідними даними. Першоджерелом інформації на полігоні перевезень може бути інформація, яка вже внесена до єдиної автоматизованої системи керування перевезеннями АСК ВП УЗ-Є за допомогою профільних автоматизованих робочих місць (АРМ) працівників підрозділів залізниць. Наприклад, завдяки АРМ товарного касира (або агента комерційного) сформована інформація про вантаж, завантажений у вагон, а в АРМ СТ Д здійснюється формування складів поїздів, вносять інформацію про здійснення технологічних операцій із поїздами, приймання-здавання змін локомотивних бригад, рух поїздів тощо. АСУ ЕРПВ відображає інформацію про стан вагонного парку, а через АРМ АС ВВП вносять інформацію про наявність попереджень на дільниці, що потребує особливої пильності під час руху. Уся інформація від систем у подальшому зводиться до АСК ВП УЗ-Є.

Вторинним джерелом інформації на полігоні може бути система «Надзвичайна ситуація» (АС «НС»). На підставі інформації, що внесена в систему, можна визначити обмеження в русі поїздів за визначеним напрямком залізничних перевезень.

На підставі інформації з цих джерел необхідно визначити параметри, що будуть впливати на розв'язання задачі і характеризувати станції, перегони та поїзди на полігоні.

Інформацію про поїзди, що знаходяться в межах полігону, подамо як множину T_i з визначеними параметрами

$$T_i = (N_i, R_i, E_i, TS_i, L_i, V_{\max_i}), \quad (1)$$

де N_i – номер поїзда;

R_i – пріоритет поїзда, $R \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$, де 1 –

швидкісний або позачерговий, 2 – пасажирський, 3 – приміський, 4 – вантажний, 5 – інший (дрезини, локомотиви тощо);

E_i – род струму тягового рухомого складу,

$E \in \{0,1,2,3\}$, де 0 – відсутній, 1 – постійний, 2 – змінний, 3 – змішаний;

TS_i – технічний стан поїзда, $TS_i \in \{0,1,2\}$, де

0 – справний; 1 – несправний, рух можливий з обмеженнями; 2 – несправний, рух неможливий;

$V_{\max i}$ – максимально допустима швидкість руху

поїзда, км/год;

L_i – довжина поїзда, м.

Наведені параметри характеризують кожен поїзд:

– за номером поїзда визначають його належність до категорії (пасажирський, вантажний тощо) і пріоритет пропускання;

– род струму дає змогу визначити можливість руху електропоїзда по дільниці;

– технічний стан поїзда впливає на швидкість руху поїзда (у разі виникнення несправності поїзд рухається зі зменшеною швидкістю) і можливість продовжувати рух;

– довжина поїзда є визначальною для вибору колії приймання поїзда на станцію.

Полігон залізничних перевезень доцільно подати як граф. Уявимо абстрагований напрямок між станціями S_1 та S_7 , як показано на рисунку.

Перегони між станціями двоколіїні, окрім перегону S_5 та S_6 , який є одноколіїним.

$a_{ij} = 1$, якщо зв'язок вершини S_i з

вершиною S_j існує,

$a_{ij} = 0$, якщо зв'язку не існує.

Матриця суміжності графу G наведена в таблиці.

Матриця суміжності A графа G

	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7
S_1	0	1	0	0	0	0	0
S_2	1	0	1	0	0	0	0
S_3	0	1	0	1	0	0	0
S_4	0	0	1	0	1	0	0
S_5	0	0	0	1	0	1	0
S_6	0	0	0	0	1	0	1
S_7	0	0	0	0	0	1	0

Перегін подано як кортеж

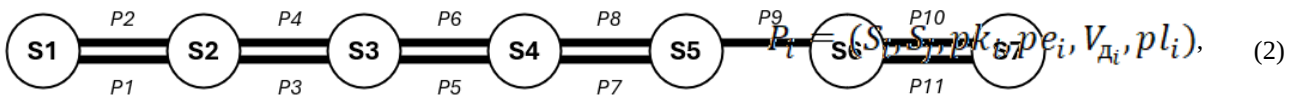


Рис. 1. Граф напрямку залізничних перевезень $S_1 - S_7$

S_7

Топологія напрямку подана як граф $G = (S, P)$, де S – множина вершин (станцій), P – множина ребер (перегонів).

Наявність зв'язку вершин графів визначена матрицею суміжності $A = [a_{ij}]$, де

де S_i – номер початкової вершини (станції);

S_j – номер кінцевої вершини (станції);

pk_i – кількість колій перегону, $pk_i \in \mathbb{N}$;

pe_i – наявність електрифікації;

V_{di} – дільнична швидкість, км/год;

pl_i – довжина перегону, км.

Множина перегонів P_i сформована на основі

матриці суміжності A за умови, коли $a_{ij} = 1$.

Параметр $pk_i \in \mathbb{N}$ описує кількість колій на перегоні та є основним для визначення можливості проїзду. Якщо кількість колій $pk_i > 1$, то виникає необхідність перевірки стану кожної з них. Нехай множина колій перегону визначена як $pm_n = \{pk_{i_n}\}, n = \overline{1, pk_i}$, тоді вільність колії визначена як бінарна змінна $pz_{pm} \in \{0, 1\}$, де

0 – колія перегону вільна, 1 – колія зайнята.

Зазвичай із автоблокуванням кожен перегін поділений на блок-ділянки, що допускає знаходження на перегоні декількох поїздів. Тому зайнятість перегону буде визначена виходячи з таких умов:

- чи відбулося руйнування колії перегону, що унеможливило рух поїзда;
- чи на колії перегону зупинився поїзд, який не може продовжувати подальший рух через несправність, або сталося сходження рухомого складу;
- чи закрита колія перегону для проведення технологічного вікна.

Тобто основним фактором для визначення вільності перегону є можливість поїзда продовжувати подальший рух. Інакше перегін вважають зайнятим, і рух може бути здійснений лише іншою вільною колією (за наявності).

Множину станцій подано як $S_i = (sk_i)$, де

sk_i – кількість приймально-відправних колій станції, $sk_i \in \mathbb{N}$.

Для спрощення в цьому випадку не враховано повний колійний розвиток станцій, а лише кількість приймально-відправних колій, які передбачають можливість наскрізного пропускання поїздів. При цьому визначення доступності станції є досить складним, оскільки для кожної станційної колії sk_i

необхідно перевіряти одразу декілька умов: вільність, електрифікацію, довжину, стан відмов пристроїв.

Вільність кожної колії $sm_n = \{sk_{i_n}\}, n = \overline{1, sk_i}$ визначають як

бінарну змінну $sz_{sm} \in \{0, 1\}$, де 0 – колія вільна, 1 – колія зайнята. Наявність електрифікації колії для множини sm_n визначають як значення змінної

$se_{sm} \in \{0, 1, 2\}$, де 0 – електрифікація відсутня, 1

– постійний струм, 2 – змінний струм. Довжину колії $sl_{sm} \in \mathbb{N}$ визначають у метрах. На швидкість проходження поїзда по станційній колії впливає стан відмов технічних пристроїв $sv_m \in \{0, 1\}$, де 0 – працюють, 1 – несправні.

Якщо на дільниці може рухатися електровоз змішаного струму ($E_i = 3$), який може прямувати на електрифікованих лініях як постійного, так і змінного струму, тоді необхідно прийняти

$$E_i = 3 \Rightarrow pe_i \in \{1, 2\} \wedge se_{sm} \in \{1, 2\} \quad (3)$$

Прибуття поїзда на станцію є можливим, якщо хоча б одна колія станції вільна, електрифікація відповідає типу тягової одиниці, довжина колії більша довжини поїзда, тобто для опису цього процесу доцільно використати елементи теорії логіки:

$$\exists sm_n \in S_i, sz_{sm} = 0 \wedge se_{sm} = E_i \wedge sl_{sm} > L_i. \quad (4)$$

Проїзд правильною колією перегону можливий, якщо хоча б одна колія вільна, а електрифікація відповідає роду струму тягової одиниці:

$$\exists pm_n \in P_i, pz_{pm} = 0 \wedge pe_i = E_i \quad (5)$$

Для визначення можливості проїзду неправильною колією перегону додатково перевіряють можливість проїзду на наступному за напрямком руху перегоні (де $\pm$ залежно від напрямку

руху, «+» якщо від S_i до S_{i+1} , «-» якщо від S_i до S_{i-1}), а також можливість приймання на колії наступної станції:

$$\begin{aligned} & (\exists pm_n \in P_i, pz_{pm} = 0 \wedge pe_i = E_i) \wedge (\exists pm_n \in P_{i\pm 1}, pz_{pm} = 0 \wedge pe_i = E_i) \\ & \wedge (\exists sm_n \in S_{i\pm 1}, sz_{sm} = 0 \wedge se_{sm} = E_i \wedge sl_{sm} > L_i). \end{aligned} \quad (6)$$

Нехай маршрут прямування поїзда визначено як впорядковану послідовність вершин і ребер графа згідно з положеннями теорії графів, тоді подамо його як

$$M_N = (S_n P_n, S_{n\pm 1} P_{n\pm 1}, \dots, P_{n\pm k}, S_{n\pm k}), M_N^{\text{норм}} \in M_N, \quad (7)$$

де S_n, P_n – порядковий номер станції та перегону початку маршруту;

P_{n+k}, S_{n+k} – порядковий номер станції та перегону кінця маршруту залежно від напрямку руху;

$M_N^{\text{норм}}$ – встановлений графіком руху поїздів маршрут поїзда;

k – кількість станцій і перегонів у маршруті.

Якщо після перевірки виконання умов (4)-(6) рух поїзда встановленим маршрутом неможливий, тоді визначають альтернативний маршрут серед множини можливих.

Нормативну тривалість виконання технологічних операцій із поїздом на станції за маршрутом визначають за формулою

$$MtS_N = \sum_i^k t_{s_i}, \text{ хв} \quad (8)$$

де t_{s_i} – тривалість операцій із поїздом на станції i , хв.

Під технологічними операціями з поїздом на станції слід розуміти загальну тривалість знаходження поїзда на i -й станції: від моменту прибуття з урахуванням простою для посадки та висадки пасажирів, зміни локомотива або локомотивної бригади, причеплення та відчеплення групи вагонів, огляду в комерційному і технічному відношенні тощо і до відправлення зі станції.

Фактична тривалість операцій на станції з прямуюванням альтернативним маршрутом відрізняється від нормативної як різниця часу на їх виконання

$$\Delta MtS = MtS_N^{\text{факт}} - MtS_N^{\text{норм}}, \text{ хв} \quad (9)$$

Аналогічно тривалість прямуювання поїзда перегонами за маршрутом і альтернативним маршрутом по перегону та різницю між фактичним і нормативним часом визначають за формулами

$$MtP_N = \sum_i^k t_{p_i}, \text{ хв}, \quad (10)$$

$$\Delta MtP = MtP_N^{\text{факт}} - MtP_N^{\text{норм}}, \text{ хв} \quad (11)$$

де t_{p_i} – тривалість прямуювання поїзда по перегону i , хв.

Загальний час руху поїзда по дільниці графіковим маршрутом визначають як

$$Mt_N = MtS + MtP, \text{ хв}, \quad (12)$$

тоді різницю часу руху альтернативним маршрутом порівняно з графіком визначають за формулою

$$\Delta Mt_N = \Delta MtS + \Delta MtP, \text{ хв}. \quad (13)$$

За критерій вибору оптимального альтернативного маршруту на множині можливих приймають із відповідною системою обмежень

$$\Delta Mt_N (\forall M_N) \rightarrow \min$$

$$\begin{cases} V_{\text{макс}} > V_d \\ N \leq N_{\text{наявн}} \\ G \leq G_{\text{макс}} \end{cases}, \quad (14)$$

де $\forall M_N$ – множина всіх можливих маршрутів;

N – пропускна спроможність дільниці;

G – вага поїзда, т.

Висновки.

Для підвищення надійності та забезпечення якості функціонування залізничної транспортної системи в умовах невизначеності, спричиненими впливом внутрішніх і зовнішніх факторів, у роботі сформовано оптимізаційну модель вибору оптимального альтернативного маршруту за критерієм мінімальної різниці часу руху поїзда по дільниці порівняно з графіковим маршрутом. Необхідність пошуку альтернативного маршруту руху поїзда обумовлена виникненням як позаштатних ситуацій (руйнування колії, зупинка поїзда на перегоні через несправність рухомого складу та ін.) так і планових робіт (технологічні вікна тощо), які унеможливають подальший рух поїзда встановленим маршрутом. При цьому можливість проходження поїздом кожної ділянки маршруту перевіряють за сукупністю логічних умов, які базовані на характеристиках станцій, перегонів і поїздів. Система обмежень ураховує технічні і

технологічні характеристики поїздів та інфраструктури. Інтеграція запропонованого рішення до системи АСК ВП УЗ Є у вигляді системи підтримки ухвалення рішень дає змогу працівникам оперативно-диспетчерської групи краще планувати рух поїздів по дільниці в разі виникнення відхилень від графіка руху.

Список використаних джерел

1. Красноштан О. М. Живучість транспортної системи та способи її підвищення. *Автомобіліст України*. 2023. С. 42–47. URL: <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2023-2-274-42-47>.
2. Uddin M., Huynh N. Reliable Routing of Road-Rail Intermodal Freight under Uncertainty. *Networks and Spatial Economics*. 2019. Т. 19, № 3. С. 929–952. URL: <https://doi.org/10.1007/s11067-018-9438-6>.
3. Propagation-Based Train Rescheduling under Recoverable Delay Disturbances / J. Zhang та ін. *Journal of Advanced Transportation*. 2024. Т. 2024. С. 1–25. URL: <https://doi.org/10.1155/2024/9961840>.
4. Гайдук Д. А., Бутько Т. В. Аналіз впливу воєнного стану на виконання графіку руху поїздів. *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустриальні центри та корпоративна логістика: матеріали XX Міжнар. наук.-практ. конф. (6-7 червня 2024 р. м. Харків)*. Харків: УкрДУЗТ, 2024. С. 49-50.

Гайдук Дмитро Андрійович, аспірант кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: d.haiduk@ukr.net. ID ORCID 0000-0002-7816-2216.

Haiduk D. A. Development of a Model for the Functioning of the Railway Transport Network under Route Failures and Unavailability Conditions

Abstract. Despite the relatively stable indicators of train schedule performance under martial law conditions, the ongoing war increases the risk of human factor influence on the organization of the transportation process due to continuous stress and emotional strain. Therefore, the development of existing and the implementation of new automated systems for operational and dispatch personnel is one of the priority areas of research. Automated systems reduce the risk of erroneous data entry by implementing input validation and correctness control mechanisms. Further processing of this information enables its use in generating reports, analyses, forecasts, and other outputs necessary for informed managerial decision-making.

This study presents a model of the railway

network's functioning under conditions of failures and unavailability route within a given section. The criterion for selecting the optimal alternative route is the minimum train travel time within the section, chosen from a set of possible routes, taking into account a defined system of constraints represented by the technical and technological parameters of trains and infrastructure. The topology of the transportation section is modeled using graph theory, while route feasibility is determined by verifying logical conditions based on parameters that characterize stations, track sections, and trains.

It is proposed to implement the formed model as a subsystem within the Automated Transportation Control System (ASK VP UZ E), functioning as a decision support system on the workstations of operational-dispatch personnel. This will help reduce the impact of the human factor in railway transportation management during disruptions to the scheduled train movements and will improve the competitiveness, reliability, and quality of rail transport services compared to other modes of transportation.

Keywords: railway transportation, alternative route, optimization mathematical model, train schedule performance.

Haiduk Dmytro Andriyovych, PhD student, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: d.haiduk@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-7816-2216>.