

ПРОКОПОВ А. О., аспірант,
ПРОХОРОВ В. М., канд. техн. наук,
КАЛАШНІКОВА Т. Ю., канд. техн. наук
(Український державний університет залізничного транспорту)

Розроблення моделі своєчасного забезпечення станцій місцевої роботи порожніми вагонами на основі концепції Precision Scheduled Railroading

Можливість подальшого підвищення конкурентоспроможності системи вантажних залізничних перевезень - це вирішальний фактор у жорсткій боротьбі на транспортному ринку. Успішна реалізація цієї можливості передбачає задоволення підвищених вимог, які висувають вантажовласники, - у першу чергу це оперативність доставки вантажів і пов'язана з цим тенденція до зменшення обсягів відправлень для скорочення витрат на зберігання продукції і пришвидшення обігових коштів компанії. Такий підхід призводить до зменшення чисельності вагонів в одній заявці при здійсненні подавань на вантажні фронти підприємств і відповідно збільшення кількості заявок, проте збільшує навантаження на систему розподілу порожніх вагонів, що й без того функціонує недостатньо ефективно. У дослідженні запропоновано шлях вирішення своєчасного забезпечення станцій місцевої роботи порожніми вагонами за допомогою впровадження концепції залізниць, що функціонують за точними оперативними планами (Precision Scheduled Railroading). Основними рисами цієї концепції є планування перевезень на рівні вагона, постійне знаходження вагонів у русі, курсування вантажних поїздів за жорсткими нитками графіка та зменшення кількості переформувань составів на сортувальних станціях. Використання цієї концепції дозволить легко позбутися супутніх проблем, що заважають ефективному вирішенню завдання розподілу порожніх вагонів, таких як недостатня пропускна спроможність ліній при організації збірних і вивізних поїздів, складність прогнозування моменту настання доступності порожнього вагона тощо. Завдяки застосуванню цієї концепції завдання побудови оперативного плану забезпечення станцій місцевої роботи порожніми вагонами вдалося подати у вигляді оптимізаційної моделі цілочисельного програмування. Також було розроблено процедуру оптимізації запропонованої моделі, що використовує сучасний математичний апарат генетичних алгоритмів. Результати проведених розрахунків доводять ефективність запропонованих підходів.

Ключові слова: розподіл порожніх вагонів, станції місцевої роботи, Precision Scheduled Railroading, генетичні алгоритми.

Постановка проблеми

Ринок вантажних залізничних перевезень відчуває необхідність у підвищенні ефективності використання вагонів, у тому числі за рахунок удосконалення управлінських технологій. Мотивацією для цього є підвищення дохідності залізничних вантажних операторів за рахунок зменшення собівартості перевезень. Однак у ньому не менше, ніж залізничні оператори, зацікавлені також підприємства-вантажовласники, адже скорочення частки транспортної складової в кінцевій вартості їхньої продукції, особливо при постійному підвищенні транспортних тарифів на тлі купі таких негативних явищ, як пандемія, різке подорожчання ресурсів і енергоносіїв, нестача кваліфікованих кадрів тощо, є вкрай важливим і для підвищення їхньої конкурентоспроможності.

Однією з проблем АТ «Укрзалізниця» є дефіцит робочого парку вагонів. Наприклад, перевізник щодня має реальну можливість завантажити лише 1,2 тис. зерновозів, тоді як добова потреба вантажовласників становить до 2 тис. одиниць, що на 66 % перевищує можливості АТ «Укрзалізниця». Та сама ситуація з критими вагонами та цементовозами — відомство може надати лише 165 та 220 вагонів потрібних типів, а потреба ринку становить 480 та 500 вагонів на добу відповідно [1]. При цьому існує проблема в постійному старінні рухомого складу. За різними даними, знос становить 85-95 %. Однак експерти ринку також стверджують, що проблема зносу та нестачі тяги навіть більша, ніж знос вагонів.

Іншою складовою цієї проблеми є відсутність єдиної універсальної, прозорої і зрозумілої моделі розподілу порожніх вантажних вагонів. Наприклад, системи розподілу порожніх цементовозів і зерновозів значно відрізняються одна від одної. Якщо для цементовоза основний принцип — це заявка від виробника та найближча відстань, то для зерновозів цей список є довшим: мінімальна відстань перевезення порожнього вагона під навантаження, мінімальний час простою порожнього вагона в очікуванні навантаження, забезпечення заявок на перевезення за прямим варіантом, пріоритетне забезпечення відправних маршрутів, пропорційний розподіл порожніх вагонів без урахування відстані.

Ще однією складовою цієї проблеми, що завдає не лише репутаційних втрат АТ «Укрзалізниця» перед її клієнтами, але й спричиняє їй колосальні збитки, є ручне управління процесом розподілу парку порожніх вагонів. Можливість здійснення такого управління спонукає до масових зловживань. Лише один виявлений епізод, коли вагони з-під вивантаження з заходу України переганяли через усю Україну під навантаження на Придніпровську залізницю, бо хтось заплатив за це гроші, свідчить про кричущий непрофесіоналізм і преступність існуючих методів розподілу порожніх вагонів. Слід відзначити, що навіть за відсутності корупційної складової в ручному режимі ефективне вирішення складних завдань з безліччю можливих варіантів розподілу порожнього парку вагонів такої масштабної залізничної системи, як АТ «Укрзалізниця», є неможливим без задіяння сучасних методів автоматизації обчислювальних процесів на основі адекватних математичних моделей. З метою усунення людського фактора в процесі планування розподілу порожніх вагонів АТ «Укрзалізниця» ще у 2017 році спробувала запустити відповідну ІТ-систему «Управління пересиланням порожніх вагонів» (АС УППВ), однак це не вирішило проблему. Модель її роботи була непрозорою й до того ж протягом року було зафіксовано більше 200 втручань у її роботу. Значним недоліком цієї системи було й те, що вона не враховувала виробничі процеси, пов'язані з подачею локомотива, наявністю бригади складачів до підходів рухомого складу під здійснення вантажних операцій, що є вкрай важливим за існуючої моделі доставки порожніх вагонів переважно у складі вивізних і збірних поїздів. Крім того, система також не враховує реальний час доставки на фронт навантаження.

Також розповсюдженою є практика, спрямована на задоволення потреб тих регіональних філій, на яких здійснюється вивантаження вагонів. Наприклад, РФ «Одеська залізниця», на якій вивантажується найбільша кількість вагонів, може направити рухомий склад з-під вивантаження не на станцію Тернопіль, а на станцію всередині філії, наприклад Знам'янку, і

таким чином вирішити власну проблему з забезпечення пунктів місцевої роботи порожніми вагонами. Однак така практика є дуже сумнівною з огляду на економічну доцільність і корисність для залізничної системи в цілому.

Отже, суть проблеми полягає у відсутності ефективних підходів щодо організації системи планування розподілу порожніх вагонів по пунктах місцевої роботи для своєчасного забезпечення процесу навантаження. До того ж така система має ґрунтуватися не на застарілих радянських принципах організації вагонопотоків, а враховувати сучасні тренди, такі як підвищення рівня маршрутизації вагонопотоків і відповідне зменшення кількості сортувальних станцій, широке впровадження багатогрупних поїздів, впровадження рейсових моделей доставки вантажів і відповідних «жорстких» ниток графіка руху тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Про важливість і складність проблеми розподілу порожніх вагонів свідчить той факт, що ще в 1989 році було запропоновано її вирішення на основі автоматизації з використанням експертних систем [2]. Ця проблема сформульована у вигляді завдання розподілу ресурсів, однак у статті окреслено лише концептуальні підходи до її вирішення. Більш ніж 30 років тому у статті [3] ця проблема вже була сформульована у вигляді задачі цілочисельного програмування, але в максимально примітивному вигляді. У роботі [4] запропоновано вирішення комбінованої проблеми побудови розкладу поїздів з порожніх і навантажених вагонів, сформульовано у вигляді оптимізаційної задачі, для якої запропоновано процедуру оптимізації на основі алгоритму імітації відпалу. Однак запропонована модель - лише один аспект проблеми розподілу порожніх вагонів. У роботі [5] розглядається проблема розподілу порожніх вагонів між автовиробниками для забезпечення перевезень готової продукції, проте для її вирішення пропонується задіяти переважно не технологічні заходи, а економіко-правові важелі. У роботі [6] пропонується вирішення завдання пошуку оптимальних планів переміщення порожнього рухомого складу одночасно з оптимізацією чисельності робочого парку транспортних одиниць. Запропонована модель претендує на певну універсальність, адже в ролі транспортних одиниць у ній можуть виступати як залізничні вагони і контейнери, так і інші типи рухомого складу, наприклад автомобілі, використовує переважно економічні підходи, такі як порогове управління, однак вона не повною мірою враховує специфіку саме вантажних залізничних перевезень.

Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми

Той факт, що інтерес дослідників до цієї проблеми не згасає протягом декількох десятиріч поспіль, свідчить не лише про її актуальність але і її складність і багатогранність. Дійсно, моделі розподілу порожніх вагонів можуть відчувати вплив цілої низки різних факторів залежно від специфіки умов залізничних полігонів, на яких вони застосовуються. Велика частка цих специфічних факторів часто може бути обумовлена безліччю моделей взаємодії між компаніями, що надають транспортні послуги, і їхніми клієнтами і переважно носять економіко-правовий характер. Також значну складність має необхідність урахування великої кількості специфічних технологічних обмежень, особливо на тлі дискретної природи та комбінаторної складності задачі. Також із загальних недоліків застосованих до вирішення цієї проблеми підходів можна віднести те, що більшість дослідників розглядали її в рамках існуючої парадигми, що склалася ще на початку ХХ століття і на основі якої були побудовані технології організації більшості залізничних систем країн світу. Однак можливо саме відхід від цієї старої парадигми та спроба розглянути проблему розподілу порожніх вагонів у контексті сучасних трендів саме і дасть можливість звільнитися від низки обмежень, що заважали створенню ефективних моделей для її вирішення в минулому. Іншим загальним недоліком було надмірне зосередження уваги на економіко-правових, а не технологічних аспектах цієї проблеми. Такий підхід давав можливість досягти певного успіху у вирішенні цієї проблеми на стратегічному рівні, але був абсолютно непридатним для її вирішення на оперативно-тактичному рівні, однак саме така постановка цього завдання відповідає викликам сьогодення.

Формулювання цілей

Метою дослідження є удосконалення методів вирішення завдання своєчасного забезпечення пунктів навантаження порожніми вагонами з акцентом на технологічних аспектах проблеми в контексті автоматизації процесу оперативно-тактичного планування місцевої роботи станцій і урахуванням сучасних трендів розвитку технологій вантажних залізничних перевезень.

Викладення основного матеріалу дослідження

Проблема розподілу порожніх вагонів є комплексною, у її основі лежить той факт, що не всі вагони залучаються до здвоєних операцій у місцях вивантаження. Це відбувається внаслідок природної асиметричності вантажопотоків, і навіть за наявності зворотних вантажопотоків вони можуть потребувати

вагонів інших типів, ніж ті, що були вивантажені. Коефіцієнт здвоєних операцій визначає середню кількість вантажних операцій, що припадають на один місцевий вагон. І якщо в радянські часи цей показник наближався до значення 1,5, то зараз він перебуває в межах 1,01÷1,03. Тобто якщо раніше майже з кожним другим вагоном після операції вивантаження здійснювалась операція навантаження, то зараз таких вагонів у середньому лише 2 зі 100. Однією з головних причин такого становища є те, що в радянські часи переважна частка вантажних вагонів належала одному власнику – державній залізничній компанії, і лише незначний відсоток вагонів знаходився у власності підприємств, що теж були державними. Зараз частка приватних вагонів становить приблизно 55 %, і цей відсоток постійно збільшується. Проблема наявності приватних парків вагонів полягає в тому, що з вагонами, які належать приватним підприємствам, неможливо здійснити здвоєні операції навіть якщо їхній тип прийнятний для певного роду вантажу, адже це заборонено договором про надання послуг з організації перевезення вантажів залізничним транспортом, оскільки цей договір не є договором оренди. Також за цим договором власник платить чималі кошти щодоби лише за перебування власного вагона на коліях АТ «Укрзалізниця» як у навантаженому, так і порожньому стані, а отже, він зацікавлений у якомога скорішому поверненні своїх вагонів для наступного навантаження. На залізничній мережі України курсують також й іновагони – вагони, власниками яких є залізничні адміністрації інших країн. Частка іновагонів може використовуватися для здвоєних операцій. До неї належать переважно ті іновагони, що використовуються за спеціальним договором і були залучені в Україну саме з метою збільшення чисельності робочого парку в рамках проведення організаційних заходів щодо вирішення проблеми нестачі вантажних вагонів. Однак на ці вагони в будь-який момент може бути оголошений режим термінового повернення. За офіційними документами Організації співробітництва залізниць (ОСЗ), термінове повернення – повернення вагона спільного користування на вимогу залізничної компанії-власника. За радянських часів також курсували вагони з трафаретом «термінове повернення», однак цей термін мав різне значення. У першу чергу цей трафарет наносився на цистерни, що перевозили нафтопродукти від нафтопереробних заводів, які працювали за безперервним циклом. Також цей термін міг означати й те, що здвоєні операції не забороняються, але дозволяється відправлення цих вагонів тільки в бік залізниці-власника або станції приписки лише за певним маршрутом.

Отже, залучення іновагонів до внутрішніх перевезень теоретично є одним із можливих шляхів вирішення проблеми дефіциту вантажних вагонів. На

сьогодні адміністрацією АТ «Укрзалізниця» розглядається питання залучення декількох десятків тисяч іновангонів для покриття дефіциту, які згодні надати залізничні адміністрації інших країн пострадянського простору. З цією метою навіть були проведені обговорення такого питання з найбільш крупними клієнтами АТ «Укрзалізниця». Однак рішення скоріше за все буде негативним внаслідок можливих труднощів повернення цих вагонів після закінчення контракту, зокрема дефіцит магістральних локомотивів для вивезення цих вагонів з території України для їх повернення залізницям-власникам. Іншою проблемою є також практична неможливість повернення цих вагонів у належному стані внаслідок нестачі запчастин і потужностей ремонтних підприємств. Адже й власний парк вагонів знаходиться в жалюгідному стані, середній строк експлуатації у вагонів різних категорій перевищений на 30÷60 %, у 54 % вагонів цей строк перевищений більш ніж у два рази. За таких умов вагони потребують виконання позапланових ремонтів фактично під час кожного навантаження або вивантаження. До того ж ремонт не гарантує, що технічний стан конкретного вагона після цього поліпшиться, адже роботи з ремонту вантажних вагонів виконують 30 державних і дев'ять приватних підприємств. В умовах жорсткої конкуренції вони беруться за ремонт навіть тих вагонів, що насправді ремонту не підлягають через крайній ступінь зношеності. Такий стан спричиняє зриви графіків перевезень, перевантаження персоналу залізничні незапланованими роботами, відволікає його від виконання інших завдань. [7]. Отже, залучення іновангонів для вирішення проблеми дефіциту вагонів і своєчасного забезпечення місцевої роботи в умовах наявності інших проблем, таких як дефіцит магістральних локомотивів і ремонтних потужностей, є недоцільним. Функціонування підсистеми місцевої роботи в умовах, коли частка власних вагонів перевищує 50 % і постійно збільшується, є значно ускладненим. Якщо інвентарні порожні вагони подавалися під навантаження одразу після прибуття на станцію, то в умовах домінування власних вагонів потрібно провести низку додаткових технологічних операцій з обробки перевізних документів, визначення вантажоотримувачів та уточнення заявок, під які прибув кожен конкретний вагон, а також виконати значний обсяг маневрової роботи з добирання та подачі вагонів за вантажовласниками, вантажоотримувачами та іншими параметрами заявок і власних вагонів. Отже, обсяги і тривалість маневрової роботи на технічних станціях, особливо на малих і середніх, останніми роками збільшилися у декілька разів. Слід відзначити, що таке погіршення умов виконання місцевої роботи відбувається на тлі гострої нестачі маневрових локомотивів. Збільшився також і середній час обробки одного збірного поїзда і

тривалість його проходження по дільниці місцевої роботи. Отже, основною причиною всіх цих негативних змін технологічного процесу є те, що власні порожні вагони після вивантаження відправляються зі станції, а під завантаження їм на заміну необхідно підвести інші порожні вагони.

Тобто виникає необхідність переміщення порожніх вагонів від місць вивантаження до місць навантаження по залізничній мережі, а звідси виникають додаткові витрати, пов'язані з порожнім пробігом вагонів і необхідністю виконання додаткових маневрових операцій. Спадщиною планової економіки є система технологічного нормування експлуатаційної роботи залізниць, що включає і моделі нормування середньої величини порожнього пробігу вагонів. Отже, нормована величина порожнього пробігу вагонів, що і досі використовується в процесі організації вантажопотоків, подається як економічно обгрунтований показник якості планування експлуатаційної роботи на основі технологіко-економічної моделі залізничного полігону. Тобто в рамках певного планово-економічного підходу відхилення цього показника як у бік збільшення так і бік зменшення сприймається як негативне явище, адже вважається, що в такому разі воно спричинить негативний вплив на інші показники експлуатаційної роботи, з якими показник середньої величини порожнього пробігу вагона знаходиться у складних залежностях. У той же час слід відзначити, що відхилення інших показників від нормативних також може мати негативний вплив на величину порожнього пробігу вагонів. Так, збільшення динамічного навантаження на вагон, що має позитивний вплив на показники використання вантажного вагона, у той же час призводить до збільшення величини середнього порожнього пробігу. Отже, будь-які оптимізаційні управлінські рішення у сфері організації вагонопотоків із завантажених вагонів можуть мати неочікувані негативні наслідки, погіршуючи умови повернення порожніх вагонів до місць навантаження.

У той же час слід відзначити, що такий планово-економічний підхід до технологічного планування та самі принципи організації вагонопотоків, досі використовувані на залізницях країн, що входили до складу колишнього СРСР, є застарілими і такими, що не відповідають сучасним реаліям ринкової економіки, в умовах якої вже 30 років функціонують залізничні системи цих країн. Умови ринкової економіки потребують вироблення нових управлінських підходів, основні акценти в яких зміщені в бік тактичного та оперативного планування. Впровадження таких підходів передбачає перехід до формування багатогрупних поїздів, відмову від формування одногрупних, які відправляють за готовністю за найближчою ниткою графіка. Такий підхід потенційно здатний забезпечити радикальне зменшення витрат

вагоно-годин на станціях внаслідок скорочення простоїв вагонів у процесі накопичення та переформування составів. У той же час він також дає нові можливості для вирішення й інших завдань, зокрема управління парком порожніх вагонів і своєчасне забезпечення ними пунктів місцевої роботи для здійснення навантаження.

Місцева робота у свою чергу є показником ефективності технології вантажних перевезень, характеризує якість взаємодії вантажної і поїзної роботи. Підсистема вантажних залізничних перевезень – складний механізм, некоректна робота лише одного елемента якого завжди призводить до значної втрати ефективності її функціонування в цілому. Недостатня узгодженість підсистеми місцевої роботи технічної станції і вантажних фронтів призводить до нерівномірної і несвоечасної подачі вагонів, що у свою чергу спричиняє непоправні втрати вантажної спроможності фронтів і невиробничий простій вагонів під час очікування вивільнення фронтів або маневрових локомотивів. Ще більш серйозні проблеми виникають при несвоечасній подачі на fronti порожніх вагонів для завантаження. У сучасних умовах нестачі вантажних вагонів у залізничній системі України навіть великі промислові та гірничо-видобувні підприємства вимушені зупинити виробничий процес, а за таких умов величина затримки подачі вагонів часто може становити декілька діб, що призводить до застосування штрафних санкцій до залізничних підприємств. Слід також відзначити, що збільшення чисельності робочого парку вантажних вагонів також не гарантує повного вирішення проблеми, адже існують й інші недоліки, такі як нестача магістральних і маневрових локомотивів, а також пропускної спроможності залізничних ліній, ємності та переробної спроможності елементів інфраструктури, що постійно скорочується внаслідок її деградації, ускладнюючи процеси формування і пропускання збірних поїздів і відповідно своєчасну передислокацію порожніх вагонів.

Одним із можливих організаційних заходів щодо зменшення порожніх пробігів вагонів є підписання договору про можливість сумісного використання вагонів власниками вагонних парків. Цей договір не є обов'язковим, але він може бути вигідним для крупних власників вагонних парків, адже він не лише дозволить їм зменшити час і відповідно плату за перебування їхніх вагонів, але, що найважливіше, дасть можливість отримати вагони під завантаження набагато раніше, не очікуючи повернення власних вагонів. До того ж АТ «Укрзалізниця» також зацікавлена в такій співпраці, оскільки це дозволить їй зменшити обсяги маневрової і поїзної роботи та уникнути колапсу, пов'язаного з нестачею пропускної спроможності залізничних ліній і переробної спроможності технічних станцій. У такому разі АТ «Укрзалізниця»

доцільно навіть надати для підписантів цієї угоди певні знижки до тарифів.

Оптимізація технології управління парком порожніх вагонів дасть можливість для підвищення ритмічності і стабільності роботи технічних станцій на залізничній мережі, вивільнення об'єктів інфраструктури від надлишкового рухомого складу, що є також вкрай важливим в умовах постійної оптимізації і скорочення кількості колій у парках технічних станцій. Однак найбільш важливим очікуваним ефектом від оптимізації технології розподілу порожніх вагонів є своєчасне забезпечення місць навантаження рухомим складом, тобто вирішення одного з важливих завдань підвищення ефективності місцевої роботи. Одним з найбільш перспективних напрямів удосконалення технології вважається подальша оптимізація маневрових і сортувальних операцій із порожніми вагонами на станціях з метою мінімізації їхнього простою. Однак спроби такої оптимізації в рамках існуючої системи організації руху поїздів стикаються з багатьма труднощами.

Іншим напрямом вирішення проблеми забезпечення районів місцевої роботи порожніми вагонами, що не виключає, а має бути спрямований на доповнення і посилення наведених вище заходів, є перехід на інші технології організації поїзної роботи. Система організації поїзної роботи як в Україні, так і країнах пострадянського простору також базується на застарілих технологіях. Так, частка двогрупних поїздів, формованих на мережі АТ «Укрзалізниця» у наш час не перевищує 3 %. Формування багатогрупних поїздів взагалі є одиничними подіями. Хоча в розвинених західних країнах, що мають потужні залізничні системи, таких як Франція або США, частка багатогрупних поїздів становить приблизно 80 % [8]. Формування багатогрупних поїздів дозволить економити вагоно-години в процесі накопичення составів, а також зменшити кількість переробок составів із використанням сортувальних пристроїв, оскільки поїзди можуть обмінюватися групами вагонів. Крім того, цей підхід дозволяє взагалі відмовитися від стратегічної моделі, що базується на плані формування поїзді та передбачає перехід на тактичну модель планування вантажних перевезень. А отже, така модель, зокрема, дозволить переміщувати певні групи вагонів на мережі без чисельних переробок на сортувальних станціях фактично за будь-яким маршрутом у попутних поїздах. Маневрова робота при цьому буде також мінімальною, а схема практично не потребуватиме затримок поїздів на станціях, адже вони все одно матимуть зупинки на певних станціях для відчеплення, причеплення або обміну груп вагонів.

У контексті проблеми своєчасного забезпечення вагонами місць навантаження пропонується таку

схему використовувати для переміщення на мережі груп порожніх вагонів. Однією з головних проблем, що обумовлює необхідність переходу від традиційної до сучасної автоматизованої технології планування забезпечення місцевої роботи порожніми вагонами в рамках цифрової трансформації залізниці, є проблема надійності плану розподілу і доставки порожніх вагонів. Низька ефективність традиційної технології планування пов'язана зі специфікою, яка полягає в тому, що значна частина вагонів, переміщення яких у порожньому стані планує диспетчер-вагонорозпорядник з метою забезпечення навантаження, на момент завершення процесу планування знаходяться ще в русі в завантаженому стані. Цієї специфіки неможливо позбутися, адже на переміщення порожніх вагонів витрачається певний, а іноді значний, час. Впровадження технології доставки порожніх вагонів у складі багатогрупних поїздів розширює можливості вибору порожніх вагонів для забезпечення потреб місцевої роботи. Оскільки рід вантажу визначає тип вагона, у якому дозволено його перевезення, то часто для забезпечення навантаження групи порожніх вагонів певного типу доводиться переміщувати на значні відстані за допомогою комбінації маршрутів вивізні та збірні поїзди, що курсують за певними визначеними схемами. Отже, теоретично модель із залученням попутних багатогрупних поїздів може забезпечити швидшу доставку вагонів коротшими маршрутами, аніж за традиційної технології. Однією з головних причин несвоечасної подачі порожніх вагонів на вантажні fronti є невисока надійність плану, який складає диспетчер-вагонорозпорядник, оскільки розрахункові дані про часи прибуття поїздів і розвантаження вагонів дуже часто виявляють значні розбіжності з фактичними даними, адже вагони можуть декілька днів перебувати на під'їзних коліях підприємств в очікуванні розвантаження або припортових станціях в очікуванні переміщення на припортові колії. Затримка може виникнути й в процесі переміщення на залізничній мережі внаслідок затримок при розформуванні або формуванні составів на сортувальних станціях по маршруту руху вагона. Причиною цього може бути як несвоечасна подача локомотива для вивезення сформованого состава зі станції внаслідок нестачі магістральних вантажних локомотивів, так і затримка накопичення состава внаслідок нестачі необхідної кількості вагонів, що, за планом формування поїздів, дозволяється включати в поїзди певного напрямку. Нестача попутних вагонів для своєчасного формування составів є наслідком значних коливань вагонопотоків, спричинених нестабільним функціонуванням промислових і аграрних підприємств в умовах перманентної економічної кризи в країні. Затримка розвантаження вагона може виникнути і через його несвоечасну

подачу на вантажний фронт внаслідок неритмічного функціонування підсистеми місцевої роботи технічної станції, до якої примикають під'їзні колії підприємства-вантажоотримувача, а повернення порожніх вагонів до системи вантажних залізничних перевезень - внаслідок їхнього несвоечасного прибирання з під'їзних колій після розвантаження. Такі ситуації відбуваються через нестачу маневрових засобів або неефективну систему планування місцевої роботи на технічних станціях і є дуже розповсюдженими в наш час. За таких умов одним з основних елементів, що має увійти до складу системи планування забезпечення місцевої роботи порожніми вагонами, є модель прогнозування моменту часу доступності порожнього вагона. Однак для успішного вирішення завдання розподілу порожніх вагонів точності існуючих моделей прогнозування моменту часу їхньої доступності недостатньо. Це обумовлено тим фактом, що зараз вантажні поїзди рухаються не за «жорсткими» нитками графіка, а за диспетчерським розкладом, і тому спрогнозувати час розвантаження вагона складно, адже неможливість спрогнозувати час його прибуття на станцію вивантаження.

Також ускладнює процес планування розподілу і безпосередньо процес доставки порожніх вагонів на станції місцевої роботи нова тенденція у стані вантажовідправників. Її суть полягає в тому, що вантажовідправники зацікавлені у дробленні відправлень з метою скорочення витрат на зберігання продукції і пришвидшення обігових коштів компаній. Такий підхід призводить до зменшення чисельності вагонів в одній заявці при здійсненні подавань на вантажні fronti підприємств і відповідне збільшення кількості заявок, що збільшує навантаження на систему розподілу порожніх вагонів, яка й без того функціонує недостатньо ефективно. Отже, завдяки цій тенденції ускладнюється як безпосередньо процес релокації вагонів, так і процес планування їхнього розподілу, адже збільшується кількість кінцевих пунктів доставки в рамках планового періоду.

Багатьох з розглянутих вище проблем, що виникають під час ефективного вирішення завдання своєчасного забезпечення станцій місцевої роботи порожніми вагонами, можна позбутися, якщо розглянути її у світлі сучасних трендів розвитку технологій вантажних перевезень. У цьому дослідженні пропонується вирішення проблеми своєчасного забезпечення станцій місцевої роботи порожніми вагонами за допомогою впровадження концепції вантажних залізниць, що функціонують за точними оперативними планами (Precision Scheduled Railroading). Precision Scheduled Railroading, або PSR — це оперативний метод управління залізницею для максимального використання активів, за допомогою якого вантажні перевезення плануються та управляються на рівні окремого вагона [9] (а не на

рівні блоків вагонів або всього поїзда). Ця концепція є клієнтоорієнтованою і спрямована на мінімізацію простою вагонів. Основою цієї концепції є безперервний рух – поїзди мають рухатись навіть попри те, що кількість вагонів у поїзді є меншою за нормативну. Такий підхід дозволить не лише значно скоротити простою вагонів, але й підвищити надійність залізничних перевезень з точки зору дотримання строку доставки та суттєво зменшити нормативні строки доставки, що у свою чергу підвищить якість сервісу та привабливість для клієнтів [10].

За таких умов технологія розподілу порожніх вагонів і їхньої доставки до місць завантаження також потребуватиме змін. Традиційна технологія забезпечення пунктів місцевої роботи порожніми вагонами за допомогою збірних і вивізних поїздів також не відповідає концепції безперервного руху PSR, а отже, потребує кардинальних змін. Концепції планування на рівні вагона та постійного руху в рамках PSR вимагають побудови такої моделі управління порожнім парком вагонів, яка б була здатна знаходити оптимальну схему релокації кожного порожнього вагона до пунктів навантаження з мінімальними витратами в максимально короткий строк. Зважаючи на те, що концепція PSR фактично дозволяє курсування неповносоставних поїздів, було запропоновано модель підтримки місцевої роботи, яка забезпечує планування своєчасної доставки вагонів до пунктів навантаження за допомогою використання вільних вагономісць у вантажних поїздах. Запропонована модель забезпечує залучення до

процесу планування тих вагонів, які ще знаходяться в русі в завантаженому стані або навіть на стадії завантаження. Така модель дозволяє в рамках концепції PSR переважно відмовитись від збірних і вивізних поїздів для транспортування порожніх вагонів, а натомість здійснювати переміщення порожніх вагонів у складі попутних вантажних поїздів, використовуючи їхні вільні вагономісця. Такий підхід, з одного боку, призведе до збільшення обсягів маневрової роботи на станціях, адже маршрут доставки порожнього вагона може передбачати його переміщення у складі декількох попутних поїздів. З іншого боку, він дозволить значно скоротити час доставки порожніх вагонів до пунктів місцевої роботи, що є вкрай важливим в умовах нестачі рухомого складу та гострого дефіциту певних типів вагонів. До того ж такий підхід дозволить значно зменшити необхідність у використанні збірних і вивізних поїздів для розвезення порожніх вагонів. Також слід відзначити, що технічна станція, з економічної точки зору, є суб'єктом господарювання, а отже, оптимізація загальних поточних технологічних витрат є важливою складовою її операційної діяльності [11]. Своєчасне забезпечення підсистеми місцевої роботи технічної станції порожніми вагонами є найважливішою запорукою її ефективного функціонування.

Отже, як критерій моделі доцільно обрати сумарні витрати залізничного оператора в процесі забезпечення пунктів місцевої роботи порожніми вагонами.

$$C(x, y, N) = \sum_{r=1}^{\#D} \sum_{c=1}^{\#S} \left(x_{r,c} \sum_{j=1}^{\#N_{r,c}} \sum_{k=y_j^c}^{y_{j+1}^c} \left(\tau_{k,k+1}^{r,c} e^{j^{map}} + e^{k^{an}} \right) \right) + \sum_{r=1}^{\#D} \left(1 - \max_{r,*} (x_{r,*}) \right) e^{u_r} + \sum_{c=1}^{\#S} \left(1 - \max_{*,c} (x_{*,c}) \right) \cdot (T - \tau_c^{docm}) \cdot e_c^{e^2} + \sum_{r=1}^{\#D} \left(\left(1 - \max_{r,*} (x_{r,*}) \right) \cdot \left(\tau_r^{n\phi} - \left(\theta \left(N_{r,c}^{\#N}, p_r \right) + t_r^{nod} \right) \right) \cdot \left(\tau_r^{n\phi} > \left(\theta \left(N_{r,c}^{\#N}, p_r \right) + t_r^{nod} \right) \right) \right) \cdot e_c^{e^2} \quad (1)$$

де D – множина порожніх вагонів, що являє собою обсяги попиту;

S – множина порожніх вагонів, що являє собою обсяги пропозиції;

$\# D$ – потужність множини порожніх вагонів, що являє собою обсяги попиту;

$\# S$ – потужність множини порожніх вагонів, що являє собою обсяги пропозиції;

N – множина поїздів, яка включає підмножини поїздів, що входять до маршрутів доставки порожніх вагонів;

$\# N_{r,c}$ – підмножина, яка містить послідовність

поїздів, що беруть участь у доставці порожнього вагона в процесі задоволення r -го замовлення за рахунок c -ї пропозиції;

u – множина, яка містить послідовності, що включають станції перечеплення вагонів між поїздами згідно з маршрутами доставки порожніх вагонів;

x – матриця, строки якої складають вагони, що входять до множини вагонів, потрібні для навантаження, а стовпці – вагони, що входять до множини вагонів, що вже доступні або стануть доступні протягом оперативного планового періоду і

можуть розглядатися як такі, що можуть бути використані для задоволення попиту на порожні вагони в місцях навантаження, елемент матриці $x_{r,c}$ набуває значення 1, якщо c -й вагон з множини пропозиції був обраний для задоволення потреби у r -му вагоні з множини попиту;

$x_{r,*}, x_{*,c}$ – r -й рядок і c -й стовпець матриці x відповідно;

$\tau_{k,k+1}^{r,c}$ – тарифна відстань між сусідніми станціями маршруту з доставки порожнього вагона в процесі задоволення r -го замовлення за рахунок c -ї пропозиції;

T – часовий горизонт оперативного планування;

e_r^u – величина штрафу в разі незадоволення потреби в порожньому вагоні, що відображена у r -му рядку матриці x ;

τ_c^{dost} – прогнозний момент часу початку доступності порожнього вагона, що відображений у c -му стовпці матриці x ;

$e_c^{e,z}$ – вартість вагоно-години простою вагона, що відповідає c -му стовпцю матриці x , яка може залежати від його приналежності та типу;

$\tau_r^{n\phi}$ – момент часу початку роботи вантажного фронту для подачі r -го порожнього вагона з множини попиту;

t_r^{nod} – нормативна тривалість подачі r -го порожнього вагона з множини попиту до відповідного вантажного фронту;

$\theta(N_{r,c}^{\#N}, p_r)$ – функція, що повертає час прибуття останнього поїзда до відповідної станції P_r призначення порожнього вагона згідно з розкладом з множини поїздів $N_{r,c,y}$, що відповідає маршруту y -го варіанта плану доставки порожнього вагона для задоволення r -го замовлення за допомогою c -ї пропозиції.

Отже, перший доданок цільової функції являє собою витрати на переміщення та витрати на маневрові операції під час здійснення перечеплень порожнього вагона між поїздами, задіяними в маршруті його доставки. Другий доданок - витрати,

$$\theta(N_{r,c}^{\#N}, p_r) + t_r^{nod} + t_r^{naa} \leq \tau_r^{z\phi}, \quad r = 1 \dots \#D, \quad c = 1 \dots \#S, \quad (4)$$

де $\tau_r^{z\phi}$ – час закінчення роботи вантажного фронту, для якого виконується r -те замовлення з доставки порожнього вагона.

пов'язані зі штрафними санкціями щодо залізничної компанії в разі невиконання замовлення на подачу порожніх вагонів вантажовідправнику для завантаження в часових межах поточного періоду оперативного планування.

Отримання адекватного плану забезпечення пунктів навантаження порожніми вагонами є можливим лише за умови врахування технічних і технологічних обмежень, які необхідно накласти на змінні математичної моделі. У першу чергу необхідно врахувати такі технічні обмеження:

$$\begin{cases} \sum_{c=1}^{\#S} x_{r,c} \leq 1, & r = 1 \dots \#D \\ \sum_{r=1}^{\#D} x_{r,c} \leq 1, & c = 1 \dots \#S \end{cases} \quad (2)$$

Ці обмеження забезпечують виконання таких умов: кожен вагон з множини пропозиції не може бути використаний більше одного разу, і кожне замовлення на подачу порожнього вагона з множини попиту не може бути задоволене більше одного разу.

Наступне обмеження забезпечує відповідність першої і останньої станцій перечеплення вагона до станції пропозиції та станції замовлення відповідно:

$$y_{1,c}^{r,c} = p_c, \quad y_{\#N_{r,c}+1,r}^{r,c} = p_r, \quad \text{якщо } x_{r,c} = 1, \quad (3)$$

де p_c – станція, що надає порожній вагон при задоволенні відповідного замовлення;

$\#N_{r,c}+1$ – номер останнього елемента підмножини станцій $y^{r,c}$ перечеплення вагона при задоволенні r -го замовлення за рахунок c -ї пропозиції (адже кількість таких станцій на одиницю більше, ніж кількість поїздів, задіяних у доставці певного вагона).

Подача вагона має бути здійснена вчасно, тобто до закінчення робочого часу відповідного вантажного фронту з урахуванням часу на навантаження:

Наступне технічне обмеження має забезпечити цілісність маршруту доставки порожнього вагона або групи вагонів, тобто маршрути кожної пари сусідніх

поїздів, що входять до кожного маршруту доставки порожнього вагона до станції місцевої роботи, яка забезпечує відповідний пункт навантаження, мають перетинатись хоча б на одній станції:

$$N_{r,c}^i \cap N_{r,c}^{i+1} \neq \emptyset. \quad (5)$$

Однак маршрути сусідніх поїздів з послідовності поїздів $N_{r,c}^i$, у складі яких виконується переміщення порожнього вагона по маршруту доставки, можуть мати не лише одну станцію перетину. Отже, перечеПЛення вагона може здійснюватись не лише на

першій попутній станції перетину маршрутів двох поїздів, але на будь-якій станції перетину. Тому постає потреба також і у виборі оптимальної станції перечеПЛення вагона. На вибір станції перечеПЛення може вплинути різниця в тарифах, узгодженість розкладу, тобто момент прибуття попереднього поїзда в послідовності поїздів, що входять до маршруту доставки порожнього вагона, має не лише передувати моменту відправлення наступного поїзда, але й бути віддаленим у часі настільки, щоб забезпечити можливість здійснення маневрових операцій з перечеПЛення вагона або групи вагонів

$$\theta(N_{r,c}^{i+1}, p_{s_{i+1}}) - \theta(N_{r,c}^i, p_{s_i}) \geq t_{s_i}^{ман}, \quad \forall v \in N, \forall \sigma \in s, \quad (6)$$

узгодженість розкладу, а також наявність або відсутність потрібної кількості вільних вагономісць на певних станціях

$$\sum_{r=1}^n \sum_{c=1}^n \left(x_{r,c} \left(N_{r,c}^y = v \right) \left(s_{r,c}^y = \sigma \right) \right) \leq q_{s_{r,c}^i}, \quad \forall v \in N, \forall \sigma, \quad (7)$$

де $\tau_r^{зф}$ – час закінчення роботи вантажного фронту, для якого виконується r -те замовлення з доставки порожнього вагона.

Отже, ця проблема являє собою задачу теорії розкладу комбінаторного типу, що була формалізована у вигляді моделі цілочисельного програмування. Розроблено процедуру оптимізації цієї математичної моделі у вигляді програмного продукту об'єктно-орієнтованими мовами Matlab та C#. На рис. 1 наведена діаграма класів мовою UML (англ. Unified Modelling Language), яка надає уявлення про архітектуру розробленої оптимізаційної процедури, що була створена з застосуванням принципів об'єктно-орієнтованого програмування.

Для оцінювання адекватності сформованої моделі та перевірки ефективності розробленої процедури було здійснено моделювання, як вихідні дані для якого був обраний абстрактний залізничний полігон, що має розгалужену мережеву структуру та налічує більше 70 технічних станцій. Ефективність розробленої процедури обумовлена використанням у її складі сучасного математичного апарату генетичних алгоритмів. Збіжність фінтес-функції генетичного алгоритму (рис. 2) доводить існування оптимуму сформованої моделі, що у свою чергу свідчить про її адекватність.

На рис. 3 наведена візуалізація оперативного плану розподілу порожніх вагонів і їхньої доставки до станцій місцевої роботи для своєчасного забезпечення

навантаження, який був отриманий при моделюванні з використанням сформованої математичної моделі та розробленої оптимізаційної процедури. На ній подано залізничний полігон і відображено маршрути доставки порожніх вагонів до станцій місцевої роботи з зазначенням номерів поїздів, задіяних у певних маршрутах. На ній вказані пункти пропозиції порожніх вагонів і пункти заявок на подачу вагонів для завантаження, а також зазначено, за рахунок яких пропозицій задовольняються заявки.

Як видно з наведеного плану (рис. 3), лише одна заявка не була виконана (станція 63) і тільки через обмежену пропозицію вагонів конкретного типу. При виконанні деяких заявок, як, наприклад, переміщення вагона від станції 27 до станції 61, спостерігається значний перепробіг порожнього вагона, однак таке рішення, отримане за допомогою сформованої моделі, обумовлене розміром штрафу за несвоєчасне подання вагона, що перевищує витрати на доставку вагона.

До переваг цієї моделі, зокрема, можна віднести той факт, що базовою розрахунковою одиницею в ній є вагон, що цілком відповідає концепції PSR, а також можливість прокладання маршрутів доставки порожніх вагонів, які можуть бути далекими від маршрутів, що відповідають тарифним відстаням, але за певних умов такі маршрути можуть бути раціональною альтернативою і повноправним елементом оптимального оперативного плану.

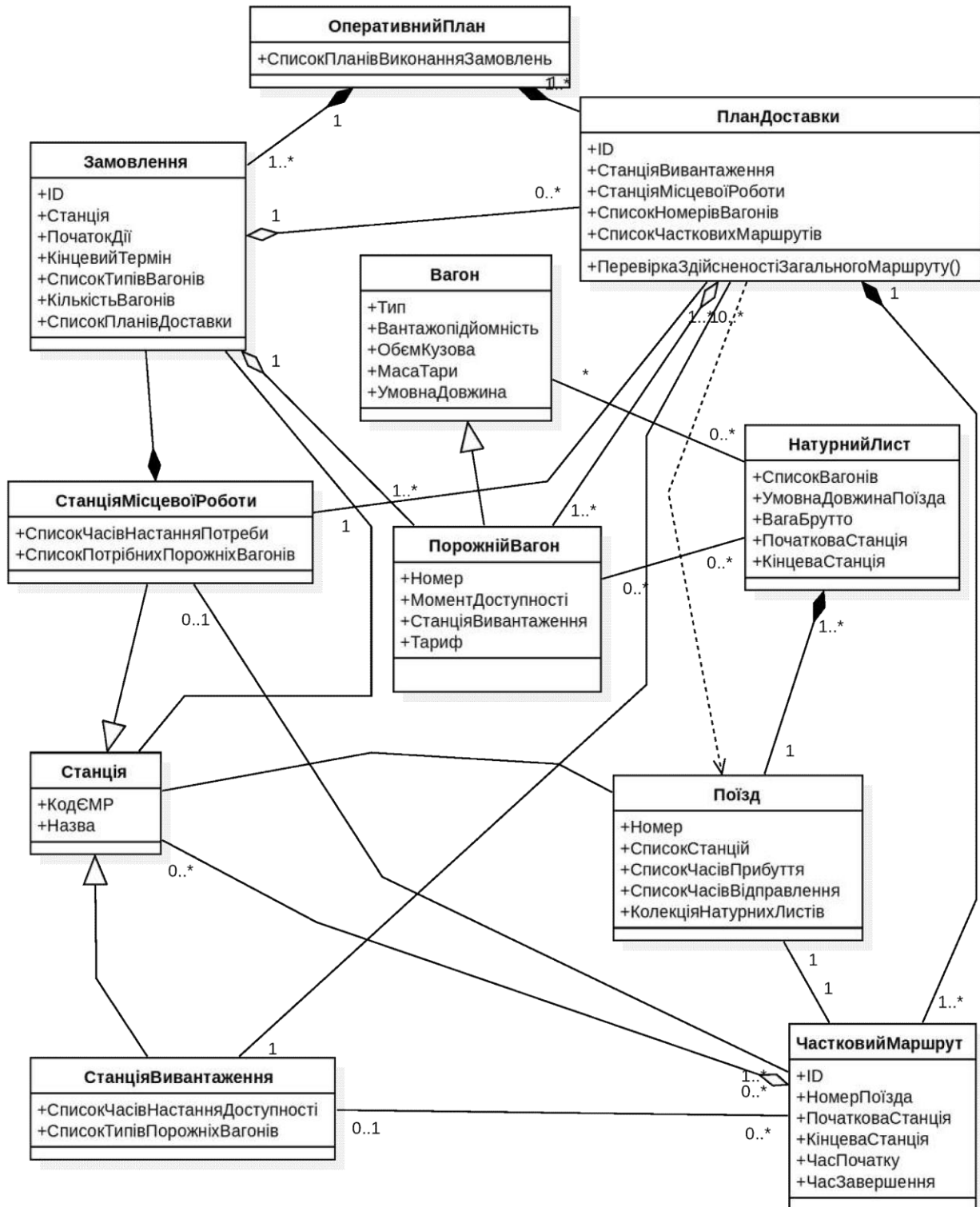


Рис. 1. UML-діаграма класів процедури оптимізації моделі побудови оперативного плану забезпечення порожніми вагонами станцій місцевої роботи

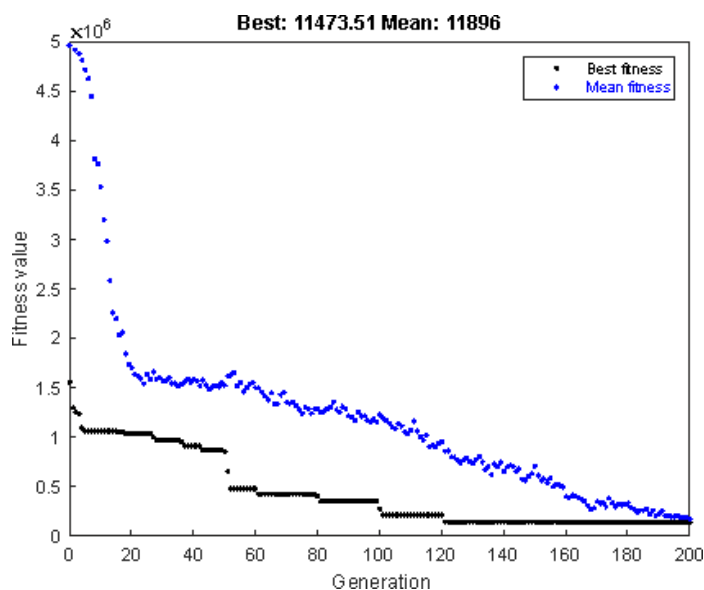


Рис. 2. Динаміка збіжності цільової функції під час виконання оптимізаційної процедури з застосуванням генетичного алгоритму

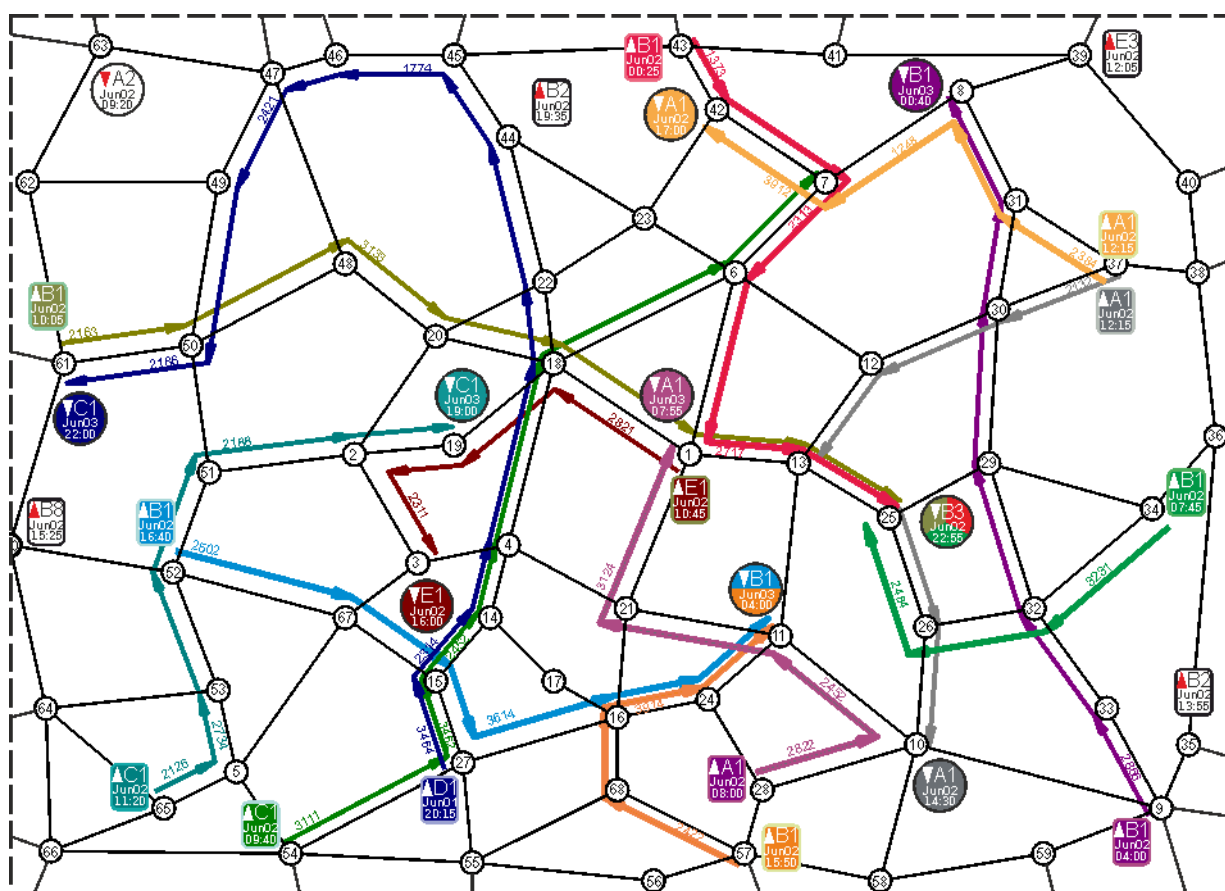


Рис. 3. Візуалізація оперативного плану розподілу порожніх вагонів і їхньої доставки до станцій місцевої роботи для своєчасного забезпечення навантаження, який був отриманий при моделюванні з використанням сформованої математичної моделі та розробленої оптимізаційної процедури

Висновки

Як показав аналіз, зростання конкуренції на транспортному ринку та у виробничій сфері призводить до збільшення вимог вантажовідправників до транспортних компаній. За таких умов підвищується складність вирішення деяких технологічних завдань, що є важливими складовими перевізного процесу. Одним з таких важливих завдань є забезпечення станцій місцевої роботи порожніми вагонами для виконання замовлень з навантаження. Під час цього дослідження було доведено, що труднощі, які заважали вирішенню завдання оперативного планування розподілу порожніх вагонів між пунктами навантаження в рамках старої парадигми організації вантажних залізничних перевезень, можуть бути подолані завдяки переходу на нову концепцію Precision Scheduled Railroading. Сформована на основі цієї концепції математична модель має певний рівень універсальності та дозволяє формалізувати проблему розподілу порожніх вагонів у вигляді оптимізаційної задачі теорії розкладу комбінаторного типу. Для оптимізації сформованої математичної моделі за допомогою мов програмування Matlab та C# була розроблена відповідна процедура, що використовує сучасний математичний апарат генетичних алгоритмів. Адекватність сформованої математичної моделі та ефективність розробленої процедури було доведено під час дослідження шляхом здійснення автоматизованого розрахунку на залізничному полігоні, який має розгалужену мережеву структуру та налічує близько 70 залізничних технічних станцій. Розроблена процедура дозволяє отримати розв'язок прикладної виробничої задачі з достатньою для практичного застосування точністю, що неможливо було отримати в рамках традиційного підходу. Також очевидним є той факт, що в сучасних умовах здійснення залізничних вантажних перевезень, які постійно ускладнюються, рівень розумово-психологічного навантаження на оперативно-керівний персонал залізниць є критичним. З огляду на проблему планування розподілу порожніх вагонів, слід відзначити, що за таких складних умов автоматизоване робоче місце інженера-вагонорозпорядника першочергово потребує інтеграції до його складу сучасної системи підтримки прийняття рішень (СППР), яка б виконувала складну рутинну обчислювальну роботу і могла забезпечити належний рівень обґрунтованості відповідних рішень і оперативних планів.

Отже, сформована математична модель і процедура її оптимізації можуть бути застосовані як елемент автоматизованої технології управління місцевою роботою в частині вирішення завдання побудови оперативного плану розподілу порожніх вагонів між станціями місцевої роботи з метою

своєчасного забезпечення пунктів навантаження рухомим складом.

Список використаних джерел

1. Спеші грузить: сможет ли новая система «Укрзалізницы» решить проблему нехватки вагонов: українська зернова асоціація. URL: <https://uga.ua/ru/news/speshi-gruzit-smozhet-linovaya-sistema-ukrzaliznytsi-reshit-problemu-nehvatki-vagonov/>.
2. Beurrier A., Demota, Ph., Lévine P., Pomerol J.-Ch. Empty freight railcar assignment by expert system. Control, Computers, Communications in Transportation: Selected Papers from the IFAC/IFIP/IFORS Symposium, (19-21 September 1989, Paris, France), *Artificial Intelligence in Operational Research*, 1990.
3. Shatokhin A., Bilenko G., Kuznetsova A., Kartsan I. Optimization of Empty Wagon Flows in the Formation of the Technical Work Plan for the Railway Network. *Transportation Research Procedia*. 2022. № 61. P. 361–365.
4. Upadhyay A., Bolia N. Combined empty and loaded train scheduling for dedicated freight railway corridors. *Computers & Industrial Engineering*. 2014. № 76. P. 23–31.
5. Sherali H. D., Lunday B. J. Equitable apportionment of railcars within a pooling agreement for shipping automobiles. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2011. 47(2). P. 263–283.
6. Song D.-P., Earl C. F., Optimal empty vehicle repositioning and fleet-sizing for two-depot service systems. *European Journal of Operational Research*. 2008. № 185(2). P. 760–777.
7. Залізничні вагони – працюючі пенсіонери : стаття у виданні «Урядовий кур'єр». URL: <https://ukurier.gov.ua/uk/articles/zaluznichni-vagoni-pracyuyuchi-pensioneri>.
8. Рябушка Ю. А. Система організації вантажних перевезень на основі тактичного планування. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: тези доповіді, 24–26 жовтня 2018 р., Харків, Україна*. 2018. №. 4 (додаток). С. 38.
9. Dick C. Tyler. Precision Scheduled Railroading and the Need for Improved Estimates of Yard Capacity and Performance Considering Traffic Complexity. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2021. 2675(10). P. 411–424.
10. Prokopov A., Prokhorov V., Kalashnikova T. Development of a model of support of local work due to the timely provision of stations by empty railcars in the conditions of implementation of the «Precision Scheduled Railroading» concept. *Multidisciplinary*

academic research, innovation and results: proceedings of the XXII International Scientific and Practical Conference, June 07–10, 2022 Prague, Czech Republic: ISG, 2022. P. 677–679.

11. Prokopov A., Prokhorov V., Kalashnikova T., Golovko T., Bohomazova H. Constructing a model for the automated operative planning of local operations at railroad technical stations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021. 3 (3 (111)). P. 32–41.

Prokopov A. O., Prokhorov V. M., Kalashnikova T. Yu. Development of a model for timely provision of local work stations with empty railcars based on the concept of Precision Scheduled Railroading.

Abstract. The possibility of further increasing the competitiveness of rail freight systems is a crucial factor in the fierce struggle in the transport market. Successful implementation of this opportunity involves meeting the increased requirements of cargo owners - primarily the efficiency of delivery of goods and the associated trend to reduce shipments in order to reduce storage costs and speed up the turnover of companies. This approach leads to a reduction in the number of cars in one order when making submissions to the freight fronts of enterprises and a corresponding increase in the number of applications. This situation increases the load on the distribution system of empty cars, which is already not functioning effectively enough. This study proposes a solution to the timely provision of local work stations with empty cars by implementing the concept of railways operating on precise operational plans (Precision Scheduled Railroading). The main features of this concept are the planning of transportation at the level of the car, the constant presence of cars in motion, the movement of freight trains on the rigid threads of the schedule and reduce the number of reformations of trains at sorting stations. Using this concept will easily get rid of related problems that hinder the effective solution of the problem of distribution of empty cars, such as, for example, lack of line capacity in the organization of pick-up and clean-up trains, the difficulty of predicting the availability of empty cars and more. Due to the application of this concept, the task of building an operational plan for providing local work stations with empty cars was presented in the form of an optimization model of integer programming. Also during the research the procedure of optimization of the offered model which uses the modern mathematical device of genetic algorithms was developed. The results of the calculations prove the effectiveness of the proposed approaches.

Keywords: distribution of empty railcars, local work stations, Precision Scheduled Railroading, genetic algorithms.

Надійшла 22.06.2022 р.

Prokopov Artem Oleksiiovych, postgraduate, Department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: prokopovartem1301@gmail.com
ID ORCID: 0000-0001-7324-4047

Prokhorov Viktor Mykolaiovych, PhD, Associate Professor, Department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: prokhorov@kart.edu.ua
ID ORCID 0000-0001-8963-6467

Kalashnikova Tetiana Yuriivna, PhD, Associate Professor, Department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: bulavina_ty@ukr.net
ID ORCID 0000-0001-6563-5945

Прокопов Артем Олексійович, аспірант кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: prokhorov@kart.edu.ua.
ORCID: 0000-0001-8963-6467.

Прохоров Віктор Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна.
E-mail: prokhorov@kart.edu.ua.
ID ORCID 0000-0001-8963-6467.

Калашнікова Тетяна Юрїївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна.
E-mail: bulavina_ty@ukr.net.
ID ORCID 0000-0001-6563-5945.