

Мельнікова Ю.І.¹, Наумов В.С.¹, Таран І.О.¹, Бовін Д.П.¹
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна¹

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

Робота присвячена актуальній проблемі оптимізації роботи міського громадського транспорту шляхом синхронізації розкладів руху на пересадочних вузлах. Актуальність дослідження обумовлена зростаючою потребою у підвищенні ефективності та якості обслуговування пасажирів міського транспорту.

Синхронізація розкладів є одним із ключових факторів, що впливають на рівень задоволеності пасажирів та загальну ефективність транспортної системи. По-перше, узгодженість розкладів різних видів транспорту дозволяє пасажирам оперативніше здійснювати пересадки, зменшуючи час очікування. По-друге, синхронізація розкладів сприяє раціональному використанню транспортних ресурсів, що дає можливість уникнути дублювання маршрутів та підвищити заповнюваність транспортних засобів. Це сприяє зниженню експлуатаційних витрат й більш ефективному управлінню транспортною інфраструктурою. По-третє, раціональна транспортна система, що функціонує ефективно, сприяє зменшенню шкідливих викидів в атмосферу. Це відбувається завдяки скороченню потреби у використанні особистого транспорту.

В якості об'єкту дослідження було обрано пересадочний вузол у місті Верхньодніпровськ Дніпропетровської області України. Метою дослідження є підвищення ефективності обслуговування пасажирів міської мережі автобусного транспорту за рахунок синхронізації розкладів руху для пересадочного вузла «Автовокзал».

Для досягнення мети дослідження було проведено натурні дослідження у вибраному транспортному вузлі, розроблено імітаційну модель функціонування транспортного вузла та проведено оптимізацію розкладів за допомогою генетичного алгоритму на підставі результатів імітаційного моделювання.

Результати дослідження продемонстрували ефективність запропонованого підходу. Отримано оптимальний розклад руху, який дозволяє знизити середній час очікування пасажирів на пересадку в ранковий пік на 3,2%.

Ключові слова: синхронізація розкладів, пересадочний вузол, імітаційне моделювання, генетичний алгоритм, оптимізація, міський громадський транспорт.

ВСТУП

Оптимізація систем громадського транспорту є критично важливою спробою задовольнити зростаючі потреби міської мобільності. Ключовим компонентом цієї оптимізації є синхронізація розкладів, яка спрямована на мінімізацію часу очікування пасажирів у вузлах пересадки. Завдяки узгодженню розкладів на різних маршрутах системи громадського транспорту можуть підвищити ефективність, зменшити експлуатаційні витрати та підвищити загальну задоволеність пасажирів.

Проблема синхронізації розкладу полягає в притаманній складності мереж громадського транспорту. Такі фактори, як коливання попиту, різний час у дорозі та взаємозалежність різних маршрутів ускладнюють розробку аналітичних моделей, які точно відображають поведінку системи. Щоб вирішити цю проблему, з'явилися підходи на основі моделювання як потужний інструмент для оцінки впливу різних конфігурацій розкладу.

Моделюючи роботу системи громадського транспорту за різними сценаріями, дослідники та планувальники можуть оцінити ефективність різних стратегій синхронізації, виявити потенційні вузькі місця та оптимізувати продуктивність системи. Цей підхід на основі даних надає цінну інформацію для прийняття рішень і допомагає гарантувати, що послуги громадського транспорту відповідають потребам громади.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Оптимізація розкладів руху в системах громадського транспорту є важливим аспектом забезпечення ефективного та надійного обслуговування пасажирів. Основною метою оптимізації розкладів у пересадочних вузлах є мінімізація часу очікування пасажирів шляхом синхронізації транспортних засобів громадського транспорту в пунктах пересадки. Ця синхронізація допомагає скоротити загальний час подорожі для пасажирів і підвищити загальну задоволеність системою громадського транспорту.

Основною метою оптимізації розкладів руху є мінімізація часу очікування пасажирів, враховуючи інші фактори, такі як експлуатаційні витрати, невідповідність пасажирського завантаження та скупчення автобусів. Для досягнення цієї мети були запропоновані різні підходи, зокрема:

- Оптимізація на підставі однієї цільової функції: цей підхід зосереджений на мінімізації часу очікування пасажирів як єдиної мети. Приклади включають роботи [1] та [2], які формують проблему оптимізації як задачу цілочислового програмування.

- Багатоцільова оптимізація: цей підхід розглядає кілька цілей одночасно, наприклад, мінімізацію часу очікування пасажирів і експлуатаційних витрат [3, 4]. Автори публікації [5] запропонували багатоцільову модель повторної синхронізації для розкладів руху автобусів, тоді як автори праць [6] і [7] представили двоцільові моделі.

Оптимізація на підставі методів цілочислового програмування була поширеним підходом до вирішення проблеми синхронізації розкладів [1, 2, 7]. Однак через складність і великий масштаб проблеми стандартні методи цілочислового програмування не завжди можуть бути здійсненними в реальних програмах. У результаті були застосовані різні евристичні методики, зокрема:

- Спеціалізовані метаевристики: для пошуку наближених рішень проблеми оптимізації процесів пересадки використовувалися такі методи, як пошук табу, імітація відпалу, ітераційний локальний пошук, а також метод гілок і меж.

- Методи штучного інтелекту: також застосовано такі методи, як оптимізація мурашиної колонії та генетичні алгоритми. Автори методики [8] поєднали оптимізацію мурашиної колонії з нечіткою логікою, тоді як автори публікацій [3, 9-11] використовували генетичні алгоритми.

Останні дослідження були зосереджені на вирішенні конкретних проблем і цілей оптимізації розкладів руху у транспортних вузлах. Наприклад, автори [6] мали на меті мінімізувати як очікуваний загальний час очікування пасажирів, так і спостережувану розбіжність у кількості пасажирів. Автори публікації [12] прагнули максимізувати перевезення пасажирів і мінімізувати групування автобусів у мережі, тоді як автори підходу [13] зосередилися на досягненні максимальної синхронізації між автобусами та лініями метро.

Оптимізація розкладів руху відіграє вирішальну роль у підвищенні ефективності та надійності систем громадського транспорту. Хоча оптимізація на підставі методів цілочислового програмування була поширеним підходом, евристичні методи та методи штучного інтелекту стають все більш важливими для вирішення великомасштабних і складних проблем [14]. Майбутні дослідження повинні продовжувати досліджувати інноваційні підходи та вирішувати нові проблеми в синхронізації розкладів для надання кращих послуг пасажирам.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Хоча існуючі підходи дозволяють дослідникам отримати раціональне рішення проблеми синхронізації для великої кількості випадків, слід згадати про недостатню універсальність і масштабованість відомих методів. У цій статті представлена спроба авторів розробити загальну, але масштабовану математичну модель вузла громадського транспорту та відповідний генетичний підхід до вирішення проблеми синхронізації розкладів.

Метою даного дослідження є підвищення ефективності обслуговування пасажирів у транспортному вузлі за рахунок синхронізації розкладів руху. Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити наступні задачі:

1. Розробити математичну модель функціонування транспортного вузла.
2. Розробити програмну реалізацію імітаційної моделі функціонування транспортного вузла.
3. Розробити програмну реалізацію генетичного алгоритму і інтегрувати його з імітаційною моделлю транспортного вузла.
4. Виконати дослідження попиту у вибраному транспортному вузлі.
5. Провести експериментальні дослідження можливості синхронізації розкладів пасажирського транспорту у вибраному транспортному вузлі.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Оскільки процедури синхронізації визначаються в рамках системи громадського транспорту, що містить лінії пасажирського транспорту, математична модель, спрямована на реалізацію цих процедур, повинна бути визначена в межах моделі транспортної системи. Така модель описана в публікації [10], де запропоновано генетичний алгоритм для синхронізації розкладів у всій мережі. У даній статті описано локальний підхід до оптимізації – для обраного пересадочного вузла (вперше використаний у дослідженні [11]), тому запропонована нижче математична модель та її програмна реалізація представляють спрощену та модифіковану версію згаданого підходу.

Як елемент системи громадського транспорту, пересадочний вузол N можна представити як множину, що містить підмножину L транспортних ліній, у розкладах яких пересадочний вузол є

зупинкою, і підмножину \mathbf{D} пасажирів, які користуються системою громадського транспорту та подорожують з даного вузла або через цей транспортний вузол з пересадкою:

$$\mathbf{N} = \{\mathbf{L}, \mathbf{D}\}, \quad (1)$$

де \mathbf{L} – множина всіх ліній громадського транспорту, траси яких містять вузол як зупинку; \mathbf{D} – модель попиту, яка представляє набір пасажирів, які починають свою подорож у вузлі або здійснюють у ньому пересадку.

Лінію громадського транспорту l_i , як елемент математичної моделі, пропонується представити наступним базовим набором основних характеристик:

$$\lambda_i = \{\psi_i, \Delta_i, \tilde{p}_i^{in}, \tilde{p}_i^{out}\}, \quad \lambda_i \in \mathbf{L}, i = 1 \dots N_L, \quad (2)$$

де ψ_i – часовий зсув початку обслуговування для i -ої лінії, хв.; Δ_i – інтервал часу між транспортними засобами на i -ому маршруті міського транспорту [хв.]; \tilde{p}_i^{in} – стохастична змінна, що представляє кількість пасажирів, які прибувають до вузла, щоб розпочати поїздку; \tilde{p}_i^{out} – випадкова величина, що представляє кількість пасажирів, які пересідають у вузлі з однієї лінії на іншу; N_L – загальна кількість ліній громадського транспорту, що мають зупинку в пересадочному вузлі.

Слід зазначити, що параметри ψ_i і Δ_i визначають розклад i -ої лінії громадського транспорту, а змінні \tilde{p}_i^{in} і \tilde{p}_i^{out} формують попит на послуги i -ої лінії.

Розклад для i -ої лінії можна представити у вигляді впорядкованої множини моментів прибуття. Момент прибуття до пересадочного вузла j -ого транспортного засобу, що обслуговує i -ту лінію, за постійності інтервалу часу можна визначити таким чином:

$$t_{ij} = t_0 + \psi_i + j \cdot \Delta_i, \quad j = 1 \dots \omega_i, \quad (3)$$

де t_0 – момент часу, коли транспортна система починає обслуговувати клієнтів, хв.; ω_i – кількість заїздів транспортних засобів i -ої лінії протягом періоду моделювання (очевидно, його значення обернено пропорційне інтервалу часу).

Кожен пасажир, як елемент множини \mathbf{D} , може бути представлений в моделі наступним набором параметрів:

$$\pi_i = \{t_i^{ap}, t_i^b, \lambda_i, \tau_i\}, \quad \pi_i \in \mathbf{D}, i = 1 \dots N_D, \quad (4)$$

де t_i^{ap} – момент часу появи i -ого пасажира в пересадочному вузлі; t_i^b – момент часу посадки i -ого пасажира в транспортний засіб відповідного автобусного маршруту, хв.; λ_i – посилення на об'єкт лінії громадського транспорту, з якої i -ий пасажир має намір скористатися в пересадочному вузлі; τ_i – логічна змінна, що показує, чи здійснюватиме i -ий пасажир пересадку у транспортному вузлі (значення True означає намір пасажира зробити пересадку); N_D – загальна кількість пасажирів, які користуються системою громадського транспорту в даному пересадочному вузлі, пас.

В якості вхідних змінних для задачі синхронізації розкладів в описаній моделі може бути використаний наступний набір параметрів: кількість транспортних засобів на лініях громадського транспорту, пропускна спроможність транспортних засобів, а також числові параметри розкладу – часові зсуви ψ_i та D_i . У найпростішому випадку, який характеризується мінімальними змінами існуючої системи громадського транспорту, синхронізація розкладів може бути здійснена шляхом встановлення значень часових зсувів початку обслуговування для ліній громадського транспорту. Ці зсуви можна представити у вигляді цілочислового вектора Ψ :

$$\Psi = \langle \psi_1, \psi_2, \dots, \psi_{N_L} \rangle. \quad (5)$$

Основним технологічним параметром, що відображає результат синхронізації, є загальний час T_w очікування пасажирами транспортних засобів у пересадочному вузлі. Відповідною метою синхронізації буде мінімізація загального часу очікування:

$$T_w(\Psi) = \sum_{i=1}^{N_D} t_{wi} \rightarrow \min, \quad (6)$$

де t_{wi} – час очікування для i -ого пасажира, який подорожує у системі громадського транспорту з використанням даного транспортного вузла як відправного або пересадочного пункту, хв.

Оскільки задача синхронізації в представленому вигляді не може бути вирішена аналітично, слід запропонувати відповідні евристики. Використання генетичних алгоритмів є зручним способом отримання рішень для таких складних стохастичних моделей, як представлена в цій статті. Основними особливостями застосування генетичного алгоритму є використаний підхід до представлення хромосом та процедура оцінки функції пристосованості.

Хромосома як елемент генетичного алгоритму репрезентує собою набір незалежних змінних. У випадку сформульованої задачі необхідно закодувати вектор Ψ , що представляє вхідну змінну. Якщо хромосому представлено у бінарній формі, відповідні дані мають бути визначені як послідовність 0 і 1 (генів хромосоми). Таку послідовність можна легко отримати, якщо вектор Ψ буде перетворено відповідно до наступного принципу: значення кожного елемента у векторі зсувів у часі кодується у двійковій формі для заданої кількості генів для кожного значення, потім усі закодовані значення об'єднуються в послідовність, що представляє вектор Ψ . Верхня межа можливого значення часового зсуву визначається кількістю генів, виділених для репрезентації елемента вектору: 3 гени відповідають діапазону значення часового зсуву від 0 до 7 хвилин включно, 4 гени дозволяють розглядати діапазон від 0 до 15 хвилин, 5 генів можуть кодувати число від 0 до 31 хвилини тощо.

Оцінку загального часу очікування T_w як функції пристосованості пропонується провести на підставі запуску імітаційної моделі (бібліотека базових класів, використана у даному дослідженні для створення імітаційної моделі, вперше була описана у публікації [15], натомість код розробленої моделі представлено в репозиторії [16]). Оскільки отримані значення загального часу очікування будуть випадковими, для оцінки функції пристосованості необхідно сформувати вибірку значень загального часу очікування для кожної комбінації вектору Ψ ; в результаті, значення функції пристосованості можна оцінити як середнє значення для отриманої вибірки.

Запропонований підхід до синхронізації розкладів реалізовано на прикладі зупинки «Автовокзал» у Верхньодніпровську Дніпропетровської області (мережу міського маршрутного транспорту схематично представлено на рис. 1).

Параметри розкладу руху автобусів на цій зупинці в серпні 2024 року наведені в табл. 1: зсуви наведені в перерахунку з 7:00 як початкового моменту, оскільки цей час було обрано як початок години пік.

У рамках дослідження пересадочного вузла «Автовокзал» проаналізовано інтенсивність попиту для ранкового пікового періоду з 6:30 до 9:30. Дослідження попиту проводилися з понеділка по п'ятницю 5-9 серпня 2024 року (загалом 15 годин безперервних спостережень). На зупинці проведено обстеження кількості пасажирів, що прибували (пішки, щоб розпочати подорож, або автобусом, щоб продовжити або закінчити подорож): для кожного пасажира визначено номер автобусної лінії, з якої він скористався. Додатково вимірювалася кількість пасажирів, які висадилися з автобуса по кожній із ліній транспорту. Для пасажирів, які висадилися, зазначалося, чи пасажир має намір продовжити поїздку іншою лінію.

В результаті спостережень була отримана вибірка розміром 3750 пасажирів, які використали зупинку «Автовокзал» під час своєї подорожі. Виходячи з обсягу вибірки, для запуску імітаційної моделі використано середню інтенсивність прибуття пасажирів до вузла «Автовокзал», що дорівнювала 250 пас./год. Частка пасажирів для кожного з автобусних маршрутів була розрахована на основі інформації про те, який маршрут обрав пасажир (результати наведені в табл. 1).

Для випадкової кількості висаджених пасажирів гіпотезу про нормальний розподіл перевірено для кожної автобусної лінії за допомогою критерію узгодженості Колмогорова-Смирнова: гіпотези не відхиляються при прийнятому рівні значущості у 5%. Середні значення (округлені до цілого числа) нормально розподілених змінних кількості пасажирів, що висаджуються, наведені в табл. 1. Дослідження поведінки пасажирів щодо продовження подорожі іншим маршрутом пасажирського транспорту показали, що близько 15% пасажирів, що висадилися, залишилися чекати на автобус іншої лінії.

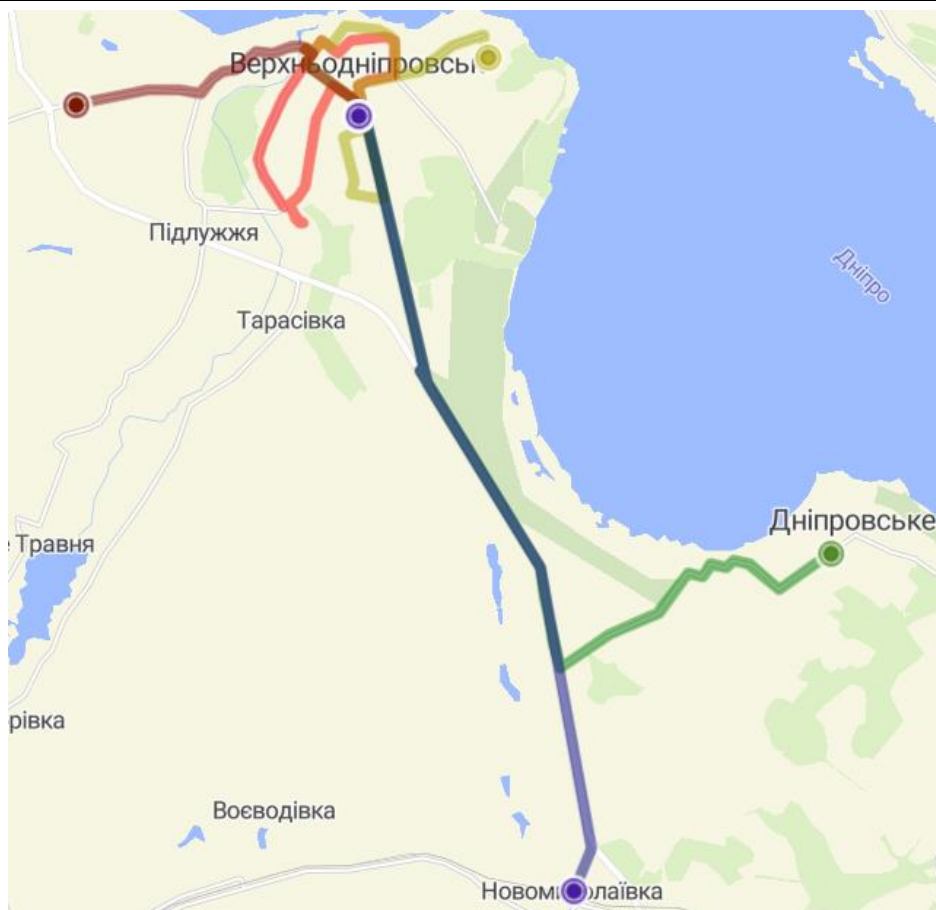


Рисунок 1 – Маршрутна мережа м. Верхньодніпровська

Таблиця 1 – Параметри базового розкладу та параметри попиту у пересадочному вузлі «Автовокзал»

Номер лінії	Зсув часу початку обслуговування лінії [хв.]	Інтервал часу між автобусами на лінії [хв.]	Часка пасажирів	Середня кількість пасажирів, що висадилися [пас.]
#1	20	35	0,35	3
#2	0	30	0,20	4
#3	0	20	0,25	5
#4	5	28	0,10	4
#5	14	26	0,10	4

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для синхронізації розкладу в пересадочному вузлі «Автовокзал» реалізовано генетичний алгоритм з наступними параметрами (реалізація алгоритму знаходиться в тому ж git-репозиторії, де зберігається код розробленої імітаційної моделі):

- кількість поколінь: 30 (кількість ітерацій алгоритму),
- розмір популяції: 100 (кількість індивідів у популяції – набір альтернативних значень вектору Ψ);
- розмір хромосоми: 35 біт (7 біт на лінію автобусного транспорту: значення часового зсуву розглядаються в діапазоні від 0 до 127 хвилин включно);
- ймовірність схрещення: 0,5 (ймовірність того, що генетичний код нового індивіду буде відтворено з коду обох батьків);
- допустима кількість мутацій на хромосому: 3 (кількість генів у хромосомі, яка вибирається для мутації);
- ймовірність мутації: 0,1 (ймовірність того, що обраний ген буде інвертований);

• коефіцієнт виживання: 0,2 (20% індивідів у популяції з найкращими характеристиками вибираються для подальшого відтворення).

Для оцінки функції пристосування в розробленому генетичному алгоритмі було розраховано середнє з 100 значень сумарних значень часу очікування для кожного варіанта вектору часових зсувів у розкладах руху автобусів.

В результаті оптимізації запропонованим генетичним алгоритмом отримано наступний вектор часових зсувів: $\Psi = \langle 22, 17, 9, 18, 11 \rangle$. Розподіл загального часу очікування для початкової конфігурації розкладу (встановленої вектором $\Psi_0 = \langle 20, 0, 0, 5, 14 \rangle$) та оптимізованої конфігурації, отриманої з вибірки 300 запусків імітаційної моделі для обох конфігурацій розкладу, показано на рис. 2.

Як можна відмітити, розклад руху автобусів, розроблений із застосуванням запропонованого генетичного алгоритму, у відповідності із результатами моделювання, дозволяє знизити середнє значення загального часу очікування з 10271 до 9938 хвилин у ранкову годину пік.

ВИСНОВКИ

Система громадського транспорту є складною системою, що характеризується стохастичним попитом на послуги та випадковими параметрами в технологічних процесах. Ця складність вимагає використання підходів на основі моделювання для вирішення проблем оптимізації.

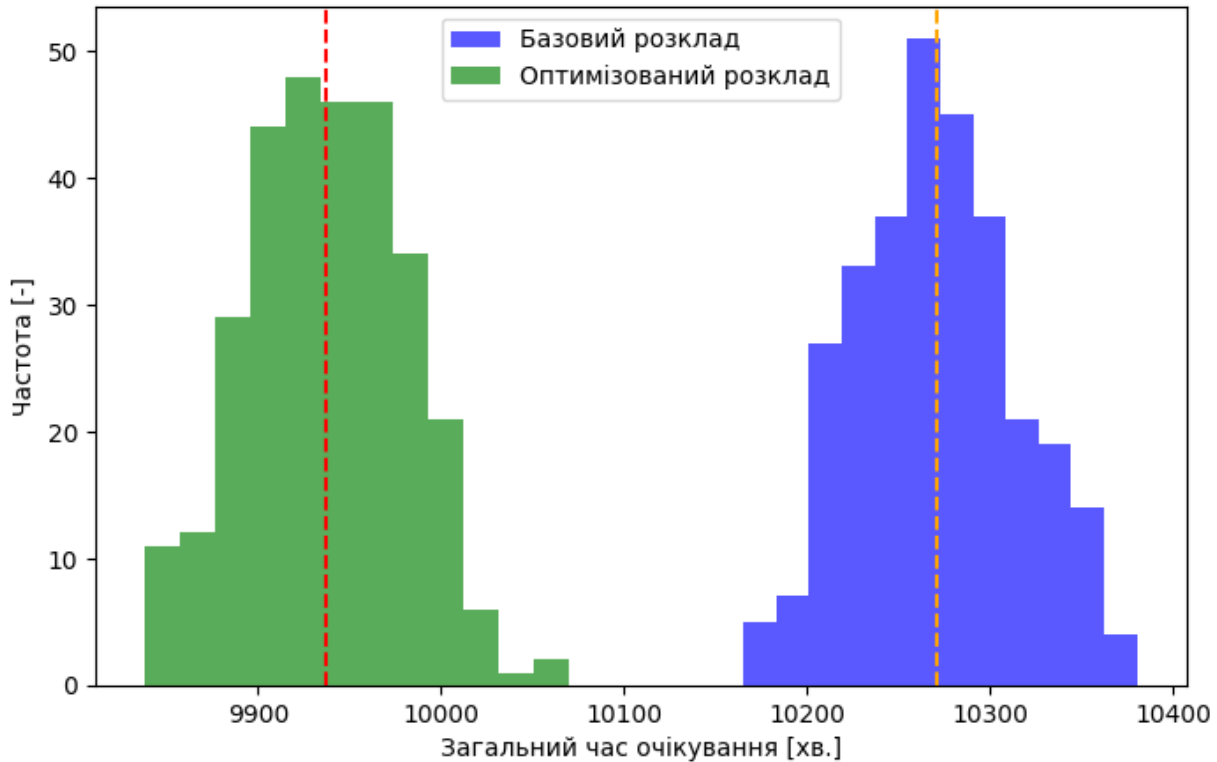


Рисунок 2 – Розподіл загального часу очікування для базового та оптимізованого розкладу

Розроблена загальна математична модель пересадочного вузла надає дослідникам масштабований інструмент для дослідження різних проблем громадського транспорту, включаючи синхронізацію розкладу. Використана реалізація програмного забезпечення пропонує низку методів для імітаційного моделювання роботи міського громадського транспорту.

Інтеграція розробленого програмного забезпечення з генетичним алгоритмом демонструє його ефективність у вирішенні задачі синхронізації розкладу. Запропонований підхід можна розширити шляхом кодування різних змінних рішень, таких як номери транспортних засобів, ємність або часові зсуви, у хромосомах. Однак такі модифікації можуть вплинути на ефективність обчислень, обмежуючи їх застосування в реальних сценаріях.

Синхронізація розкладу в одному пересадочному вузлі може впливати на загальний час очікування пасажирів в інших вузлах мережі. Тому результати, отримані за допомогою запропонованого підходу, слід оцінювати в контексті всієї системи громадського транспорту. В

якості альтернативи можна розглянути підхід до синхронізації всієї мережі, як запропоновано в [10]. Однак обчислювальна складність цього підходу може обмежити його практичне використання.

Щоб підвищити застосовність запропонованого підходу до синхронізації розкладу, подальші дослідження повинні бути присвячені:

- проведенню аналізу чутливості для оцінки впливу різних параметрів генетичного алгоритму та конфігурацій мережі громадського транспорту на результати синхронізації,
- розробці більш ефективних і масштабованих методів для синхронізації розкладу в усій мережі для вирішення обчислювальних проблем, пов'язаних з цим підходом,
- вивченню інтеграції синхронізації розкладу з іншими проблемами оптимізації громадського транспорту, такими як планування маршруту, розклад транспортних засобів і налаштування частоти,
- дослідженню доцільності впровадження запропонованого підходу в операції в режимі реального часу для адаптації до динамічного попиту та збоїв.

Реалізація зазначених напрямків перспективних досліджень і використання розробленого підходу у практиці організації роботи громадського транспорту може сприяти підвищенню ефективності, надійності та якості обслуговування пасажирів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ceder, A., Golang, B., Tal, O., 2001. Creating bus timetables with maximal synchronization. *Transportation Research Part A* 35.10, 913–928.
2. Liu, T., Ceder, A., 2018. Integrated public transport timetable synchronization and vehicle scheduling with demand assignment: A bi-objective bi-level model using deficit function approach. *Transportation Research Part B* 117, 935–955.
3. Shrivastava, P., Dhingra, S.L., 2002. Development of coordinated schedules using genetic algorithms. *Journal of Transportation Engineering* 128.1, 89–96.
4. Bruno, G., Improta, G., Sgalambro, A., 2009. Models for the schedule optimization problem at a public transit terminal. *OR Spectrum* 31.3, 465–481.
5. Wu, Y., Yang, H., Tang, J., Yu, Y., 2016. Multi-objective re-synchronizing of bus timetable: Model, complexity and solution. *Transportation Research Part C* 67, 149–168.
6. Liu, T., Ceder, A., 2016. Synchronization of public transport timetabling with multiple vehicle types. *Transportation Research Record* 2539, 84–93.
7. Tian, X., Niu, H., 2019. A bi-objective model with sequential search algorithm for optimizing network-wide train timetables. *Computers and Industrial Engineering* 127, 1259–1272.
8. Teodorović, D., Lučić, P., 2005. Schedule synchronization in public transit using the fuzzy ant system. *Transportation Planning and Technology* 28.1, 47–76.
9. Wu, W., Liu, R., Jin, W., 2016. Designing robust schedule coordination scheme for transit networks with safety control margins. *Transportation Research Part B* 93A, 495–519.
10. Naumov, V., 2018. Synchronisation of timetables for public bus lines using genetic algorithms and computer simulations. *Lecture Notes in Networks and Systems* 36, 44–53.
11. Naumov, V. 2020. Genetic-based algorithm of the public transport lines synchronization in a transfer node, *Transportation Research Procedia* 47, 315–322.
12. Ibarra-Rojas, O., López-Irarragorri, F., Rios-Solis, Y., 2016. Multiperiod bus timetabling. *Transportation Science* 50.3, 805–822.
13. Shen, Y., Wang, S., 2016. An adaptive differential evolution approach for the maximal synchronization problem of feeder buses to metro. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience* 13.6, 3548–3555.
14. Yap, M., Luo, D., Cats, O., van Oort, N., Hoogendoorn, S., 2019. Where shall we sync? Clustering passenger flows to identify urban public transport hubs and their key synchronization priorities. *Transportation Research Part C* 98, 433–448.
15. 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.
16. Class library for simulations of technological processes in a public transport network. URL: <https://github.com/naumovvs/publictransportnet>.

REFERENCES

1. Ceder, A., Golang, B., Tal, O., 2001. Creating bus timetables with maximal synchronization. *Transportation Research Part A* 35.10, 913–928.

2. Liu, T., Ceder, A., 2018. Integrated public transport timetable synchronization and vehicle scheduling with demand assignment: A bi-objective bi-level model using deficit function approach. *Transportation Research Part B* 117, 935–955.
3. Shrivastava, P., Dhingra, S.L., 2002. Development of coordinated schedules using genetic algorithms. *Journal of Transportation Engineering* 128.1, 89–96.
4. Bruno, G., Improta, G., Sgalambro, A., 2009. Models for the schedule optimization problem at a public transit terminal. *OR Spectrum* 31.3, 465–481.
5. Wu, Y., Yang, H., Tang, J., Yu, Y., 2016. Multi-objective re-synchronizing of bus timetable: Model, complexity and solution. *Transportation Research Part C* 67, 149–168.
6. Liu, T., Ceder, A., 2016. Synchronization of public transport timetabling with multiple vehicle types. *Transportation Research Record* 2539, 84–93.
7. Tian, X., Niu, H., 2019. A bi-objective model with sequential search algorithm for optimizing network-wide train timetables. *Computers and Industrial Engineering* 127, 1259–1272.
8. Teodorović, D., Lučić, P., 2005. Schedule synchronization in public transit using the fuzzy ant system. *Transportation Planning and Technology* 28.1, 47–76.
9. Wu, W., Liu, R., Jin, W., 2016. Designing robust schedule coordination scheme for transit networks with safety control margins. *Transportation Research Part B* 93A, 495–519.
10. Naumov, V., 2018. Synchronisation of timetables for public bus lines using genetic algorithms and computer simulations. *Lecture Notes in Networks and Systems* 36, 44–53.
11. Naumov, V. 2020. Genetic-based algorithm of the public transport lines synchronization in a transfer node, *Transportation Research Procedia* 47, 315–322.
12. Ibarra-Rojas, O., López-Irarragorri, F., Rios-Solis, Y., 2016. Multiperiod bus timetabling. *Transportation Science* 50.3, 805–822.
13. Shen, Y., Wang, S., 2016. An adaptive differential evolution approach for the maximal synchronization problem of feeder buses to metro. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience* 13.6, 3548–3555.
14. Yap, M., Luo, D., Cats, O., van Oort, N., Hoogendoorn, S., 2019. Where shall we sync? Clustering passenger flows to identify urban public transport hubs and their key synchronization priorities. *Transportation Research Part C* 98, 433–448.
15. 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.
16. Class library for simulations of technological processes in a public transport network. URL: <https://github.com/naumovvs/publictransportnet>.

Yu. Melnikova, V. Naumov, I. Taran, D. Bovin. Synchronization of city public transport timetables at a transfer node using genetic algorithms

The research is devoted to the actual problem of optimizing the operation of urban public transport by synchronizing public transport schedules at transfer nodes. The relevance of the study is due to the growing need to improve the efficiency and quality of service to passengers of city transport.

Timetable synchronization is one of the key factors affecting passenger satisfaction and the overall efficiency of the transport system. Firstly, the coordination of schedules for various types of transportation enables passengers to make quick transfers, thereby reducing waiting times. This is especially significant in cases of transfers between different modes of transportation, such as buses, trams, subways, or commuter trains. Secondly, timetable synchronization facilitates the rational use of transportation resources, allowing for the avoidance of route duplication and increasing vehicle occupancy. This, in turn, contributes to lower operational costs and more efficient management of transportation infrastructure. Thirdly, a rational and efficiently functioning transportation system helps to reduce harmful emissions into the atmosphere. This occurs through a decrease in the need for personal vehicles and a reduction in the number of vehicles on the roads.

The transplant node in the Verkhnyodniprovsk, Dnipropetrovsk region of Ukraine, was chosen as the object of the study. The purpose of the study is to improve the efficiency of passenger service in the city bus network by synchronizing the schedules for the “Autovokzal” transport node.

To achieve the goal of the research, field studies were conducted in the selected transport node, a simulation model of the operation of the transport node was developed, and schedules were optimized using a genetic algorithm based on the results of simulations.

The results of the study demonstrated the effectiveness of the proposed approach. The improved traffic schedule was obtained, which allows to reduce the average waiting time of passengers for a transfer in the morning peak by 3.2%.

Keywords: schedule synchronization, transfer node, simulation modeling, genetic algorithm, optimization, urban public transport.

МЕЛЬНИКОВА Юлія Ігорівна, старший викладач кафедри «Управління на транспорті», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», e-mail: yulaskripa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7023-023X>.

НАУМОВ Віталій Сергійович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Управління на транспорті», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», e-mail: naumov.v.s@nmu.one. <https://orcid.org/0000-0001-9981-4108>.

ТАРАН Ігор Олександрович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Управління на транспорті», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», e-mail: taran7077@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-3679-2519>.

БОВІН Данило Павлович, студент гр. 275м-24-1, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», e-mail: bovin.d.p@nmu.one.

Yuliia MELNIKOVA, Senior Lecturer of Transport Management Department, Dnipro University of Technology, e-mail: yulaskripa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7023-023X>.

Vitalii NAUMOV, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Transport Management Department, Dnipro University of Technology, e-mail: naumov.v.s@nmu.one. <https://orcid.org/0000-0001-9981-4108>.

Ihor TARAN, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Transport Management Department, Dnipro University of Technology, e-mail: taran7077@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-3679-2519>.

Danylo BOVUN, student gr. 275m-24-1, Dnipro University of Technology, e-mail: bovin.d.p@nmu.one.

DOI 10.36910/automash.v2i23.1540