УДК 656.2

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.165.2016.87882

РОЗРАХУНОК ПЛАНУ ФОРМУВАННЯ ПОЇЗДІВ НА ОСНОВІ СТОХАСТИЧНОЇ КОМБІНАТОРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

Інженери В. М. Прохоров, Ю. А. Рябушка

РАСЧЁТ ПЛАНА ФОРМИРОВАНИЯ ПОЕЗДОВ НА ОСНОВЕ СТОХАСТИЧЕСКОЙ КОМБИНАТОРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Инженеры В. Н. Прохоров, Ю. А. Рябушка

COMPUTATION OF TRAINS FORMATION PLAN ON THE BASE OF STOCHASTIC COMBINATORIAL OPTIMIZATION

Engineers V. M. Prokhorov, Yu. A. Riabushka

У якості основи для створення автоматизованої системи розрахунку плану формування поїздів запропоновано математичну модель, яка використовує у якості стохастичної змінної параметр накопичення вагонів з метою покращення характеристик оптимального плану. Запропоновано метод розрахунку плану формування одногрупних поїздів на основі використання генетичних алгоритмів, який дозволяє враховувати альтернативні маршрути прямування поїздів.

***Ключові слова**: план формування поїздів, автоматизована система розрахунку плану формування поїздів, генетичний алгоритм, параметр накопичення, стохастична оптимізація.*

В качестве основы для создания автоматизированной системы расчета плана формирования поездов предложена математическая модель, которая использует в качестве стохастической переменной параметр накопления вагонов с целью улучшения характеристик оптимального плана. Предложен метод расчета плана формирования одногруппных поездов на основе использования генетических алгоритмов, который позволяет учитывать альтернативные маршруты следования поездов.

***Ключевые слова**: план формирования поездов, автоматизированная система расчета плана формирования поездов, генетический алгоритм, параметр накопления, стохастическая оптимизация.*

The analysis of domestic and foreign scientific research in the field of solving optimization problems in railcar traffic control and control of process of freight trains formation is done. The problem of computation of train formation plan is formulated as a stochastic combinatorial optimization problem. As a basis for the creation of an automated system for computation of train formation plan it is offered the mathematical model that uses parameter storage cars accumulation as stochastic variable in order to improve the characteristics of the optimal plan, takes into account the capacity constraints of railway lines, bandwidth and processing capacity of technical stations. The proposed method of computation of single-group train formation plan on the basis of the use of genetic algorithms, which allows to consider alternative routes of trains. The proposed coding solutions using set theory. To increase the flexibility of the model as a penalty function the function is used, that assesses the risk of deviation the railcar accumulation parameters of their average values. The simulation results in Matlab environment are presented.

***Keywords:** trains formation plan, automated system for computation of trains formation plan, genetic algorithm, railcars accumulation parameter, stochastic optimization.*

Вступ. Як показав аналіз функціонування підсистеми вантажних залізничних перевезень, процес накопичення вагонів і формування составів відіграє в них ключову роль. Тривалість накопичення одного состава залежить від потужності вагонопотоку даного призначення. Основними показниками процесу накопичення составів є сумарні вагоно-години накопичення для даного призначення за добу, середній час простою одного вагона під накопиченням, середній час накопичення состава.

Для прискорення процесу накопичення составів застосовуються такі заходи: забезпечення пріоритету розпуску составів, які включають замикаючі групи вагонів для завершення накопичення інших составів, забезпечення підведення великих груп вагонів під кінець процесу накопичення составів, формування поїздів підвищеної маси, а також інші заходи, які передбачають при розробленні оперативних планів на добу, зміну, 6-годинні періоди роботи і які націлені на пришвидшення ритму роботи станції. Але навіть при раціонально організованому процесі роботи станцій простій вагонів з переробкою складає майже половину загального часу знаходження вагонів на станції.

Тому найбільші можливості для скорочення добових вагоно-годин простою полягають у раціоналізації організації вагонопотоків на мережі в цілому. Розроблення якісного плану формування поїздів (ПФП) є найбільш ефективним заходом економії добових вагоно-годин накопичення. Для створення автоматизованої системи розрахунку ПФП і забезпечення його якості на сучасному рівні потрібні нові підходи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На північноамериканському континенті ключовим завданням у галузі організації вагонопотоків є завдання

компонування вагонів у блоки і закріплення їх за поїздами з одночасним вирішенням завдання планування роботи локомотивів і локомотивних бригад. У роботі [1] пропонується спеціально розроблений метаевристичний метод, призначений для вирішення, але невелика розмірність задачі, наведена в якості прикладу його реалізації, свідчить про його недосконалість. У роботі [2] запропоновано формулювання завдання маршрутизації вагонопотоків, як задачі визначення структури графа, у якій залізничні станції є вершинами, а блоки вагонів – дугами, для розв'язання задачі запропоновано алгоритм, створений на основі алгоритму гілок і границь, який генерує маршрут для кожного блока, розв'язуючи задачу пошуку найкоротшого шляху. Як недолік даної розробки слід зазначити недотримання нормативної кількості вагонів у поїздах, а також складність застосування для реальних залізничних полігонів, тому що при одночасному оперуванні вагонами і блоками на всьому полігоні завдання маршрутизації вагонопотоків переходить до класу задач великої і надвеликої розмірності. У статті шведських дослідників [3], опублікованій у журналі Європейского консорціуму з досліджень у галузі інформатики і математики, пропонується метод вирішення завдання розформування-формування поїздів на сортувальній станції за допомогою застосування багатостадійного формування «тимчасових» составів, кількість яких регулюється моделлю залежно від наявності вільних колій. Завдання формування составів сформульовано як багатопродуктова потокова задача, розв'язання якої пропонується за допомогою комп'ютерної програми-вирішувача, що використовує алгоритм на основі комбінації декількох методів математичного програмування з обмеженнями. Але самі автори зазначають, що для реальної задачі, яка має велику розмірність, використання евристичних методів локального пошуку або цілочисельного програмування було б більш доцільним. У статті [4] запропоновано математичні моделі на базі використання нейро-нечітких мереж для визначення доцільності формування і маршруту прямування групових поїздів. Також у статті запропоновано оригінальну методику оперативного коригування плану формування поїздів на основі використання еволюційного відбору. У статті [5] запропоновано оригінальний підхід до вирішення завдання раціонального розподілу сортувальної роботи між технічними станціями мережі залізниць, яка враховує побажання вантажовідправників і повинна забезпечити гарантію своєчасної доставки вантажів у погоджених з замовником термінах. У статті [6] запропоновано методи оперативного керування поїздопотоками на основі сучасних інформаційних і телекомунікаційних технологій.

Визначення мети та задачі дослідження. Для вирішення завдання розрахунку ПФП на сучасному якісному рівні необхідно створити автоматизовану систему керування вантажопотоками, яка б використовувала сучасні інформаційні технології і забезпечувала збір актуальної інформації про обсяги вагонопотоків, яку можна використовувати у якості вихідних даних. Але в першу чергу необхідно створити математичну модель для адекватного моделювання витрат відповідно до варіанта плану. Модель повинна враховувати всі обмеження, що стосуються залізничної інфраструктури, але, крім того, вона повинна бути гнучкою, щоб мати можливість максимально враховувати варіативність вихідних даних. Важливим є також і вибір методу оптимізації.

Основна частина дослідження. Складання плану формування поїздів – складне комбінаторне завдання, пов'язане з розрахунками великої кількості варіантів і

складних логічних дій. Тому для вирішення цього завдання доцільно запропонувати методи комбінаторної оптимізації. Комбінаторна оптимізація – пошук оптимального об'єкта в кінцевій множині об'єктів [7]. Таким оптимальним об'єктом і є оптимальний план формування поїздів, який потрібно відшукати в множині всіх можливих варіантів плану. Значення параметрів накопичення входять до вихідних даних для розрахунку ПФП як сталої величини. Але, хоча і в дуже вузькому діапазоні, на параметр накопичення можна впливати, змінюючи черговість розформування-формування поїздів та іншими організаційними заходами на станціях. Якщо включити параметри накопичення в модель не як сталі величини, а як стохастичні змінні, які можуть набувати значення в інтервалі, у межах якого на них можливо впливати, то це дасть змогу відшукати варіант плану з кращими показниками, хоча і потребуватиме здійснення додаткових дій для впливу на величини поточних параметрів накопичення. Для здійснення впливу на параметри накопичення доцільно також створити автоматизовані системи, які будуть оптимізувати оперативні плани роботи технічних станцій. З іншого боку використання параметра накопичення як випадкової величини відносить завдання побудови оптимального плану поїздів у такій постановці також і до задач стохастичної оптимізації.

Дослідження специфічних обчислювальних алгоритмів для задач стохастичної комбінаторної оптимізації в наш час лише розпочиняються. При тому, що інтерес до цієї проблеми значний, виникають труднощі як з боку стохастичної, так і збоку комбінаторної складових цих алгоритмів, які значно ускладнюють розроблення, застосування і тестування алгоритмів для задач цього класу. Тому в якості методу оптимізації можливе використання таких універсальних метаевристичних методів, як генетичні алгоритми. Використання метаевристичних методів оптимізації є зручним у застосуванні і з практичної точки зору воно знімає обмеження на формат і кількість системи обмежень математичної моделі. Таким чином, це надасть змогу врахувати в моделі можливість відхилення напрямку прямування вагонопотоків від найкоротшого маршруту, що є дуже важливим аспектом у сучасних умовах.

Важливий аспект використання генетичних алгоритмів – кодування. Кодування – це представлення розв'язку задачі, яку потрібно розв'язати за допомогою генетичного алгоритму, у вигляді вектора, який у термінах генетичних алгоритмів називається хромосомою. Кожен елемент такого вектора називається геном. Кодування повинно враховувати специфіку задачі і не повинно бути надлишковим, щоб хромосома мала якомога меншу довжину.

Що стосується задачі побудови плану формування поїздів, то розв'язок цієї задачі має містити варіанти об'єднання струменів. Кількість генів у хромосомі визначається кількістю ділянок залізничної мережі, які знаходяться між станціями уступів і вздовж яких склад струменів вагонопотоків є незмінним. Кожен ген буде містити число, яке відповідає номеру варіанта розбиття множини струменів на підмножини. Кількість таких варіантів розбиття залежить від кількості струменів і визначається за допомогою чисел Белла.

Якщо параметр накопичення набуває значення, які є відхиленням у бік зменшення від математичного очікування, тоді існує імовірність, що ці значення не будуть отримані при виконанні плану формування поїздів. Цей ризик у цільовій функції моделі потрібно врахувати. Але для цього потрібна кількісна міра ризику. Технічний ризик – це математичне очікування величини втрат. [8]

Тоді його можна виразити такою формулою:

$$R = P \cdot L,$$

де P – імовірність настання небажаної події;

L – величина втрат у разі настання небажаної події.

Імовірність настання небажаної події – це імовірність того, що величина параметра накопичення, яка була прийнята при побудові плану формування поїздів, буде перевищена. Параметри накопичення являють собою стохастичні змінні, задані нормальними законами розподілу, тому цю імовірність можна розрахувати за допомогою кумулятивної функції розподілу нормального закону за формулою

$$P = 1 - F(c) = 1 - \frac{1}{2}\left[1 + erf\left(\frac{c - \overline{c}}{\sigma\sqrt{2}}\right)\right],$$

де $erf(x)$ – функція похибок Лапласа.

Величину втрат можна визначити як вартість додаткових вагоно-годин накопичення, які виникнуть при перевищенні фактичних величин параметрів накопичення, і тих, які прийняті при розрахунку плану формування поїздів. Таким чином, цю величину можна визначити як різницю між математичним очікуванням параметра накопичення і поточним значенням параметра накопичення як стохастичної змінної, помноженої на норму кількості вагонів у складі поїзда і на вартість вагоно-години.

Цю функцію ризику слід обчислювати лише у випадку, коли поточне значення параметра накопичення виявиться меншим, ніж математичне очікуванням параметра накопичення, в іншому випадку можна вважати, що нема ризику виникнення додаткових витрат.

При використанні цільової функції у якості фітнес-функції генетичного алгоритму функція ризику буде відігравати роль штрафної функції і не дасть можливість всім стохастичним змінним, які є поточними значеннями параметрів накопичення, набувати лише мінімальних значень.

Тоді цільову функцію моделі побудови плану формування одногрупних поїздів можна записати як

$$C(x,c) = e_{В\cdot Г}\sum_{i=1}^{w}\left[\left(c_i m_i + \frac{1}{2}erfc\left(\frac{c_i - \overline{c_i}}{\sigma_i\sqrt{2}}\right)(c_i - \overline{c_i})m_i \cdot\right.\right.$$
$$\cdot Sgn\left(Sgn(c_i - \overline{c_i}) + 1\right) + \left(t_i^{обр} + t_i^{роз}\right)\sum_{u=1}^{л} n_u x_{iu}\Bigg)Sgn\left(\sum_{d=1}^{k} x_{dj}\right) +$$
$$\left.\left. + \sum_{j=1}^{л}\left(x_{ij} n_j\left(\sum_{h=2}^{q_i - 1} t_{hi}^{тран} + \sum_{r=1}^{z_i}\frac{L_{ir}}{V_{ir}^{діл}}\right)\right)\right] \to \min,$$

де w – кількість всіх можливих призначень;

m_i – норма кількості вагонів у складі поїзда на *i*-му призначенні;

c_i – поточний параметр накопичення *i*-го призначення;

$\overline{c_i}$ – математичне очікування величини параметра накопичення *i*-го призначення;

σ_i – середньоквадратичне відхилення параметра накопичення i-го призначення;

$t_i^{обр}$ – час обробки поїзда i-го призначення на станції розформування;

$t_i^{роз}$ – час розформування поїзда i-го призначення на станції розформування;

n_u – кількість вагонів u-го струменя;

k – кількість струменів вагонопотоків;

q_i – кількість технічних станцій на i-му призначенні;

z_i – кількість технічних станцій на *i*-му призначенні;

$t_{hi}^{тран}$ – час обробки транзитного поїзда без переробки на h-й станції i-го призначення;

$V_{ir}^{діл}$ – дільнична швидкість руху вантажних поїздів r-ї дільниці *i*-го призначення;

x_{ij} – змінна, яка набуває значення 1, якщо *i*-те призначення включає вагонопотік j-го струменя, в іншому випадку набуває значення 0;

$e_{В\cdot Г}$ – вартість вагоно-години;

Sgn – знакова функція;

$erfc$ – комплементарна функція похибок Лапласа.

Перший доданок у квадратних скобках являє собою витрати вагоно-годин на накопичення i-го призначення, другий доданок являє собою надлишкові витрати вагоно-годин на накопичення i-го призначення, що пов'язані з ризиком перевищення поточного значення параметра накопичення, якщо поточне значення параметра накопичення набуває значень менших, ніж математичне очікування цієї величини. Комплементарна функція похибок Лапласа – неелементарна функція, що являє собою інтеграл імовірності Лапласа:

$$erfc(x) = 1 - erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt ,$$

де $erf(x)$ – функція похибок Лапласа.

Комплементарна функція похибок використовується для розрахунку імовірності перевищення випадковою величиною, яка розподілена за нормальним законом, певного значення.

Третій доданок являє собою витрати вагоно-годин на розформування составів кожного призначення, які залежать від кількості вагонів. Четвертий доданок являє собою витрати вагоно-годин на проходження технічних станцій транзитом без переробки, а також витрати вагоно-годин у русі на дільницях між технічними станціями. Ці витрати також залежать від сумарної кількості вагонів усіх струменів вагонопотоків по кожному призначенню.

Дана цільова функція потребує мінімізації з урахуванням обмежень, які обумовлені технічними параметрами інфраструктури об'єктів полігону, а також технологічними особливостями перевізного процесу.

Однією з головних цілей вирішення завдання побудови плану формування поїздів є оптимальний розподіл роботи між технічними станціями. Ключовим параметром технічної станції є величина її переробної спроможності, яка визначається її колійним розвитком, пропускною спроможністю горловин і переробною спроможністю сортувальних пристроїв. Завдання розрахунку плану формування поїздів потрібно вирішувати з урахуванням обмеження за переробною спроможністю технічних станцій, яке можна записати як

$$\sum_{i=1}^{w} \sum_{j=1}^{k} n_j x_{ij} \gamma_{is} / m_i \le N_s^{пер} \quad , \mathrm{s} = 1..\mathrm{S} ,$$

де γ_{is} – набуває значення 1, якщо s-та станція є станцією розформування i-го

призначення, в іншому випадку набуває значення 0;

$N_s^{пер}$ – переробна спроможність s-ї станції;

S – кількість технічних станцій на полігоні.

Одночасно з роботою з переробки вантажних поїздів технічна станція виконує роботу з обробки і пропускання транзитних вантажних поїздів і пасажирських поїздів. Тому, окрім переробної спроможності, потужність кожної технічної станції обмежена також її пропускною спроможністю. Пропускна спроможність станції визначається як кількість вантажних поїздів (без переробки і з переробкою) і задана кількість пасажирських поїздів, яка може бути пропущена станцією за добу по всіх напрямках за умов роботи, що забезпечують повне використання наявних засобів, виходячи з технічної оснащеності, передової технології і найкращої організації руху поїздів [9]. Пропускна спроможність станції визначається найменшим значенням пропускної спроможності її приймально-відправних колій і горловин. Обмеження з пропускної спроможності технічних станцій можна записати як

$$\sum_{i=1}^{w}\sum_{j=1}^{k} n_j x_{ij} \omega_{is} / m_i \le N_s^{проп} - N_s^{пас} \quad , \mathrm{s} = 1..\mathrm{S} \quad ,$$

де ω_{is} – набуває значення 1, якщо s-та станція входить до маршруту i-го призначення (є станцією формування, розформування або транзитною), в іншому випадку набуває значення 0;

$N_s^{проп}$ – пропускна спроможність s-ї станції;

$N_s^{пас}$ – кількість пасажирських поїздів, що пропускає s-та станція протягом доби.

Потрібно також враховувати і те, що не тільки технічні станції, але і залізничні дільниці, що їх з’єднують, також мають обмеження з пропускної спроможності. Пропускна спроможність залізничної лінії – це найбільша кількість поїздів або пар поїздів встановленої маси, яка може бути пропущена за добу залежно від наявних технічних засобів, типу і потужності рухомого складу і прийнятих методів організації руху поїздів (тип графіка). До наявних технічних засобів можна віднести кількість колій, вид блокування на перегонах дільниці (автоматичне, напівавтоматичне), потужність тяглових підстанцій та інше. Обмеження з пропускної спроможності дільниць можна записати як

$$\sum_{i=1}^{w}\sum_{j=1}^{k} n_j x_{ij} \rho_{id} / m_i \le N_d^{проп} - N_d^{пас} \quad , \mathrm{d} = 1..\mathrm{D} \quad ,$$

де ρ_{id} – набуває значення 1, якщо d-та дільниця входить до маршруту i-го призначення, в іншому випадку набуває значення 0;

$N_d^{проп}$ – пропускна спроможність d-ї дільниці;

$N_d^{пас}$ – кількість пасажирських поїздів, що пропускає d-та дільниця протягом доби;

D – кількість дільниць на полігоні.

Для проведення моделювання було створено програмне забезпечення в середовищах Matlab (оптимізація цільової функції за допомогою генетичного алгоритму) і Mupad (візуалізація результатів оптимізації). На рис. 1 представлені вихідні дані для розрахунку: полігон, що являє собою розгалужену залізничну мережу, на якому наведені струмені вагонопотоків із зазначенням їх потужностей. Також на рис. 1 зображена динаміка зміни цільової функції в результаті роботи генетичного алгоритму, яка демонструє швидку збіжність алгоритму.

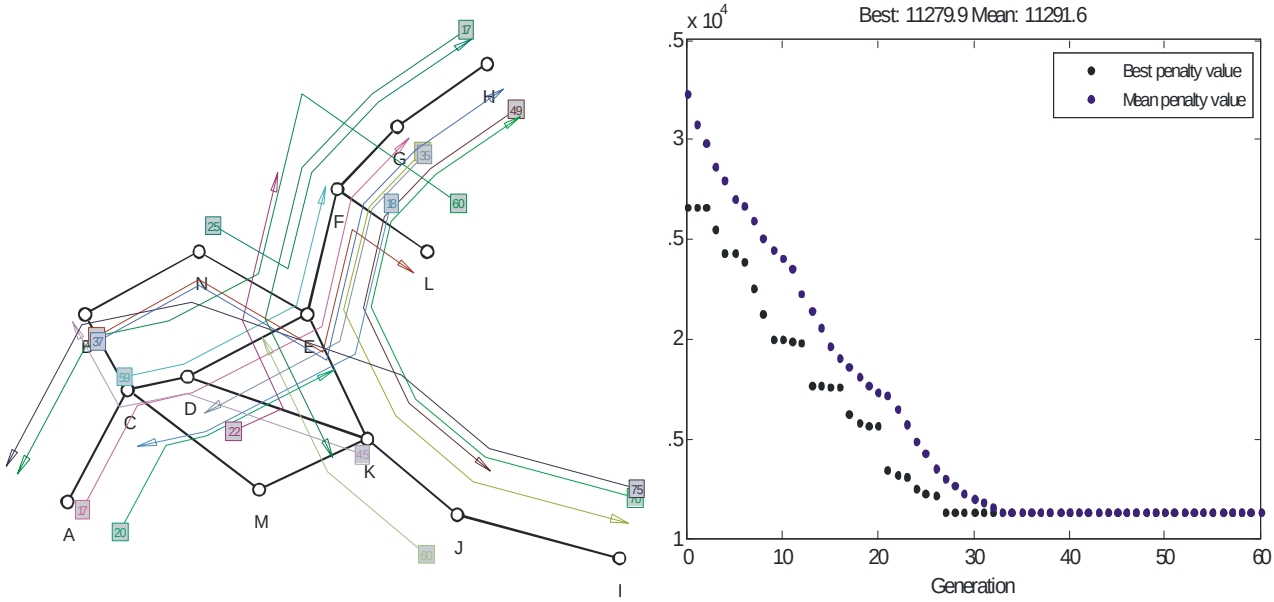

Рис. 1. Залізничний полігон із зазначеними струменями вагонопотоків і їх потужностями, динаміка зміни цільової функції при здійсненні оптимізації за допомогою генетичного алгоритму

На рис. 2 подано оптимальний план формування поїздів, що був розрахований у результаті здійснення оптимізації запропонованої цільової функції, який представлений у вигляді тривимірної графічної моделі.

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Завдання розрахунку оптимального плану формування поїздів було і залишається одним з ключових завдань у сфері організації вантажних залізничних перевезень на залізницях України. Бурний розвиток нових математичних методів оптимізації та комп'ютерної техніки створюють нові можливості для вирішення цього складного завдання. Подолання обчислювальних труднощів при вирішенні цього завдання можливе вже на сучасному рівні розвитку при застосуванні метаевристичних методів оптимізації, які використовують алгоритми керованого пошуку і при коректному їх застосуванні і відповідному налаштуванні забезпечують бажану точність розрахунків. Це дасть змогу вивести технології керування вагонопотоками на новий якісний рівень, дозволить створити сучасну автоматизовану систему керування вагонопотоками, яка зокрема зможе здійснювати коригування плану формування поїздів і в оперативному режимі.

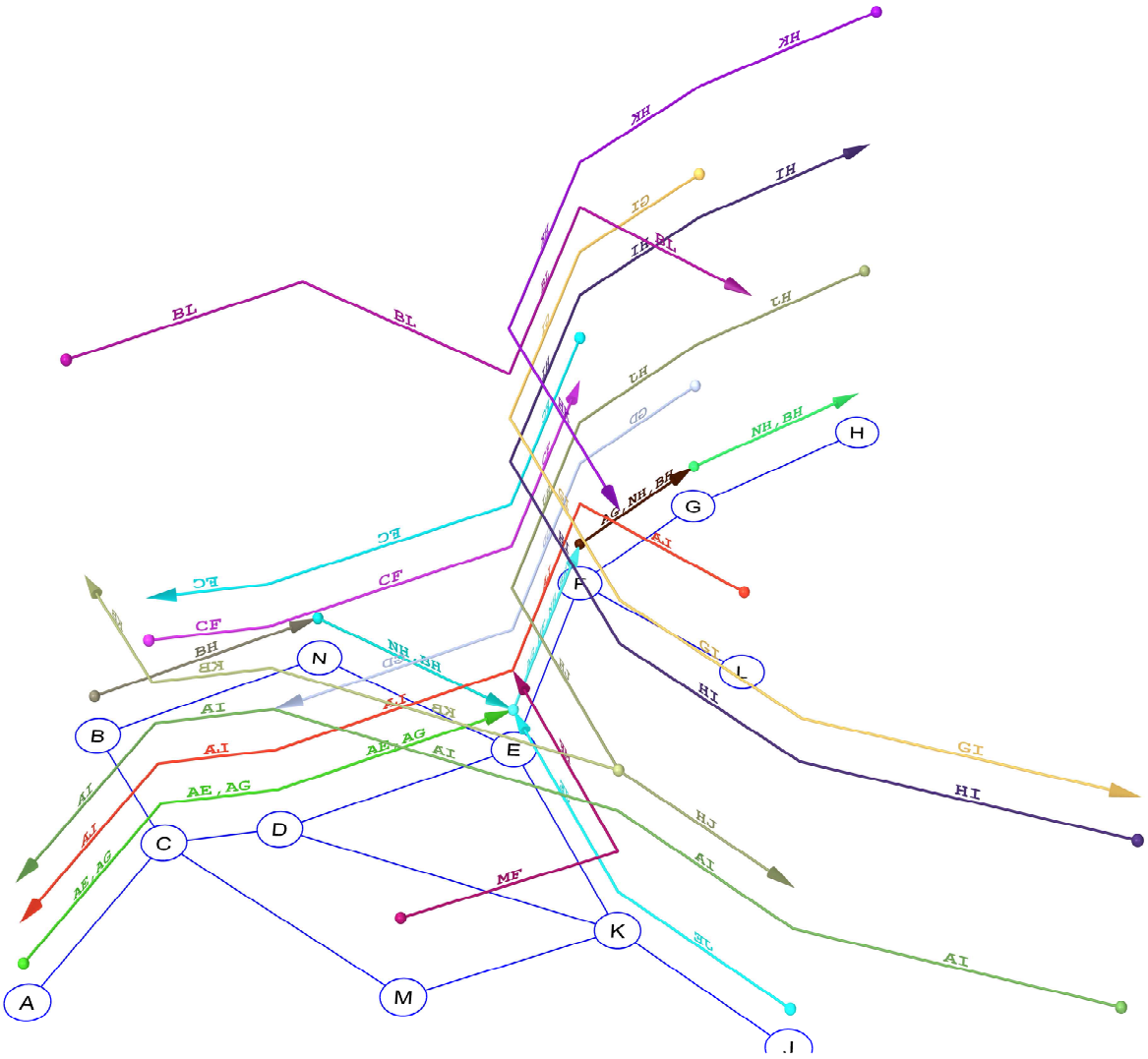

Рис. 2. Тривимірна візуалізація результатів розрахунку плану формування поїздів

Список використаних джерел

1. Yaghini, M. A. Population-based algorithm for the railroad blocking problem [Текст]/ M.Yaghini, M. Seyedabadi, M. Khoshraftar // J Ind Eng Int, SpringerOpen. – 2012. – №8(8). – P. 30-41.

2. Newton, H.N. Constructing railroad blocking plans to minimize handling costs [Text] / H.N. Newton, C. Barnhart, P.H. Vance// Transportation Science. – 1998. – № 32. – P. 330–345.

3. Kreuger, P. A. Challenge for Combinatorial Optimisation [Text] / P. Kreuger, M. Aronsson // ERCIM News. – 2007. – № 68. – P. 23-25.

4. Прохорченко, А. В. Удосконалення технології коригування плану формування поїздів на основі погодженої організації групових поїздів оперативного призначення [Текст] / А. В. Прохорченко, Л. В. Корженівський // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2008. – № 6/6(36). – С. 37-40.

5. Butko, T. V. Formalization of the technology of arranging tactical group trains [Text] / T. V. Butko, A. V. Prokhorchenko, A. Kyman // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – 3 (76). – P. 38-43.

6. Efficient scheduling of railway traffic based on global information of train [Text] / F. Li, Z. Gao, K. Li, L. Yang // Transportation Research Part B. – 2008. – № 42. – P. 1008-1030.

7. Schrijver, A. Combinatorial Optimization: Polyhedra and Efficiency [Text] / A. Schrijver. – Berlin: Springer, 2002. – 1884 P.

8. An Introduction to Factor Analysis of Information Risk (FAIR) [Text] // Risk Management Insight LLC – 2006. – P. 11-13.

9. Антонюк, И. Д. Справочная книга начальника станции [Текст] / И. Д. Антонюк, В.Г. Орлов, А. В. Самсонов. – 2-е изд. перераб. – М.: Транспорт, 1969. – 464 с.

Прохоров Віктор Миколайович, інженер кафедри управління експлуатаційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту.
Рябушка Юлія Анатоліївна, інженер кафедри управління експлуатаційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057)7301088.

Prokhorov Viktor Mykolaiovych, engineer of cathedra of management of operational work, Ukrainian State University of Railway Transport.
Riabushka Yulia Anatoliivna, engineer of cathedra of management of operational work, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 7301088.

Стаття прийнята 02.11.2016 р.