

**СИНХРОНІЗАЦІЯ РОЗКЛАДІВ РУХУ МІСЬКОГО ГРОМАДСЬКОГО
ТРАНСПОРТУ У ПЕРЕСАДОЧНОМУ ВУЗЛУ З ВИКОРИСТАННЯМ
ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ**

д.т.н., професор кафедри Вдовиченко В.
транспортних технологій,
аспірантка Мельнікова Ю.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

У сучасних умовах урбанізації та зростання навантаження на транспортну інфраструктуру особливого значення набуває забезпечення злагодженого функціонування системи міського громадського транспорту. Одним із ключових елементів ефективної транспортної системи є надійна та зручна організація пересадок, що мінімізує загальний час поїздки пасажирів та сприяє зниженню заторів і навантаження на довкілля. Проблема синхронізації розкладів руху в пересадочних вузлах є складною з огляду на багатофакторність, динамічність транспортного середовища та обмеженість ресурсів.

Традиційні методи планування розкладів, що базуються на жорстких аналітичних моделях або евристичних правилах, часто не забезпечують оптимального результату в умовах складних і змінних вхідних даних. У цьому контексті зростає інтерес до застосування методів штучного інтелекту, зокрема генетичних алгоритмів (ГА) - потужного інструменту глобальної оптимізації, що імітує еволюційні процеси природного відбору.

Метою дослідження є аналіз підходів до синхронізації розкладів громадського транспорту в межах пересадочного вузла з використанням генетичних алгоритмів, які дозволяють мінімізувати час очікування пасажирів при пересадках та підвищити загальну якість транспортного обслуговування. У дослідженнях розглядаються особливості побудови моделі, формалізація функції пристосованості, вибір параметрів алгоритму та результати моделювання на прикладі типового пересадочного вузла великого міста.

Синхронізація розкладів міського громадського транспорту у пересадочних вузлах є однією з ключових задач транспортного планування, що безпосередньо впливає на якість обслуговування пасажирів [1-3]. У межах цієї задачі необхідно забезпечити узгодженість прибуття і відправлення транспортних засобів різних маршрутів таким чином, щоб звести до мінімуму час очікування при пересадках. Враховуючи складність системи з великою кількістю змінних параметрів, обмежень та цільових критеріїв, використання класичних аналітичних методів часто є недостатньо ефективним. Одним із перспективних підходів до вирішення цієї задачі є застосування генетичних алгоритмів - евристичних методів оптимізації, що базуються на принципах еволюції біологічних популяцій.

Генетичні алгоритми дозволяють ефективно здійснювати пошук у великих та складних просторах рішень, зокрема при наявності локальних екстремумів та нелінійних залежностей між змінними. Основними складовими генетичного алгоритму є представлення розкладу у вигляді хромосоми (індивіда), функція пристосованості, яка оцінює якість рішення (наприклад, загальний час очікування пасажирів або кількість втрачених пересадок), а також оператори відбору, схрещування та мутації, що забезпечують еволюцію популяції від одного покоління до іншого.

У межах дослідження кожна особина популяції кодує варіант розкладу руху транспортних засобів, який визначає конкретні моменти прибуття і відправлення в пересадочному вузлу. Функція пристосованості враховує не лише час очікування пасажирів при пересадках, але й обмеження, пов'язані з інтервалами руху, місткістю транспортних засобів, допустимими відхиленнями від базових розкладів, а також рівнем завантаженості пересадочного вузла у години пік. Використання адаптивних механізмів контролю параметрів алгоритму, зокрема змінної ймовірності мутації та динамічного масштабування популяції, дозволяє підвищити ефективність пошуку оптимального рішення.

Перевагою генетичного підходу є його здатність генерувати кілька прийнятих альтернатив, з яких можна обрати рішення, найбільш придатне з погляду практичної реалізації та стратегії розвитку міської транспортної системи. Застосування такого методу також дозволяє враховувати стохастичний характер попиту на перевезення, варіативність дорожніх умов і можливість виникнення відхилень від розкладу у реальному часі. Це відкриває перспективи інтеграції генетичних алгоритмів із сучасними системами підтримки прийняття рішень у транспортному диспетчерському управлінні.

Отже, використання генетичних алгоритмів для синхронізації руху громадського транспорту у пересадочних вузлах є ефективним інструментом оптимізації, який поєднує високу адаптивність до змін середовища з можливістю досягнення збалансованих рішень у багатокритеріальному середовищі. Це створює основу для побудови більш гнучких та орієнтованих на пасажирів систем організації міського руху.

Сучасні інформаційні технології відіграють ключову роль у реалізації складних оптимізаційних завдань, пов'язаних з плануванням і керуванням рухом міського пасажирського транспорту. Одним із найперспективніших підходів до автоматизації процесу синхронізації розкладів є використання програмних методів, які базуються на застосуванні генетичних алгоритмів. Ці методи дають змогу враховувати багатфакторність транспортної системи, її динамічну природу та обмеження, пов'язані з пасажирським попитом, пропускну здатністю інфраструктури та режимами руху.

Програмна реалізація моделі синхронізації розкладів включає кілька основних компонентів: модуль генерації початкової популяції розкладів, блок обчислення функції пристосованості, оператори генетичної еволюції (схрещування, мутація, відбір), а також механізми збереження найкращих рішень (елітного відбору) та адаптації параметрів алгоритму у процесі пошуку. Розклади кодуються у вигляді хромосом, де кожен ген відповідає часу прибуття або відправлення транспортного засобу на певному маршруті або зупинці в межах пересадочного вузла.

У якості мови реалізації часто обираються високорівневі платформи програмування, зокрема Python, MATLAB або Java, які дозволяють швидко створювати прототипи, візуалізувати процес оптимізації та інтегрувати моделі з базами даних про рух транспорту. Для прискорення розрахунків можливе використання паралельних обчислень та хмарних технологій. Дані для роботи алгоритму зазвичай формуються на основі розкладів руху, GPS-відстеження транспорту, а також статистики пасажиропотоків.

Однією з важливих функцій програмної системи є забезпечення інтерактивного налаштування вагових коефіцієнтів у функції пристосованості, що дозволяє адаптувати модель під конкретні умови міста або пересадочного вузла.

Наприклад, у години пік можлива перевага критерію мінімізації затримок, а у міжпіковий час - забезпечення рівномірності інтервалів. Це підвищує гнучкість застосування алгоритму на практиці.

Крім того, програмні методи забезпечують збереження історії пошуку рішень, що дозволяє аналізувати ефективність попередніх сценаріїв, формувати базу знань для майбутніх планувань і використовувати отримані рішення як початкову популяцію для подальших оптимізацій. Також передбачається можливість інтеграції з міськими інтелектуальними транспортними системами (ІТС) для адаптації розкладів у режимі реального часу відповідно до фактичного стану дорожнього руху.

Таким чином, програмні методи, що базуються на генетичних алгоритмах, формують потужний інструмент для автоматизованої синхронізації руху міського пасажирського транспорту. Вони поєднують переваги еволюційного підходу з можливостями сучасних обчислювальних технологій, забезпечуючи високу якість рішень у складному багатокритеріальному середовищі.

Успішна реалізація принципів синхронізації руху міського пасажирського транспорту на практиці демонструє вагомі переваги цього підходу для підвищення ефективності функціонування транспортної системи, зменшення заторів і покращення рівня обслуговування пасажирів. У різних містах світу впроваджено низку рішень, що ґрунтуються на інтеграції розкладів між різними видами транспорту, автоматизованому плануванні пересадок та адаптивному управлінні рухом у реальному часі.

Одним із найбільш відомих прикладів є система громадського транспорту у місті Цюрих (Швейцарія), де функціонує високорівнева модель синхронізації руху трамваїв, автобусів та поїздів приміського сполучення. Розклади складаються з урахуванням гарантованих пересадок, що дає змогу пасажирам здійснювати швидку зміну маршруту з мінімальним часом очікування. Централізована система управління рухом відстежує реальні позиції транспортних засобів та, у разі затримок, автоматично коригує часи відправлення суміжних маршрутів для забезпечення збереження пересадки.

У Копенгагені (Данія) діє інтегрована транспортна система Movia, що об'єднує автобусні маршрути, метрополітен та залізничний транспорт. Важливою особливістю є застосування інтелектуальних алгоритмів оптимізації розкладів із пріоритетом пересадок на ключових вузлах. Розклади адаптуються до пасажирських потоків за даними електронних квитків та мобільних додатків, що дозволяє ефективно реагувати на зміну попиту у різний час доби. При цьому частина маршрутів координується за принципом «пульсового графіка» — коли всі транспортні засоби прибувають і відправляються з вузла в межах короткого часових інтервалів, створюючи зручні вікна пересадки.

У японському місті Нагоя реалізовано систему синхронізації між автобусним сполученням та лініями міського метро, де основна увага приділяється точності дотримання розкладів та динамічній координації у разі непередбачених збоїв. Завдяки розвиненій цифровій інфраструктурі, система в режимі реального часу враховує запізнення та оперативно коригує розклад наступних рейсів, інформуючи водіїв та пасажирів через мобільні платформи.

У Бразилії, у місті Куритіба, яке відоме своїм новаторським підходом до організації автобусного транспорту (система BRT), також впроваджено систему синхронізації маршрутів, що функціонує на основі часових вікон для пересадок на головних транспортних коридорах. Завдяки централізованому управлінню й

заздалегідь узгодженим розкладам вдається мінімізувати час очікування, незважаючи на великі обсяги перевезень.

В Україні елементи синхронізації впроваджуються в Києві та Львові, зокрема у межах проектів із цифровізації транспортної системи та запровадження електронного квитка. Проте поки що ці рішення мають обмежений масштаб і не забезпечують повної інтеграції між усіма видами транспорту, що створює потенціал для подальшого вдосконалення.

Аналіз міжнародного досвіду свідчить про високу ефективність синхронізації розкладів руху у великих містах за умов системного підходу, інтеграції цифрових платформ та адаптивних алгоритмів планування. Успішні приклади підтверджують доцільність використання сучасних методів оптимізації, зокрема генетичних алгоритмів, для досягнення високого рівня злагодженості транспортної мережі та покращення умов пересування пасажирів.

У результаті дослідження було обґрунтовано доцільність використання генетичних алгоритмів як ефективного інструменту для вирішення задачі синхронізації руху міського громадського транспорту у межах пересадочного вузла. Запропонований підхід дозволяє враховувати множинні обмеження й критерії оптимальності, зокрема мінімізацію часу очікування пасажирів, забезпечення гарантованих пересадок, дотримання транспортних інтервалів і рівномірність пасажиропотоків.

Література

1. Nasmachnow, S., & Risso, C. (2021). Exact and Evolutionary Algorithms for Synchronization of Public Transportation Timetables Considering Extended Transfer Zones. *Applied Sciences*, 11(15), 7138. <https://doi.org/10.3390/app11157138>
2. Huang, K., Wu, J., Sun, H., & Yang, X. (2022). Timetable synchronization optimization in a subway-bus network. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 608, 128273. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2022.128273>
3. Cevallos, F., & Zhao, F. (2012). A Genetic Algorithm for Bus Schedule Synchronization. In *Applications of Advanced Technology in Transportation* (pp. 737–742). ASCE. [https://doi.org/10.1061/40799\(213\)118](https://doi.org/10.1061/40799(213)118).

УДК 504.03:656

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРАКТИК НАРАХУВАННЯ КОМПЕНСАЦІЇ ПЕРЕВІЗНИКАМ ЗА ПАСАЖИРСЬКІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ: ДОСВІД УКРАЇНИ ТА КРАЇН ЄС

Доцент кафедри транспортних технологій Потаман Н.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Potaman81@ukr.net

Сучасна система компенсації перевізників за пасажирські перевезення відіграє ключову роль у забезпеченні стабільності, якості та доступності громадського транспорту. Порівняння моделей, що застосовуються в Україні та країнах Європейського Союзу, демонструє принципові відмінності в підходах до фінансування, що впливають на ефективність, прозорість та підзвітність системи [1-2].

У країнах ЄС основним механізмом є чиста вартість контракту (Net Cost Contract, NCC), який передбачає, що місто (замовник) компенсує перевізнику