

Рукопис надійшов: 15.07.2022

Статтю опубліковано: 30.10.2022

УДК 656.2

DOI: 10.15587/1729-4061.2022.265668

Формування моделі планування швидкої доставки контейнерів залізницею в умовах інтермодальних перевезень на основі робастної оптимізації

Л. О. Пархоменко, Т. В. Бутько, В. М. Прохоров, Т. Ю. Калашнікова,
Т. В. Головка

Досліджено можливість створення технології швидкого залізничного сполучення для транспортування контейнерів між портом та підприємствами-клієнтами в ході здійснення інтермодальних перевезень. Метою розробки технології є зменшення частки використання автотранспорту на інтермодальних маршрутах та вирішення таким чином цілої низки пов'язаних з ним екологічних, транспортних, муніципальних та економічних проблем. Сформована технологія базується на принципах максимального наближення залізниці до кінцевих пунктів маршруту, мінімізації кількості проміжних видів транспорту та забезпечення максимальної швидкості просування контейнерів залізницею. З цією метою запропоноване застосування вантажних терміналів MetroCargo™ та модульних поїздів CargoSprinter. В ході дослідження була поставлена і вирішена задача надійного оперативного планування роботи парку таких поїздів для здійснення доставки контейнерів між портом і підприємствами в умовах "забруднених" вихідних даних. З цією метою задача формалізована у вигляді моделі змішаного програмування, що базується на принципах робастної оптимізації. Для здійснення оптимізації моделі із урахуванням принципів робастності була запропонована процедура, яка використовує двоконтурний генетичний алгоритм. В результаті моделювання було встановлено, що отриманий план лише на 6,5 % поступає за цільовим критерієм плану, який було отримано без урахування робастності. Було доведено, що розроблена модель дозволяє отримувати оперативний план доставки контейнерів залізницею, який є близьким до оптимального. В той же час, план є реалізованим навіть у випадку найбільш несприятливого збігу обставин у вигляді затримок, зсуву часових вікон роботи вантажних фронтів тощо, тобто в реальних умовах транспортного процесу.

Ключові слова: інтермодальні контейнерні перевезення, модульні контейнерні поїзди, робастна оптимізація, двоконтурний генетичний алгоритм.

1. Вступ

Зростання обсягів контейнеропотоків, що прямують водними, наземними та повітряними транспортними шляхами, не припиняється з квітня 1956 року, коли американський підприємець Малком Маклін вперше відправив партію контейнерів з Ньюарка до Хьюстона на переобладнаному танкері, здійснивши тим самим революцію у світовій торгівлі. Революційність застосування контейнерів

у галузі міжнародних перевезень полягала в тому, що вони надали можливість в декілька десятків разів зменшити витрати коштів і часу при здійсненні вантажних операцій, та, за рахунок зниження транспортних витрат, значно здешевити імпортовані товари. Однак масові переміщення вантажів у міжнародному сполученні і зараз є складним і відповідальним процесом, у якому окрім морського задіяні й наземні види транспорту, в тому числі й залізничний. Успішність та ефективність цього процесу залежить від надійності усіх ланок інтермодальної транспортної системи. Найважливішою ланкою, яка повинна забезпечувати взаємодію між наземними та морським видами транспорту, в тому числі за рахунок своєчасного та якісного планування і виконання вантажних операцій, – є припортові контейнерні термінали.

Контейнерні термінали морських портів з 90 років минулого сторіччя знаходяться у стані постійної модернізації та переоснащення. Однак, разом із збільшенням чисельності сучасного обладнання терміналів швидко зростають і контейнеропотоки, які їм доводиться обслуговувати. З 1990 року по 2021 рік загальний щорічний контейнеропотік зріс більше ніж у 10 разів і зараз перевищує 800 млн TEU. Таким чином, навіть маючи новітнє обладнання, сучасні припортові термінали стикаються з купою проблем, які зокрема пов'язані із використанням великої кількості одиниць автомобільного рухомого складу, в тому числі в якості допоміжних видів транспорту. Отже, подальше залучення автоперевізників на інтермодальні маршрути стикається з низкою непереборних обмежень.

За таких умов, раціональним шляхом розвитку інтермодальних перевезень є розробка і впровадження нових технологій, які забезпечать стримання використання автомобільної техніки та розв'язання цілої купи пов'язаних з нею проблем – від транспортних та технічних до комунальних і екологічних. Однак ключ до розв'язання цих проблем лежить на шляху розробки принципово нових транспортних технологій, що забезпечать рентабельну та конкурентоспроможну залізничну доставку контейнерів. Тому дослідження, присвячені формуванню основ таких технологій, є актуальними.

2. Аналіз літератури та постановка проблеми

Інтермодальні контейнерні перевезення характеризуються залученням великої кількості підприємств, обладнання, рухомого складу, інфраструктурних об'єктів, які відносяться до різних галузей економіки і технологічні процеси яких охоплюють різноманітні сфери діяльності людини. Отже система інтермодальних перевезень є джерелом складних технічних, економічних, екологічних і соціальних проблем, які в свою чергу приваблюють дослідників, які працюють на стику самих різноманітних наукових сфер. Однак особливий інтерес науковців викликають проблеми функціонування залізничного транспорту у складі системи інтермодальних перевезень та проблеми взаємодії залізничного і морського транспорту.

У роботі [1] за допомогою методів змішаного-цілочисельного програмування одночасно вирішуються задачі побудови плану перевалки контейнерів між суднами, дворами і поїздами та розкладу відправлення поїздів. Однак процесу формування поїздів приділено недостатньо уваги. У [2] вирішується проблема

рентабельності залізничних операторів при взаємодії з морським транспортом в ході здійснення інтермодальних перевезень в умовах мінливої кон'юнктури та нестабільного ціноутворення. В моделі використовуються принципи робастної оптимізації, однак складну проблему взаємодії морських і залізничних перевізників пропонується вирішувати лише за рахунок перерозподілу доходів, тобто суто в економічній площині. У [3] ті ж автори пропонують вирішення подібної проблеми взаємодії морських та залізничних операторів за допомогою моделі динамічного програмування, однак також пропонуються лише економічні, а не технічні заходи. У [4] вирішується задача організації інтермодальних перевезень на основі моделі пошуку оптимального балансу енерговитрат між залізничним і морським транспортом, однак такий підхід може вплинути лише на вибір маршруту і не вирішує технічних проблем взаємодії при зміні видів транспорту в портах. У [5] пропонується вирішувати проблему взаємодії видів транспорту у інтермодальному терміналі на основі оптимізації його параметрів за допомогою мультиагентних моделей у складі програмного продукту AnyLogic, однак такий підхід може бути корисним лише на стадії проектування і до того ж він все одно не вирішує навіть проблеми екології та прилеглих до порту територій. У [6] розглядаються виклики, що стоять перед дослідниками проблем взаємодії між портовим терміналом та залізничним транспортом, детально висвітлена велика кількість важливих проблем як стратегічного так і оперативного планування, однак не наведено жодних моделей для їх вирішення. У [7] розглядаються шляхи оптимізації взаємодії між портом і залізницею в першу чергу за рахунок узгодження графіка відправлення поїздів та плану перевантаження контейнерів, що надходять до порту, з метою збільшення частки прямого перевантаження контейнерів з суден на поїзди, однак практика останніх років виявила обмеженість таких підходів, особливо якщо вони використовуються без урахування імовірнісної складової транспортних процесів. У роботі також не були представлені принципово нові технічні або технологічні рішення для вирішення проблеми перевантаження портових терміналів, а лише запропоноване збільшення потужності кранів та маневрових засобів. У [8] розглядається задача формування контейнерних поїздів для доставки контейнерів від порту Генуї до вантажоотримувачів в глибині та на півночі Італії. Запропонована модель дозволяє не лише раціонально формувати блоки з фітінгових платформ, але й розглядає більш детальний рівень – формування блоків контейнерів, які завантажуються на платформи. Однак слід констатувати, що дана модель здатна лише несуттєво зменшити термін доставки і не націлена на забезпечення швидкого залізничного сполучення для транспортування контейнерів. У [9] розглядається можливість організації ефективного дальнього залізничного сполучення між країнами Азії та портами Північної Європи (Скандинавія, країни Балтії) і Середземномор'я (Греція) для транспортування контейнерів в ході здійснення інтермодальних перевезень. В рамках проекту ReOrient передбачається вирішення основних проблем сумісності залізничних систем країн Європи, таких як наявність великої чисельності різних систем сигналізації, централізації і блокування (СЦБ), різних стандартів тягового струму, зв'язку тощо. Ці

проблеми значно стримують розвиток контейнерних залізничних перевезень територією Європи.

Таким чином, проблема взаємодії залізничного та морського видів транспорту є комплексною. Вона щільно пов'язана з проблемами пропускної спроможності припортових терміналів, негативного впливу на прилеглу до терміналів міську інфраструктуру, проблеми екології. Однак останнім часом до всієї цієї купи проблем додається ще одна важлива проблема: взагалі можливість існування залізничних контейнерних перевезень на короткі та середні відстані. Адже з різних причин залізничний транспорт програє конкурентну боротьбу автомобільному в цьому сегменті ринку завдяки багатьом чинникам і не лише технічним, таким як швидкість доставки тощо, але й економічним, і в тому числі таким, які не пов'язані безпосередньо з перевізним процесом. Отже, дана проблема є комплексною і тому потребуватиме комплексних підходів для її вирішення. Однак сучасні розробки, як в сферах портового обладнання і залізничного транспорту, так і в сфері інформаційних технологій, надають певного оптимізму на цьому шляху.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є формування технології використання залізничного транспорту для швидкого транспортування контейнерів на сухопутній ділянці маршруту в ході здійснення інтермодальних перевезень, яка буде здатна покращити взаємодію залізниці і порту і дозволить залізничним підприємствам успішно конкурувати із автомобільним транспортом на ринку інтермодальних перевезень.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- виробити підходи, що дозволять забезпечити швидку і дешеву доставку контейнерів залізницею за можливості за схемою "від дверей до дверей" від порту до вантажоотримувача;
- розробити гнучку модель оперативного планування роботи залізничного підприємства по доставці контейнерів, яка дозволить забезпечити мінімізацію витрат контейнеро-годин під час формування составів та зробить привабливим для клієнтів використання залізничного транспорту на коротких і середніх дистанціях.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес сухопутної доставки контейнерів в ході здійснення інтермодальних перевезень. Предметом дослідження є технологія швидкої доставки контейнерів із застосуванням залізничного транспорту. Основна гіпотеза дослідження така: на сучасному етапі розвитку технічних засобів залізничного транспорту а також досягнень в сферах обчислень, обробки інформації та управління, існує можливість для створення технології транспортування контейнерів залізничними шляхами в рамках процесу інтермодальних перевезень. Дана технологія буде здатна значною мірою замінити автомобільний транспорт та вирішити таким чином цілу низку проблем, пов'язаних з трансфером контейнеропотоків з морського транспорту на сухопутний та їх просуванням сухопутною ділянкою маршруту.

Задачі оперативного планування вантажних залізничних перевезень зазвичай оперують великою кількістю акторів і тому завжди мають місце відсутність повноти потрібної інформації та випадковість подій. Таким чином, постановка задачі набуває певної невизначеності. Невизначеність у вихідних даних задачі ускладнює отримання якісного управлінського рішення. Оптимізаційні задачі, що мають справу із невизначеністю у даних або змінних, природа та форма представлення якої може бути різною, прийнято відносити до класу задач стохастичної оптимізації. Однак даний клас є найменш дослідженим зі всієї множини оптимізаційних задач, що обумовлює той факт, що задачі даного класу представляють значний інтерес дослідників-теоретиків. У той же час він також представляє ще більший практичний інтерес з огляду на те, що невизначеність в тій чи іншій формі притаманна будь-яким процесам реального світу. Отже розробка теорії та отримання надійних методів вирішення задач даного класу є ключем до покращення систем управління в багатьох сферах виробництва. Однак задачі, які можна віднести до даного класу є дуже різноманітними. Деякі автори вважають, що природа невизначеності має принципове значення. Як було зазначено вище, невизначеність може бути обумовлена недостатністю інформації або, наприклад, імовірнісною природою певного процесу або явища. Тому класичний підхід до постановки та вирішення задач стохастичної оптимізації передбачає максимальне використання наявної статистичної інформації щодо досліджуваних процесів, такої як параметри статистичних законів розподілу тощо, та її представлення і обробку за допомогою математичного апарату теорії ймовірностей. Однак такий підхід є дуже складним і витратним тому, що він потребує збору та обробки великої кількості статистичних даних та все одно не гарантує можливості врахування всіх необхідних факторів. Іншою важливою сучасною парадигмою в галузі стохастичної оптимізації є отримання надійних (робастних) рішень. Як було доведено [10] більшість реальних задач оптимізації є дуже чутливими до відхилень вихідних даних. Так, наприклад, відхилення у векторі розрахункових даних від реальних лише на 1–2 % може спричинити відхилення розрахункового оптимуму від реального на декілька десятків відсотків, що повністю нівелює практичну цінність отриманого рішення. З метою подолання даної проблеми був розроблений напрямок, який має назву «робастна оптимізація». Робастну оптимізацію можна розглядати як доповнення до підходу стохастичного програмування для вирішення проблем оптимізації з неповністю визначеними даними, які за її термінологією називають «забрудненими». Робастна оптимізація передбачає отримання такого рішення стохастичної задачі, яке б не втратило своєї практичної цінності навіть за умов, коли всі стохастичні змінні приймуть значення, що відповідатимуть найбільш несприятливому сценарію розвитку подій. З точки зору управління роботою модульних поїздів на полігоні під час доставлення контейнерів може видаватись, що найгіршим сценарієм є той, коли всі величини тривалості руху поїздів по перегонах приймуть свої максимальні значення. Однак, з огляду на те, що дана задача є також і задачею комбінаторної оптимізації, це твердження може виявитись хибним. Наприклад, якщо один поїзд здолає дільницю за мінімальний час та прибуде до певного вантажного фронту швидше за інший поїзд, вантажні операції з ним розпочнуться також раніше. В такому випадку ін-

ший поїзд буде змушений чекати, що в свою чергу може стати причиною його запізнення до закриття вантажного фронту на іншій під'їзній колії за планом його роботи. Таким чином, шукаючи найкраще рішення з найгірших варіантів розвитку подій, робастна оптимізація реалізує принцип мінімакса. Отже, отже величина імовірності в робастній оптимізації практично не має значення і тому такі змінні як, наприклад, величини тривалості просування поїздів між станціями або часові вікна доступності певних транспортних ресурсів, таких як, наприклад, вантажні фронти, доцільно представити у вигляді інтервальних чисел. Також в роботі були використані методи математичного моделювання, в процесі розробки процедури оптимізації моделі був використаний сучасний математичний апарат генетичних алгоритмів (ГА).

5. Результати дослідження можливості розробки технології швидкої доставки контейнерів залізницею при здійсненні інтермодальних перевезень

5.1. Окреслення підходів щодо спрощення трансферу контейнеропотоків та формування основ технології швидкого залізничного сполучення

Крах логістичних механізмів по всьому світу, що трапився за лічені місяці, стане тригером багатьох процесів у сфері транспорту і в першу чергу в галузі інтермодальних перевезень. Ці процеси неминуче призведуть до трансформації існуючих транспортних технологій в бік безпрецедентної гнучкості, варіативності та інтелектуалізації. Спостереження за подіями 2021 року не залишає жодних сумнівів відносно того, що не лише світ вже ніколи не буде колишнім, але й що вже ніколи не будуть колишніми технології інтермодальних перевезень. Як показав досвід за період пандемії, головною проблемою інтермодальних перевезень став колапс, спричинений перевантаженістю контейнерних терміналів. Ділянка від порту до вантажоотримувача, не зважаючи на постійне вдосконалення технологій, залишається найбільш проблемною частиною шляху. З одного боку цілком зрозуміло, що за рахунок автоперевізників її вирішити неможливо, зважаючи на подальше зростання обсягів інтермодальних перевезень. Подальший розвиток автомобільних контейнерних перевезень стримується постійно зростаючою кількістю обмежень, таких як, наприклад, екологічні обмеження, обмеження з максимальної вантажопідйомності транспортних засобів тощо. До того ж вартість оренди або володіння важкими автомобілями, які здатні перевозити 40-ка або 53-ох футові контейнери є високою. Крім того для перевезення кожного такого контейнера потрібен не лише окремий кошовний вагозов, але й окремий водій. Також дуже гостро постає проблема нестачі пропускної спроможності автодоріг, особливо це стосується припортової зони, яка крім того часто розташована на території великих міст або мегаполісів. З іншого боку, для доставки контейнерів вглиб континенту традиційно використовується залізниця. Однак тут також багато проблем. Однією з головних проблем з точки зору інтермодального оператора є те, що використання контейнерних поїздів не виключає необхідності залучення до транспортного ланцюга автоперевізників. Необхідність використання автомобільного транспорту обумовлена тим, що багато підприємств-вантажотримувачів віддалені від магістральних залізничних ліній. Отже на «останній милі» інтермодального маршруту майже

завжди використовується автотранспорт. До того ж така схема передбачає додаткові операції перевантаження і зберігання.

Таким чином, використання автомобільного транспорту при здійсненні інтермодальних перевезень має багато недоліків та створює велику низку додаткових проблем. Натомість використання залізничного транспорту є більш перспективним як з точки зору інтермодальних операторів, так і з точки зору морських портів, адже чим більше пропускна спроможність ланки порт–залізниця, тим більше вантажів порт зможе залучити і обробити і відповідно збільшити свої заробітки. Для клієнтів залізничний транспорт потенційно є більш привабливим в порівнянні з автомобільним з огляду на такі чинники як тарифи, більший рівень безпеки, незалежність від погодних умов тощо. Однак важливим економічним чинником є швидкість доставки і залізничний транспорт на коротких та середніх відстанях за ним значно поступається автомобільному. Однак збільшення терміну доставки навіть на добу особливо для підприємства, яке отримує або відправляє великі партії контейнерів, може призводити до суттєвих збитків з огляду на те, що таким чином відбувається сповільнення руху його обігових коштів. І значення цього фактору лише зростає адже в контейнерах зазвичай перевозять коштовні вантажі, а внаслідок високої інфляції останніх часів їх вартість постійно зростає. Застосування залізничного транспорту на коротких та середніх дистанціях в даний час зазвичай є недоцільним, адже воно поступається автомобільному саме швидкістю доставки. Так відбувається тому, що в даний час залізничний транспорт використовується в інтермодальних перевезеннях у вигляді маршрутних контейнерних поїздів або фітінгові платформи з контейнерами включаються до складу, наприклад, дільничних поїздів. За таких умов додатково витрачається час на накопичення составів, а у випадку дільничних поїздів час витрачається також і на переформування поїздів. До того ж час накопичення контейнерних поїздів збільшується ще й з причини затримок контейнерів на причалах внаслідок загромождження контейнерних площадок біля причалів.

Таким чином система інтермодальних перевезень складається з низки підсистем, потужності яких мають бути добре гармонізовані, щоб запобігти вузьким місцям у транспортному ланцюзі. Для того щоб задовольнити попит на контейнерні перевезення абсолютно необхідно зробити не лише інвестувати у впровадження нових технічних засобів і перебудову, але й у технології оперативне управління [11]. Отже для мінімізації або повного виключення автомобільного транспорту зі схеми інтермодальних перевезень необхідно настільки наблизити залізничні колії до кінцевих пунктів відправлення або призначення вантажів наскільки це практично можливо. І така можливість фактично вже існує, адже багато і великих і середніх підприємств і в Європі і у США мають власні так звані «під'їзні колії», які сполучають їх із магістральними залізничними лініями. Отже необхідно розробити транспортну технологію, яка б задовольняла технічним вимогам використання під'їзних колій для доставки контейнерів від порту «до дверей» вантажоотримувачів і була б у той же час економічно виправданою. У той же час інтеграція залізниці і порту також є одним з найважливіших стратегічних елементів його розвитку як з точки зору економіки так з і точки зору маркетингу. Існують порти в яких вже реалізована щільна інтеграція залізничної і

портової інфраструктури із використанням сучасного портового обладнання, яке дозволяє виключити необхідність використання інших видів транспорту при перевантаженні контейнерів із суден до поїздів. Така інтеграція не лише спрощує організацію роботи порту але й значно збільшує шанси залізниці на перехват замовлень на перевезення коштовних вантажів у автомобільних перевізників, що є дуже важливим в сучасних умовах жорсткої конкуренції на транспортному ринку. Така інтеграція також дозволяє збільшити пропускну спроможність сухопутної ділянки маршруту, яка безпосередньо примикає до порту. Це досягається за рахунок виключення необхідності перетину простору міста з перевантаженими дорогами колісною технікою такою як, наприклад, автоплатформи, човникові контейнеровози або Річстакери, що використовуються для транспортування контейнерів ввід причалу до терміналу. Однак стрімке зростання обсягів контейнерних перевезень поставило і таку модель під сумнів. Основною причиною є те, що велика кількість контейнерів потребувала терміналів з великою площею, хоча морські порти й до того були одними з найбільших споживачів землі в мегаполісах. Іншою причиною є те, що значно збільшилася не лише кількість контейнерів, але й контрагентів, таких як вантажовласники, вантажоотримувачі, експедитори, інтермодальні оператори тощо.

Очевидним фактом є те, що першочергові вимоги, які необхідно задовольнити, – це вимоги до рухомого складу. По-перше, корисна довжина колій вантажних районів може бути дуже обмеженою і здатною прийняти состав, який містить лише декілька вагонів. По-друге, ці колії в переважній більшості є неелектрифікованими. До того ж, рухомий склад повинен бути здатним до зміни напрямку руху та рухатись в обох напрямках по магістральних залізничних лініях з достатньо високою швидкістю.

Рухомий склад, який задовольняє даним вимогам, вже існує, це – модульні вантажні п'ятивагонні поїзди, які вперше були побудовані в Німеччині ще в 90-х роках минулого сторіччя. Дані поїзди відносяться до класу CargoSprinter – за назвою першого такого поїзда, який був розроблений і збудований в 1996 році фірмою Windhoff GmbH у співробітництві із державним оператором вантажних залізничних перевезень DB Cargo та оператором аеропортів компанією Fraport. Вочевидь компанія Fraport була зацікавлена в цьому поїзді саме як в рухомому складі для перевезення невеликих партій авіаконтейнерів. Слово «спринтер» у назві свідчить про те, що призначення цього поїзда полягало в швидкому перевезенні вантажів на короткі відстані. Відносно велика швидкість руху даного поїзда обумовлена в першу чергу невеликою масою. У складі поїздів CargoSprinter відсутній локомотив, а кожен вагон представляє собою моторну платформу, в верхній частині якої розташований майданчик для навантаження контейнерів, а в нижній – дизель-генераторні модулі та/або тягові електродвигуни. Таким чином, поїзди CargoSprinter відносяться до моторвагонного рухомого складу, що й обумовлює їх високу питому потужність, яка визначається як відношення потужності двигунів до маси рухомого складу. Додаткове зменшення ваги досягається також завдяки використанню візків Джейкобса для з'єднання безмоторних вагонів між собою. Отже, навіть якщо з'єднати декілька таких поїздів в один, то він все одно зможе рухатись значно швидше ніж зви-

чайний контейнерний поїзд. Технічні характеристики CargoSprinter дозволяють зчеплювати разом до 7 поїздів.

У свій час багатообіцяючий проект CargoSprinter фактично спіткала невдача. Але ця невдача відбулася не через його технічну недосконалість або технологічну незатребуваність, а зовсім з інших причин, пов'язаних зі складнощами виробництва окремих запчастин. Зараз пройшло вже більше 20 років і технології виробництва значно просунулися вперед. До того ж з'явилися зовсім інші технології, які здатні зробити ці модульні поїзди ще більш досконалішими та економічними. У сучасних умовах їх доцільно було б зробити електричними, такими, що живляться від електромережі під час руху по магістральній лінії і від акумуляторних батарей під час руху по під'їзних коліях або коліях вантажних районів для здійснення вантажних операцій. В будь-якому разі вартість ремонту і обслуговування цих поїздів у разі залучення їх до інтермодальних перевезень складе малопомітну частку витрат, особливо на фоні майже десятикратного росту тарифів на транспортування контейнерів, який відбувся всього лише протягом 2020–2021 років.

Отже, поїзди CargoSprinter дозволять наблизити інтермодальних перевізників до клієнтів без використання автомобільного транспорту. Однак, як було зазначено вище, для створення синергетичного ефекту важливо максимально інтегрувати залізницю із портом. Найкращим варіантом інтерації є такий, що дозволить мінімізувати необхідність проміжного зберігання контейнерів та використання додаткових видів інтермодального транспорту такого як Річстакери або рейкові козлові крани тощо. Технічно ця задача видається дуже складною, вона токою і є. Однак на ринку існує готове рішення – система MetroCargo™. Системи MetroCargo™ представляють собою модульні вантажні залізничні термінали, обладнані складними прецизійними електро-механічними комп'ютеризованими системами, які призначені для завантаження і розвантаження контейнерних поїздів в автоматичному режимі [12, 13]. Системи MetroCargo™ дозволяють кардинально (більше ніж у 10 разів) скоротити витрати часу на виконання вантажних операцій.

5. 2. Формування моделі побудови оперативного плану розвозу контейнерів за допомогою модульних поїздів.

Таким чином, пропонується організувати процес транспортування контейнерів за допомогою парку модульних поїздів CargoSprinter. З цією метою необхідно розробити модель оперативного планування їх роботи. Модель повинна забезпечити відхід від традиційної практики використання залізничного транспорту під час здійснення інтермодальних перевезень, яка обмежується лише прямими маршрутними контейнерними поїздами або включенням фітінгових платформ із контейнерами до складу повноскладних вантажних поїздів, на накопичення яких під час формування та переформування витрачається багато часу. Модель повинна здійснювати раціональний розподіл заявок на транспортування контейнерів між модульними поїздами, а також детально планувати маршрут та черговість виконання операцій з кожним з них.

Також модель повинна забезпечити можливість отримання надійного оперативного плану в реальних умовах транспортного процесу, в ході якого мають місце систематичні відхилення часів моментів настання подій та тривалості транспортних операцій від запланованих або нормативних значень, а також певний рівень невизначеності, пов'язаний з точністю інформації, яку надають клієнти.

Першочерговою компонентою вихідних даних повинна бути множина контейнерів. Кожен елемент цієї множини представляє собою кортеж, що містить такі атрибути, як момент часу доступності контейнера для завантаження (після вивантаження з контейнеровозу у порту або після доставки контейнера вантажовідправником до вантажного району під'їзної колії та початку його роботи); його маса; довжина у футах; номер вершини графа залізничної мережі, що відповідає під'їзній колії вантажоотримувача; момент часу закінчення роботи вантажного району під'їзної колії або момент часу закінчення процесу завантаження судна-контейнеровозу; час спливання терміну доставки. Під'їзні колії – залізничні шляхи, призначені для транспортного обслуговування одного або декількох підприємств, які пов'язані із загальною мережею залізниць безперервним рейковим шляхом і належать залізниці або підприємству [14]. Також вихідними даними є параметри залізничної мережі: топологія колійних сполучень, що задана графовою структурою і вершини якої представляють залізничні станції та вантажні райони під'їзних колій, а дуги – залізничні перегони між роздільними пунктами. Також для кожної дуги повинні бути вказані «вікна», які не зайняті згідно до графіка руху і в продовж яких може бути відправлений модульний контейнерний поїзд. Ці вікна повинні бути розраховані з урахуванням типу сигналізації на перегонах («автоблокування», («напівавтоблокування» тощо). Вихідні дані для вирішення даної задачі повинні також містити множину вантажних пунктів. Характеристика кожного пункту повинна містити інформацію про часові «вікна» його роботи, середній час завантаження та розвантаження одного контейнера. Таким чином, порт також може бути представлений як вантажний пункт.

Слід також зазначити, що для забезпечення можливості використання моделі у реальних умовах, вона повинна враховувати вплив потоків випадкових подій, який постійно відчуває будь який транспортний процес. Особливо це стосується процесу інтермодальних перевезень, в якому задіяні декілька видів транспорту, зокрема й ті, нормальне функціонування яких безпосередньо залежить від погодних умов, які у свою чергу можуть бути важко передбачуваними навіть на протязі нетривалого часового періоду. Як відомо, впливу випадкових потоків відмов піддаються будь які елементи транспортної системи: рухомий склад, елементи транспортної інфраструктури, пристрої сигналізації, зв'язку та інформаційного забезпечення. Значна затримка прибуття судна, закриття залізничної колії, поломка модульного поїзда – всі ці події можуть стати причиною того, що вже прийнятий план розвозу контейнерів буде виконати неможливо. Такі рідкі події не лише дуже важко передбачити, але й недоцільно враховувати при формуванні плану. Для нівелювання їх впливу на транспортний процес більш доцільно в оперативному режимі скорегувати план, тобто зробити повторні розрахунки з урахуванням нової інформації про поточний стан системи. А отже, необхідно передбачити можливість здійснення розрахунків не лише з певного початко-

вого положення, а й з будь якого поточного положення. Однак все ж таки існує певний вид невизначеності в процесі розвозу контейнерів за допомогою модульних поїздів, який необхідно враховувати. Він пов'язаний з особливостями технологічного процесу на залізниці. Однією з особливостей поїздів типу CargoSprinter є їх висока швидкість. Швидкість є їх значною перевагою, адже таким чином вони можуть бути відправлені зі станції фактично не порушуючи існуючий графік руху поїздів. Однак все ж таки час на переміщення від однієї станції до іншої не є сталою величиною і може коливатись в певних межах. Навіть за умови сталої швидкості руху поїзда CargoSprinter затримка його відправлення зі станції може відбутися за рахунок того, що в цей час відбувається відправлення іншого поїзда, до того ж для звільнення цим поїздом першої блок дільниці також потрібен певний час. До того ж, якщо попереду поїзда CargoSprinter на перегоні рухається не швидкий або швидкісний пасажирський, а важкий вантажний поїзд, то він також буде обмежувати швидкість пересування модульного поїзда. На однокільних дільницях, якщо на перегоні вже знаходиться зустрічний поїзд, необхідно дочекатися його прибуття на станцію для отримання можливості відправлення поїзда на перегін, що також може зайняти значний час. Іншим фактором, що є частою причиною збільшення перегінного часу ходу поїздів є обмеження швидкості, пов'язані з ремонтними роботами на перегонах. Однак найбільш негативний вплив на ступінь невизначеності задачі планування вносять вантажні фронти і під'їзні колії підприємств, адже вони майже ніколи не мають чіткого графіка функціонування, до того ж вони певний час можуть бути недоступними також і з причини обслуговування інших клієнтів, адже однією під'їзною колією можуть сумісно користуватися одразу декілька підприємств з метою мінімізації витрат. Отже цільова функція моделі робастної оптимізації, яка представляє експлуатаційні витрати, може бути записана наступним чином:

$$\begin{aligned}
 & F(c, x, n, \Psi, \tau) = \\
 & = \max_{(\Psi, \tau)} \left\{ \begin{aligned}
 & e_{\text{пк}} \sum_{i=1}^n \left(d(p_0^i, x_1^i(c_i)) + \sum_{j=2}^{\#x_i} d(x_{j-1}^i(c_i), x_j^i(c_i)) \right) + \\
 & + e_{\text{пг}} \sum_{i=1}^n \psi(i, \#x_i) + \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^{\#x_i} e_{i,j}^{\text{пг}} \theta(\psi(i, j) - \tau_{i,j}'') + \\
 & + e_{\text{кмк}} \sum_{i=1}^n \left(d(p_0^i, x_1^i(c_i))(q_{\text{max}}^i - q_{0,1}^i) + \right. \\
 & \left. + \sum_{j=2}^{\#x_i} (d(x_{j-1}^i(c_i), x_j^i(c_i))(q_{\text{max}}^i - q_{j-1,j}^i)) \right)
 \end{aligned} \right\} \rightarrow \min_{(c, x, n)} \quad (1)
 \end{aligned}$$

де c – змінна підмножина загальної множини контейнерів, що розглядається до перевезень в межах планового періоду;

c_i – змінна підмножина множини c , яка містить контейнери, які призначені для перевезення i -им модульним поїздом;

x – множина, що містить послідовності виконання перевезень всіма модульними поїздами на протязі планового періоду;

n – чисельність робочого парку модульних поїздів;

$x_i(c_i)$ – підмножина, множини x , що містить послідовність виконання перевезень i -им модульним поїздом і яка залежить від підмножини c_i ;

$\#x_i$ – потужність підмножини x_i , що дорівнює кількості пунктів (вантажних фронтів) на маршруті i -го поїзда;

$e_{\text{пк}}$ – вартість поїздохілометра;

$e_{\text{пт}}$ – вартість поїздогодини;

$e_{\text{кмк}}$ – вартість порожнього пробігу контейнеро-місце-кілометра;

$\tau'_{i,j}$ – момент часу початку роботи j -го вантажного фронту на маршруті i -го поїзда, який заданий інтервальним числом;

$\tau''_{i,j}$ – момент часу закінчення роботи j -го вантажного фронту на маршруті i -го поїзда, який заданий інтервальним числом;

τ – множина кортежів, кожен i -ий елемент якої містить 2 інтервальних числа $\{\tau'_j, \tau''_j\}$, що визначають часові рамки функціонування j -го вантажного фронту;

$d(x_{j-1}^i(c_i), x_j^i(c_i))$ – відстань у залізничному сполученні між $j-1$ -им та j -им пунктами маршруту i -го поїзда;

$d(p_0^i, x_1^i(c_i))$ – відстань у залізничному сполученні між початковим пунктом маршруту (0) i -го поїзда, в якому він знаходиться на момент початку планового періоду, та першим пунктом маршруту (1), що задається змінним вектором x ;

Ψ – множина, що містить значення моментів часу закінчення вантажних операцій з поїздами на вантажному фронті, кожен елемент множини є результатом розрахунку із використанням функції $\psi(i,j)$;

$\psi(i,j)$ – функція, що повертає значення моменту часу закінчення вантажних операцій з i -им поїздом на j -му вантажному фронті його маршруту та початку переміщення до наступного вантажного фронту. Дана функція може бути задана за допомогою наступної рекурсивної формули:

$$\psi(i, j) = \begin{cases} \max(\tau^0 + t_{i,0,1}^{\text{перем}}, \tau'_{i,1}, \tau_{i,1}^{\text{вист}}) + t_{i,1}^{\text{вант}} & j = 1. \\ \max(\psi(i, j-1) + t_{j-1,j}^{\text{перем}}, \tau'_{i,j}, \tau_{i,j}^{\text{вист}}) + t_{i,j}^{\text{вант}} & j > 1. \end{cases} \quad (2)$$

де τ^0 – момент часу початку планового періоду;

$t_{i,j-1,j}^{\text{перем}}$ – змінний час переміщення i -го поїзда між $j-1$ -им та j -им пунктами маршруту, який не враховує час очікування вантажних операцій;

$\tau_{i,j}^{\text{вист}}$ – момент часу виставлення контейнерів підприємством на майданчик вантажного фронту j -ої під'їзної колії (з цього моменту вони готові до завантаження на i -ий поїзд);

$t_{i,j}^{\text{вант}}$ – тривалість вантажних операцій на j -му вантажному фронті з i -м поїздом;

У складі даної функції використовується функція \max тому, що момент початку виконання вантажних операцій з поїздом визначається як максимальне значення з трьох величин: моменту прибуття поїзда до вантажного фронту, моменту початку роботи вантажного фронту та моменту доступності контейнерів для завантаження (момент виставлення контейнерів підприємством-вантажовідправником на майданчик вантажного фронту). Якщо на даному вантажному фронті з даним поїздом виконуються лише операції по вивантаженню контейнерів, тоді значення величини $\tau_{i,j}^{\text{вист}}$ приймається за 0.

Перший доданок представляє собою витрати, що пов'язані з пересуванням поїздів. Другий доданок представляє витрати, пов'язані з часом, що витрачається на безпосереднє здійснення перевезень а також очікування та здійснення вантажних операцій. Третій доданок представляє собою витрати що виникають у вигляді штрафів у разі несвоєчасної доставки контейнерів. Для деяких пунктів, на яких здійснюється вивантаження контейнерів, вони можуть бути неактуальними, однак для деяких можуть бути значними. Найбільш показовий приклад – несвоєчасна доставка контейнерів у порт для завантаження на судно може викликати затримку судна із виплатою відповідного штрафу (демередж). Або, навіть якщо судно не було затримано а його власники або оператори мали право згідно договору відправити його не дочекавшись контейнерної партії для завантаження, все одно судноходні компанії стягують штраф з інтермодальних операторів у разі резервування перевізних потужностей без пред'явлення вантажів до перевезення. Даний штраф, який наприклад, у компанії MSC (Mediterranean Shipping Company) має назву «no show bookings surcharge», складає щонайменше \$300 за 1 TEU. Четвертий доданок представляє собою додаткові витрати, пов'язані з пробігом порожніх контейнеромісць у складі поїзда. Даний доданок фактично є штрафною функцією, яка застосовується для підвищення ефективності використання рухомого складу шляхом мінімізації ступеня недовантаження модульних поїздів та величини їх пробігу в такому стані.

Оптимізацію даної функції необхідно здійснювати з урахуванням технологічних обмежень, що притаманні процесу транспортування контейнерів.

Перше обмеження звужує область припустимих рішень таким чином, щоб при виконанні вантажних робіт на будь якому вантажному пункті будь якого поїзда виключити можливість завантаження на нього більшої кількості контейнерів ніж його максимальна контейнеромісткість:

$$\sum_{k=1}^m (\#c_{i,k}^{\text{нав}} - \#c_{i,k}^{\text{вив}}) \leq q_{\max}^i, \forall m \in x_i, i = 1..n. \quad (3)$$

Друге обмеження необхідне для забезпечення можливості виконання робочим парком модульних поїздів всієї множини робіт без порушення часових меж планового періоду:

$$\max \psi(i, \#x_i) \leq \tau^{\text{m}}, \forall i, i = 1..n, \quad (4)$$

де $\tau^{\text{п}}$ – часовий горизонт планування;

Третє обмеження необхідне для забезпечення можливості кожним модульним поїздом виконання вантажних операцій в кожному пункті його маршруту до моменту його закриття:

$$\max \psi(i, j) \leq \tau''_{i,j}, \forall i, \forall j, i = 1..n, j = 1..x_i. \quad (5)$$

Використання функції \max в обмеженнях, в які входять змінні, які відчують вплив невизначеності, обумовлене необхідністю забезпечення робастності обмежень.

Наступним етапом є процес оптимізації моделі. Слід зазначити, що на протязі двох останніх десятиріч на напрямку вирішення задач робастної оптимізації були зроблені певні досягнення. Наприклад, у роботах [15, 16] були сформульовані підходи, які дозволяють шляхом певних перетворень цільової функції та обмежень представити задачу робастної оптимізації у вигляді задачі опуклого програмування. Вирішення даної задачі пропонується здійснювати за допомогою спеціально розробленого методу еліпсоїдів. Однак дані підходи можуть бути ефективними лише за певних умов. Зокрема вони передбачають, що модель має гладку цільову функцію. Однак в задачі побудови оперативного плану роботи модульних поїздів ця умова не виконується, адже вона відноситься до класу задач комбінаторної (тобто дискретної) оптимізації. Таким чином, ефективне вирішення даної прикладної задачі як і будь-якої складної виробничої задачі в робастній постановці потребує розробки індивідуального методу оптимізації. Специфічність даної задачі, як і багатьох прикладних задач в цілому, полягає в тому, що вони зазвичай не потребують знаходження абсолютного оптимуму цільової функції, а лише наближення до нього з певною точністю. За таких умов слід відмовитись від спроб розробки аналітичних методів, та віддати перевагу іншим класам методів, таким як, наприклад, евристичні методи. Одним з головних напрямків евристичних методів оптимізації є генетичні алгоритми (ГА). Генетичні алгоритми у якості кандидата для застосування при вирішенні даної задачі мають цілу низку переваг. По-перше, вони дозволяють автоматизувати процес вирішення складних задач, навіть тих, що мають велику розмірність, завдяки можливості ефективного використання обчислювальних потужностей ЕОМ. По-друге, вони не мають обмежень на застосування лише з гладкими цільовими функціями, а отже можуть бути застосовані для вирішення задач комбінаторної оптимізації.

Складність задачі планування роботи модульних поїздів в робастній постановці полягає в тому, що для відшукування надійного плану необхідно одночасно здійснювати мінімізацію і максимізацію цільової функції. Для гладких цільових функцій існує метод еліпсоїдів [17], однак можливість і успішність його застосування залежить від багатьох факторів і в тому числі не в останню чергу від досвіду і майстерності дослідника. У випадку даної задачі планування ми маємо справу з задачею дискретної оптимізації і тому застосування даного методу є априорі неможливим. Для оптимізації сформованої моделі було запропоновано метод, що базується на використанні сучасного математичного апарату

ГА [18]. Ідея методу полягає в каскадному застосуванні двох ГА. Схема алгоритму запропонованого методу наведена на рис. 1. Зовнішній ГА використовується для пошуку оптимальних значень вектора керуючих змінних, що відповідають мінімуму витрат і відповідно мінімуму цільової функції, яка представлена фітнес-функцією ГА, внутрішній ГА використовується для пошуку значень вектора інтервальних змінних, що переважно представляють тривалості виконання операцій, які моделюють найбільш несприятливий варіант розвитку подій для даного екземпляру вектора керуючих змінних.

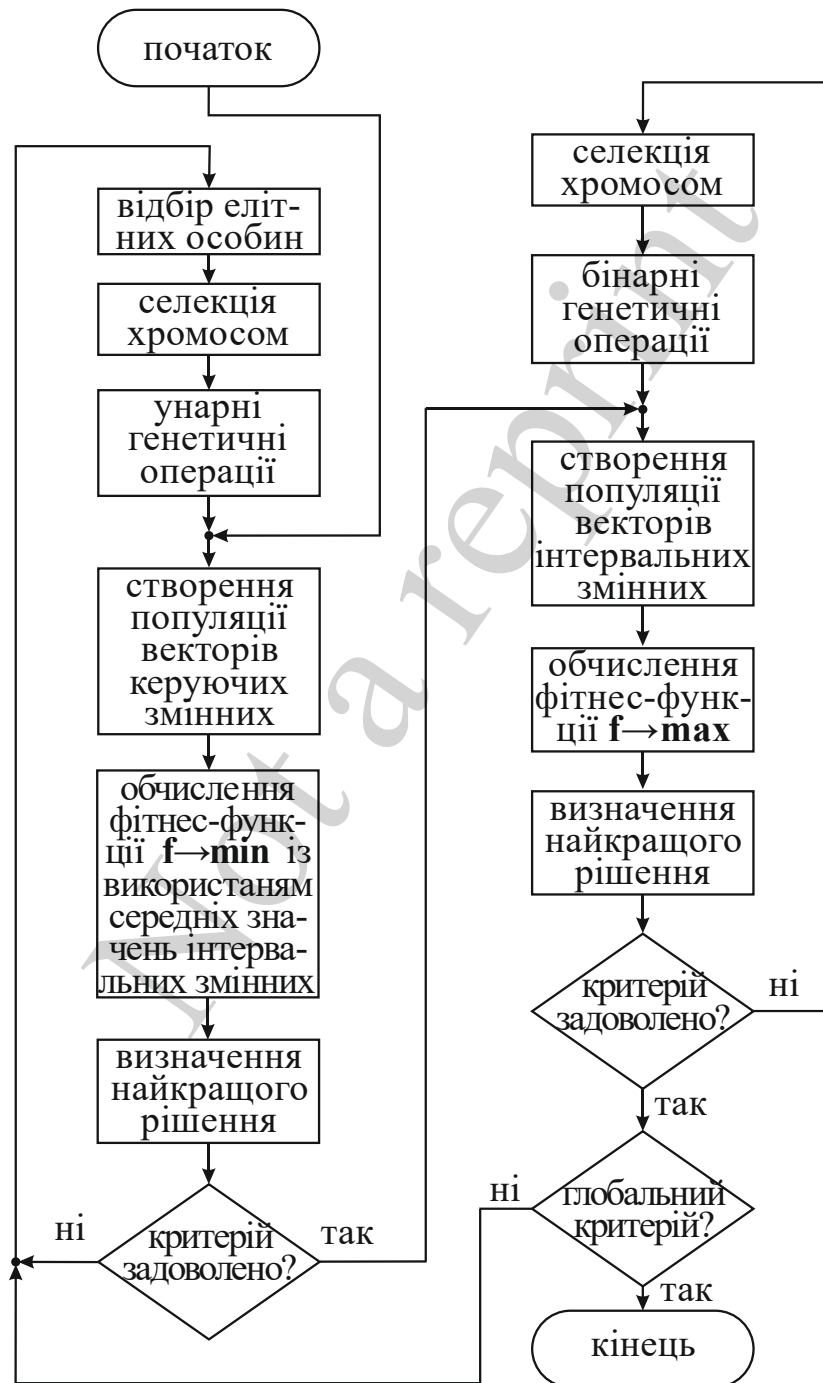


Рис. 1. Блок-схема каскадного генетичного алгоритму для вирішення задачі побудови оперативного плану роботи модульних контейнерних поїздів в робастній постановці

Такий підхід із використанням двох контурів ГА теоретично потребуватиме виконання значних обсягів обчислень, особливо у випадку великої розмірності задачі. Для зменшення обчислювального навантаження доцільно максимально спростити обчислення у внутрішньому контурі алгоритму.

На основі сформованої математичної моделі та запропонованого алгоритму із використанням мови Matlab було розроблено процедуру її оптимізації у вигляді прорамного забезпечення. За допомогою даного прорамного забезпечення було здійснено моделювання на абстрактному полігоні (рис. 2), який налічує декілька десятків залізничних станцій, до яких примикають під'їзні колії підприємств. Одна залізнична станція (станція №1) примикає безпосередньо до порту та облаштована спеціальним вантажним обладнанням MetroCargo для портових терміналів. В результаті процесу оптимізації була отримана схема маршрутів виконання замовлень з розвозу контейнерів (рис. 2).

Також в результаті процесу оптимізації був отриманий оперативний план роботи модульних контейнерних поїздів при виконанні замовлень у вигляді плана-графіка (рис. 3).

Отриманий план спрямований на реалізацію 15 заявок на транспортування контейнерів як від порту до вантажних дворів підприємств-клієнтів так і в зворотному напрямку. Крім того до цього числа входять і заявки (2 заявки) на транспортування контейнерів (в тому числі порожніх) між підприємствами або між підприємствами та сухопутними контейнерними терміналами, що розташовані в межах полігону. В отриманому оперативному плані задіяні 4 модульних поїзда, адже саме ця кількість була визначена моделлю як мінімально необхідна для задоволення всіх заявок. Як можна бачити з плану-графіка (рис. 2), незважаючи на те, що конфігурація вікон роботи вантажних фронтів підприємств є найбільш несприятливою і на декількох під'їзних коліях тривалість роботи вантажних фронтів взагалі становила не більше ніж 2÷3 години, загальні втрати, пов'язані з невиробничим простоем рухомого складу, становили всього лише 0,33 поїздо-години (простій поїзда № 4 біля станції № 1) та 0,66 контейнеро-години (поїзд був завантажений двома контейнерами). Також в ході моделювання було встановлено, що отриманий оперативний робастний план виявився лише на 6,5 % гіршим за цільовим критерієм моделі (сумарними експлуатаційними витратами) від плану, що отриманий без урахування невизначеності у вигляді "забруднених" вихідних даних. Однак у разі настання випадку найгіршої комбінації значень вихідних даних, реалізація звичайного плану взагалі була б неможливою без оперативного корегування і навіть із застосуванням корегування вона виявилась до 40 % дорожчою в порівнянні із робастним планом.

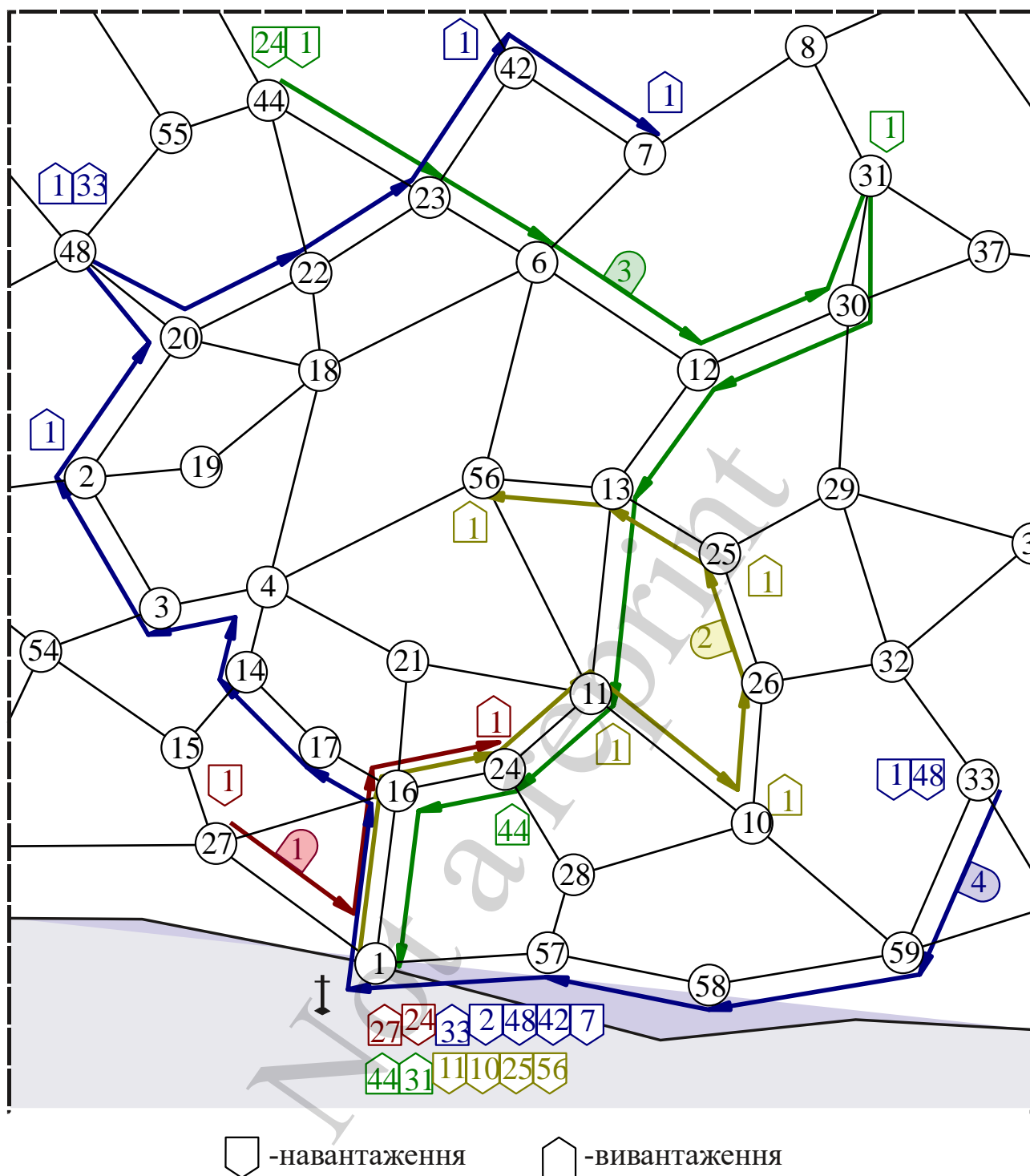


Рис. 2. Абстрактний залізничний полігон та схема маршрутів виконання замовлень з розвозу контейнерів, отримана в результаті процесу оптимізації

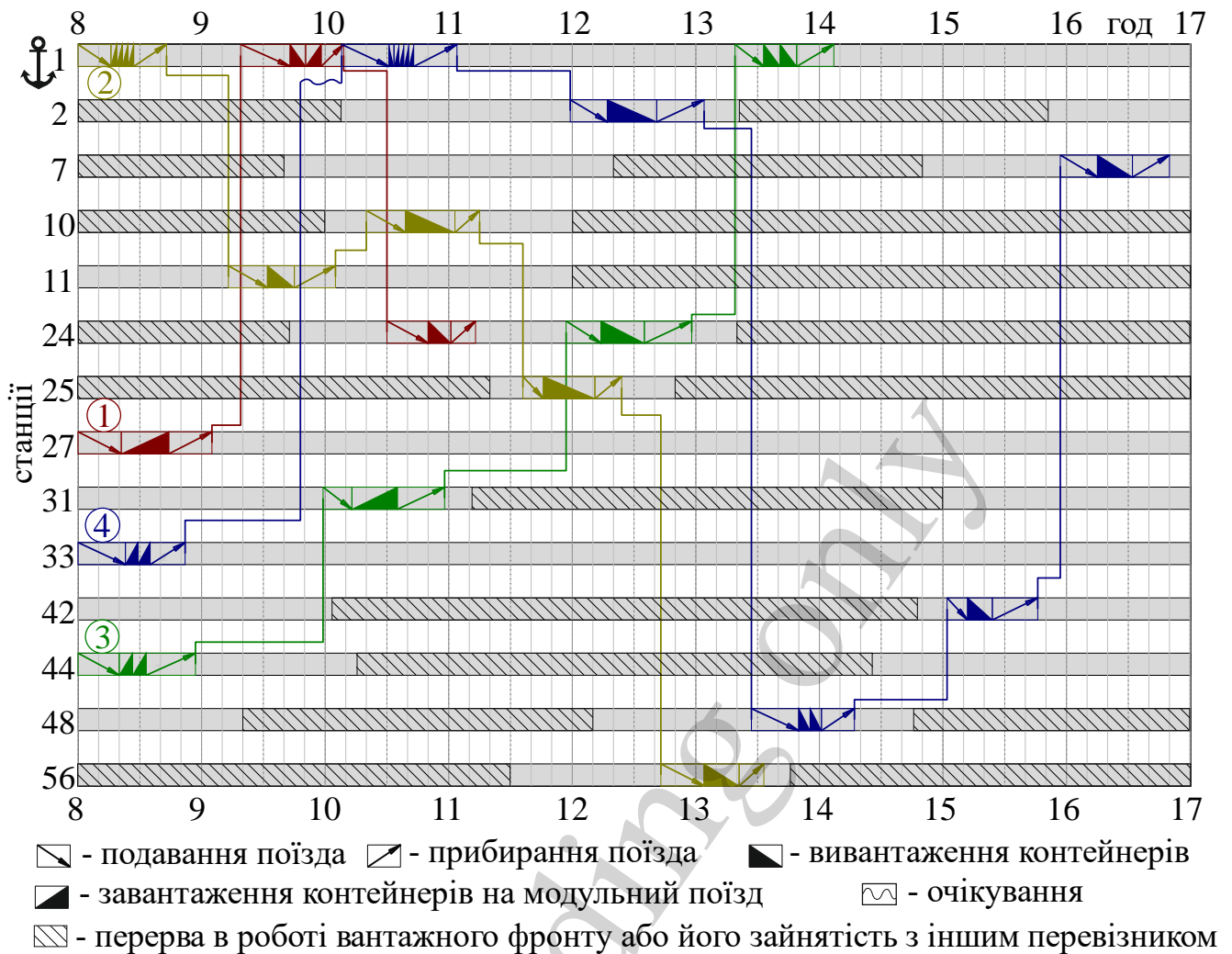


Рис. 3. План-графік роботи модульних контейнерних поїздів при виконанні замовлень з розвозу контейнерів, отриманий в результаті процесу оптимізації

6. Обговорення результатів дослідження можливості розробки технології швидкої доставки контейнерів

Дослідження технологічного процесу інтермодальних перевезень в частині взаємодії морських перевізників з іншими видами транспорту, і в першу чергу автомобільним, виявило існування низки різнопланових взаємопов'язаних проблем. Було доведено, що вирішення або значне покращення стану цих проблем потребує скорочення застосування автомобільного транспорту, який використовується при здійсненні інтермодальних перевезень, і особливо того, який взаємодіє із інтермодальними припортовими терміналами. Виробити підходи для вирішення зазначеного комплексу проблем вдалося завдяки тому, що на ринку вже існують, хоча й окремо, такі сучасні технічні рішення як, наприклад, системи прямого перевантаження контейнерів з судна на поїзд MetroCargo™ та модульні контейнерні поїзди типу CargoSprinter. Однак розквіт їх масового використання ще попереду і цілком залежить від концепцій і технологій їх застосування, які ще тільки доведеться розробити. Дослідження саме і присвячене розробці інформаційно-технологічного рішення, яке представляє модель оперативного планування роботи парку модульних поїздів і яке є необхідною надбу-

довою над згаданою вище запропонованою технічною базою. Задачу побудови оперативного плану доставки контейнерів було формалізовано у вигляді моделі робастної оптимізації, яка містить робастну цільову функцію (1) та робастні обмеження (3)–(5). Використання робастності дозволило забезпечити високий рівень адекватності моделі реальним умовам транспортного процесу. Для забезпечення максимальної деталізації обчислення експлуатаційних витрат, які й представляють собою критерій цільової функції моделі, в залежності від прийнятих управлінських рішень, необхідно було формалізувати складні просторово-часові взаємозалежності між транспортними операціями. Це вдалося зробити завдяки введенню до складу моделі функції обчислення часових інтервалів, яка використовує рекурсію (2). Важливою складовою успішного застосування оптимізаційної моделі на практиці є наявність процедури її оптимізації. Обчислення моделей робастної оптимізації, особливо в дискретному просторі, представляє окреме завдання виняткової складності, адже навіть для гладких неперервних цільових функцій існує лише один аналітичний метод, до того ж можливість застосування якого на практиці є вкрай обмеженою. Однак запорука успішності вирішення цього завдання по-перше полягала у тому, що в ході практичного застосування моделі відшукування глобального оптимуму із аналітичною точністю є бажаним, але не є критично важливим. По-друге, вдалося, використовуючи сучасний математичний апарат м'яких обчислень, розробити та реалізувати у вигляді програмного продукту процедуру оптимізації моделі, яка базується на запропонованому двоконтурному генетичному алгоритмі (рис. 1) і дозволяє за раціональний час отримувати оперативний план із достатньою точністю. Отриманий план (рис. 3) за рахунок визначення необхідної кількості раціонального розподілу заявок між ними та послідовностей їх виконання на основі моделі і забезпечує виконання всієї множин замовлень в часових межах планового періоду (від 8:00 до 17:00 години) в найбільш несприятливих умовах. При цьому загальні втрати часу внаслідок невиробничого простору модульних поїздів становили лише 20 хвилин. До того ж визначення моделлю послідовності виконання операцій відбувається одночасно із визначенням оптимального маршруту слідування модульних поїздів на залізничному полігоні (рис. 2). З цієї метою процедура оптимізації використовує також графові алгоритми, такі як алгоритм Дейкстри та інш. Таким чином, слід зазначити, що запропонована модель варує не лише економічними чинниками як у [1–3] з метою саморегулювання системи інтермодальних перевезень, а дозволяє вирішувати управлінські завдання в технічній площині. Також розроблена модель не лише визначає оптимальні маршрути доставки, як у [4], або здатна моделювати процес доставки контейнерів лише на рівні симуляції як у [5], а дозволяє отримувати готові комплексні управлінські рішення на рівні тактичного і оперативного планування. До того ж, запропонована модель використовує новітні підходи і дозволяє вийти за рамки як традиційних технологій взаємодії залізничного і морського транспорту, так і традиційних технологій організації контейнерних залізничних перевезень, на яких базується дослідження [7].

Слід також зазначити, що впровадження запропонованої технології буде пов'язане з певними труднощами. Негативна тенденція, що пов'язана з перехо-

дом підприємств на автомобільний транспорт при доставці контейнерів, призвела до того, що значна кількість під'їзних колій знаходиться у занедбаному стані і потребуватиме певних ремонтних робіт для повторного введення в експлуатацію. В одних країнах, таких як, наприклад, США, дана тенденція викликана низькою в порівнянні з автомобільним транспортом швидкістю доставки контейнерів залізничним транспортом та вигідними тарифами автоперевізників, в інших країнах, таких як країни Східної Європи, вона викликана нестабільністю економіки та падінням обсягів промислового виробництва внаслідок світової економічної кризи, пандемії тощо. Також слід зазначити, що адекватність отриманого оперативного плану роботи модульних поїздів може бути забезпечена лише за умови, якщо реальні значення величин, які в моделі представлені змінними середовища у вигляді інтервальних чисел, не вийдуть за межі цих інтервалів в ході реалізації цього плану. Отже, границі цих інтервалів повинні бути оцінені з якомога більшою точністю при підготовці вихідних даних. Необгрунтоване розширення меж цих інтервалів може сприяти дотриманню зазначеної вимоги та потраплянню фактичних даних в межі інтервалів, однак отриманий таким чином оперативний план може виявитись значно менш оптимальним, тобто може відбутись суттєве погіршення значення цільового критерія.

До недоліків дослідження слід віднести той факт, що в ході його проведення було зроблене припущення, яке передбачає що модульний поїзд, маючи високу швидкість пересування, може бути відправлений диспетчерським наказом зі станції перед будь яким вантажним поїздом практично не викликаючи його затримки як на станції так і на перегоні. Однак існує багато країн, в яких рух вантажний і пасажирських поїздів відбувається по одних й тих же залізничних лініях. Швидкість руху пасажирського рухомого складу є вищою за швидкість модульних контейнерних поїздів, отже вони не можуть бути відправлені перед пасажирським поїздом без виділення окремої нитки розкладу. Таким чином вплив розкладу на швидкість просування модульних поїздів між станціями враховано лише в загальному вигляді, без взяття до уваги конкретних даних графіка руху. До того ж графік руху також передбачає технологічні вікна для ремонту колій та інші види обмежень руху, які також не були враховані в дослідженні.

В ході практичного використання розробленої моделі слід враховувати обмеження, що пов'язані з обчислювальною складністю, адже комбінаторна задача, до того ж в робастній постановці, може потребувати значних обчислювальних ресурсів. Таким чином необхідно забезпечити відповідність потужності комп'ютерної системи до розмірності задачі.

У світлі подальшого розвитку моделі, в ній більш детально слід врахувати процеси руху модульних поїздів по залізничних дільницях, адже в багатьох країнах спостерігається брак пропускнуої спроможності залізничної інфраструктури особливо в припортових зонах. Доречі дозволяється виконувати зчеплення модульних поїздів і прослідування в зчепленому стані залізничними коліями попутної частини маршруту. Це надасть можливість економно витратити пропускну спроможність залізничних ліній та здешевити перевезення особливо в країнах з високою вартістю ниток графіка руху поїздів. Отже можливість зчеплення модульних поїздів доцільно врахувати в подальших дослідженнях. Таким чи-

ном, запропонований підхід в сукупності зі сформованою моделлю можна розглядати як основу нової технології використання залізничного транспорту при здійсненні інтермодальних контейнерних перевезень.

7. Висновки

1. Сформовано підхід для вирішення комплексу проблем, що пов'язані із взаємодією морського із сухопутними видами транспорту у порту і припортових терміналах, а також екологічних і муніципальних проблем, пов'язаних з домінуванням автомобільного транспорту на сухопутних ділянках маршруту в процесі здійснення інтермодальних перевезень. В рамках цього підходу було запропоновано заміщення автомобільних перевізників залізничними за рахунок впровадження технічних рішень, таких як сучасна системи прямого перевантаження контейнерів з судна на поїзд MetroCargo™ та використання модульних контейнерних поїздів типу CargoSprinter в рамках системи інтермодальних перевезень. Це дозволить підвищити ефективність взаємодії залізничних і морських перевізників в умовах здійснення інтермодальних перевезень: мінімізувати необхідність зберігання контейнерів на площадках біля причалів а також на складах припортових терміналів, зменшити кількість вантажних операцій, кардинально скоротити використання проміжного інтермодального автомобільного транспорту такого як, наприклад, річстакери, порталні перевізники, мобільні крани тощо, як на території порту і терміналів так і на припортових муніципальних територіях. Збільшити швидкість доставки контейнерів на коротких і середніх дистанціях, забезпечивши за можливістю доставку "до дверей" без використання автомобільного транспорту.

2. З метою забезпечення високої ефективності використання запропонованих технічних засобів та функціонування системи інтермодальних перевезень в цілому, було сформовано модель оперативного планування роботи парку модульних поїздів залізничного оператора, який виконує доставку контейнерів на коротких і середніх дистанціях в ході здійснення процесу інтермодальних перевезень.

Дана модель, враховуючи певний рівень невизначеності вихідних даних щодо часових рамок транспортних операцій, дозволяє розраховувати надійний оперативний план, який навідь за самих несприятливих умов, у сенсі комбінації значень інтервальних змінних вихідних даних, дозволить виконати завдання по доставці контейнерів вчасно, в повному обсязі і з мінімальними витратами, що було доведено у ході моделювання.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Література

1. Yan, B., Jin, J. G., Zhu, X., Lee, D.-H., Wang, L., Wang, H. (2020). Integrated planning of train schedule template and container transshipment operation

in seaport railway terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 142, 102061. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102061>

2. Liu, D., Yang, H. (2012). Dynamic Pricing Model of Container Sea-Rail Intermodal Transport on Single OD Line. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 12 (4), 122–127. doi: [https://doi.org/10.1016/s1570-6672\(11\)60216-x](https://doi.org/10.1016/s1570-6672(11)60216-x)

3. Liu, D., Yang, H. (2013). Optimal Slot Control Model of Container Sea-Rail Intermodal Transport based on Revenue Management. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 96, 1250–1259. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.142>

4. Fan, Q., Jin, Y., Wang, W., Yan, X. (2019). A performance-driven multi-algorithm selection strategy for energy consumption optimization of sea-rail intermodal transportation. *Swarm and Evolutionary Computation*, 44, 1–17. doi: <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2018.11.007>

5. Muravev, D., Hu, H., Rakhmangulov, A., Mishkurov, P. (2021). Multi-agent optimization of the intermodal terminal main parameters by using AnyLogic simulation platform: Case study on the Ningbo-Zhoushan Port. *International Journal of Information Management*, 57, 102133. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102133>

6. Ambrosino, D., Asta, V., Crainic, T. G. (2021). Optimization challenges and literature overview in the intermodal rail-sea terminal. *Transportation Research Procedia*, 52, 163–170. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.01.089>

7. Yan, B., Zhu, X., Lee, D.-H., Jin, J. G., Wang, L. (2020). Transshipment operations optimization of sea-rail intermodal container in seaport rail terminals. *Computers & Industrial Engineering*, 141, 106296. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106296>

8. Morganti, G., Crainic, T. G., Frejinger, E., Ricciardi, N. (2020). Block planning for intermodal rail: Methodology and case study. *Transportation Research Procedia*, 47, 19–26. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.068>

9. Nair, R., Miller-Hooks, E. D., Mahmassani, H. S., Arcot, V. C., Kuo, A., Zhang, K. et. al. (2008). Market Potential for International Rail-Based Intermodal Services in Europe. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2066 (1), 21–30. doi: <https://doi.org/10.3141/2066-03>

10. Ben-Tal, A., Nemirovski, A. (2002). Robust optimization – methodology and applications. *Mathematical Programming*, 92 (3), 453–480. doi: <https://doi.org/10.1007/s101070100286>

11. Kozan, E. (2000). Optimising container transfers at multimodal terminals. *Mathematical and Computer Modelling*, 31 (10-12), 235–243. doi: [https://doi.org/10.1016/s0895-7177\(00\)00092-3](https://doi.org/10.1016/s0895-7177(00)00092-3)

12. Metrocargo and MetrocargoCity innovative solution for intermodal shipment. URL: http://www.bestufs.net/download/Workshops/BESTUFS_II/Vilnius_Sep07/BESTUFS_Vilnius_Sep07_Ferraris_I-Log.pdf

13. Пархоменко, Л. О., Калашнікова, Т. Ю., Прохоров, В. М. (2021). Підвищення інтероперабельності залізничної транспортної системи України при здійсненні інтермодальних контейнерних перевезень на основі технології

MetroCargo™. Innovations and prospects of world science – Proceedings of IV International Scientific and Practical Conference. Vancouver, 312–317.

14. Prokopov, A., Prokhorov, V., Kalashnikova, T., Golovko, T., Bohomazova, H. (2021). Constructing a model for the automated operative planning of local operations at railroad technical stations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (3 (111)), 32–41. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.233673>

15. Ben-Tal, A., Goryashko, A., Guslitzer, E., Nemirovski, A. (2004). Adjustable robust solutions of uncertain linear programs. *Mathematical Programming*, 99 (2), 351–376. doi: <https://doi.org/10.1007/s10107-003-0454-y>

16. Ben-Tal, A., Nemirovski, A., Roos, C. (2003). Extended Matrix Cube Theorems with Applications to μ -Theory in Control. *Mathematics of Operations Research*, 28 (3), 497–523. doi: <https://doi.org/10.1287/moor.28.3.497.16392>

17. Shor, N. Z. (1985). *Minimization Methods for Non-Differentiable Functions*. Springer, 164. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-82118-9>

18. Yang, T., Kuo, Y., Cho, C. (2007). A genetic algorithms simulation approach for the multi-attribute combinatorial dispatching decision problem. *European Journal of Operational Research*, 176 (3), 1859–1873. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.10.048>

Not a reprint