

ПАРХОМЕНКО Л. О., к. т. н.,  
ПРОХОРОВ В. М., к. т. н.,  
КАЛАШНІКОВА Т. Ю., к. т. н.,  
ГАЛУЦЬКА А. О., магістрант,  
ШЕШЕНЯ І. І., магістрант  
(Український державний університет залізничного транспорту)

## Розробка процедури формування схеми маршрутів поїздів для автоматизованої системи управління швидкісними пасажирськими перевезеннями

*Конкурентоспроможність швидкісних пасажирських перевезень в Україні цілком залежить від швидкості впровадження компаніями-операторами логістичних принципів управління, які спираються на сучасні цифрові технології. Вирішення однієї з найважливіших тактичних задач управління швидкісними залізничними системами – задачі планування маршрутів швидкісних поїздів на полігоні, який являє собою розгалужену залізничну мережу, з метою максимізації пасажиропотоків і одночасної мінімізації експлуатаційних витрат, пов'язане зі значною обчислювальною складністю. Дослідження присвячено розробленню процедури оптимізації математичної моделі, яка становить собою цільову функцію, що відображає оптимізаційні критерії, та систему технологічних обмежень.*

*Сформована процедура базується на застосуванні сучасного евристичного методу оптимізації – методу генетичних алгоритмів, який є складовою частиною таких сучасних напрямів, як штучний інтелект та м'які обчислення. Застосування генетичних алгоритмів надало можливість вирішення складної задачі планування маршрутів швидкісних поїздів на залізничному полігоні, яку можна класифікувати як задачу комбінаторної оптимізації великої розмірності. Сформовану процедуру було реалізовано у вигляді програмного забезпечення у середовищі Matlab. Ефективність цієї процедури було перевірено в ході моделювання, в результаті якого було отримано оптимальну схему маршрутів швидкісних поїздів на залізничному полігоні.*

**Ключові слова:** швидкісні пасажирські перевезення, схема маршрутів швидкісних поїздів, процедура оптимізації математичної моделі, генетичні алгоритми.

### Постановка проблеми

Стрімкий розвиток швидкісних пасажирських перевезень є яскравою ознакою сьогодення у транспортній сфері. Все більше країн світу долучаються до цієї переможної ходи швидкісних залізниць. Такі країни-першопроходці, як Франція, Японія, Іспанія, вже мають високошвидкісні залізничні мережі протяжністю близько 3000 км кожна і постійно їх розширюють. Навіть США, які довгий час, внаслідок географічних та економічних особливостей розташування міст, утримувались від вступу до спільноти країн, що запровадили високошвидкісний залізничний рух, розпочали будівництво Каліфорнійської Високошвидкісної Магістралі. Однак лідером цих перегонів є Китай, який розробляє і впроваджує нові високошвидкісні залізничні системи на основі використання надсучасних технологій і вже збудував декілька мереж сумарною протяжністю майже 40000 км. Таким чином, Китай уже сьогодні має

дуже складну і розгалужену високошвидкісну залізничну мережу, найбільш слабкою ланкою якої є система її управління. В Україні поки що активно розвивається швидкісний залізничний рух. Однак на шляху цього розвитку також постають проблеми, подібні до проблем мережі Китаю. Адже швидкісні поїзди, на відміну від високошвидкісних, фактично не обмежені спеціальними коліями, а можуть курсувати по всій мережі, яка в Україні є однією з найбільш протяжних, щільних і розгалужених залізничних мереж в Європі. Функціонування мережі всебічно залежить від попиту населення на відповідні транспортні послуги, який є дуже динамічним і в свою чергу залежить від економічної ситуації в регіонах, яка постійно змінюється. Водночас розгалужена залізнична мережа України має значну кількість пасажирських станцій, які розташовані поблизу міст та великих населених пунктів. Таким чином, існує велика

кількість можливих маршрутів проїзду пасажирів, так званих пар пунктів відправлення-призначення (англ. origin-destination pair). На високошвидкісній залізничній мережі Китаю навіть у наддалекому сполученні (протяжність перевищує 1500 км) налічується 2967 маршрутів. Середня тривалість переміщення за такими маршрутами складає 9,9 години з урахуванням часу трансферу, адже структура мережі не дає змоги переважній більшості з цих пар мати прямий доступ. Прямий доступ мають у середньому лише 10 % таких пар, однак більшість з них має низьку частоту обслуговування. Отже, високошвидкісні залізниці Китаю дають можливість пасажирів долати відстань понад 1500 км за 9,9 години, що в купі з прийнятною вартістю, яка становить приблизно 10 доларів США на 100 км і менше, є достатньо конкурентною офертою на ринку пасажирських перевезень. Слід зазначити, що трансфер забирає близько 30 % часу, що свідчить про доволі низьку ефективність системи планування маршрутів, адже його скорочення могло б значно підвищити привабливість цього виду транспорту для пасажирів. Схожа ситуація спостерігається і в Україні, але з меншими швидкостями руху та відстанями. Хоча в Україні також є маршрути, дальність яких перевищує 1000 км.

Отже, суть проблеми полягає у відсутності ефективних підходів для побудови автоматизованих систем планування швидкісних пасажирських залізничних перевезень, які дають змогу вирішувати задачу оптимізації маршрутів швидкісних поїздів, ураховуючи всі фактори, що впливають на прибутки залізничних компаній-операторів та їх експлуатаційні витрати.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Складові цієї проблеми доволі широко висвітлено в наукових публікаціях останніх років, що свідчить про її актуальність. В [1] вирішується задача оптимізації розкладу руху високошвидкісних поїздів з метою збільшення пропускної спроможності магістральних ліній за рахунок варіювання кількістю зупинок. Однак для вирішення цієї задачі у статті запропоновано використання класичних математичних методів. У [2] вирішується проблема оптимізації маршрутів швидкісних поїздів із використанням геоінформаційних систем. Однак ця задача вирішується на стратегічному, а не на тактичному рівні. У [3] розглядається задача оптимізації розкладу і зупинок швидкісних поїздів на напрямку з урахуванням пасажиропотоків і пропускної спроможності ліній. Задача вирішується для реальної ділянки Ухань – Гуанчжоу, однак для її вирішення використані класичні математичні методи лінійної релаксації. У [4] вирішується задача оптимізації розкладу швидкісних поїздів за критеріями

експлуатаційних витрат і рівня «незручності» для пасажирів, для оптимізації моделі був використаний оригінальний алгоритм мінімізації ентропії. Однак задача вирішується лише на магістральній лінії. У [5] пропонується вирішення задачі оптимізації розкладу руху швидкісних поїздів за допомогою використання алгоритму генерації стовпчиків. Однак задача вирішується лише для залізничного напрямку, до того ж запропонований метод також належить до класичних методів вирішення задач лінійного програмування.

#### **Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми**

Зважаючи на значну кількість наукових статей останнього десятиріччя, що присвячені питанням управління системами залізничних швидкісних пасажирських перевезень, таких як оптимізації маршрутів і розкладу швидкісних поїздів, слід зазначити, що деякі важливі моменти в них залишилися поза увагою. В першу чергу майже не присвячено уваги питанням цифрової трансформації процесів управління швидкісними залізничними системами. Хоча останніми роками набули стрімкого розвитку технології, які здатні кардинально змінити ці процеси. Це зокрема такі технології, як, наприклад, нейронні мережі технології глибокого навчання (англ. deep learning), які мають великий потенціал у побудові високоточних моделей для прогнозування пасажиропотоків. Також останніми роками значного поширення набули сервіси продажу квитків через мережу інтернет. Цифрова трансформація – це головний драйвер підвищення ефективності у сфері транспортних послуг у сучасному світі, і це останній аргумент залізничних компаній у жорсткій конкурентній боротьбі з автомобільними і авіаперевізниками. В першу чергу цифрова трансформація має змінити традиційні стратегії управління, коли, наприклад, розклад пасажирських поїздів може роками залишатися незмінним. Цифрова трансформація має змістити акценти в системі управління зі стратегічного на тактичний рівень. Потенціал цифровізації в тому, що вона може надати системам тактичного і оперативного планування швидкісних залізничних перевезень необхідний у сучасних умовах рівень гнучкості. Іншим аспектом проблеми є також той факт, що основна увага науковців була привернута до питань оптимізації курсування швидкісних поїздів на напрямках або магістральних лініях. Саме цим і можна виправдати використання морально застарілого традиційного математичного апарату, такого як лінійне програмування тощо. Однак на сьогодні набувають значущості принципи високоточного управління, які були проголошені «концепцією високоточних залізниць» (англ. high precision railway), які

передбачають високий ступінь узгодженості всіх складових транспортного процесу. Отже, узгодження руху швидкісних поїздів не лише на напрямку, але й на всій залізничній мережі, включаючи операції трансферу та розклади інших залізничних операторів та інших видів транспорту при здійсненні інтермодальних пасажирських перевезень, є нагальною вимогою сьогодення. Оптимізація процесів управління швидкісними залізничними системами потребує інших підходів. Оптимізація розкладу і маршрутів курсування швидкісних поїздів на розгалужених залізничних мережах потребує застосування сучасних алгоритмів теорії графів, комбінаторної оптимізації тощо. Отже, вирішення таких задач пов'язане із зовсім іншим рівнем обчислювальної складності. А отже, за таких умов першорядної важливості набуває не процес формування математичної моделі, а процес її оптимізації. Цей процес може бути успішним лише за умови наявності оптимізаційної процедури, яка навіть в умовах великої розмірності задачі забезпечить отримання результату за прийнятний час і з необхідним рівнем точності, який може бути основою для прийняття якісного управлінського рішення в реальних умовах залізничного полігону. Створення такої процедури передбачає необхідність урахування багатьох специфічних факторів моделі та вихідних даних, а також ретельний вибір методів і алгоритмів оптимізації.

#### Формулювання цілей

Метою дослідження є удосконалення методів і вирішення тактичних задач управління швидкісними пасажирськими перевезеннями в умовах мінливості пасажиропотоків і конкуренції з іншими видами транспорту шляхом формування придатної для практичного застосування процедури оптимізації математичної моделі планування маршрутів швидкісних пасажирських поїздів.

#### Виклад основного матеріалу дослідження

Основним фактором витрат слід вважати пробіг порожніх місць у поїздах, тобто зменшення витрат відповідає підвищенню населеності поїздів. Прибуток залежить від кількості перевезених пасажирів, яка у свою чергу залежить від зручності і комфорту. Рівень комфорту, на який може вплинути вибір маршруту поїзда, полягає у тривалості подорожі і мінімізації кількості трансферів. Тривалість подорожі кожного пасажирів залежить не лише від довжини його індивідуального маршруту, який залежить від маршруту або маршрутів поїздів, які він використовує, а й від кількості проміжних зупинок, адже кожна зупинка, крім зменшення дільничної швидкості поїзда за рахунок додавання часу на посадку і висадку

пасажирів на станції, спричиняє також і зменшення його технічної швидкості через уповільнення для здійснення зупинки.

Отже, система управління швидкісними пасажирськими перевезеннями має, по-перше, формувати схему маршрутів таким чином, щоб максимізувати кількість пар пунктів відправлення-призначення, які мають найбільший попит. По-друге, найбільш протяжні індивідуальні маршрути пасажирів, особливо ті, що мають значний попит, мають містити раціональну кількість проміжних зупинок і мінімальну кількість трансферів. Слід зазначити, що зменшення кількості зупинок призводить до випадіння пар пунктів відправлення-призначення і відповідної втрати пасажирів. Однак наявність значної кількості зупинок на маршрутах також призводить до втрати пасажирів, переважно тих, що прямують на відносно далекі відстані, адже значна тривалість поїздки робить її для них непривабливою.

Отже, в сучасних умовах нестабільної економічної ситуації в Україні і, відповідно, мінливих пасажиропотоків доцільно здійснювати визначення схеми маршрутів швидкісних поїздів на рівні тактичного планування, тобто на термін від декількох тижнів до місяця. В умовах тотального використання мережі інтернет, за допомогою якої здійснюється переважна більшість операцій з квитками, така відносно часта зміна розкладу не спричинить значних незручностей для пасажирів.

Таким чином, схема циркуляції швидкісних поїздів представляє множину маршрутів, для кожного з яких визначені початкова, кінцева і проміжні станції. Пари пунктів відправлення-призначення пасажирів можуть використовувати більше одного маршруту поїзда, однак у такому разі кожна послідовна пара з множини цих маршрутів повинна мати спільну станцію, на якій кожен з двох маршрутів має зупинку для забезпечення можливості здійснення пересадки. Як було зазначено вище, залізнична мережа, по якій курсують швидкісні поїзди класів InterCity та InterCity+, налічує велику кількість станцій і виходить навіть за межі України. Залежність кількості пар пунктів відправлення-призначення від кількості станцій представляє ступеневу функцію. Тобто кількість таких пар може перевищувати кількість станцій навіть не на один порядок.

Цю задачу доцільно сформулювати у вигляді оптимізаційної математичної моделі. Цільову функцію моделі можна записати так [6] :

$$C(n, x, y) = \theta_1 \cdot e_{\text{нкм}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=2}^{\#x^i} L(x_{j-1}^i, x_j^i) + \theta_2 \sum_{i=1}^n \left( \sum_{s=1}^{S_i} \sum_{j=1}^k \left( (a_i - y_{ij} \cdot P_j \cdot \psi_{isj}) \frac{l_{si}}{l_i} \right) \right) + \theta_3 \cdot c_{\text{кв}} \sum_{j=1}^k \left( P_j - \sum_{i=1}^n y_{ij} \cdot P_j \right),$$

де  $e_{\text{нкм}}$  – витратна ставка за 1 поїздо-кілометр, грн;

$l_i$  – довжина маршруту  $i$ -го поїзда;

$X$  – множина послідовностей, що відповідають станціям маршрутів швидкісних поїздів;

$\#x^i$  – потужність множини станцій маршруту  $i$ -го поїзда;

$L(x_{j-1}^i, x_j^i)$  – відстань між  $j-1$ -ю та  $j$ -ю

станціями маршруту  $i$ -го поїзда;

$n$  – кількість маршрутів поїздів;

$k$  – потужність множини струменів пасажиропотоків;

$y_{ij}$  – визначає частку пасажиропотоку  $j$ , який буде перевезений поїздом  $i$ ;

$a_i$  – максимальна кількість місць  $i$ -го поїзда;

$P_j$  – розмір  $j$ -го пасажиропотоку;

$l_{si}$  – довжина  $S$ -ї ділянки маршруту  $i$ -го поїзда;

$\psi_{isj}$  – набуває значення 1, якщо по  $S$ -й ділянці поїздом  $i$ -го маршруту може перевозитися  $j$ -й пасажиропотік, тобто якщо станція посадки і станція висадки пасажирів  $j$ -го пасажиропотоку належать до множини станцій  $i$ -го маршруту і станція посадки розташовується раніше станції висадки відповідно до напрямку руху поїзда, в іншому випадку набуває значення 0;

$S_i$  – кількість ділянок між зупинками поїзда  $i$ -го маршруту;

$c_{\text{кв}}$  – середня вартість квитка;

$\theta_1.. \theta_3$  – вагові коефіцієнти.

Перший доданок цільової функції відповідає критерію мінімізації довжини пробігу пасажирських поїздів, другий доданок відповідає критерію мінімізації пробігу вільних місць і третій доданок відповідає критерію освоєння пасажиропотоків. Таким чином, усі ці три критерії у цільовій функції зведені до суперкритерію з використанням методу згортки за

допомогою вагових коефіцієнтів. Вагові коефіцієнти доцільно обирати експертним шляхом. Критерій мінімізації пробігу вільних місць представлений у вигляді нелінійної функції, квадратична залежність використана для прогресивного зростання значення функції при збільшенні сумарної величини пробігу вільних місць. Сумарна величина пробігу вільних місць залежить як від кількості місць, так і від величини пробігу. Але оскільки критерій освоєння пасажиропотоків є найбільш важливим, то доцільно обирати ваговий коефіцієнт, що відповідає даному критерію таким чином, щоб його величина перевищувала значення суми вагових коефіцієнтів двох інших критеріїв.

Крім того, на матрицю змінних  $y$  необхідно накласти обмеження:

$$\sum_{i=1}^n y_{ij} \leq 1, \quad \forall j, j = 1..k,$$

що означає, що сума часток одного пасажиропотоку, які прямують до станції призначення у різних поїздах, не може перевищувати 1.

Ще одне обмеження на матрицю змінних  $y$  можна записати таким чином:

$$\sum_{j=1}^k (y_{ij} \cdot P_j \cdot \psi_{isj}) \leq a_i, \quad \forall i, \forall s, i = 1..n, s = 1..S_i,$$

воно забезпечить неперевищення сумарною кількістю пасажирів, що відносяться до різних пасажиропотоків і одночасно прямують у складі  $i$ -го поїзда по  $S$ -й ділянці його маршруту. Під різними пасажиропотоками маємо на увазі потоки, у яких не збігаються початкові і/або кінцеві пункти прямування пасажирів, однак певні ділянки маршрутів таких пасажиропотоків можуть збігатися.

Однак, якщо як вихідні дані використати дані не магістрального напрямку, а реального залізничного полігону, який становить собою розгалужену залізничну мережу з декількома десятками, а то й сотнями станцій, тоді оптимізація цільової функції цієї моделі потребуватиме перебору астрономічно великої

кількості теоретично можливих комбінацій. Отже, задачу пошуку оптимальної схеми курсування швидкісних поїздів можна класифікувати як задачу комбінаторної оптимізації. Вирішення такої задачі, особливо у випадку її великої розмірності, викликає значні складнощі в першу чергу з точки зору обсягів обчислень, які необхідно здійснити для отримання рішення.

Рішення даної задачі можна отримати, здійснивши оптимізацію цільової функції, враховуючи обмеження. Однак слід зазначити, що не існує ефективних аналітичних методів вирішення таких задач. Увесь спектр інструментів для оптимізації математичної моделі задачі, яка має комбінаторну природу, налічує лише приблизні методи. Вибір методу залежить від багатьох параметрів задачі. Однак одним з вирішальних параметрів є розмірність задачі, адже від неї залежить обсяг обчислювальної роботи, яку необхідно здійснити для досягнення мети. Фактично кожен метод має свою функцію залежності обсягів обчислень від розмірності задачі. Більш ефективні алгоритми зазвичай мають більш повільну функцію зростання обсягів обчислювальної роботи залежно від розмірності задачі. Однак дуже часто область застосування таких ефективних алгоритмів обмежується колом специфічних комбінаторних задач певного типу. Тобто такі алгоритми не є універсальними. Однак останнім часом з наукових публікацій надходить усе більше свідчень про успішне застосування для вирішення різних типів комбінаторних задач алгоритмів, які належать до сучасних наукових напрямів, зокрема таких, як штучний інтелект і м'які обчислення. Отже, можна вважати, що такі алгоритми мають певний рівень універсальності, хоча вважати абсолютно універсальними їх не можна тому, що, по-перше, на відміну від аналітичних алгоритмів, ці сучасні алгоритми є евристичними. Евристичні алгоритми не гарантують знаходження абсолютного оптимуму, їх точність залежить від багатьох факторів, а отже, вона може виявитися недостатньою при вирішенні певної задачі. По-друге, як точність, так і швидкість роботи такого алгоритму залежать від якості налаштування його параметрів, які мають відповідати як параметрам задачі, так і параметрам обчислювального обладнання. І по-третє, для вирішення задачі їй необхідно надати певну форму, яка є придатною для використання відповідного алгоритму, що іноді буває зробити дуже складно внаслідок наявності певних формальних умов та обмежень даного алгоритму.

З огляду на це найбільш придатним для вирішення задачі планування маршрутів швидкісних поїздів є евристичні алгоритми, які належать до класу так званих генетичних алгоритмів, адже вони мають багато різних модифікацій та параметрів

налаштування, що робить їх гнучким інструментом для вирішення широкого класу задач.

Ефективність генетичних алгоритмів обумовлена їх здатністю значно скорочувати обсяги обчислень за рахунок використання механізмів, що побудовані на еволюційних принципах живої природи. Для їх застосування необхідно параметри оптимізації, тобто набір керуючих змінних моделі, представити у вигляді спеціального вектора, який має назву «хромосома».

Отже, доцільно за допомогою хромосоми надати множину маршрутів. Однак кожен маршрут також становить собою множину станцій, кількість яких може змінюватись. Хромосома – лише вектор, до того ж фіксованої довжини. Існують типи генетичних алгоритмів із змінною довжиною хромосоми (англ. Variable-Length Chromosome Genetic Algorithm). Однак вони мають свої недоліки, як, наприклад, швидкість їх роботи є меншою порівняно з алгоритмами з фіксованою довжиною хромосоми. До того ж їх програмна реалізація є складнішою.

Отже, необхідно за допомогою вектора-хромосоми представити множину маршрутів, кількість яких є змінною величиною. До того ж кількість станцій на кожному маршруті є теж змінною величиною, як і склад самих станцій. Таким чином, необхідно забезпечити можливість для зміни як кількості маршрутів, так і кількості станцій на маршрутах у процесі пошуку оптимальної схеми курсування поїздів. З цією метою довжина хромосоми має бути обрана такою, щоб забезпечити можливість відображення варіанта, якому відповідає найбільша сукупно множина станцій. Слід зауважити, що невиправдане і надмірне збільшення довжини хромосоми не лише негативно відбивається на швидкості роботи генетичного алгоритму, але й може значно знизити якість отриманого рішення, яке буде дуже далеким від оптимального. Отже, пропонується схема кодування хромосоми, яка наведена на рис. 1.

Таким чином, хромосома складається з трьох розділів. Перший розділ містить множину генів, які можуть набувати значень, що відображають номери станцій на графі залізничної мережі, які відповідають послідовності станцій, на яких має зупинку поїзд, що прямує за певним маршрутом. Другий розділ містить лише один ген, який управляє кількістю маршрутів. Значення, яких він набуває, обмежені кількістю составів, які є в робочому парку і можуть одночасно курсувати на лініях.



Рис. 1. Схема кодування рішення задачі формування оптимального плану маршрутів швидкісних поїздів у вигляді хромосоми генетичного алгоритму

Кількість генів у першому розділі відповідає максимально можливій сумарній кількості станцій на всіх маршрутах. Кількість генів у третьому розділі відповідає максимально можливій кількості маршрутів швидкісних поїздів. Єдиний ген другого розділу визначає кількість поточних актуальних генів третього розділу. Таким чином, якщо цей ген набуває значення 6, тоді всі гени третього розділу, які розташовані після шостого, не беруться до уваги.

Гени третього розділу у свою чергу задають кількість станцій, що входять до складу кожного маршруту. Таким чином, якщо перший ген третього розділу набуває значення 4 – це означає, що для визначення першого маршруту необхідно зчитати значення перших чотирьох генів першого розділу. Ця послідовність з чотирьох чисел представляє послідовність номерів станцій на графі залізничної мережі, яка розташована в тому самому порядку, в якому їх проходить швидкісний поїзд, прямуючи даним маршрутом. Отже, в процесі виконання генетичного алгоритму поточний вектор номерів станцій певного маршруту може містити зовсім нелогічні комбінації станцій, однак такі варіанти будуть відкинуті після їх оцінювання за допомогою цільової функції, яку генетичний алгоритм використовує як функцію пристосованості (англ. *Fitness function*). Тоді, якщо другий ген третього розділу набуває значення 3, – це означає, що для визначення другого маршруту необхідно зчитати значення трьох генів першого розділу, але ці гени розташовані вже після перших чотирьох генів, які визначають перший маршрут, і так далі. Значення генів першого та третього розділу, які залишились зайвими в даній поточній комбінації, не враховуються.

На основі цільової функції та запропонованого методу її оптимізації було розроблено процедуру формування схеми маршрутів швидкісних поїздів мовою Matlab. На рис. 2 наведено динаміку збіжності цільової функції під час виконання оптимізаційної процедури, яка використовує генетичний алгоритм.

Слід зазначити, що застосований тип генетичного алгоритму передбачає мінімізацію функції пристосованості (цільової функції). Оптимальна схема маршрутів натомість передбачає максимізацію

прибутків компанії-оператора швидкісних перевезень. Отже, в розробленій процедурі цільова функція, яка підлягає максимізації, була використана зі знаком «–». Як видно з рис. 2, генетичний алгоритм демонструє доволі швидко збіжність, що свідчить не лише про адекватність моделі, але й про коректність параметрів налаштування алгоритму та ефективність розробленої процедури оптимізації.

Результати оптимізації ця процедура дає змогу отримати також і в графічному вигляді. На рис. 3 подано приклад графічного інтерфейсу для відображення схеми маршрутів швидкісних поїздів на графі залізничної мережі.

Таким чином, на рис. 3 наведено схему маршрутів чотирьох швидкісних поїздів, які мають пункт трансферу на станції 1, яка одночасно є кінцевою станцією для маршрутів першого та другого поїздів і початковою для маршрутів третього та четвертого поїздів. На дільниці між станціями 13 і 1 маршрути першого та другого поїздів накладаються, що обумовлено не лише необхідністю мінімізації довжин маршрутів, але й значним обсягом пасажиропотоку між цими станціями.

## Висновки

Складність задач, що постають у сфері організації високошвидкісних залізничних пасажирських перевезень, обумовлює необхідність пошуку нових нетрадиційних підходів для їх вирішення. Розроблено процедуру формування схеми маршрутів швидкісних поїздів, основою якої є математична модель, яка максимізує прибуток компанії-оператора і як проміжні критерії зокрема враховує населеність составів, пробіг порожніх місць. Розроблена процедура дає змогу отримати рішення прикладної виробничої задачі з достатньою для практичного застосування точністю, яке неможливо було отримати за допомогою традиційних математичних методів. Таким чином, розроблена процедура, завдяки застосуванню сучасних підходів і евристичних алгоритмів, розширює можливості для подальшої автоматизації та цифрової трансформації процесів управління швидкісними пасажирськими залізничними системами.

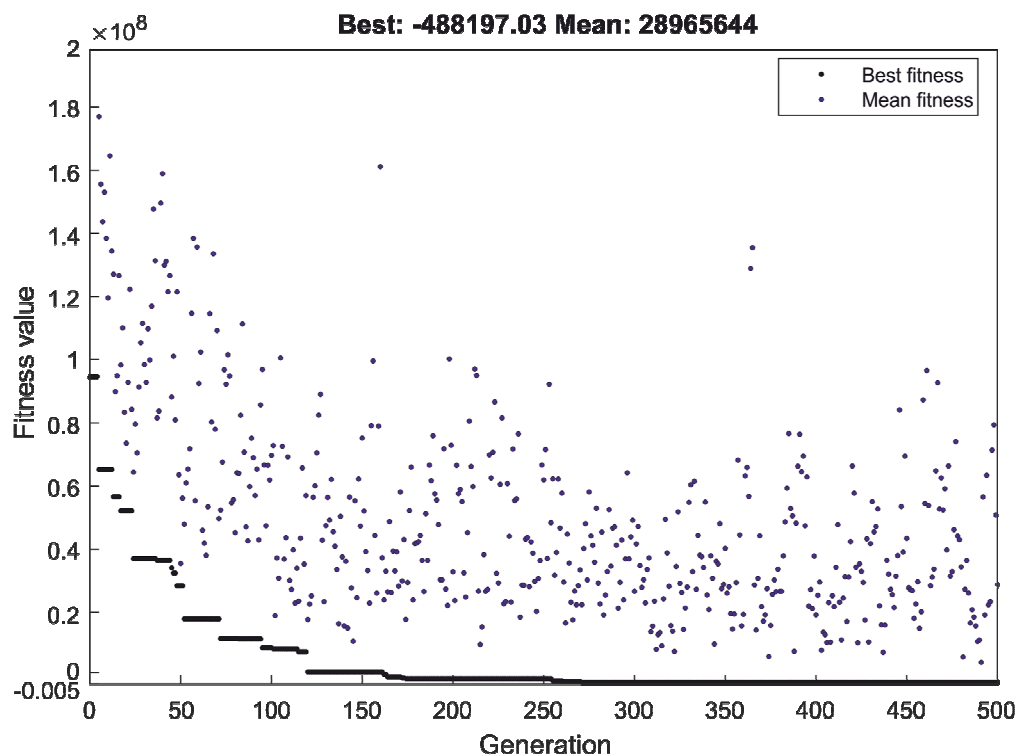


Рис. 2. Динаміка збіжності цільової функції під час виконання оптимізаційної процедури із застосуванням генетичного алгоритму

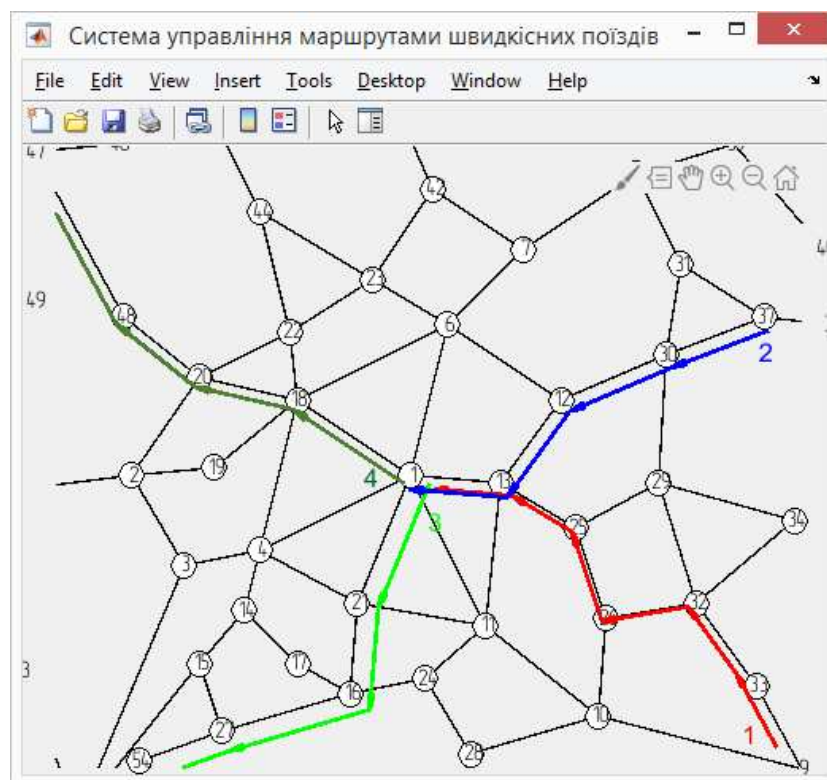


Рис. 3. Інтерфейсне вікно, що відображає схему маршрутів швидкісних поїздів на графі залізничної мережі, отриману в результаті оптимізації

## Список використаних джерел

1. Yue, Y., Wang, S., Zhou, L., Tong, L., Saat, M. R. Optimizing train stopping patterns and schedules for high-speed passenger rail corridors. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2016. № 63. P. 126–146.
2. Kim, H. Y., Wunneburger, D., Neuman, M., An, S. Y. Optimizing high-speed rail routes using a Spatial Decision Support System (SDSS): the Texas Urban Triangle (TUT) case. *Journal of Transport Geography*. 2014. № 34. P. 194–201.
3. Wang, J., Zhou, L., Yue, Y., Tang, J., Bai, Z. Optimizing high-speed railroad timetable with passenger and station service demands: A case study in the Wuhan-Guangzhou corridor. *Journal of advanced transportation*. 2018. № 1. P. 1–18.
4. Kaspi M., Raviv T. Service-oriented line planning and timetabling for passenger trains. *Transportation Science*. 2013. № 47(3). P. 295–311.
5. V. Cacchiani, A. Caprara, P. Toth. A column generation approach to train timetabling on a corridor. *A Quarterly Journal of Operations Research*. 2008. № 6 (2). P. 125–142.
6. Розробка математичної моделі для оптимізації плану формування швидкісних пасажирських поїздів / В. М. Прохоров, Т. Ю. Калашнікова, Т. О. Мураховський, Ю. О. Лотиш, В. В. Шабатура *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2019. № 5. С. 19–23.

**Parkhomenko L. O., Prokhorov V. M., Kalashnikova T. Yu., Halutska A. O., Sheshenia I. I. Development of a procedure for forming a scheme of train routes for an automated control system for high-speed passenger transportation.**

**Abstract.** The competitiveness of high-speed passenger transportation in Ukraine depends entirely on the speed of implementation by the operating companies of logistics management principles based on modern digital technologies. The solution to one of the most important tactical problems in the management of high-speed railway systems - the problem of planning high-speed train routes on the polygon, which is an extensive railway network, in order to maximize passenger traffic and simultaneously minimize operating costs, is associated with significant computational complexity. The study is devoted to the development of a procedure for optimizing the mathematical model of this problem, which is an objective function that reflects the optimization criteria, and a system of technological constraints. The supercriterion of the objective function of the optimization mathematical model is the profit of the company-operator of passenger high-speed rail transport, which in turn takes into account the criterion of income from ticket sales, the criterion of costs, including technological costs of transportation. The control variables of the model are the routes of high-speed

trains. To minimize travel time, the maximum number of passenger transfers is used as a limit. The developed procedure is based on the use of a modern heuristic optimization method – the method of genetic algorithms, which is an integral part of such modern areas as artificial intelligence and soft computing. The use of genetic algorithms made it possible to solve the complex problem of planning the routes of high-speed trains on a railway polygon, which can be classified as a high-dimensionality combinatorial optimization problem. The developed procedure was implemented as software in the Matlab environment. The effectiveness of this procedure was tested in the course of modeling, as a result of which an optimal scheme of routes of high-speed trains on the railway polygon was obtained. Thus, the formed procedure allows to find close to the optimal solution not only for the railway direction, but also for the extensive railway network, which has hundreds of railway stations.

**Keywords:** high-speed passenger transportation, high-speed train route scheme, mathematical model optimization procedure, genetic algorithms.

**Пархоменко Л. А., Прохоров В. Н., Калашникова Т. Ю., Галуцкая А. А., Шешеня И. И. Разработка процедуры формирования схемы маршрутов поездов для автоматизированной системы управления скоростными пассажирскими перевозками.**

**Аннотация.** Конкурентоспособность скоростных пассажирских перевозок в Украине полностью зависит от скорости внедрения компаниями-операторами логистических принципов управления, опирающихся на современные цифровые технологии. Решение одной из важнейших тактических задач управления скоростными железнодорожными системами – задачи планирования маршрутов скоростных поездов на полигоне, который представляет собой разветвленную железнодорожную сеть, с целью максимизации пассажиропотоков и одновременной минимизации эксплуатационных расходов, связано со значительной вычислительной сложностью. Исследование посвящено разработке процедуры оптимизации математической модели данной задачи, которая представляет собой целевую функцию, которая отражает оптимизационные критерии, и систему технологических ограничений. Разработанная процедура основана на применении современного эвристического метода оптимизации – метода генетических алгоритмов, который является составной частью таких современных направлений, как искусственный интеллект и мягкие вычисления. Применение генетических алгоритмов позволило решить сложную задачу планирования маршрутов скоростных поездов на железнодорожном полигоне,



як задачу комбінаторної оптимізації великої розмірності. Розроблена процедура була реалізована в формі програмного забезпечення в середовищі Matlab. Ефективність даної процедури була перевірена в ході моделювання, в результаті якого була отримана оптимальна схема маршрутів швидкісних поїздів на залізничному полігоні.

**Ключевые слова:** швидкісні пасажирські перевезення, схема маршрутів швидкісних поїздів, процедура оптимізації математичної моделі, генетичні алгоритми.

Надійшла 26.08.2021 р.

**Parkhomenko Larysa Oleksiivna**, PhD, Associate Professor, Department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [l.o.parkhomenko@ukr.net](mailto:l.o.parkhomenko@ukr.net)  
<https://orcid.org/0000-0003-1647-7746>

**Prokhorov Viktor Mykolaiovych**, Ph.D., Department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [prokhorov@kart.edu.ua](mailto:prokhorov@kart.edu.ua)  
<https://orcid.org/0000-0001-8963-6467>

**Kalashnikova Tetiana Yuriivna**, Ph.D., Department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [bulavina\\_ty@ukr.net](mailto:bulavina_ty@ukr.net)  
<https://orcid.org/0000-0001-6563-5945>

**Halutska Aliona Oleksandrivna**, master student, Department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [alyona.galutskay@gmail.com](mailto:alyona.galutskay@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0003-3614-3663>

**Sheshenia Ilona Ivanivna**, master student, Department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [sheshenya1998@gmail.com](mailto:sheshenya1998@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-8708-8951>

**Пархоменко Лариса Олексіївна**, к. т. н., кафедра управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: [l.o.parkhomenko@ukr.net](mailto:l.o.parkhomenko@ukr.net)  
<https://orcid.org/0000-0003-1647-7746>

**Прохоров Віктор Миколайович**, к. т. н., кафедра управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: [prokhorov@kart.edu.ua](mailto:prokhorov@kart.edu.ua)  
<https://orcid.org/0000-0001-8963-6467>

**Калашинікова Тетяна Юріївна**, к. т. н., кафедра управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту,

м. Харків, Україна. E-mail: [bulavina\\_ty@ukr.net](mailto:bulavina_ty@ukr.net)  
<https://orcid.org/0000-0001-6563-5945>

**Галуцька Альона Олександрівна**, магістрант, кафедра управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: [alyona.galutskay@gmail.com](mailto:alyona.galutskay@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0003-3614-3663>

**Шешеня Ілона Іванівна**, магістрант, кафедра управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: [sheshenya1998@gmail.com](mailto:sheshenya1998@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-8708-8951>