

УДК 656.2

ПАРХОМЕНКО Л. О., к.т.н.,

ПРОХОРОВ В. М., к.т.н.,

КАЛАШНІКОВА Т. Ю., к.т.н.

(Український державний університет залізничного транспорту)

Удосконалення технології управління місцевою роботою дільниці в умовах невизначеності на основі робастної оптимізації

У статті розглянуто удосконалення технології управління місцевою роботою залізничних дільниць в умовах невизначеності, що важливо для підвищення ефективності вантажних перевезень. Сучасні методи планування часто базовані на середньодобових даних і не враховують коливань, отже, ефективність управління місцевою роботою може суттєво знижуватися через недостатнє врахування динаміки перевезень. Метою статті є розроблення нової методики планування роботи збірних поїздів з урахуванням невизначеностей, що дасть змогу підвищити точність і надійність планування. Для цього пропонують використовувати робастну оптимізацію, яка забезпечує стійкість рішень до змінюваних умов шляхом застосування принципу мінімаксу. Цей підхід дає змогу створювати надійні плани, які ефективно функціонують навіть у разі значних відхилень від очікуваних умов.

У статті проаналізовано результати моделювання, що було проведено за допомогою розробленої процедури оптимізації з застосуванням математичного апарата генетичних алгоритмів, реалізовану в середовищі MATLAB. Моделювання підтвердило ефективність запропонованого підходу.

Водночас результати дослідження показують, що для досягнення ще більших результатів доцільно враховувати статистичні дані про коливання обсягів місцевої роботи на станціях. Для цього пропонують інтегрувати стохастичну складову в модель робастної оптимізації, яка дає змогу краще враховувати варіації в обсягах перевезень і забезпечує більш точні рішення. Це може суттєво покращити ефективність планування, зменшити витрати і підвищити загальну ефективність управління залізничними перевезеннями.

Отже, запропоновані методи відкривають нові можливості для вдосконалення технологій управління місцевою роботою на залізниці, забезпечуючи більш надійні та економічні рішення в умовах невизначеності.

Ключові слова: місцева робота, невизначеність, планування роботи збірних поїздів, робастна оптимізація.

Постановка проблеми

Місцева робота на залізничних дільницях здійснюється за допомогою так званих збірних поїздів, які виконують операції з місцевими вагонами. Планування роботи збірних поїздів зазвичай базовано на передбачуваних, постійних об'ємах навантаження і вивантаження вагонів на дільниці. Проте в реальних умовах ці об'єми можуть суттєво коливатися в межах певних допустимих значень, і можливі комбінації цих змінних – надзвичайно різноманітні.

Такі коливання можуть призвести до того, що попередньо прийнятий план роботи збірних поїздів виявиться неефективним. Традиційні методи планування, що не враховують цю невизначеність, можуть призвести до нерационального використання ресурсів, затримок у перевезеннях, додаткових витрат вагоногодина, несвоєчасного доставлення порожніх вагонів до місць навантаження і, як наслідок, підвищення експлуатаційних витрат.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Стаття [1] досліджує планування вантажних перевезень на залізниці в умовах змішаної невизначеності, поєднуючи нечіткість і випадковість. Інноваційний аспект полягає в розробленні трьох моделей програмування з шансом, які враховують ці два види невизначеності для оптимізації маршрутів, обсягів вантажів і частоти перевезень. Математичний апарат включає міру шансу та критичні значення нечітко-випадкових змінних, а для розв'язання моделей застосовують гібридний алгоритм, що поєднує пошук потенційних маршрутів, симуляцію та генетичний алгоритм.

Стаття [2] розглядає проектування логістичного ланцюга холодного залізничного транспорту, використовуючи змішане цілочисельно-нелінійне програмування (MINLP) для оптимізації хабів, вантажних потоків і частоти обслуговування.

© ПАРХОМЕНКО Л. О., ПРОХОРОВ В. М., КАЛАШНІКОВА Т. Ю. 2024

Невизначеності враховують через нечітке програмування. Результати показують до 1,99 % економії витрат при збільшенні хабів і до 2,69 % зниження витрат для економічно орієнтованих рішень порівняно з детермінованим підходом. Основний недолік – складність обробки нечітких даних.

Стаття [3] розглядає тактичне планування операцій, яке включає ухвалення ряду взаємопов'язаних рішень для оптимального розподілу ресурсів і досягнення економічних і сервісних цілей компанії. Основну увагу приділяють проектуванню мережі обслуговування для міжміських вантажних перевізників, таких як залізниці та автоперевізники. Введено нову класифікацію проблем проектування мережі обслуговування та формулювання моделей. Новизна полягає в поданні нової класифікації проблем і розвитку математичного програмування для проектування мереж. Основний недолік – складність розв'язання моделей, особливо для складних випадків. Недоліком є й висока обчислювальна складність підходу та можливі проблеми з ефективністю за екстремальних варіацій невизначеності.

Стаття [4] розглядає транспортну задачу з чотирма вимірами для сумісних і несумісних варіантів плану, де параметри подано у вигляді нечітких змінних другого типу. Запропонована модель орієнтована на мінімізацію транспортних витрат при врахуванні доступності, попиту, ваги та обсягу транспортних засобів. Нечіткі параметри типу 2 спочатку перетворюються в нечіткі параметри типу 1, а потім у випадкові параметри за допомогою методів узагальненої достовірності та центроїда. Ці параметри конвертовані в чіткі параметри для обмежень і цільової функції.

Новизна полягає в детальному описі процедур перетворення нечітких параметрів типу 2 у чіткі та застосуванні кількох методів для цього перетворення. Основний недолік – обчислювальна складність процесу перетворення і розв'язання моделі.

Стаття [5] пропонує метод урахування мінливості параметрів, які є вихідними даними для розрахунку плану формування одноступінних вантажних поїздів для підвищення його надійності. Впроваджено використання нечітких множин для врахування коливань у параметрах організації вагонопотоків. Розроблено метод визначення оптимального порогового значення руху вагонів в умовах невизначеності за допомогою технік Беллмана і Заде. Новизна полягає в застосуванні нечітких множин для підвищення стабільності плану формування поїздів і зменшення кількості корегувань. Основний недолік – можлива складність реалізації методів нечітких множин і їхня обчислювальна складність.

Стаття [6] пропонує нову модель формування вантажних поїздів на залізничному транспорті з урахуванням нечітких витрат на перевезення. Модель використовує метод нечітких найкоротших шляхів для визначення оптимальних маршрутів, а потім

перетворює нечітку модель у класичну модель блокування. Для вирішення великих реальних проблем розроблено метод на основі генетичних алгоритмів.

Новизна полягає у використанні нечітких витрат для моделювання блокування вагонів і застосуванні генетичних алгоритмів для покращення ефективності розв'язання. Основний недолік – можливі обчислювальні витрати при застосуванні генетичних алгоритмів на великих задачах.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Аналіз сучасних наукових досліджень показує, що передові математичні методи, як, наприклад, техніки нечіткої оптимізації, переважно застосовують до більш загальних проблем, зокрема охоплюючи галузі логістики та змішаних перевезень, залишаючи питання удосконалення управлінських технологій на рівні місцевої роботи недостатньо розробленими.

Попри значні досягнення в оптимізації технологій залізничного транспорту, питання удосконалення технологій управління місцевою роботою на залізничних дільницях часто залишаються поза увагою. Більшість досліджень у цій сфері зосереджені на загальних методах оптимізації, не враховуючи специфіку і складність проблем місцевої роботи залізничного транспорту.

Це підкреслює важливість подальшого вивчення і адаптації сучасних підходів, зокрема підходів до оперування факторами невизначеності, для підвищення ефективності підсистеми місцевої роботи, що є критично важливим для зниження витрат і підвищення загальної ефективності транспортних систем.

Формулювання цілей

Метою цього дослідження є розроблення підходу до планування роботи збірних поїздів, що дасть змогу враховувати коливання обсягів навантаження та вивантаження вагонів на дільниці і обирати такий варіант плану, який буде найбільш раціональним і надійним за будь-яким варіантом розвитку подій.

Викладення основного матеріалу дослідження

Сучасна організація місцевої роботи на залізничних ділянках стикається з багатьма викликами, пов'язаними з регламентацією та плануванням. Незважаючи на наявність великої кількості нормативно-технологічних документів, таких як план формування поїздів, графік руху місцевих поїздів і оперативне планування поїзної та вантажної діяльності, їхня невідповідність між собою створює значні труднощі в управлінні місцевими вагонопотоками. Ці документи розробляють підрозділи на різні часові горизонти, що призводить

до фрагментації планування та зниження ефективності експлуатаційних процесів.

Реальна ситуація на місцях часто суттєво відрізняється від передбаченої в нормативних актах, де припускають рівномірне середньодобове навантаження. У результаті виникає нерівномірність у роботі, яка проявляється у тривалих перервах між подаванням вагонів на вантажні fronti і їхнім посиленням надходженням на станції вивантаження. Це у свою чергу призводить до зниження ефективності використання навантажувально-розвантажувальних можливостей і збільшення операційних витрат.

Нерівномірність у виконанні вантажних операцій протягом доби є об'єктивною реальністю, яку необхідно враховувати при плануванні місцевої роботи. Проте наявні методи змінно-добового планування не орієнтовані на досягнення максимальних результатів щодо завантаження та розвантаження, що призводить до частих корегувань планів і зниження стійкості роботи всієї системи.

Складність організації місцевої роботи полягає в розпорошеності вантажних операцій на великій кількості станцій, більшість із яких через низьку рентабельність є збитковими. Ефективне управління місцевою роботою потребує більш гнучкого та узгодженого підходу – не лише середньодобові норми, але й реальна динаміка руху вагонів. Планування має бути спрямоване на максимальне використання вантажних фронтів, що можливе лише за умови своєчасного подавання вагонів на станції призначення.

Отже, необхідність розроблення більш стійких і адаптивних методів планування та управління місцевою роботою, здатних враховувати мінливість і невизначеність умов, стає очевидною.

Розглянемо залізничну дільницю, обмежену дільничними станціями А та F, які обслуговують місцеву роботу на проміжних станціях В, С, D і E (рис. 1).

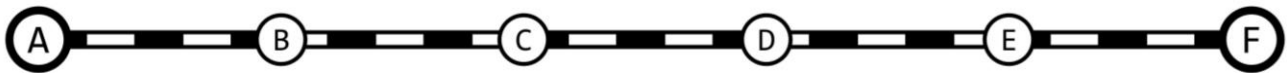


Рис. 1. Схема залізничної дільниці місцевої роботи

Обслуговування місцевої роботи цих станцій здійснюється за допомогою збірних поїздів. У сучасних умовах на станціях мережі АТ «Укрзалізниця» мають місце істотні добові коливання обсягів навантаження і вивантаження на станціях, пов'язаних як із неритмічністю роботи підприємств, так і неефективною організацією місцевої роботи на залізниці. У будь-якому разі такі коливання є неминучими, якщо економіка є не плановою, а ринковою. З іншого боку, система організації місцевої роботи на основі збірних поїздів передбачає, що вибрана схема обслуговування станцій дільниці прив'язана до ниток графіка руху, який на мережі АТ «Укрзалізниця» діє без змін тривалий час і фактично для вантажних поїздів діє протягом усього календарного року. Існують і інші засоби і технології для обслуговування місцевої роботи проміжних станцій не тільки за кордоном, але й на мережі АТ «Укрзалізниця». Однак на Укрзалізниці вони фактично є допоміжними і лише доповнюють технологію, базовану на збірних поїздах. Отже, актуальним завданням є формування методів більш раціонального планування роботи збірних поїздів в умовах коливань обсягів місцевої роботи, тобто в умовах невизначеності. Стандартним підходом у такому випадку скоріше за все є побудова імовірнісних або статистичних моделей на основі історичних даних по кожній станції. Однак він дуже витратний і непродуктивний, адже ці імовірнісні характеристики постійно змінюються. До того ж моделі дискретної оптимізації, які містять значну

кількість стохастичних змінних, дуже важко оптимізувати. Тож у такому випадку доцільно використовувати простіші моделі, наприклад інтервальні числа, які визначають лише верхню і нижню межі змінної, – для побудови надійного плану роботи збірних поїздів застосувати підхід на основі робастної оптимізації.

Робастна оптимізація – це метод, спрямований на пошук рішень, стійких до змін і невизначеностей у вхідних даних [7]. Замість того, щоб шукати оптимальні рішення для фіксованих умов, робастна оптимізація прагне знайти такі рішення, які будуть ефективними навіть при відхиленнях від очікуваних параметрів. У випадку планування роботи збірних поїздів цей метод дає змогу створити план, який залишається надійним за змінних обсягів вантажоперевезень, затримок на станціях та інших невизначеностей. Робастна оптимізація забезпечує збалансованість між ефективністю і надійністю, мінімізуючи потребу в частих корегуваннях плану, що врешті-решт знижує експлуатаційні витрати та підвищує стабільність роботи залізничної системи.

Отже, необхідно сформувати цільову функцію моделі управління, яка реалізує підхід робастної оптимізації. За критерій оптимізації доцільно взяти витрати вагоногодин. Тоді цільова функція може бути записана як

$$\begin{aligned}
 & B\left(x, \mathbf{m}_{неп}^{нав}, \mathbf{m}_{пар}^{нав}, \mathbf{m}_{неп}^{вие}, \mathbf{m}_{пар}^{вие}, \tau_x^{пр.зб}, \tau_{-x}^{пр.зб}, \tau_x^{від.зб}, \tau_{-x}^{від.зб}, \tau_x^{ман}, \tau_{-x}^{ман}\right) = \\
 & \min_x \left\{ \max_{\left(\mathbf{m}_{неп}^{нав}, \mathbf{m}_{пар}^{нав}, \mathbf{m}_{неп}^{вие}, \mathbf{m}_{пар}^{вие}\right)} \left\{ \sum_{i=1}^n \left(m_{i,x}^{вие} + m_{i,x}^{*нест}\right) \left(\tau_{i,x}^{від.зб} - \tau_{i,-x}^{пр.зб}\right) + \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. + \sum_{i=1}^n \left(m_{i,x}^{нав} + m_{i,x}^{*надл}\right) \left(24 - \left(\tau_{i,x}^{пр.зб} - \tau_{i,-x}^{від.зб}\right)\right) + \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. + \sum_{i=1}^n \left(m_{i,x}^{вие} + m_{i,x}^{*нест} + m_{i,x}^{нав} + m_{i,x}^{*надл}\right) \tau_{i,x}^{ман} + \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. + \sum_{i=1}^n \left(m_{i,x}^{вие} + m_{i,x}^{*нест} + m_{i,-x}^{вие} + m_{i,-x}^{*нест}\right) \tau_{i,-x}^{ман} \right\} \right\} \quad (1)
 \end{aligned}$$

де \mathcal{X} – булева керуюча змінна, яка відповідає одній із двох схем прокладання пари збірних поїздів, кожену зі схем будемо ідентифікувати за напрямком першого збірного поїзда, отже, цю булеву змінну можна інтерпретувати так: 0 – парний напрям (і відповідна схема), 1 – непарний напрям;

$\mathbf{m}_{неп}^{нав}, \mathbf{m}_{пар}^{нав}, \mathbf{m}_{неп}^{вие}, \mathbf{m}_{пар}^{вие}$ – змінні вектори (на що й вказує жирний шрифт), які містять поточні значення параметрів місцевої роботи, подані як інтервальні числа, – обсяги навантаження в непарному і парному напрямку і обсяги вивантаження в непарному і парному напрямку по станціях місцевої роботи відповідно, ваг;

$m_{i,x}^{нав}$ – елемент змінного вектора, що відповідає кількості вагонів, навантажених на i -й станції і відправлених у напрямку \mathcal{X} (на відповідну дільничну станцію) або зворотному напрямку, якщо другий індекс – $-\mathcal{X}$;

$m_{i,x}^{вие}$ – елемент змінного вектора, що відповідає кількості вагонів, які прибули до i -ї станції з напрямку \mathcal{X} (відповідної дільничної станції) або у зворотному напрямку, якщо другий індекс – $-\mathcal{X}$;

$m_{i,x}^{*нест}, m_{i,x}^{*надл}$ – кількість порожніх вагонів, які прибудуть до i -ї станції з напрямку \mathcal{X} (або зворотного напрямку, якщо другий індекс – $-\mathcal{X}$) із метою компенсації нестачі порожніх вагонів, які відправляються з i -ї станції в напрямку \mathcal{X} (або зі зворотного напрямку, якщо другий індекс – $-\mathcal{X}$) із метою усунення надлишку на станції, ці змінні позначені зірочкою, тому що вони залежать від змінних моделі, але ця залежність є складною, адже змінні є результатом оптимізації вкладеної оптимізаційної моделі, наприклад лінійного програмування за типом транспортної задачі, мета

якої раціонально розподілити порожні вагони по дільниці;

$\left(\tau_{i,x}^{пр.зб} - \tau_{i,-x}^{від.зб}\right)$ – тривалість часового інтервалу між прибуттям першого збірного поїзда до i -ї станції і відправленням другого;

$\left(\tau_{i,x}^{від.зб} - \tau_{i,-x}^{пр.зб}\right)$ – тривалість часового інтервалу між відправленням першого збірного поїзда з i -ї станції і прибуттям другого;

$\tau_{i,x}^{ман}, \tau_{i,-x}^{ман}$ – тривалість маневрових операцій на i -й станції з першим і другим збірними поїздами відповідно;

n – кількість станцій місцевої роботи (проміжних станцій) на дільниці. Перший доданок цільової функції є сумарними витратами вагоногодин у часових інтервалах між відправленням першого збірного поїзда та прибуттям другого по кожній із проміжних станцій. Другий доданок є сумарними витратами вагоногодин у часових інтервалах між відправленням другого збірного поїзда та прибуттям першого по кожній із проміжних станцій. Третій і четвертий доданки є сумарними витратами вагоногодин під час виконання операцій із першим і другим збірними поїздами відповідно по кожній із проміжних станцій.

Оператори \min і \max у цільовій функції застосовані з метою реалізації принципу мінімаксу – знайти таке рішення, яке мінімізує максимально можливий негативний вплив невизначеності на цільову функцію. Це означає, що замість того, щоб оптимізувати цільову функцію лише для одного можливого сценарію, розглядають усі можливі сценарії, що можуть виникнути внаслідок невизначеності параметрів, тобто знайти рішення, яке є «найкращим серед найгірших» — мінімізувати витрати в найгіршому випадку.

Застосовуючи принцип мінімаксу до задачі побудови надійного плану роботи збірних поїздів, ми прагнемо мінімізувати максимальні можливі збитки або витрати, які можуть виникнути через коливання в параметрах, таких як обсяги перевезень. У звичайній оптимізації ми могли б шукати рішення, яке мінімізує середнє значення витрат або часу. Проте в умовах невизначеності, де параметри можуть варіюватися, мінімакський підхід дає нам змогу знайти таке рішення, яке залишиться оптимальним навіть за найгіршого сценарію.

Крім того, на змінні моделі, як керуючі, так і допоміжні, необхідно накласти обмеження, які мають забезпечити дотримання певних технічних і/або технологічних умов.

Хоча для кожного змінного параметра, як, наприклад, обсяги навантаження по станціях, задано індивідуальні межі коливань, однак межі коливань також можуть бути задані і для агрегованих величин, як, наприклад, сумарне навантаження в непарному напрямку тощо. Такі обмеження для моделі можна записати як

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{нав.пар}^{\Sigma \min} \leq \sum_{i=1}^n m_i^{нав.пар} \leq m_{нав.пар}^{\Sigma \max} \\ m_{нав.неп}^{\Sigma \min} \leq \sum_{i=1}^n m_i^{нав.неп} \leq m_{нав.неп}^{\Sigma \max} \\ m_{вив.пар}^{\Sigma \min} \leq \sum_{i=1}^n m_i^{вив.пар} \leq m_{вив.пар}^{\Sigma \max} \\ m_{вив.неп}^{\Sigma \min} \leq \sum_{i=1}^n m_i^{вив.неп} \leq m_{вив.неп}^{\Sigma \max} \end{array} \right. \quad (2)$$

де $T_i^{ван.оп.}$ – мінімальна тривалість здійснення вантажних операцій (у тому числі подвійних, якщо до станції надходять навантажені вагони) на i -й станції. Крім того, необхідно забезпечити виконання технологічного обмеження щодо максимальної кількості вагонів у складі збірних поїздів, адже

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=y}^{N-2} m_{i,d}^{вув} + \sum_{i=2}^y m_{i-1,d}^{нав} + \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N m_{p,q}^{нор} (p \leq y)(q > y) \leq m^{норм}, \quad \forall y = 1 \dots N-1, d = 1 \\ \sum_{i=3}^y m_{i-2,d}^{вув} + \sum_{i=y}^{N-1} m_{i-1,d}^{нав} + \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N m_{p,q}^{нор} (p \geq y)(q < y) \leq m^{норм}, \quad \forall y = 2 \dots N, d = 0 \end{array} \right. \quad (4)$$

де $m_i^{нав.пар}, m_i^{нав.неп}, m_i^{вив.пар}, m_i^{вив.неп}$ – поточні значення навантаження і вивантаження в парному і непарному напрямках по i -й станції відповідно;

$m_{нав.пар}^{\Sigma \min}, m_{нав.неп}^{\Sigma \min}, m_{вив.пар}^{\Sigma \min}, m_{вив.неп}^{\Sigma \min}, m_{нав.пар}^{\Sigma \max}, m_{нав.неп}^{\Sigma \max}, m_{вив.пар}^{\Sigma \max}, m_{вив.неп}^{\Sigma \max}$ – максимальні і мінімальні сумарні значення навантаження і вивантаження в парному і непарному напрямках відповідно.

Крім того, на проміжній станції, що є найближчою до дільничної станції, на якій сходяться збірні поїзди, необхідно забезпечити можливість виконання подвійних вантажних операцій із вагонами в інтервалі між збірними поїздами, які прибули до станції з першим збірним поїздом у завантаженому (деякі в порожньому) стані і з якими необхідно провести операції розвантаження (якщо потрібно), а потім повторного навантаження до прибуття другого збірного поїзда, до якого вони будуть причеплені

$$\left(\tau_{i,x}^{від.зб} - \tau_{i,-x}^{нр.зб} \right) \geq T_i^{ван.оп.}, \quad i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x = 0 \\ n, & \text{якщо } x = 1 \end{cases} \quad (3)$$

кількість вагонів у складі поїзда, з якими він вирушає на кожен перегін, змінюється і залежить від значень керуючих змінних. Ці обмеження в рамках моделі (окремо для непарного і парного напрямків) можна записати як

де N – кількість станцій на дільниці включно з дільничними станціями;

$У$ – параметр, що набуває значення номерів станцій на дільниці (усі станції пронумеровані послідовно включно з дільничними станціями), тобто він перебирає номери станцій, із яких збірні поїзди відправляються на перегони (для обчислення кількості вагонів у складі поїзда, з якими він вирушає на перегін);

d – напрямок руху по дільниці: 0 – парний, 1 – непарний;

m^{norm} – нормативна кількість вагонів у складі збірного поїзда, прийнята на певній дільниці;

$m_{p,q}^{por}$ – кількість порожніх вагонів, передана зі станції P до станції Q в порядку регулювальних заходів згідно з поточним планом переміщення порожніх вагонів (який слід перераховувати окремо як вкладену підзадачу при кожній зміні значень змінних моделі).

Розглянемо дільницю, наведену на рис. 1. Припустимо, що обсяги навантаження і вивантаження вагонів по станціях місцевої роботи коливаються в певних межах і тому задані інтервальними числами (табл. 1). У передостанньому та останньому стовпчиках наведені мінімальні і максимальні значення для сумарних величин цих параметрів.

Таблиця 1

Обсяги місцевої роботи на станціях дільниці

проміжні станції	B	C	D	E	$m^{\Sigma min}$	$m^{\Sigma max}$
навантаження в парному напрямку	[0;5]	[0;5]	[0;5]	[0;5]	10	17
навантаження в непарному напрямку	[13;18]	[4;9]	[0;5]	[15;20]	30	47
вивантаження в парному напрямку	[0;5]	[0;5]	[1;6]	[1;6]	11	19
вивантаження в непарному напрямку	[0;5]	[13;18]	[4;9]	[1;6]	25	35

Прийmemo також, що величина мінімальної тривалості здійснення вантажних операцій $T_i^{ван.оп.}$

для всіх станцій дорівнюватиме 5 год, а нормативна кількість вагонів у складі збірного поїзда на дільниці прийнята на рівні 50 ваг.

Тоді для оптимізації сформованої моделі (1) із використанням вихідних даних із табл. 1 необхідно розробити оптимізаційну процедуру, адже навіть сучасні оптимізаційні пакети, або навіть середовища

для математичних розрахунків, такі як Matlab, не містять готових рішень для задач робастної оптимізації, особливо якщо ті мають дискретну природу, як задача оптимізації роботи збірних поїздів. Ураховуючи складність задачі, як механізм оптимізації доцільно взяти математичний апарат генетичних алгоритмів [8].

Розроблення процедури оптимізації на основі генетичних алгоритмів у середовищі MATLAB для задачі дискретної природи є складним, але ефективним підходом до пошуку оптимальних рішень. Генетичні алгоритми, які імітують процеси природного відбору і еволюції, дають змогу знаходити рішення для складних комбінаторних задач, де традиційні методи можуть бути менш ефективними. У середовищі MATLAB цей підхід реалізовано через розроблення спеціальних функцій, які визначають операції селекції, кросинговеру, мутації та оцінювання придатності. Дискретна природа задачі потребує розроблення спеціалізованих операторів, які забезпечують генерацію і модифікацію рішень у відповідності з допустимими значеннями змінних. У процесі еволюції популяція потенційних рішень поступово покращується шляхом відбору найбільш пристосованих індивідів, що дає змогу досягти глобально оптимального розв'язку навіть за наявності великого простору можливих варіантів.

Було розроблено спеціальну процедуру оптимізації на основі генетичних алгоритмів, яку реалізовано в середовищі MATLAB. Ця процедура забезпечує повне дослідження простору рішень і дотримання необхідних обмежень. Після розроблення алгоритму було проведено моделювання з використанням зазначених вище вихідних даних, спрямоване на оцінювання продуктивності процедури та адекватності розробленої моделі.

Фінальні значення обсягів місцевої роботи, отримані в результаті моделювання, наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Обсяги місцевої роботи, отримані при моделюванні

проміжні станції	B	C	D	E	Σ
навантаження в парному напрямку	5	5	2	5	17
навантаження в непарному напрямку	18	4	5	20	47
вивантаження в парному напрямку	0	5	6	6	17
вивантаження в непарному напрямку	3	18	9	1	31
разом навантаження	23	9	7	25	64
разом вивантаження	3	23	15	7	48
нестача порожніх вагонів	20	0	0	18	38
надлишок порожніх вагонів	0	14	8	0	22

Також під час оптимізації вирішують підзадачу розподілу порожніх вагонів на дільниці. Для обсягів

місцевої роботи (табл. 2) цей розподіл виглядає так, як наведено на рис. 2.

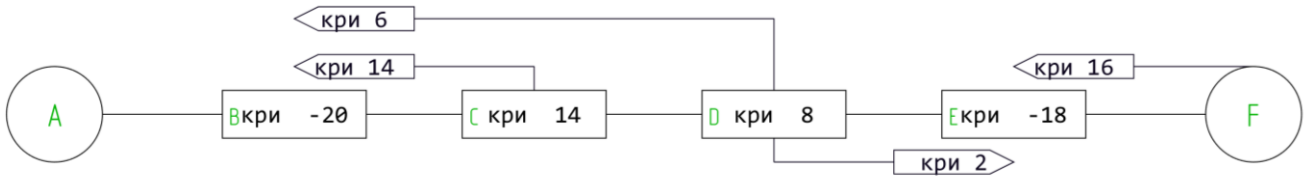


Рис. 2. Розподіл порожніх вагонів для забезпечення місцевої роботи на дільниці А-F, що відповідає оптимальному варіанту плану

На основі отриманого розподілу порожніх вагонів (рис. 2), а також даних про добове навантаження і вивантаження місцевих вагонів на

дільниці А-F (табл. 2) було розраховано діаграму балансу причеплених і відчеплених вагонів (рис. 3).

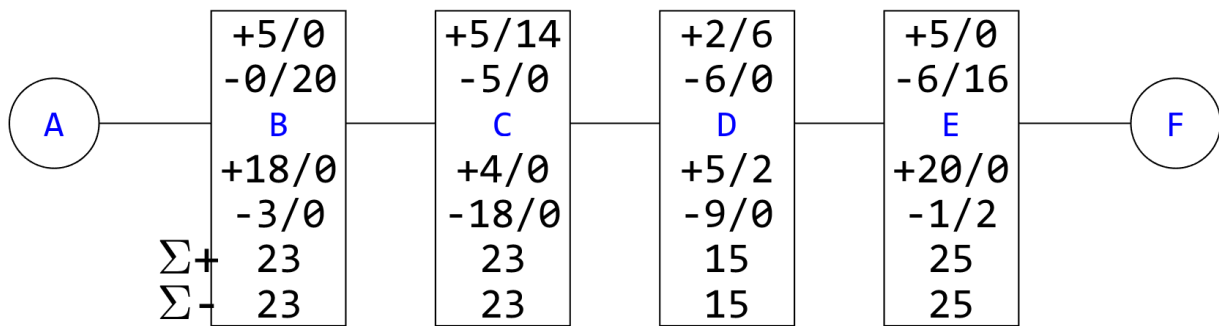


Рис. 3. Діаграма балансу причеплених і відчеплених місцевих вагонів на дільниці А-F

На основі отриманих діаграм було сформовано діаграму місцевих вагонопотоків на дільниці А-F (рис. 4).

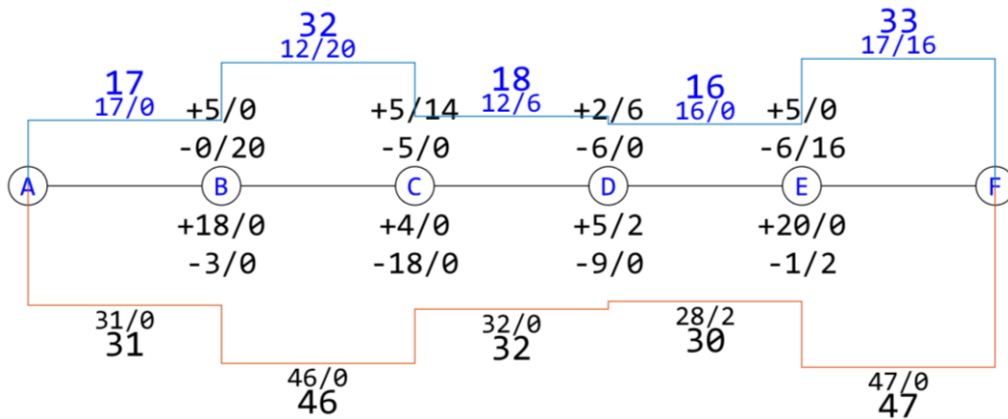


Рис. 4. Діаграма місцевих вагонопотоків на дільниці А-F

Для простоти і наочності запропонованого підходу було вибрано дані, які передбачають одну пару збірних поїздів, а також не розглядали перехресні схеми та ін. Однак слід розуміти, що реальні задачі планування місцевої роботи можуть бути набагато складнішими.

На основі прийнятої кількості збірних поїздів і діаграми місцевих вагонопотоків було створено план-наряд для практичної реалізації руху збірних поїздів по залізничній дільниці (рис. 5) – схему переміщення поїздів і їхніх зупинок на проміжних станціях для проведення маневрових операцій із причеплення та

відчеплення вагонів. Крім того, у плані-наряді станцій відображено час, витрачений на зупинки на кожній зі

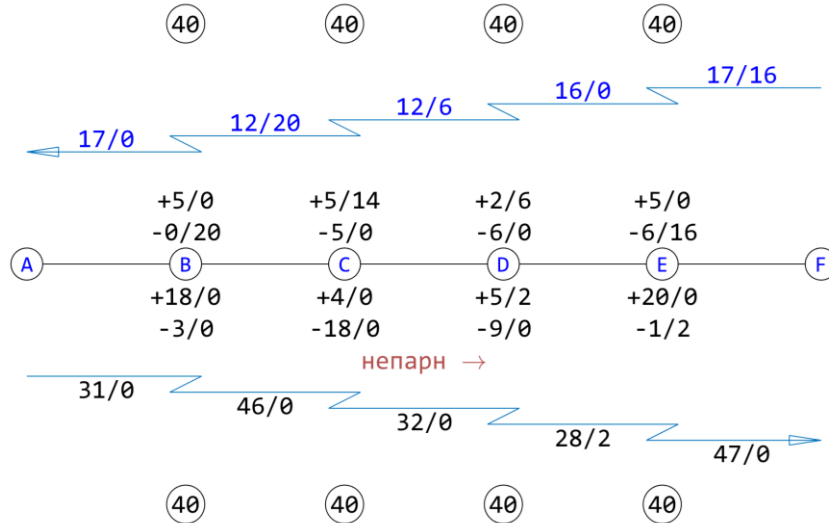


Рис. 5. План-наряд на роботу збірних поїздів

У випадку, якщо відбуваються операції відчеплення і причеплення місцевих вагонів, встановлено тривалість зупинок на рівні 40 хв. Натомість, у тих випадках, коли виконують лише один вид операцій, передбачені зупинки тривалістю 25 хв. Цей підхід сприяє ефективній координації часу для виконання маневрових операцій і забезпечує безперервний рух збірних поїздів по дільниці.

Також у результаті оптимізації на основі сформованого плану-наряду та даних про тривалість руху вантажних поїздів по перегонах дільниці А-Ф (рис. 6) було отримано робастний варіант плану організації роботи збірних поїздів на графіку руху, який відповідає схемі «перший парний поїзд» (рис. 6).

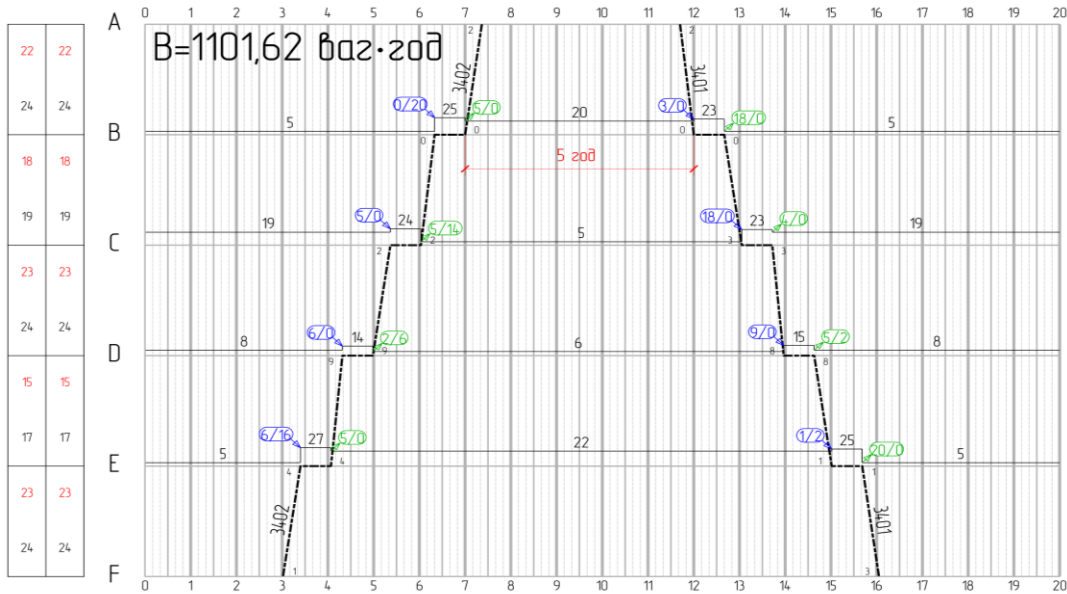


Рис. 6. План роботи збірних поїздів на дільниці А-Ф за схемою «перший парний поїзд»

Витрати вагоно-годин, що відповідають отриманому плану за схемою «перший парний поїзд», становили величину 1101,62. Слід зазначити, що витрати вагоно-годин для такого знайденого найскладнішого випадку комбінації вихідних даних за схемою «перший непарний поїзд», становлять лише

на декілька десятків вагоно-годин більше, ніж за схемою «перший парний поїзд». Крім того, розроблена оптимізаційна процедура була створена так, що вона могла відслідковувати певні екстремальні випадки, у яких вартість неоптимального саме для поточної комбінації даних

рішення була надто високою. Отже, були виявлені такі комбінації даних, різниця витрат вагоно-годин для яких залежно від вибраної схеми прокладання збірних поїздів могла становити навіть п'ятикратну величину. У більшості таких випадків саме отримана за допомогою оптимізаційної процедури схема виявлялась оптимальною.

Отже, отримані результати показали надійність і ефективність запропонованого підходу, надавши цінні дані для визначення оптимального рішення задачі.

Висновки

Було розглянуто проблему удосконалення технології управління місцевою роботою на залізничних дільницях за умов невизначеності. Запропонований підхід базований на застосуванні робастної оптимізації, що дає змогу забезпечити стійкість і надійність рішень за мінливих і непередбачуваних умов. У результаті проведених досліджень було розроблено процедуру оптимізації на основі використання математичного апарата генетичного алгоритму, за допомогою якого ефективно знаходять оптимальні плани роботи для збірних поїздів. Моделювання показало, що запропонований метод зменшує кількість корегувань планів під час їх реалізації, що сприяє підвищенню ефективності та зменшенню експлуатаційних витрат. Використання робастної оптимізації у процесі планування місцевої роботи забезпечує більш точне і адаптивне управління, що враховує реальні умови роботи на залізничних ділянках і дає змогу досягти оптимального результату навіть за умов значної невизначеності.

Розроблений метод оптимізації плану роботи збірних поїздів на основі робастної оптимізації враховує мінливий характер параметрів місцевої роботи, що дає змогу значно підвищити стійкість прийнятих рішень, зменшити кількість корегувань плану та знизити експлуатаційні витрати. Розроблені підходи є ефективним інструментом для покращення планування місцевої роботи на залізницях. Однак за наявності статистичних даних про коливання обсягів місцевої роботи на станціях для знаходження більш точного рішення доцільно ускладнити модель і застосувати підхід, наприклад, стохастичної робастної оптимізації, адже з погляду математики така задача фактично є задачею пошуку стратегії, яка багаторазово буде застосована до різних комбінацій даних.

Список використаних джерел

1. Yang L., Gao Z., Li K. Railway freight transportation planning with mixed uncertainty of randomness and fuzziness. *Applied Soft Computing*. 2011. 11(1). P. 778–792.
2. Gan M., Li D., Yao Z., Yu H., Ou Q. Intelligent decision modeling for optimizing railway cold chain service networks under uncertainty. *Information Sciences*. 2024. 679. C. 121112.
3. Crainic T. G. Service network design in freight transportation. *European Journal of Operational Research*. 2000. 122. 2. P. 272–288.
4. Aktar M. S., Kar C., Dutta P. Fixed charge 4-dimensional transportation problem for breakable incompatible items with type-2 fuzzy random parameters under volume constraint. *Advanced Engineering Informatics*. 2023. 58. 102222.
5. Badetskii A., Medved O. Improving the Stability of the Train Formation Plan to Uneven Operational Work. *Transportation Research Procedia*. 2021. 54. P. 559–567.
6. Yaghini M., Momeni M., Sarmadi M., Seyedabadi M., Khoshraftar M. M. A fuzzy railroad blocking model with genetic algorithm solution approach for Iranian railways. *Applied Mathematical Modelling*. 2015. 39(20). P. 6114–6125.
7. Poss M. Robust combinatorial optimization with knapsack uncertainty. *Discrete Optimization*. 2018. 27. P. 88–102.
8. Marseguerra M., Zio E., Martorell S. Basics of genetic algorithms optimization for RAMS applications. *Reliability Engineering & System Safety*. 2006. 91(9). P. 977–991.

Parkhomenko L. O., Prokhorov V. M., Kalashnikova T. Yu. Enhancing the Technology of Local Operations Management for Railway Sections under Uncertainty Based on Robust Optimization.

The paper explores the enhancement of local operations management technology for railway sections under uncertainty, which is crucial for improving the efficiency of freight transportation. Current planning methods often rely on average daily data and do not account for fluctuations. Consequently, the effectiveness of local operations management can be significantly reduced due to inadequate consideration of transportation dynamics.

The goal of the paper is to develop a new methodology for planning the operation of consolidated trains considering uncertainties, which will improve planning accuracy and reliability. To achieve this, robust optimization is proposed, which ensures solution stability against changing conditions through the application of the minimax principle. This approach allows for the creation of reliable plans that function effectively even in the face of significant deviations from expected conditions.

The paper analyzes the results of modeling conducted using a developed optimization procedure based on genetic algorithms, implemented in the MATLAB environment. The modeling confirmed the effectiveness of the proposed approach.

At the same time, the study results indicate that to achieve even greater outcomes, it is advisable to consider statistical data on fluctuations in local operations volumes

at stations. Therefore, it is suggested to integrate stochastic robust optimization, which better accounts for variations in transportation volumes and provides more accurate solutions. This could significantly enhance planning efficiency, reduce costs, and improve the overall effectiveness of railway transportation management.

Thus, the proposed methods open new opportunities for refining local operations management technologies on railways, providing more reliable and cost-effective solutions under uncertainty.

Keywords: local operations, uncertainty, planning of local train operations, robust optimization

Пархоменко Лариса Олексіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8963-6467>.

E-mail: parhomenko@kart.edu.ua.

Прохоров Віктор Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1647-7746>.

E-mail: prokhorov@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.

Parkhomenko Larysa, 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: parhomenko@kart.edu.ua.

Prokhorov Viktor, PhD (Tech), Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1647-7746>.

E-mail: prokhorov@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.