

УДК 656.222.1(477)

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.154.2015.65927>

**УДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ ФОРМУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ МАРШРУТІВ  
ПРЯМУВАННЯ ПРИМІСЬКИХ ПАСАЖИРСЬКИХ ПОЇЗДІВ НА ЗАЛІЗНИЦЯХ УКРАЇНИ**

Канд. техн. наук Д.В. Константинов

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ  
МАРШРУТОВ СЛЕДОВАНИЯ ПРИГОРОДНЫХ ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДОВ НА  
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ УКРАИНЫ**

Канд. техн. наук Д.В. Константинов

**IMPROVE THE MODEL FORMATION OF RATIONAL ROUTE COMMUTER TRAINS ON THE  
RAILWAYS OF UKRAINE**

Ph. Doct. D.V. Konstantinov

*У роботі було розглянуто питання про раціоналізацію організації маршрутів приміських поїздів на залізницях України. Розроблено модель, за допомогою якої можна здійснювати формування оптимальних маршрутів прямування приміських поїздів на основі використання еволюційного моделювання та генетичних алгоритмів.*

**Ключові слова:** приміські поїзди, приміські перевезення, генетичний алгоритм, моделювання маршрутів, оптимальний маршрут.

*В работе был рассмотрен вопрос про рационализацию организации маршрутов пригородных поездов на железных дорогах Украины. Разработана модель, с помощью которой можно осуществлять формирование оптимальных маршрутов следования пригородных поездов на основе использования эволюционного моделирования и генетических алгоритмов.*

**Ключевые слова:** пригородные поезда, пригородные перевозки, генетический алгоритм, моделирование маршрутов, оптимальный маршрут.

*In this paper we addressed the issue of streamlining the organization of routes commuter trains on the railways of Ukraine. We developed a model with which to carry out the formation of optimal routes for commuter trains using evolutionary modeling and genetic algorithms.*

**Keywords:** commuter trains, commuter transportation, genetic algorithm, simulation routes, the best route.

**Вступ.** Однією з найважливіших задач підвищення якості роботи транспорту є удосконалення роботи підсистем планування та управління. Необхідність обробки великого обсягу інформації, що потрібна для прийняття ефективних управлінських рішень на різні періоди часу, потребує використання сучасних інформаційних технологій, які можуть функціонувати як системи підтримки прийняття рішень (СППР) на основі сучасних науково-математичних методів.

У сучасних умовах в основі залізничних приміських пасажирських перевезень лежать незмінні впродовж кількох десятиріч технології перевізного процесу, які обмежують здатність пасажирського комплексу гнучко реагувати на

коливання попиту споживачів ринку приміських пасажирських перевезень. Виходячи з цього, для зниження збитковості приміських пасажирських перевезень необхідним є застосування організаційних технологій, в основу яких покладені концепції гнучкого адаптивного регулювання перевізного процесу оперативного та довгострокового характеру відповідно до принципів пасажирської логістики.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями.** Запропоновані раніше в [1-4] моделі формування адаптивної системи приміських перевезень для взаємного узгодження та

практичної реалізації потребують ув'язки їх роботи. Це можливо здійснити шляхом створення загальної моделі організації приміських перевезень, завданням якої буде розробка маршрутів приміського руху на основі збору звітних даних щодо оперативно-регульовальної роботи на станціях та результатів визначення доцільності вибору подальшого напрямку слідування. Результатом роботи такої системи буде створення найбільш економічно та технологічно доцільних маршрутів прямування приміських поїздів на певних приміських мережах, що дозволить надати системі приміських перевезень ще більшої гнучкості в роботі за рахунок розвитку та узагальнення механізмів адаптації. Розробку такої системи доцільно реалізувати на основі еволюційних методів моделювання з використанням генетичних алгоритмів [4].

Згідно з Концепцією Державної програми реформування залізничного транспорту від 27 грудня 2006 р. № 651-р та Програмою реструктуризації галузі одним із основних напрямків розвитку організації приміських пасажирських перевезень є формування та подальше удосконалення гнучких технологій управління перевізним процесом, що є одним з напрямків вирішення проблеми значної збитковості та покращення ресурсозбереження.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В останніх роботах, присвячених питанню формування адаптивної системи організації приміських перевезень [1-3], було сформовано моделі удосконалення організації приміських перевезень, що спрямовані на вирішення задач оперативного регулювання складів та управління процесом просування приміських поїздів. Однак зазначені моделі розроблені здебільше для подальшого формування на їх основі СППР, що обмежує їх використання локальним характером застосування в межах станції і незручність при формування на їх основі комплексних рішень.

В роботі [4] було запропоновано використання генетичного алгоритму для моделювання системи формування оптимальних маршрутів прямування

приміських поїздів, яка дозволяє формувати комплексні замкнені маршрути з урахуванням вимог безпеки руху технічного та технологічного характеру. Однак подана в [4] модель є відокремленою за своєю структурою від [1-3] та потребує ув'язки з ними.

**Визначення мети та задачі дослідження.** Отже, метою дослідження є формування загальної моделі організації приміських маршрутів з використанням математичних апаратів нечіткої логіки, нейронних мереж та генетичного алгоритму на основі раніш запропонованої в [4]. Завданням дослідження є взаємна функціональна ув'язка структур моделей для отримання комплексної моделі, що може бути в перспективі основою СППР.

**Основна частина дослідження.** Моделювання маршрутів прямування приміських поїздів полягає в пошуку оптимальних варіантів їх курсування в межах певної мережі, моделлю якої може бути зважений граф  $G(v,r)$ , де вагами ребер є гени  $h_{ij}^k$  [4].

Завдання пошуку оптимального маршруту курсування приміського поїзда в межах певної мережі полягає у знаходженні деякої сукупності дільниць прямування поїзда від  $i$ -х станцій відправлення до  $j$ -х станцій призначення, послідовне проходження яких поїздом формує загальний маршрут, який порівняно з іншими варіантами є більш ефективним відносно критерію оптимізації, враховуючи, що станції  $i$  та  $j$  є станціями обороту приміських поїздів на певних напрямках. Тому враховуючи необхідність формування генотипу (набору оптимальних маршрутів) певної мережі в умовах моделювання на основі генетичного алгоритму згідно із завданням пошуку певної оптимальної комбінації маршрутів доцільно подати в ролі хромосоми деякий маршрут, що складається з певної сукупності дільниць  $i-j$  залізничного вузла, де кожний ген відповідно моделює дільницю прямування між певною парою станцій  $i-j$ . Структуру хромосоми подано у вигляді [4]

$$H = \sum_{i,j=1}^v h_{ij} \in \{h_{ij}^1, h_{ij}^2, \dots, h_{ij}^k, h_{ij}^{k+1}, \dots, h_{ij}^m\} \quad h_{ij}^k = \begin{cases} 1 - \text{можливий} \\ 0 - \text{неможливий} \end{cases} \quad (1)$$

де  $V$  - кількість станцій у вузлі, що моделюється;

$h_{ij}^k$  - ген, що моделює певний варіант слідування від станції відправлення  $i$  до станції призначення  $j$  і набуває значення 1 або 0;

$m$  - загальна кількість генів у певному маршруті;

$k$  - певний ген маршруту із загальної сукупності  $m$ ,  $k \in m$ .

Отже, генотипом графу  $G(R)$  буде набір хромосом  $H \in \{h_{ij}^1, h_{ij}^2, \dots, h_{ij}^k\}$ , кожна з яких відповідно моделює один певний маршрут для приміського поїзда. При цьому гени в кожному певному маршруті розташовуються іншим чином, моделюючи послідовність дільниць прямування у маршруті [4].

Початковим етапом вирішення завдання пошуку оптимальної комбінації в моделі генетичного алгоритму є формування вихідної популяції, що здійснюється шляхом випадкового перебору та розстановки генів і їх значень в заданій сукупності хромосом з поданням їх як двійникової послідовності фіксованої довжини. Кожен ген в хромосомі моделює певну дільницю слідування від станції відправлення  $i$  до станції призначення  $j$  та може набувати значення 1 або 0. Таким чином, в комбінації генів кожної хромосоми подано певний маршрут слідування, гени якого розташовуються послідовно у порядку слідування дільницями маршруту [4].

Оцінювання пристосованості хромосом в популяції або вибір найкращих варіантів здійснюється за допомогою фітнес-функції для кожної хромосоми вихідної популяції. Завдання пошуку оптимального маршруту прямування полягає у визначенні варіанта слідування у вузлі з мінімальними експлуатаційними витратами, що вказує на необхідність спрямування задачі фітнес-функції на винайдення мінімального рішення, яке буде

відповідати мінімальним витратам на прямування приміського поїзда.

При цьому необхідно врахувати деякі особливості формування маршрутів в умовах використання генетичного алгоритму:

1. Кінцевою станцією прибуття  $j$  в останньому гені  $h_{ij}^m$  кожного обраного маршруту має бути початкова станція відправлення  $i$  в першому гені  $h_{ij}^1$ , що вказує на необхідність формування замкнутих кільцевих маршрутів.

2. Станція прибуття  $j$  кожного певного гена  $h_{ij}^k$  має збігатися зі станцією відправлення  $i$  наступного гена  $h_{ij}^{k+1}$ .

3. Сумарна довжина дільниць прямування обраних генів кожного маршруту  $\sum_{i,j=1}^n t_{ij}^k h_{ij}^k$  не повинна перевищувати максимальну відстань руху між двома суміжними технічними операціями ТО-2 з приміським рухомим складом –  $L_{\max}^{TO-2}$ .

4. Сумарний час прямування по  $i$ - $j$  дільницях обраних генів згідно зі сформованим маршрутом  $\sum_{i,j=1}^n t_{ij}^k h_{ij}^k$  не повинен перевищувати тривалості прямування до встановленого графіком руху поїздів пункту зміни локомотивних бригад  $T_{\max}^{лб}$ .

Визначені умови формують систему обмежень, яка має бути закладена у фітнес-функцію і потребує її структуризації. Ці умови є основою для обмеження сукупності змодельованих маршрутів шляхом перевірки на їх виконання та відсіювання тих, що їх не пройшли, тобто найменш пристосованих хромосом [4].

$$FF1(H) = \begin{cases} \min, \text{ якщо } i \in h_{ij}^1 = j \in h_{ij}^{1+m} \text{ та } j \in h_{ij}^k = i \in h_{ij}^{k+1} \text{ при } h_{ij}^k = 1 \\ \max \text{ в іншому випадку} \end{cases}, \quad (2)$$

$$FF2(H) = \begin{cases} \min, \text{ якщо } \sum_{i,j=1}^n t_{ij}^k h_{ij}^k \leq L_{\max}^{TO-2} \text{ та } \sum_{i,j=1}^n t_{ij}^k h_{ij}^k \leq T_{\max}^{лб} \text{ при } h_{ij}^k = 1 \\ \max \text{ в іншому випадку} \end{cases}. \quad (3)$$

Завданням моделювання є пошук оптимального маршруту з сукупності змодельованих випадковим чином і перевірених в системі обмежень згідно з (2) та (3). Критерієм пошуку є мінімальні сумарні витрати від слідування змодельованого хромосомою маршруту, що складаються з суми витрат на прямування по кожній дільниці відповідно обраних генів

$$FF3(H) = \min \sum_{i,j=1}^n c_{ij}^k h_{ij}^k, \quad (4)$$

де  $c_{ij}^k$  - рівень витрат на прямування згідно з геном  $h_{ij}^k$ , що визначається витратами на оперативне регулювання по станції відправлення та витратами на шляху прямування через неповне використання населеності згідно з [3].

$$c_{ij}^k = \sum_{n=1}^p x_{ij}^n (C_{ij}^n + N_{ij}^n), \quad (5)$$

де  $C_{ij}^n$  - еквівалент витрат на підготовку певного приміського поїзда до відправлення на один з можливих напрямків, що визначається фізичною кількістю вагонів, які необхідно причепити або відчепити відповідно до завдання оперативного регулювання;

$N_{ij}^n$  - еквівалент витрат на шляху прямування через неповне використання населеності, що визначається фізичною кількістю вагонів, які залишаються порожні.

$$N_{ij}^n = \sum_{n=1}^p B_n^{\text{факт}} - \sum_{n=1}^p B_n^{\text{факт}} \cdot H_{ij}^n / 100\%, \quad (6)$$

де  $\sum_{n=1}^p B_n^{\text{факт}}$  - кількість секцій в приміському поїзді по відправленні зі станції обороту на  $n$ -й напрям;

$H_{ij}^n$  - населеність приміського поїзда по відправленні;

$x_{ij}^n$  - параметр, що визначає рівень доцільності відправлення приміського поїзда на  $n$ -й напрям за результатом роботи моделі [3] і визначається як

$$x_{ij}^n = 100 - X, \quad (7)$$

де  $X$  - відповідно до [3] визначає задачу визначення рівня доцільності відправлення приміського поїзда на  $n$ -й напрям.

$$X = (C_{ij}^n, H_{ij}^n) \rightarrow D \in \{d_1, d_2, \dots, d_k\}, \quad (8)$$

де  $d_1$  - доцільність призначення 99,9%;  
 $d_2$  - доцільність призначення 87,5%;  
 $d_3$  - доцільність призначення 75%;  
 $d_4$  - доцільність призначення 62,5%;  
 $d_5$  - доцільність призначення 50%;  
 $d_6$  - доцільність призначення 37,5%;  
 $d_7$  - доцільність призначення 25%;  
 $d_8$  - доцільність призначення 12,5%;  
 $d_9$  - доцільність призначення 0,1%.

Визначення значення параметра  $X$  здійснюється за результатом роботи нейро-нечіткої моделі, структура якої подана в [3].

Таким чином, оцінювання пристосованості хромосом в популяції здійснюється шляхом перевірки їх на виконання трьох зазначених умов. Отже, фітнес-функція має складатися з трьох частин, кожна з яких здійснює обчислення значення виконання певної вимоги згідно з (2), (3) та (4). При цьому загальне рішення, що складається з суми значень згідно з рішенням кожної умови, спрямовується на винайдення найменшої величини

$$FF(H) = (FF1(H) + FF2(H) + FF3(H)) \Rightarrow \min. \quad (9)$$

Якщо відомо або задано мінімальне значення функції пристосованості, зупинка алгоритму може бути здійснена після

досягнення цього значення, що буде означати винайдення оптимального рішення. Винайдення на даному етапі оптимального

рішення, що відповідає найменшим витратам на прямовання певного маршруту, є завершенням роботи моделі генетичного алгоритму у зв'язку з виділенням найкращої хромосоми.

Якщо ж у сукупності отриманих рішень жодне не відповідає оптимальному значенню, наступним етапом моделювання є селекція хромосом, яка являє собою вибір, згідно розрахованих при оцінюванні пристосованості хромосом в популяції значень фітнес-функції, тих хромосом які будуть задіяні у створенні нащадків для наступної популяції. Цей вибір здійснюється за принципом природного відбору, згідно з яким найбільші шанси на участь у створенні нових осіб мають хромосоми з найкращими, відповідно до поставленого завдання значеннями фітнес-функції. В даній задачі в процесі селекції хромосом виділяються ті, що мають мінімальні значення  $FF(H)$ . Вони формують батьківську популяцію.

Наступним етапом до хромосом, відібраних за допомогою селекції, застосовуються генетичні оператори. В класичному генетичному алгоритмі використовують два основних генетичних оператори – оператор схрещування та оператор мутації. В процесі використання оператора схрещування хромосоми з батьківської популяції об'єднуються в пари випадковим шляхом з вірогідністю 0,5, після чого для кожної відібраної пари випадковим чином визначається точка схрещування  $l_k$  в діапазоні  $[1, k-1]$ . В результаті схрещування пари батьківських хромосом хромосома нащадка складається на позиціях від 1 до  $l_k$  з генів одного з батьків, а на позиціях від  $l_k$  до  $k-1$  з генів іншого.

При використанні оператора мутації відбувається зміна значення гена в хромосомі

на протилежне з певною вірогідністю. Хромосоми, отримані в результаті використання генетичних операторів до тимчасової батьківської популяції, включаються у склад нової початкової популяції, яка бере участь у новій ітерації генетичного алгоритму, для якої знову обчислюється оцінювання пристосованості хромосом в популяції. Наведений цикл операцій повторюється, доки не буде винайдено хромосому з найкращим значенням фітнес-функції. Результатом вирішення завдання пошуку оптимального маршруту певного приміського поїзда у вузлі є винайдення хромосоми з мінімальним значенням  $FF(H)$  відносно інших.

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** Реалізація на основі запропонованої моделі системи підтримки прийняття рішення на рівні відділу управління приміських перевезень дозволить автоматизувати процес формування приміських маршрутів на напрямках слідування приміських поїздів та удосконалити існуючі графіки руху та обороту приміських поїздів. Використання запропонованої моделі у комплексі з моделями прогнозування приміських пасажиропотоків, оперативного регулювання составів приміських поїздів та визначення оптимальних напрямків слідування по станціях відправлення [1-3] на основі створення розподіленої СППР дозволить якісно покращити інформаційне забезпечення і рівень автоматизації приміських перевезень. Це надасть можливість знизити експлуатаційні витрати та реалізувати на даній основі перспективну технологію організації руху приміських поїздів за модульним принципом в умовах використання нових зразків рухомого складу.

### Список використаних джерел

1. Константинов, Д.В. Удосконалення технології організації приміських перевезень [Текст] / Т.В. Бутко, Д.В. Константинов // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – Вип. 102. – С. 15-23.
2. Константинов, Д.В. Розробка системи підтримки прийняття рішень з застосуванням нейронечіткого моделювання для реалізації оперативного регулювання композиції составів у приміському сполученні [Текст] / Д.В. Константинов // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – Вип. 111. – С. 68-81.

3. Константинов, Д.В. Моделирование оперативного регулирования маршрутами примесского ruchu на основе нечеткой логики та нейронних мереж [Текст] / Т.В. Бутко, Д.В. Константинов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – №1(80). – С. 13-19.

4. Константинов, Д.В. Удосконалення організації маршрутів прямування приміських пасажирських поїздів на залізницях України [Текст] / Д.В. Константинов, Д.О. Бурлакова // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – Вип. 131. – С. 149-157.

Рецензент д-р техн. наук, професор Є. С. Альошинський

---

Константинов Денис Володимирович, канд-т техн. наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-88. E-mail: kdv1984@ukr.net.

Konstantinov Denis Vladimirovych, Ph. Doct. docent department of upravlinya ekspluatacijnoyu robotoyu Ukraine State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-88. E-mail: kdv1984@ukr.net.

Наукова праця здана до друку 14.07.2015 року