

Мельнікова Ю.І.^{1,2}, Орда О. О.²*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна¹,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна²*

СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ПІДХОДІВ ДО ПАРАМЕТРИЧНОГО НАЛАШТУВАННЯ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗКЛАДІВ РУХУ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

Робота присвячена дослідженню проблеми ефективності практичної реалізації генетичних алгоритмів (ГА) для синхронізації розкладів руху залежно від вибору евристичних параметрів.

Метою дослідження є систематичне узагальнення сучасних наукових підходів до обґрунтування параметричного налаштування ГА при синхронізації розкладів руху громадського транспорту та виявлення особливостей їх вибору при проведенні наукових досліджень з підвищення ефективності та надійності рішень у варіативних умовах функціонування транспортних мереж. У роботі використано методи системного та порівняльного аналізу результатів сучасних наукових праць, присвячених використанню ГА у задачах оптимізації транспортних розкладів.

У роботі виділено ключові параметри налаштування генетичного алгоритму, що формують архітектуру обчислювального процесу, до яких відносяться: розмір популяції, ймовірність кросингверу та ймовірність мутації. Встановлено, що у більшості проаналізованих сучасних наукових праць ці параметри визначаються емпірично без належного теоретичного обґрунтування, що свідчить про необхідність розробки методичних підходів до їх вибору. Критичний аналіз існуючих розробок дозволив виявити, що науковцями недостатньо уваги приділяється саме евристичному вибору параметрів ГА при вирішенні задачі синхронізації розкладів руху громадського. Це обмежує надійність алгоритмічних рішень у варіативних умовах функціонування транспортних мереж. Визначено перспективний напрям подальших досліджень, що полягає у розробці адаптивних стратегій налаштування параметрів генетичного алгоритму для підвищення ефективності та надійності рішень відповідно до реальних умов функціонування громадського транспорту.

Практична значимість дослідження полягає у систематизованому аналітичному узагальненні існуючих підходів, що дозволить науковцям та фахівцям транспортної галузі використовувати результати дослідження в якості інструментарію для обґрунтування параметричного налаштування ГА з метою підвищення ефективності їх застосування при вирішенні задач синхронізації розкладів руху громадського транспорту.

Ключові слова: громадський транспорт, синхронізація розкладів руху, генетичний алгоритм, параметри налаштування, систематичний аналіз.

ВСТУП

Синхронізація розкладів руху громадського транспорту (ГТ) є одним із основних напрямів підвищення якості транспортних послуг. Синхронізація графіків руху ліній громадського транспорту призводить до значного скорочення часу очікування пасажирями. Окрім підвищення якості послуг, синхронізація розкладів призводить до покращення показників функціонування транспортних засобів.

Задача синхронізації розкладів руху є *NP*-складною, тому на практиці визначення її оптимального розв'язання в умовах функціонування реальних систем пасажирського транспорту є неосяжним. Ефективним інструментом для вирішення задачі, яка характеризується величезним простором пошуку, є генетичний алгоритм. Його широка імплементація в різних галузях науково-практичної діяльності підтверджує високу обчислювальну ефективність та адаптивність до варіативних умов.

Попри значний потенціал ГА в синхронізації розкладів руху громадського транспорту, ефективність методу залежить від правильного вибору евристичних параметрів. Параметри ГА значно впливають на швидкість збіжності алгоритму та якість рішення. Неоптимальний вибір цих параметрів може призвести до передчасної конвергенції, неможливості знайти наближені до оптимальних рішення або надмірно тривалого часу обчислення, що зменшує практичну корисність синхронізації розкладів з використанням ГА. Тому робота присвячена дослідженню проблеми ефективності практичної реалізації ГА для синхронізації розкладів руху залежно від вибору евристичних параметрів.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Результати аналізу наукових джерел [1-23] свідчать, що ГА є високоефективним інструментарієм оптимізації та синхронізації розкладів руху громадського транспорту. Протягом останніх десятиліть спостерігається суттєве зростання кількості досліджень, присвячених

застосуванню ГА для вирішення цієї задачі. Результати досліджень доводять здатність ГА отримувати рішення високої якості для різноманітних топологій мереж та варіативних цільових функцій. Попри те, що ГА не гарантують досягнення абсолютно оптимального рішення у кожній ітерації, вони демонструють значну перевагу у швидкості збіжності та меншу обчислювальну складність порівняно з традиційними методами оптимізації, що робить їх перспективним інструментом для вирішення задач транспортного планування.

Водночас аналіз останніх досліджень показав, що питання ефективності застосування евристичних методів при формуванні розкладів руху громадського транспорту залишається недостатньо дослідженим. У зв'язку з цим актуальною постає задача проведення критичного аналізу сучасних наукових праць та систематизації і узагальнення підходів до параметричного налаштування ГА, що дозволить виявити наукові проблеми та перспективні напрями застосування метаевристичних методів при вирішенні задач транспортного планування.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є систематичне узагальнення сучасних наукових підходів до обґрунтування параметричного налаштування ГА при синхронізації розкладів руху громадського транспорту та виявлення особливостей їх вибору при проведенні наукових досліджень з підвищення ефективності та надійності рішень у варіативних умовах функціонування транспортних мереж. Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити наступні задачі:

1. Проаналізувати та систематизувати існуючі наукові підходи до вибору параметрів ГА при вирішенні задачі синхронізації розкладів руху громадського транспорту.
2. Визначити ключові параметри налаштування ГА, що формують архітектуру обчислювального процесу;
3. Висвітлити проблемні аспекти процедури налаштування параметрів ГА при вирішенні поставленої задачі.

У дослідженні використано методи системного та порівняльного аналізу результатів сучасних наукових праць, присвячених використанню ГА у задачах оптимізації транспортних розкладів. Для визначення ключових параметрів налаштування алгоритмів та виявлення особливостей їх вибору з метою підвищення ефективності та надійності рішень використано методи теоретичного узагальнення та систематизації існуючих наукових розробок.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у систематичному узагальненні сучасних наукових підходів до параметричного налаштування ГА для оптимізації розкладів руху громадського транспорту та виявленні наукової проблеми, обумовленої домінуванням емпіричного вибору ключових параметрів над теоретично обґрунтованими методиками, що обмежує надійність алгоритмічних рішень у варіативних умовах функціонування транспортних мереж. Отримані результати розширюють теоретико-методологічні засади застосування метаевристичних методів у задачах транспортного планування.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

На основі проведеного аналізу останніх досліджень [1–23] систематизовано базову архітектуру та послідовність етапів реалізації ГА, що дозволило встановити взаємозв'язок між етапами реалізації ГА та його параметричним налаштуванням. Генетичний алгоритм починається з випадкової генерації початкової популяції індивідумів, кожна з яких закодована як хромосома. Після обчислення значень цільової функції для кожної особини поточної популяції здійснюється процедура селекції батьківських пар. Відбір особин для подальшого кросинговеру реалізується на основі їхніх показників адаптивності, що забезпечує пріоритетне відтворення найбільш пристосованих рішень відповідно до встановлених критеріїв оптимізації. Кросинговер шляхом обміну частинами батьків в обраній точці створює нове потомство. Мутація передбачає зміну одного або декількох «генів» у випадковому порядку, щоб створити нове потомство, таким чином створюючи нові адаптивні рішення, які дозволяють уникнути локальних оптимумів. Завершення ГА відбувається за однієї з умов: досягнуто фіксованої кількості поколінь; рівень пристосованості досягнуто; відсутність поліпшення найкращого значення пристосованості.

Параметри ГА інтегровані в кожен етап його реалізації і визначають траєкторію пошуку та швидкість збіжності алгоритму до глобального екстремуму. До таких параметрів ГА відносяться:

1. Довжина хромосоми.
2. Кількість поколінь.
3. Розмір популяції.
4. Коефіцієнт виживання.

5.Ймовірність кросинговеру.

6.Ймовірність мутації і кількість мутацій.

Кожний параметр ГА має особливий і різний вплив на якість рішення поставленої задачі. Науковці і фахівці в основному визначають параметри ГА інтуїтивно або на основі особистого досвіду.

Довжина хромосоми в структурі ГА визначається кількістю незалежних змінних оптимізаційної задачі. У контексті синхронізації розкладів цей параметр еквівалентний загальній кількості контрольних точок, параметри яких підлягають корекції. У роботі [21] розмір хромосоми становить 35 бітів: для п'яти маршрутів автобусного транспорту використано по 7 бітів на кожен маршрут. Значення часового зсуву може змінюватися в межах від 0 до 127 хв.

Кількість поколінь визначає тривалість ітераційного циклу і глибину опрацювання простору альтернатив. За допомогою цього параметра досягається баланс між тривалістю пошуку та прецизійністю результату. Особливу роль кількість поколінь відіграє у випадках, коли умовою завершення ГА є досягнення фіксованої кількості поколінь, в інших випадках цей параметр не використовується. Комплексний огляд літератури [1-21] це підтверджує. Більшість науковців (рис. 1) в своїх роботах не вказує даний параметр ГА, але найчастіше (23,5 % робіт) використовується значення кількості поколінь до 50 через значне збільшення часу обчислення при вирішенні проблеми синхронізації розкладу руху.

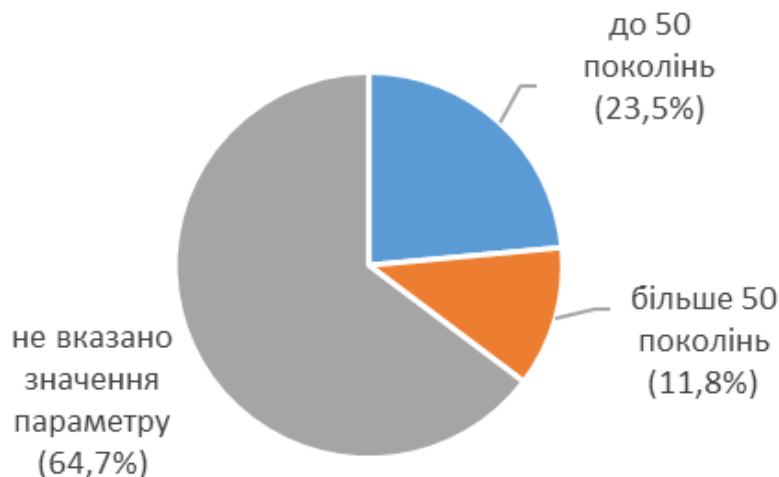


Рисунок 1 - Розподіл наукових публікацій за значенням параметру кількості поколінь, які використовуються для синхронізації розкладів руху ГТ

При визначенні розміру популяції необхідно врахувати, що у випадках, коли розмір популяції невеликий, доступний простір пошуку є обмеженим, а при великому значенні обчислювальне навантаження стає високим. Автори Nesmachnow S. та Rizzo C. [15] при вирішенні задачі синхронізації розкладів руху автобусів з урахуванням розширених пересадочних зон використовували розмір популяції 25 особин. Значення цього параметру було прийнято на основі експериментів, які проводилися на п'яти невеликих прикладах завдань із різними характеристиками.

За результатами узагальнення підходів, представлених на рис. 2, у більшості досліджень [1, 5, 6, 10, 16, 21] автори використовують розмір популяції 50...100 особин (38,2 %). В останні роки спостерігається тенденція до збільшення значення цього параметра: у низці робіт розмір популяції становить 200 особин [12, 17, 19, 20]. Необхідно відзначити, що між кількістю поколінь і розміром популяції існує зворотна залежність. Велика популяція швидше покриває простір пошуку, що може скоротити кількість необхідних поколінь, тоді як мала популяція потребує тривалішої еволюції для досягнення певного рівня якості результатів застосування ГА.

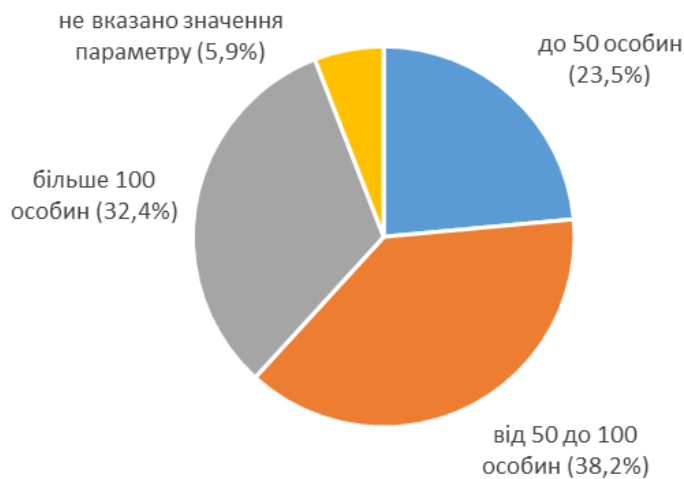


Рисунок 2 - Розподіл наукових публікацій за розміром популяції ГА, що використовується для синхронізації розкладів руху ГТ

Коефіцієнт виживання забезпечує стабільність еволюційного процесу і задіяний при відборі особин, які переходять у наступне покоління без генетичних змін. Значне збільшення коефіцієнту виживання може призвести до швидкого домінування однієї особини. У більшості проаналізованих робіт (66,7 %) цей параметр не вказується, так як його стандартне значення коливається в межах від 10 до 20 %.

Ймовірність кросинговеру визначає інтенсивність структурної рекомбінації генетичного матеріалу, виступаючи основним механізмом експлуатації простору пошуку. При вирішенні задачі синхронізації розкладів руху ймовірність кросинговеру часто встановлюється в межах від 50 % до 100 % (рис. 3). Автори [1, 3, 7, 20] вважають, що діапазон 50...60 % дозволяє забезпечити баланс між обчислювальною складністю і досягненням цільової достовірності результатів. Необхідно відзначити, що в останні роки ймовірність кросинговеру складає 90 % [10, 17, 18, 19]. З одного боку, це сприяє динамічному дослідженню простору пошуку, а з іншого – підвищує ймовірність втрати результатів пошуку наближених до оптимальних рішень.

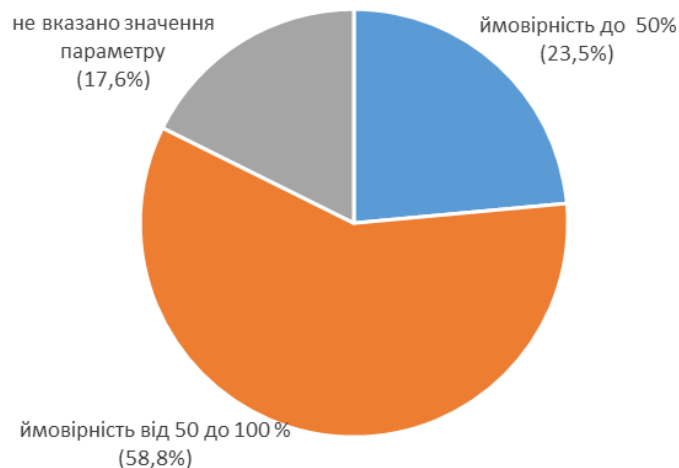


Рисунок 3 - Розподіл наукових публікацій за значенням параметру ймовірність кросинговеру, що використовується для синхронізації розкладів руху ГТ

Процес мутації запобігає збігу ГА до локального оптимуму і забезпечує генетичне різноманіття. Кількість мутацій і ймовірність мутації виступають стохастичними регуляторами варіативності генотипів, забезпечуючи інваріантність алгоритму. За результатами аналізу (на рис. 4) встановлено, що у задачах синхронізації розкладів руху ймовірність мутації найчастіше не перевищує 10 %. Таке значення параметра забезпечує баланс між дослідженням нових областей простору пошуку та використанням вже знайдених ефективних рішень. Cheng G. та He Y. [19] провели аналіз чутливості параметра ймовірності мутації при фіксованій ймовірності кросинговеру 90 %, на основі

якого було обрано значення ймовірності мутації 5 %. Автори зазначають, що таке значення параметра забезпечує компроміс між витратами часу та ефективністю пошуку рішень. Обмеженням проведеного аналізу є вузький діапазон дослідження ймовірності мутації (4...7 %).

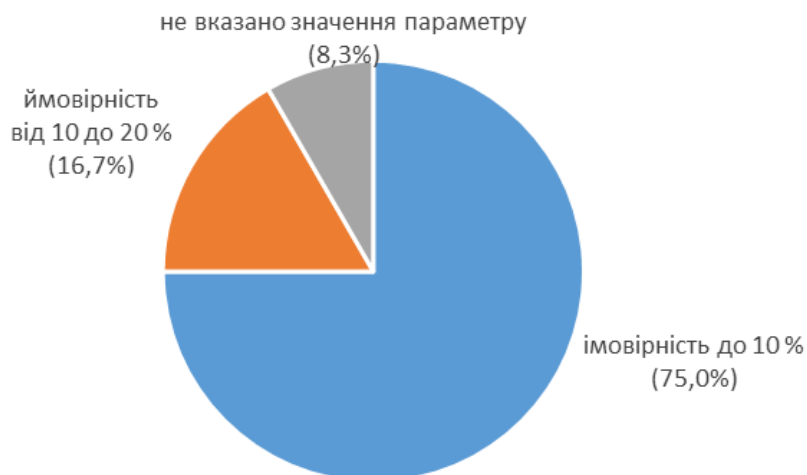


Рисунок 4 - Розподіл наукових публікацій за значенням параметру ймовірності мутації, що використовується для синхронізації розкладів руху ГТ

Ефективна конфігурація ГА передбачає високе значення ймовірності кросинговеру і низьке значення ймовірності мутації, що забезпечує стабільну інтенсифікацію пошуку в поєднанні з достатньою генетичною гетерогенністю. У задачах синхронізації розкладів з великою кількістю контрольних точок асиметричне співвідношення цих параметрів забезпечує «прорив» крізь зони локальної збіжності. В роботі [20] для визначення оптимальних значень параметрів ГА, ймовірність кросинговеру (90 %), ймовірність мутації (10 %), використовували відносно відхилення (RPD) методу Тагучі. В межах дослідження проведено лише 9 експериментів для кожного тестового завдання. Необхідно відзначити, що саме така комбінація параметрів є найпоширенішою при вирішенні задачі синхронізації розкладів руху [15, 18, 20].

Отже, параметри налаштування ГА визначають функціональну спроможність алгоритму та адекватність отриманих результатів при вирішенні задачі синхронізації розкладів руху. У всіх проаналізованих роботах [1-21] відсутній теоретичний базис наукового обґрунтування параметричного налаштування ГА, що впливає на ефективність розв'язання задачі синхронізації розкладів руху. Існують окремі спроби обґрунтування вибору співвідношень ймовірності мутації та ймовірності кросинговеру [15, 20], однак проведені експерименти мають обмежену вибірку та спрощені тестові сценарії, що свідчить про те, що вибір параметрів ГА здебільшого базується на особистому досвіді або результатах попередніх досліджень.

Водночас ефективність роботи генетичного алгоритму значною мірою визначається значеннями його основних параметрів. Найбільший вплив на ефективність ГА мають такі параметри: розмір популяції, ймовірність кросинговеру та ймовірність мутації. Кожний з цих параметрів впливає на певний етап реалізації ГА, а їх комбінація формує архітектуру обчислювального процесу.

Проблема налаштування параметрів генетичного алгоритму під час розв'язання задач синхронізації розкладів руху залишається недостатньо дослідженою. Характер впливу параметрів ГА на його результативність значною мірою залежить від специфіки поставленої задачі. У зв'язку з цим визначення ефективних значень параметрів для задач синхронізації розкладів руху потребує проведення відповідних експериментальних досліджень.

В роботі [22] запропоновано застосування байєсівської оптимізації для автоматизованого налаштування параметрів ГА, що є критичним для підвищення ефективності методів оптимізації розкладів. Автори систематизують процес як мета-задачу, пропонуючи двоступеневу модель, яка ефективно замінює евристичний підбір параметрів та підвищує ефективність розв'язання складних комбінаторних задач у транспортних системах.

В роботі [23] був проведений експеримент з виявлення залежності результатів ГА (середній час очікування пасажирів) від параметрів ГА (розмір популяції, ймовірність кросинговеру та ймовірність мутації). У рамках дослідження застосовано інструментарій статистичного аналізу та методи лінійної регресії. Було сформовано три лінійні моделі, кожна з яких описує залежність

результативності генетичного алгоритму від зміни значення відповідного параметра. Отримані коефіцієнти регресії відображають емпіричну залежність середнього часу очікування пасажиром від зазначених параметрів ГА. Аналіз результатів експерименту свідчить про те, що на продуктивність ГА при вирішенні задачі синхронізації розкладів руху позитивно впливають лише розмір популяції та ймовірність кросинговеру. Збільшення цих параметрів призвело до зменшення часу очікування пасажиром. Водночас параметри мутації (її ймовірність та кількість спроб) суттєво не змінили ефективність алгоритму в межах цієї задачі.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Аналіз сучасних наукових публікацій показує, що ГА активно застосовуються для вирішення задач оптимізації та синхронізації розкладів руху громадського транспорту. Водночас у більшості досліджень параметри генетичного алгоритму, такі як розмір популяції, ймовірність кросинговеру та ймовірність мутації, визначаються емпірично або на основі інтуїтивних припущень дослідників.

Проведений аналіз показав, що у науковій літературі майже відсутні систематизовані підходи або методики обґрунтування вибору параметрів ГА для задач синхронізації транспортних розкладів. Це ускладнює практичне використання ГА у задачах транспортного планування та знижує ефективність їх застосування, що свідчить про наявність наукової проблеми та визначає актуальність подальших досліджень у цьому напрямі. Перспективний напрям подальших досліджень полягає у розробці адаптивних стратегій налаштування параметрів генетичного алгоритму для підвищення ефективності та надійності рішень відповідно до реальних умов функціонування громадського транспорту.

ВИСНОВКИ

В результаті виконаних досліджень отримані наступні висновки:

1. Систематизовано результати сучасних наукових розробок щодо впливу параметричного налаштування генетичного алгоритму на його функціональну спроможність та релевантність результатів при вирішенні проблеми синхронізації розкладів руху.

2. Виділено ключові параметри налаштування генетичного алгоритму, що формують архітектуру обчислювального процесу, до яких відносяться: розмір популяції, ймовірність кросинговеру та ймовірність мутації.

3. Встановлено, що у більшості проаналізованих сучасних наукових праць ці параметри визначаються емпірично без належного теоретичного обґрунтування, що свідчить про необхідність розробки методичних підходів до їх вибору.

4. Критичний аналіз існуючих розробок дозволив виявити, що науковцями недостатньо уваги приділяється саме евристичному вибору параметрів ГА при вирішенні задачі синхронізації розкладів руху ГТ. Це обмежує надійність алгоритмічних рішень у варіативних умовах функціонування транспортних мереж.

5. Визначено перспективний напрям подальших досліджень, що полягає у розробці адаптивних стратегій налаштування параметрів генетичного алгоритму для підвищення ефективності та надійності рішень відповідно до реальних умов функціонування громадського транспорту.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1.Cevallos F., Zhao F. Minimizing transfer times in public transit network with genetic algorithm. *Transportation Research Record*. 2006. № 1971(1), 74–79. <https://doi.org/10.1177/0361198106197100109>

2.Shrivastava P, O'Mahony M. A model for development of optimized feeder routes and coordinated schedules? A genetic algorithms approach, *Transport Policy*. 2006. № 13(5), 413–425 <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2006.03.002>

3.Shafahi Y., Khani, A. A practical model for transfer optimization in a transit network: Model formulations and solutions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2010. №44(6). <https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.03.007>

4.Tuzun A., Yilmaz S. Transit coordination with heterogeneous headways. *Transportation Planning and Technology*. 2014. № 37(5). <https://doi.org/10.1080/03081060.2014.912419>

5.Wu J., Liu M., Sun H., Li T., Gao Z., Wang, D. Equity-based timetable synchronization optimization in urban subway network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2015. № 51. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.11.001>

6.Wu Y., Tang J., Yu Y., Pan Z. A stochastic optimization model for transit network timetable design to mitigate the randomness of traveling time by adding slack time. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2015. № 52, 15–31. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.12.012>

- 7.Naumov V., Samchuk G. Class library for simulations of passenger transfer nodes as elements of the public transport system. *Procedia Engineering*. 2017. № 187, 77-81. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.352>
- 8.Naumov V. Synchronization of timetables for public bus lines using genetic algorithms and computer simulations. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2018. № 36, 44–53. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74454-4_4
- 9.Shang P., Li R., Liu Z., Xian K., Guo, J. Timetable synchronization and optimization considering time-dependent passenger demand in an urban subway network. *Transportation Research Record*. 2018. №2672(8), 243–254. <https://doi.org/10.1177/0361198118772958>
- 10.E. Khmeleva, A. A. Hopgood, L. Tipi, M. Shahidan. Fuzzy-logic controlled genetic algorithm for the rail-freight crew-scheduling problem. *KI-Kunstliche Intelligenz*. 2018. Vol. 32, № 1, 61–75. doi: 10.1007/s13218-017-0516-6
- 11.Cao Z., Ceder A., Li D., Zhang S. Optimal synchronization and coordination of actual passenger-rail timetables. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2019. 23-1249. <https://doi.org/10.1080/15472450.2018.1488132>
- 12.Chen Y., Mao B., Bai Y., Ho T., Li Z. Timetable synchronization of last trains for urban rail networks with maximum accessibility. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2019. № 99(2), 110–129. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.01.003>
- 13.Wang Y., Li D., Cao Z. Integrated timetable synchronization optimization with capacity constraint under time-dependent demand for a rail transit network. *Computers & Industrial Engineering*. 2020. № 142. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106374>
- 14.X. Wang, M. Liu, Y. Ci, Y. Yang. Effectiveness of driver’s bounded rationality and speed guidance on fuel-saving and emissions-reducing at a signalized intersection. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 2021, 1–15, DOI: [10.1016/j.jclepro.2021.129343](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129343)
- 15.Nesmachnow S., Risso, C. Exact and Evolutionary Algorithms for Synchronization of Public Transportation Timetables Considering Extended Transfer Zones. *Applied Sciences*. 2021. №11(15), 7138. <https://doi.org/10.3390/app11157138>
- 16.Wang Y., Zhou Y., Yan X. Autonomous bus timetable synchronization for maximizing smooth transfers with passenger assignment. *Expert Systems with Applications*. 2022. №193, 478-492. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116430>
- 17.Zhao Hu, Feng Shumin, Ci Yusheng, Xin Mengwei, Huang Qiuju. Scheduling Synchronization for Overlapping Segments in Bus Lines: Speed Control and Green Extension Strategies. *Journal of Advanced Transportation*. 2022, 2428040, 10 p. <https://doi.org/10.1155/2022/2428040>
- 18.Naeini H., Shafahi Y., Taherkhani, M. Optimizing and synchronizing timetable in an urban subway network with stop-skip strategy. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2022. № 22. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2022.100301>
19. Cheng G, He Y. Enhancing passenger comfort and operator efficiency through multi-objective bus timetable optimization. *Electronic Research Archive*, 2024, 32(1), 565-583. <https://doi.org/10.3934/era.2024028>
- 20.Sun M, Liang C, Chang D. Enhancing shipyard transportation efficiency through dynamic scheduling using digital twin technology. *PLoS One*. 2024. №19(2):e0297069. doi: 10.1371/journal.pone.0297069.
- 21.Naumov V., Taran I., Melnikova Y., Kapica D. Minimizing passenger waiting in public transport: A genetic algorithm approach to bus schedule synchronization. Proceedings of 28th International scientific conference Transport Means. 2024. 91–96. <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2024.P91-96>
22. R  ther C., Rieck J. A Bayesian Optimization Approach for Tuning a Grouping Genetic Algorithm for Solving Practically Oriented Pickup and Delivery Problems. *Logistics*. 2024. 8(1):14. <https://doi.org/10.3390/logistics8010014>
23. Мельнікова Ю. І. Аналіз впливу параметрів на ефективність застосування генетичного алгоритму при вирішенні задачі синхронізації руху громадського транспорту. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2026. №13(44), с. 424–432. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13\(44\).424-432](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13(44).424-432)

REFERENCES

- 1.Cevallos, F., & Zhao, F. (2006). Minimizing Transfer Times in Public Transit Network with Genetic Algorithm. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1971(1), 74-79. <https://doi.org/10.1177/0361198106197100109>
2. Shrivastava, P., & O’Mahony, M. (2006). A model for development of optimized feeder routes and coordinated schedules—A genetic algorithms approach. *Transport policy*, 13(5), 413-425. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2006.03.002>
3. Shafahi Y, Khani A (2010) A practical model for transfer optimization in a transit network: model formulations and solutions. *Transp Res A Policy Pract* 44(6):377–389 DOI: [10.1016/j.tra.2010.03.007](https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.03.007)

4. Tuzun Aksu, D., & Yılmaz, S. (2014). Transit coordination with heterogeneous headways. *Transportation Planning and Technology*, 37(5), 450–465. <https://doi.org/10.1080/03081060.2014.912419>
5. Wu, J., Liu, M., Sun, H., Li, T., Gao, Z. & Wang, D.Z.W. (2015). Equity-based timetable synchronization optimization in urban subway network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2015. № 51. pp. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.11.001>
6. Wu, Y., Tang, J., Yu, Y., & Pan, Z. (2015). A stochastic optimization model for transit network timetable design to mitigate the randomness of traveling time by adding slack time. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 52, pp. 15–31.. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.12.012>
7. Naumov, V., & Samchuk, G. (2017). Class library for simulations of passenger transfer nodes as elements of the public transport system. *Procedia Engineering*, 187, 77-81. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.352>
8. Naumov, V. (2018). Synchronization of timetables for public bus lines using genetic algorithms and computer simulations. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 36, 44-53. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74454-4_4
9. Shang, P., Li, R., Liu, Z., Xian, K., & Guo, J. (2018). Timetable synchronization and optimization considering time-dependent passenger demand in an urban subway network. *Transportation Research Record*, 2672(8), 243-254. <https://doi.org/10.1177/0361198118772958>
10. Khmeleva, E., Hopgood, A. A., Tipi, L., & Shahidan, M. (2018). Fuzzy-logic controlled genetic algorithm for the rail-freight crew-scheduling problem. *Künstliche Intelligenz*, 32(1), 61-75. <https://doi.org/10.1007/s13218-017-0516-6>
11. Cao, Z., Ceder, A., Li, D., & Zhang, S. (2019). Optimal synchronization and coordination of actual passenger-rail timetables. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 231-249. <https://doi.org/10.1080/15472450.2018.1488132>
12. Chen, Y., Mao, B., Bai, Y., Ho, T., & Li, Z. (2019). Timetable synchronization of last trains for urban rail networks with maximum accessibility. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 99(2), 110-129. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.01.003>
13. Wang, Y., Li, D., & Cao, Z. (2020). Integrated timetable synchronization optimization with capacity constraint under time-dependent demand for a rail transit network. *Computers & Industrial Engineering*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106374>
14. Wang, X., Liu, M., Ci, Y., & Yang, Y. (2021). Effectiveness of driver's bounded rationality and speed guidance on fuel-saving and emissions-reducing at a signalized intersection. *Journal of Cleaner Production*, 325, 129343. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129343>
15. Nesmachnow, 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>
16. Wang, Y., Zhou, Y., & Yan, X. (2022). Autonomous bus timetable synchronization for maximizing smooth transfers with passenger assignment. *Expert Systems with Applications*, 193, 116430. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116430>
17. Zhao, H., Feng, S., Ci, Y., Xin, M., & Huang, Q. (2022). Scheduling Synchronization for Overlapping Segments in Bus Lines: Speed Control and Green Extension Strategies. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2022/2428040>
18. Motvallian Naeni, H., Shafahi, Y., & SafariTaherkhani, M. (2022). Optimizing and synchronizing timetable in an urban subway network with stop-skip strategy. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 22, 100301. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2022.100301>
19. Cheng, G., & He, Y. (2024). Enhancing passenger comfort and operator efficiency through multi-objective bus timetable optimization. *Electronic Research Archive*, 32(1), 565–583. <https://doi.org/10.3934/era.2024028>
20. Sun, M., Liang, C., & Chang, D. (2024). Enhancing shipyard transportation efficiency through dynamic scheduling using digital twin technology. *PLOS ONE*, 19(2), e0297069. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0297069>
21. Naumov, V., Taran, I., Melnikova, Y., & Kapica, D. (2024). Minimizing Passenger Waiting in Public Transport: A Genetic Algorithm Approach to Bus Schedule Synchronization. *Transport Means 2024. Proceedings of the 28th International Scientific Conference*. <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2024.p91-96>
22. Rütter, C., & Rieck, J. (2024). A Bayesian Optimization Approach for Tuning a Grouping Genetic Algorithm for Solving Practically Oriented Pickup and Delivery Problems. *Logistics*, 8(1), 14. <https://doi.org/10.3390/logistics8010014>

23. Melnikova Yu. I. Analiz vplyvu parametriv na efektyvnist zastosuvannya henetychnoho alhorytmu pry vyrishenni zadachi synkhronizatsii rukhu hromadskoho transportu. Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky. 2026. №13(44), s. 424–432. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13\(44\).424-432](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13(44).424-432)

Yu. Melnikova, O. Orda. Systematization of approaches to parameters settings of genetic algorithms for optimizing public transport schedules

The research investigates the problem of the practical implementation efficiency of genetic algorithms (GAs) for public transport schedule synchronization, specifically focusing on the impact of heuristic parameter selection.

The purpose of the research is to systematically summarize contemporary scientific approaches to justifying the parametric tuning of genetic algorithms for synchronizing public transport timetables, and to identify the specifics of parameter selection in research aimed at improving the efficiency and reliability of solutions under variable transport network operating conditions. The study employs methods of systemic and comparative analysis of current scientific works dedicated to the use of GAs in transport schedule optimization problems.

The findings of current scientific works on the influence of GAs parametric tuning on its functional capacity and result relevance in solving the timetable synchronization problem have been systematized. The key GAs tuning parameters that form the architecture of the computational process were identified: population size, crossover probability, and mutation probability. It was established that in the majority of analysed scientific works these parameters are determined empirically without adequate theoretical justification, indicating the need to develop methodological approaches to their selection. A critical analysis of existing works revealed that researchers pay insufficient attention to the heuristic selection of GAs parameters when solving the public transport timetable synchronization problem, which limits the reliability of algorithmic solutions under variable transport network operating conditions. A promising direction for further research was identified, consisting in the development of adaptive GAs parameter tuning strategies to enhance solution efficiency and reliability in line with real public transport operating conditions.

The practical significance of the study lies in its systematized analytical generalization of existing approaches, which will enable researchers and transport industry specialists to use the findings as a toolkit for justifying GAs parametric tuning in order to improve the effectiveness of its application in solving public transport timetable synchronization problems.

Keywords: public transport, schedule synchronization, genetic algorithm, parameters tuning, systematic analysis

МЕЛЬНИКОВА Юлія Ігорівна, старший викладач кафедри «Управління на транспорті», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», аспірантка кафедри транспортних технологій, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: melnikova.yu.i@nmu.one, <https://orcid.org/0000-0001-7023-023X>.

ОДРА Олександра Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: orda@khadi.kharkov.ua, ORCID 0000-0002-7213-8469

Yuliia MELNIKOVA, Senior Lecturer of Transport Management Department, Dnipro University of Technology, Postgraduate of Department of Transport Technologies, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: melnikova.yu.i@nmu.one, <https://orcid.org/0000-0001-7023-023X>.

Oleksandra ORDA, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Transport Technologies, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: orda@khadi.kharko [PhD in Technical Sciences, Associate Professor, v.ua](https://orcid.org/0000-0002-7213-8469), ORCID 0000-0002-7213-8469

Дата надходження статті до видання: 07.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

<https://doi.org/10.36910/2r6v8v17>