

Ковальов Д.Д., аспірант  
(Український державний університет залізничного транспорту)

## Використання генетичних алгоритмів при плануванні залізничних перевезень у міжнародному сполученні

*Стаття розглядає проблеми і перспективи розвитку прикордонних терміналів України з країнами ЄС у воєнний та післявоєнний періоди. Проведено аналіз сучасного стану вантажних перевезень у європейському напрямку, проблеми та коротко- і довгострокові перспективи розвитку залізниць. Залізничний транспорт відіграє ключову сприяючу роль до інтеграції України у європейську транспортну систему. Це відкриває можливості до реалізації плану відбудови та розвитку залізниць.*

**Ключові слова:** залізнична інфраструктура, вантажні перевезення, контейнерні перевезення, генетичні алгоритми, оптимальний маршрут.

### Вступ

Незважаючи на потенціал для швидкого розвитку, Україна знаходиться у досить вразливому економічному становищі. Основними проблемами у країні досі залишаються корупція, відкладання проведення реформ та з лютого 2022 року до цього додається війна проти РФ. Станом на осінь 2023 року повномасштабне вторгнення та ведення бойових дій РФ проти України залишається головним негативним чинником, який ускладнює та уповільнює усі економічні та політичні процеси у країні. Однак з іншої сторони теперішня ситуація зміцнює стосунки з країнами ЄС, створює передумови для інвестування у відбудову країни та модернізацію існуючої інфраструктури; оскільки залізничний транспорт України підпадає під дану категорію, доцільно освітити проблеми залізниці та шляхи їх вирішення.

### Актуальність

АТ «Укрзалізниця» увійшла у воєнний період як найбільший роботодавець країни зі штатом у 231 тисячу працівників, прибутком у 17 мільйонів доларів у 2021 році, компанія забезпечила 82% вантажних і 50% пасажирських перевезень. На період 2022 з січня до квітня було здійснено перевезень на 65,9 млн тонн вантажів. Порівнюючи з минулим роком (2021), такий показник відповідає шістдесяти дев'яти відсоткам від усіх вантажів, транспортованих залізницею. Водночас у січні-квітні 2022 року залізницею перевезено 7,4 млн пасажирів, що на 1,5 млн пасажирів більше, ніж за відповідний період 2021 року. Найбільший приріст (64%) відбувся у березні 2022 року через евакуацію людей. Таке перевезення було безкоштовним. Водночас, після скорочення та поступового скасування руху евакуаційних поїздів, пасажиропотік суттєво зменшився, як наслідок – у квітні 2022 року було перевезено на 19% менше пасажирів, ніж за аналогічний період попереднього року. Від початку військових подій в Україні залізниця перевезла пасажирськими вагонами у східні регіони більш ніж сім тисяч тонн гуманітарної допомоги. Також розвивається напрямок вантажних перевезень – це понад тисяча чотириста вагонів за місяць з

© Ковальов Д.Д. 2024

гуманітарними вантажами із закордону до найбільших українських міст. Укрзалізниця здійснює евакуацію людей: у середньому 3 млн пасажирів на місяць, у тому числі 40 тис. пасажирів - до сусідніх країн. На всіх вузлових станціях пасажиром надається необхідна допомога, вивантажується гуманітарна допомога, здійснюється харчування та спорядження. Водночас через бойові дії відбулося значне падіння вантажопотоків (за 4 місяці 2022 року на 31% порівняно з відповідним періодом 2021 року). Фактично було перервано транзитне сполучення на міжнародних коридорах, що сполучають Азію – Європу. Транзитні перевезення залізницею за час війни (березень-квітень 2022 року) зменшилися проти рівня відповідного періоду 2021 року на 88,4%. Противник постійно завдає прицільних ракетних ударів по інфраструктурі Укрзалізниці. Станом на п'яте травня 2022р загальна сума збитків, завданих АТ «Укрзалізниця» через знищення активів Компанії внаслідок воєнної агресії становить 6,8 млрд грн.

### Аналіз досліджень і публікацій

Інтерес adeptів транспорту до розвитку контейнерних перевезень стабільно зростає [5,8]. Це пов'язано з перевагами та особливостями, які контейнерні перевезення мають порівняно зі звичайними способами транспортування [6,7].

Також слід враховувати сучасну політичну ситуацію та процеси які відбуваються на прикордонних терміналах під час воєнного стану в країні [3, 4].

### Мета дослідження

Мета дослідження полягає в удосконаленні процесів планування залізничних перевезень у міжнародному сполученні. Це можливо досягти пошуком шляхів перерозподілу вагонопотоку на прикордонних терміналах України. Оскільки задача носить оптимізаційний характер, доцільно порівняти певні математичні моделі, беручи до уваги трудомісткість завдання. Перспективним є використання генетичних алгоритмів, оскільки вони можуть бути ефективно застосовані у транспортній залізничній логістиці України.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

Відповідно до проекту плану відновлення України (виданий у 2022р) виділяють 2 типи проблем, що потребують вирішення: термінові та довгострокові. Оскільки тема роботи присвячена залізниці розглядаються лише потреби пов'язані з цим видом транспорту.

Термінова потреба: усунення перешкод співпраці з ЄС

У 2021 році основний експорт України (80% за обсягом) і велика частка критичного імпорту (наприклад, вугілля) йшли через порти, які зараз заблоковані. Навіть якщо буде досягнуто припинення вогню/зняття блокади, диверсифікація логістики є важливою високий пріоритет.

Розширення пропускної спроможності на кордонах з ЄС:

- Будівництво додаткових залізниць до кордону ЄС і Дунаю для розширення мультимодальності із залізницями ЄС і дунайськими портами;

- Будівництво транскордонних сільськогосподарських транспортних засобів ЄС. сховищ і терміналів;

- Ремонт і модернізація залізничних сортувальних станцій на ключових маршрутах (зокрема експортних);

- Технічне обслуговування, обладнання для перебезування вантажних вагонів із колії 1520 на 1435 мм

- Модернізація існуючих автомобільних/залізничних пунктів пропуску на кордоні з ЄС та будівництво додаткових;

- Розвиток інфраструктури і пропускної здатності портів Дунаю.

Довгострокові цілі: оновити інфраструктуру та зміцнити взаємозв'язок.

У минулому транспортна інфраструктура була значно недоінвестована (наприклад, 94% локомотивів старше 25 років, а активна реконструкція доріг почалася лише в 2018 році). Крім того, є значні збитки від війни, Україна досить велика країна, і негативний вплив поганої інфраструктури посилюється.

1. Термінова відбудова та розвиток інфраструктури:

- Будівництва, відновлення та переобладнання колій (включно з пошкодженнями війни), забезпечення мультимодальності з українськими портами та залізницями ЄС;

- Будівництво, реконструкція та модернізація доріг та мостів (включаючи збитки від війни), забезпечення мультимодальності з українськими портами та залізницею;

2. Довготермінова відбудова та розвиток інфраструктури:

- Будівництва, відновлення та переобладнання колій (включаючи електрифікацію), забезпечення мультимодальності з українськими портами та залізницею ЄС;

- Оновлення залізничних вагонів і локомотивів;

- Будівництва, відновлення та переобладнання доріг, забезпечення мультимодальності з українськими портами та залізницею;

- Будівництво високошвидкісної залізниці Київ–Варшава. Це розширить мультимодальність із залізницями ЄС.

Виходячи з запропонованого західними партнерами ідей з модернізації прикордонних терміналів, можна дійти висновку, що подальша реконструкція станцій призведе до ще більших простоїв на них. Тому є доцільним розглянути перерозподіл вагонопотоків із найбільш навантажених станцій на менш зайняті. Така ідея передбачає доволі масивний граф з великою кількістю точок на мережі залізниць. Пропонується застосування математичних методів на етапі планування задля пошуку найоптимальнішого шляху.

Спектр застосування математичних моделей та підходів постійно розширюється в галузі транспортної логістики. Пошук оптимальних маршрутів слідування транспортних засобів є однією із задач, яку дуже легко сформулювати, але часом складно вирішити. Вона полягає у пошуку найкоротшого чи найдешевшого маршруту від початку до кінця, маючи безліч можливих шляхів слідування. Конкретний розв'язок задачі (аналіз довжин усіх можливих відрізків та обрати найкоротший варіант) зазвичай опиняється доволі трудомістким процесом. Маючи 15 точок на графі ми отримуємо 43 мільярди маршрутів та для 18 точок кількість зростає до 177 білйонів. Для прикладу уявімо, що ми маємо суперкомп'ютер, який видає результат для 30 точок за 60 хвилин; у такому випадку для 32 точок потрібно витратити більш ніж 1 місяць на пошук відповіді.

Алгоритми пошуку оптимальних маршрутів можна поділяють на 2 групи: точні та евристичні (неточні) методи.

Точні методи. Характерна особливість цих методів - гарантія знаходження оптимальних рішень при високій загальній трудомісткості процесу. Тому точні методи здебільшого застосовують при роботі з порівняно простими задачами, що не містять великої кількості даних для обробки. Незважаючи на це вони набувають широкого застосування, коли мова заходить про оптимізаційні процеси у галузі перевезень, промислового виробництва, управлінні матеріальними потоками тощо.

До точних методів відносять: метод повного перебору (Brute Force), метод гілок та меж (Branch and Bound), метод динамічного програмування (Dynamic Programming) тощо.

Метод повного перебору (Brute Force). Алгоритм повного перебору (метод грубої сили) проводить пошук усіх можливих варіантів вирішення завдання. Він є найбільш точним, але актуальний лише при невеликій кількості даних. Цей метод гарантує знаходження оптимального вирішення «задачі комівояжера», але через свою пряmlinійність його не доцільно застосовувати при роботі з великими об'ємами даних; оскільки це призводить до значних часових витрат на пошук розв'язку.

Метод гілок та меж. Представлений точний метод є модернізацією методу грубої сили, але на

відміну від останнього він не враховує варіанти які задалегідь не мають правильного вирішення. Метод гілок та меж зберігає усі переваги точних алгоритмів, однак при великих значеннях точок  $n$  його використовувати не доцільно. Для роботи та доцільності застосування методу необхідні 2 умови: розгалуження і знаходження оцінок (границь).

Перше описує процес утворення підмножин менших розмірів від початкової кількості допустимих значень змінної  $X$ . Отримані підмножини створюють умовне «дерево», його також називають деревом меж та гілок, або деревом пошуку. Гілками утвореного дерева вважають підмножини значень змінної  $X$ .

Головний недоліком цього методу – це необхідність повністю вирішувати задачі лінійного програмування, аналізуючи усі гіпотетично допустимі рішення. Громіздкі за об'ємом даних завдання роблять метод гілок і меж недоцільним у використанні, хоча він заслуговує повної довіри у вирішенні задач цілочисельного лінійного програмування.

Метод динамічного програмування (Dynamic Programming). Використовуючи динамічне програмування для пошуку серед усіх можливих варіантів шукають оптимальне рішення, тобто таке щоб досягти екстремального значення певної цільової функції. Оптимізація заданої задачі проводиться розподілом її на складові, більш прості задачі. Таким чином можна значно скоротити час роботи алгоритму порівняно з більш прямолінійними методами. Все зводиться до вирішення таких «підзадач» та об'єднання отриманих результатів разом для одержання остаточного (оптимального) рішення.

Загалом, застосування лише цих методів не є достатнім. Оскільки, витрати часу на пошук оптимуму не є прийнятними. Сильна сторона точних методів – це 100% вирішення задачі, за умови невеликих вхідних даних, чи відсутності потреби у терміновості отримання рішення.

Евристичні (неточні) методи. Для компенсації недоліків точних методів часто використовуються неточні, або евристичні алгоритми і методи. Однією із основних переваг є те, що вони мають надзвичайно швидкий час виконання операцій, порівняно з точними. Це стає можливим завдяки тому, що вони навіть не беруть до уваги непідходящі для обчислень дані. Такий підхід набирає широкого застосування для великих за кількістю даних задач оптимізації цільової функції.

Алгоритм Крістофідеса (Christofides' Algorithm). Представлений алгоритм є рішенням задачі комівояжера для випадків, де відстані утворюють метричний простір та виконуються симетричність і нерівності трикутника. Описано алгоритм «наближення», який гарантує, що отримане рішення буде на відстані не більше  $3/2$  від довжини оптимального вирішення.

Алгоритм  $k$ -найближчих сусідів (NearestNeighbour). Класифікаційний підхід, який заснований на використанні, обчислених між об'єктами відстаней, для класифікації інших об'єктів у просторі їх властивостей. Об'єкти з найменшою до них відстанню утворюють окремих клас.

Метод  $k$ -найближчих сусідів (KNN) є метричним алгоритмом, який використовується для автоматичної класифікації об'єктів. Його головний принцип полягає в тому, що об'єкт переходить в клас, до якого належать найбільші за кількістю представники серед його сусідів.

Жадібний алгоритм (Greedy). Жадібний алгоритм – це простий і прямолінійний евристичний алгоритм, який засновується на виборі найкращого варіанту на кожному кроці та не звертає уваги на можливі наслідки. Його мета – отримати оптимальне рішення в кінці процесу, виходячи з наявних даних на певному етапі. Оптимізація маршруту зазвичай може бути вирішена за допомогою жадібного алгоритму, який є простим у виконанні і часто дуже швидким. Навіть якщо і існують задачі, які не можуть бути повністю розв'язані за його допомогою, використання жадібної стратегії все ж може дати задовільний результат.

Порівнюючи роботу жадібного алгоритму із методом динамічного програмування, можна зазначити, що жадібна стратегія працює згори донизу, здійснюючи послідовні жадібні вибори, у той час як динамічне програмування розв'язує задачу знизу догори. Жадібний підхід обіцяє знаходити не лише розв'язок, але й оптимальне рішення, шляхом скорочення великої задачі до менших підзадач.

Табу-пошук (TabuSearch). Алгоритм табу-пошуку (ТП) – це евристичний алгоритм, що використовує локальний пошук, щоб уникнути западання в передчасні локальні оптимуми шляхом заборони рухів, які приводять до повторення попередніх рішень та циклічної роботи. ТП починається з початкового рішення. На кожній ітерації генерується набір рішень, і найкраще з цього набору обирається як нове рішення. Певні атрибути попередніх рішень зберігаються у "табу-списку", який оновлюється в кінці кожної ітерації. Вибір найкращого рішення із набору здійснюється з урахуванням заборонених атрибутів. Найкраще допустиме рішення в даний момент оновлюється, якщо нове поточне рішення є кращим. Процес триває до досягнення одного з двох критеріїв завершення: максимальна кількість виконаних ітерацій або максимальна кількість ітерацій без поліпшення рішення.

Мурашиний алгоритм (Ant Colony Optimization). Один із найефективніших поліноміальних алгоритмів для приближеного розв'язання оптимізаційних задач та пошуку маршрутів на графах – це підхід, який використовує модель поведінки мурашок, які шукають шляхи від колонії до джерела їжі. Робота алгоритму починається з розміщення мурашок у вершинах графа, і далі мурашки рухаються по графу випадковим чином, керуючись ймовірнісним методом.

Вихідний результат може бути неточним, однак повторення алгоритму може призвести до (достатньо) точного результату через ймовірність рішення.

Генетичний алгоритм. Відображає процес природної селекції, де найкращі особини відбираються для відтворення наступних поколінь. Особливістю генетичного алгоритму є акцент на використанні оператора «схрещення», який виконує операцію рекомбінації рішень-кандидатів, роль якої аналогічна ролі схрещення в живій природі. На ряду з

мурашиним алгоритмом, генетичний вважається найбільш ефективним та широко застосовується на практиці. Оскільки, за порівняно короткий час гарантують максимально близьке оптимуму рішення.

Було створено безліч програм, для вирішення даної проблеми, які мають за основу певні алгоритми, методи та математичні моделі. Одним із лідерів у даній галузі є генетичні алгоритми; цей програмний продукт дозволяє скоротити час на пошук найвигіднішого варіанту перевезень і уникнути додаткових витрат. Він добре себе зарекомендував та широко застосовується навіть за межами транспортної галузі. Оскільки алгоритм є досить гнучким і дає змогу оперувати з великими об'ємами даних пропонується його використання.

За принципом своєї роботи, алгоритм, що нагадує процес Дарвінівської еволюції, відрізняється випадковістю та ітераційністю. Еволюція зазвичай розпочинається зі спільноти випадково утворених осіб, які становлять покоління на кожній ітерації. Кожна особа у популяції оцінюється за своєю придатністю, яка зазвичай визначається значенням цільової функції в оптимізаційній задачі, що вирішується. Найбільш придатні особини, стохастично відібрані, і геном кожної особи видозмінюється (еволюціонує), щоб утворити нове покоління. Нове покоління фенотипів далі бере участь у подальших ітераціях алгоритму. Алгоритм закінчується, за умови якщо відібрано, або максимальну кількість поколінь, або досягнуто задовільного рівня придатності особин.

Таким чином, весь процес роботи можна розподілити на 3 основні етапи:

1. Формування стартової популяції;
2. Аналіз функції адаптивності для кожної особи;
3. Ітерація до моменту задоволення умов пошуку:

- Селекція осіб із популяції;
- Мутація або/та схрещування;
- Аналіз функції адаптивності для всіх осіб;
- Створення нової популяції (нове покоління).

Усі операції виконуються поступово в строгому порядку. Схематично це виглядає наступним чином:

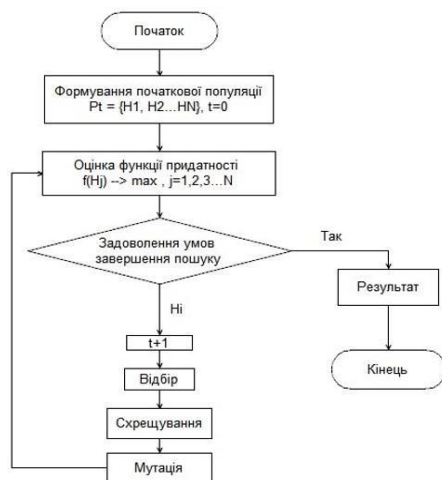


Рис. 1. Принцип роботи типового генетичного алгоритму

Створення початкової популяції. Цей етап залежить від природи завдання, зазвичай типова задача має близько декількох сотень, або навіть тисяч можливих рішень. Перша популяція створюється випадково, оскільки не має сенсу намагатися відтворити надто пристосованих осіб з самого початку. За умов неконкурентоздатності популяції, генетичний алгоритм перетворить її в придатну для життя популяцію. Наслідком першого кроку є популяція P, що налічує N осіб.

Відбір. У процесі створення нового покоління, кожен наступний цикл призводить до відбору певної частини наявної популяції. Індивідуальні рішення вибираються за допомогою Fitness-based процесу. В даному випадку показник Fitness характеризує значення пристосованості кожної особи. «Вживають» ті індивіди які мають найбільше значення функції Fitness. Вона визначається генетичним представленням і визначає якість представленого рішення. Функція Fitness завжди залежить від проблеми.

Доля Fitness осіб являє собою параметр генетичного алгоритму, його задають заздалегідь під час створення програми, або дають змогу регулювати під час роботи з алгоритмом.

Схрещування (Розмноження, кросингвер). Схрещування – це оператор, який використовується для комбінації генетичної інформації двох чи більше батьків з подальшим відтворенням цієї інформації у нащадка. Основна умова для розмноження полягає у забезпеченні нащадків здатністю успадковувати характеристики від усіх батьків.

Традиційні генетичні алгоритми зберігають генетичну інформацію в хромосомі, представленій бітовим масивом. Кросингвер бітових масивів є популярними і наочним прикладом генетичної рекомбінації.

Мутація. Мутації набувають такого ж значення, як і процес розмноження: у генетичному алгоритмі існує параметр m, який представляє кількість «мутантів», і на кроці мутацій необхідно вибрати mN осіб, які потребують зміни, використовуючи задані операції мутації.

Математична основа генетичного алгоритму. Оскільки ідея генетичного алгоритму заснована на еволюційній моделі Дарвіна, має сенс розглядати математичне обґрунтування кожного етапу еволюційного процесу.

Стандартне представлення кожного кандидата - це масив бітів. Масиви інших типів та структур можна використовувати так само. Однією з головних переваг генетичних уявлень є їх зручна виправність, оскільки їх компоненти легко упорядковуються завдяки сталому розміру, що спрощує проведення кросингвера. Після того, як генетичне представлення та фітнес-функція визначені, генетичний алгоритм переходить до ініціалізації популяції, а потім для вдосконалення її шляхом повторного застосування операторів мутації, кросингвера та селекції.

Ініціалізація. Перед початком виконання роботи треба задати параметри алгоритму, такі як: довжина хромосоми (розмір масиву даних) та розмір популяції.

Конкретно для завдання оптимізації перевезень, потрібно також враховувати швидкість транспортного засобу, відстані між станціями, або містами, якість та завантаженість маршрутів тощо. Для цього вводяться додаткові константи, або змінні величини. Для підвищення швидкості розрахунків шляхи які задалегідь не використовуються доцільно ліквідувати.

Формування початкової популяції. В комп'ютерному програмуванні формування початкової популяції зазвичай це представляється масивом даних:

$$P_t = \{N_1, N_2 \dots N_n\}, \quad t = 0, \quad (1)$$

де P – популяція;

N – ген;

t – номер популяції. t приймається 0, адже ми маємо випадково згенеровані дані.

Оцінка індивідів за функцією придатності. Рядок  $f(N_j) \rightarrow \min, j = 1, 2, 3 \dots N$  демонструє здійснення мінімізації даних. Відбір фокусується на особах з найменшим значеннями. Залежно від завдання може використовуватися, або операція мінімізації, або максимізації функції придатності.

Максимізація функції придатності fitness k:

$$fitness_k = \begin{cases} \frac{f(x_k) - I^{min}}{I^{max} - I^{min}} & \text{якщо } I^{max} \neq I^{min} \\ 1, & \text{якщо } I^{max} = I^{min} \end{cases}, \quad (2)$$

$$I^{min} = \min_{x \in Y} f(x),$$

$$I^{max} = \max_{x \in Y} f(x),$$

де I – набір (індивіди) значень цільової функції в даному поколінні;

$f(x_k)$  - значення заданої цільової функції;

x - фенотип;

k = номер присвоєний фенотипу.

Мінімізація функції придатності fitness k:

$$fitness_k = \begin{cases} \frac{I^{max} - f(x_k)}{I^{max} - I^{min}} & \text{якщо } I^{max} \neq I^{min} \\ 1, & \text{якщо } I^{max} = I^{min} \end{cases}, \quad (3)$$

Перевірка даних. Наступний крок має суто перевірочний характер. А саме чи задовольняють існуючі дані умови задачі, якщо так то робота програми припиняється і результат виводиться на екран. В іншому випадку починається цикл операцій відбору – схрещування – мутації, який повторюватиметься встановлену кількість поколінь, або до тих пір доки користувач не отримає задовільний результат.

Відбір. Відбір - оператор випадкового вибору одного індивіда з популяції. Оператор селекції ґрунтується на значеннях функції придатності всіх індивідів поточної популяції для використання обраного індивіда в операторі схрещування. При цьому ймовірність вибору у індивідів з більш високою придатністю вище, ніж у індивідів з більш низькою придатністю.

Пропорційна селекція. Можливість вибору елемента пропорційна значенню придатності індивіда. Даний вид селекції може працювати тільки з позитивними значеннями придатності.

Пропорційна селекція визначається за формулою:

$$p_k = \frac{fitness_k}{\sum_{j=1}^N fitness_j}, \quad (4)$$

Для вибору особи необхідно за випадковим числом обрати індивіда на якого воно вказує:

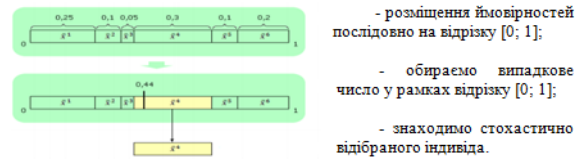


Рис. 2. Процес вибору особи

Схрещування (Кросинговер). Схрещування відповідає біологічному процесу рекомбінації хромосом. Генетична рекомбінація- це обмін генетичним матеріалом між різними організмами, що призводить до отримання потомства з комбінацією ознак, що відрізняються від ознак, які знаходяться у будь-якого з батьків.

Кросинговер з однією точкою (Single-point crossover). Точка на хромосомах обох батьків вибирається випадковим чином і позначається «перехресною точкою»(crossover point). Біти праворуч від цієї точки розміщуються між двома батьківськими хромосомами. Це призводить до двох нащадків, кожний з яких має певну генетичну інформацію від обох батьків.



Рис. 3. Приклад кросинговера з однією точкою

Кросинговер з двома, чи більше точками (Two-point and n-point crossover). У кросинговері з двома точками дві хромосоми вибираються випадковим чином із батьківських хромосом. Блоки між двома точками обмінюються між організмами нащадків. Кросинговер з двома точками рівнозначний виконанню двох кросинговерів з однією перехресною точкою у різних місцях масиву. Ця стратегія може бути виконана до n-точкового кросинговера для будь-якого додатного цілого n, вибираючи n перехресних точок.



Рис. 4. Приклад кросингвера з двома точками

**Мутація.** Мутація - оператор, що відповідає за генетичне різноманіття починаючи від першого покоління хромосом алгоритму до наступного. Це аналог біологічної мутації і зазвичай ці зміни незначні. Мутація видозмінює декілька або навіть одне значення гена від початкового стану. При виконанні операції, кожний ген з тією чи іншою ймовірністю видозмінюється, тобто отримує протилежне значення.

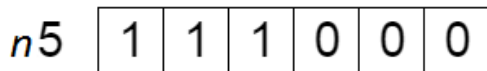
У генетичному алгоритмі мутації обираються серед трьох варіантів: сильна, слабка та середня мутації.

$$p(mut) = \begin{cases} \frac{1}{3n}, & \text{якщо мутація слабка} \\ \frac{1}{n}, & \text{якщо мутація середня} \\ \frac{3}{n}, & \text{якщо мутація сильна} \end{cases}, \quad (5)$$

де  $n$  - довжина вектора бінарної задачі оптимізації.

Схематично це виглядає як просте змінення значення одного блоку масиву на протилежне:

### До мутації



### Після мутації

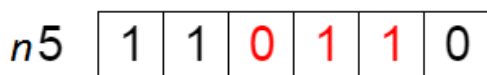


Рис. 5. Приклад мутації трьох генів

Переваги та недоліки генетичного алгоритму.

**Переваги:**

1. Генетичний алгоритм працюють з кодами, що представляють собою формалізований вигляд набору параметрів. В процесі роботи генетичного алгоритму маніпуляції з кодами відбуваються незалежно від їх змісту, тобто код розглядається просто як рядок бітів.

2. Це один із найшвидших за пошуком оптимального рішення алгоритм. В своїй роботі не використовує додаткової інформації, а працює з даними в області допустимих значень параметрів.

3. При реалізації процедури пошуку, генетичний алгоритм обробляє одночасно декілька точок пошукового простору, а не переходить послідовно від точки до точки, як в традиційних методах.

4. Використання двох механізмів рішень: детермінованого та ймовірнісного. Це дає змогу

отримати більш ефективні результати, аніж якщо б ми використовували один з цих механізмів.

5. Здатний працювати з великими об'ємами даних.

**Недоліки:**

1. Не завжди гарантує оптимальне рішення. Інколи потребує другої спроби на пошук оптимуму.

2. Складний в реалізації. Лише професіонал в області генетичного програмування може реалізувати складні за своєю природою проекти.

3. Нестача різноманітності в індивідах. У популяції швидко відбувається виділення єдиного генотипу, що представляє собою максимальне локальне значення, і всі інші особини виявляються недостатньо конкурентоспроможними у відборі. Наслідком цього є поширення копій даної особи серед всієї популяції. Хоча вже існують методи боротьби з цією проблемою.

Математична модель на базі генетичних алгоритмів. Доцільно розглядати і використовувати декілька критеріїв, за якими ми отримуємо фінальний результат. Необхідно виділити  $n$ -кількість масивів даних, по одому для кожного з критеріїв. Транспортна логістика, у більшості випадків, стикається з питаннями строків доставки, безпеки та витрати на транспортування. Щоб мати вибір найбільш важливого критерію, слід запропонувати кілька найкращих варіантів, проте кінцеве рішення залишається за людиною. Розрахунки проводяться окремо, щоб уникнути конкуренції між даними цільової функції.

Цільова функція, що описує вартості доставки:

$$ЗС = MB + \sum C_i \rightarrow \min, \quad (6)$$

де  $MB$  - митна вартість;

$C_i$  - собівартість перевезення  $i$ -го виду транспорту;

$ЗС$  - загальна вартість перевезення;

Як зазначено вище у статті, роль митних витрат важлива при визначенні базисних умов. Існує кілька методів розрахунку митних витрат, і для нашої роботи ми використовуємо метод додавання вартості. Оцінка митної вартості включає в себе розрахунок різних видів витрат та прибутку експортера.

Формула розрахунку митної вартості на основі додавання ( $MB$ ) визначається:

$$MB = BB + BD + NP + VP + LP + CP, \quad (7)$$

де  $CP$  - відповідна частина прибутку від подальшого перепродажу товарів, що накопичується у продавця;

$NP$ — прибуток експортера;  $VP$ — витрати покупця;

$BB$  — вартість матеріалів і витрат, виробника при виробництві товарів;

$BD$  — витрати на розвантаження, транспортування і страхування, навантаження в Україні;

ЛП — ліцензійні платежі за роботу з об'єктами інтелектуальної власності.

Цільова функція, що описує час доставки:

$$T_{\text{дост}} = T_p + T_{\text{п-к}} + T_{\text{п}} + T_b \rightarrow \min, \quad (8)$$

де  $T_{\text{п-к}}$  — час витрачений на початково-кінцеві операції;

$T_b$  — буферний час;

$T_p$  — час простоїв;

$T_r$  — час слідування.

Стохастична модель має певні обмеження цільової функції. У нашому випадку, ці обмеження визначаються введеними користувачем даними. Оскільки немає фіксованої величини, що обмежує вартість і час перевезення, ці значення повинні бути включені в алгоритм кожного разу. Наприклад, максимальний час перевезення встановлюється стороною і алгоритм не повинен його перевищувати. Це дозволяє виключити багато варіантів, які не відповідають умовам перевезення і вимогам клієнтів напередодні. Те ж саме стосується й вартості доставки. Учасники перевезення встановлюють максимальну суму, в межах якої проводиться пошук оптимального рішення.

Для прикладу було розглянуто перевезення залізничним транспортом з м. Харкова до м. Берлін. Одним із сервісів з відкритим доступом є Logistics explorer, який пропонує наступний маршрут з мінімальними витратами.

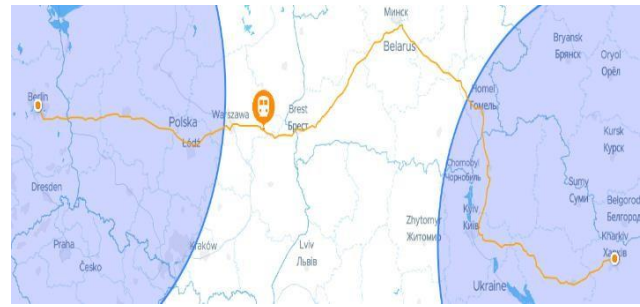


Рис. 6. Варіант перевезення через додаток Logistics explorer

Застосувавши метод пошуку ГА був знайдений наступний маршрут. На пошук оптимального маршруту програма витратила приблизно 22 секунди. Весь маршрут складає приблизно 1941 кілометра, для проходження якого потрібно 59.2 години (без урахування простою на технічних станціях).



Рис. 7. Варіант перевезення з використанням методу ГА

Генетичний алгоритм пропонує більш дешеву та швидшу альтернативу деяким існуючим варіантом. За нашими розрахунками показники нового маршруту умовного перевезення залізничним транспортом за маршрутом Харків – Берлін більше задовольняють потреби перевідників. Результати для зручності наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння техніко-економічних показників

Фактори	ГА	Існуючий варіант
1. Середня технічна швидкість составу, км/год	16,28	14,42
2. Час слідування вантажу, год	119,2	142,9
3. Відстань перевезення, км	1941	2061
4. Собівартість перевезення, грн	124600	132350
5. Економічний ефект, грн	7750	-
6. Річний економічний ефект, млн. грн	22436,25	-

**Висновки**

Ринкова економіка та зростання обсягів міжнародної торгівлі спонукає перевізників до покращення та раціоналізації планування перевезення. Комп'ютеризація даного процесу дозволить:

1. Зменшити час пошуку найбільш ефективних рішень, враховуючи критерії швидкості та вартості;
2. Знизити ймовірність помилок і ризику виникнення негативних наслідків;
3. Брати до розрахунків правові норми та положення країн, що виконують роль імпортерів або експортерів.

Пропонується розглядати оптимізаційну систему невідривно від існуючих АСУ на залізницях. Такий підхід сприяє інтеграції запропонованого методу на вже оперуючі системах управління. Під час проведення розрахунків економічного ефекту від ведення інновації, результат був позитивним та показав термін окупності складає 2 роки.

Створення автоматизованих систем позитивно сприятиме на транспортно-логістичну галузь в Україні. Наша країна має великі можливості для поліпшення перевізних послуг і створення сприятливих умов для покращення іміджу України у закордонних клієнтів. Запропонована інновація не потребує значних капіталовкладень і може приносити позитивний економічний ефект шляхом зниження собівартості впровадження високих технологій.

**Список використаних джерел**

1. The National Council for the Recovery of Ukraine from the Consequences of the War. Draft Ukraine Recovery Plan. URL: [https://uploads-ssl.webflow.com/621f88db25fbf24758792dd8/62d815739a363800fd1cda5c\\_Recovery%20and%20development%20of%20infrastructure.pdf](https://uploads-ssl.webflow.com/621f88db25fbf24758792dd8/62d815739a363800fd1cda5c_Recovery%20and%20development%20of%20infrastructure.pdf)
2. National Recovery Council. Ukraine's National Recovery Plan. July 2022. URL: [https://uploads-ssl.webflow.com/621f88db25fbf24758792dd8/62c166751fcf41105380a733\\_NRC%20Ukraine%27s%20Recovery%20Plan%20blueprint\\_ENG.pdf](https://uploads-ssl.webflow.com/621f88db25fbf24758792dd8/62c166751fcf41105380a733_NRC%20Ukraine%27s%20Recovery%20Plan%20blueprint_ENG.pdf)
3. Лисий в. М., стебляк д. М. Вплив війни на розвиток транспортного перевезення в Україні// Науковий вісник Ужгородського національного університету. DOI: <https://doi.org/10.32782/2413-9971/2022-43-16>
4. Н. І. Антоцишина. Інтеграційні процеси транспортної системи України в ЄС//Електронний журнал «Ефективна економіка» № 10, 2013. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=2423>
5. В. О. Баланов Огляд раціональних шляхів розвитку залізничних перевезень міжнародними транспортними коридорами // Транспортные системы и технологии перевозок. 2013. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/oglyad-ratsionalnih-shlyahiv-rozvitku-zaliznichnih-perevezen-mizhnarodnimi-transportnimi-koridorami> (дата обращения: 15.10.2023).
6. В. О. Баланов Развитие контейнерных перевозок в Украине та досвід перевезень в європейських країнах //

Транспортные системы и технологии перевозок. 2012. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rozvitok-konteylernih-perevezen-v-ukrayini-ta-dosvid-perevezen-v-evropeyskih-krayinah> (дата обращения: 15.10.2023).

7. Ю. В. Кебал, с.м. кондратюк, с.с. мямлін. Вдосконалення конструкцій рухомого складу для перевезення контейнерів залізничним транспортом// Збірник наукових праць ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна. Вип. 15. 2018 р. DOI: <https://doi.org/10.15802/tst2018/150196>
8. Шраменко Н.Ю., Орда О.О. Формирование альтернативных вариантов транспортно-экспедиторского обслуживания грузовладельцев при интермодальных перевозках // Автомобильный транспорт. 2015. №37. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-alternativnyh-variantov-transportno-ekspeditorskogo-obsluzhivaniya-gruzovladeltsev-pri-intermodalnyh-perevozkah> (дата обращения: 15.10.2023).

**Kovalov D.D. The use of genetic algorithms in the planning of rail transportation in the international connection**

**Abstract.** The article explores challenges and opportunities related to the growth of Ukrainian border terminals with EU nations during both wartime and post-war periods. It conducts an analysis of the present condition of freight transportation towards Europe, addressing immediate issues as well as short- and long-term prospects for railway development. The pivotal role of railway transport in facilitating Ukraine's integration into the European transportation network is emphasized, presenting possibilities for realizing plans for railway reconstruction and advancement. It has been established that container transportation already occupies a significant share of the market and the tendency to use it is only increasing. Ukraine, as a transit state (there are 4 out of 10 existing pan-European transport corridors pass through the territory of Ukraine), has great potential for the development of its own railway transportation system. On practice container transportation allows to reduce the cost of packing operations by more than 2 times, increase labor productivity by 4-5 times, and provide conditions for complex mechanization and automation of transshipment operations. Transport and logistics system of Ukraine is at a rather low level compared to other countries of the world. Therefore, this article studies the ways of optimizing the container movement from Ukraine to EU countries, using certain mathematical algorithms and methods. One of these methods described is genetic algorithm, which is considered to be one of the best mathematical algorithms for the task described above. It could play a crucial role in establishing a decent logistical railway system at the western border of Ukraine. Also, it could help to optimize the border crossings passage to implement and expand transport capabilities of Ukrainian railways. It could not only help to find the fastest or cheapest route but also shows the weak points of Ukrainian border terminals. Based on this information,



more ways of improvement could be proposed to modernize and expand border terminals and stations, with further integration into the European transport system.

**Keywords:** railway infrastructure, cargo transportation, container transportation, genetic algorithms, optimal route.

*Ковальов Денис Дмитрович, аспірант, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.*

*E-mail: kovaliov59@kart.edu.ua*

*ORCID ID <https://orcid.org/0009-0003-3417-4113>.*

*Kovalov Denys Dmytrovich, Phd student, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.*

*E-mail: kovaliov59@kart.edu.ua*

*ORCID ID <https://orcid.org/0009-0003-3417-4113>*