

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Кваліфікаційна
наукова праця на
правах рукопису

Мельнікова Юлія Ігорівна

ДИСЕРТАЦІЯ

УДК 656.072

**СИНХРОНІЗАЦІЯ РОЗКЛАДІВ РУХУ ГРОМАДСЬКОГО
ТРАНСПОРТУ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЕВРИСТИЧНИХ МЕТОДІВ
І ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

275 – Транспортні технології (за видами)
27 – Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших
авторів мають посилання на відповідні джерела



Ю.І. Мельнікова

Науковий керівник Орда Олександра Олександрівна, к.т.н., доцент

Харків – 2026

АНОТАЦІЯ

Мельнікова Ю.І. Синхронізація розкладів руху громадського транспорту із використанням евристичних методів і імітаційного моделювання. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 275.03 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)». – Харківський національний автомобільно-дорожній університет, МОН України, Харків, 2026.

Дослідження присвячено розвитку теоретичних і методичних засад підвищення рівня обслуговування міського населення громадського транспорту шляхом формування підходу до синхронізації розкладів руху громадського транспорту із застосуванням сучасних евристичних методів і імітаційного моделювання. Складність вирішення поставленої задачі в сучасних умовах посилюється стохастичною природою попиту та динамічністю транспортних потоків, що нівелює точність детермінованих моделей. Застосування евристичних методів стає необхідною відповіддю на високу обчислювальну складність (NP-складність) задачі синхронізації розкладів, що забезпечують високу обчислювальну ефективність та адаптивність до варіативних умов і дозволяють отримати рішення за реальний час. Саме тому актуальним є створення моделей і методів, здатних враховувати стохастичну природу попиту на пасажирські перевезення і отримати наближене до оптимального рішення, що забезпечить зменшення загальних експлуатаційних витрат на функціонування систем міського громадського пасажирського транспорту (МГПТ).

У дисертації проведено порівняльний аналіз наукових робіт, присвячених вирішенню задачі синхронізації розкладів руху з використанням різних підходів і методів, класифіковано дослідження на чотири окремі групи за основними методами оптимізації, виявлено, що найпоширенішим методом є генетичні алгоритми (ГА), які успішно застосовані при синхронізації розкладів на різних рівнях, включаючи вузли, вибрані маршрути та цілі мережі і для різних видів транспорту. Отримані результати досліджень свідчать про наявність суттєвого

дисонансу між вагомим теоретичним базисом та низьким рівнем впровадження наукових розробок у практичну діяльність транспортних підприємств. Необхідно відзначити, що науковцями недостатньо уваги приділяється проблемі параметричного налаштування ГА при вирішенні задачі синхронізації розкладів руху. Тому робота присвячена подоланню існуючого розриву між теоретичними досягненнями та практичними застосуваннями розроблених рішень.

Одним із ключових результатів дослідження є розробка підходу до синхронізації розкладів руху міського громадського пасажирського транспорту із застосуванням сучасних евристичних методів, що дозволяє нівелювати дестабілізуючий стохастичний вплив середовища на рівень задоволення потреб населення у перевезеннях.

Особливе місце у роботі займає проведення оцінки статистичної значущості параметрів ГА на ефективність його практичної реалізації при синхронізації розкладів руху і визначення характеру їх впливу на якість транспортного обслуговування. Критерієм якості транспортного обслуговування є середній час очікування пасажирів у вузлах пересадки і мережі міського громадського пасажирського транспорту. Отримані результати досліджень визначають раціональні межі налаштувань евристичного алгоритму для отримання субоптимальних розкладів відповідно до умов функціонування транспортної системи. Науково обґрунтовані рекомендації допоможуть ефективно впроваджувати та налаштовувати ГА для вирішення задач синхронізації розкладів руху.

У роботі представлено авторську програмну бібліотеку мовою Python, призначену для імітаційного моделювання роботи міського громадського пасажирського транспорту. Модель базується на структурі графа, де вузли та ребра відповідають елементам транспортної мережі (зупинкам, перегонам). Програмний комплекс дозволяє відтворювати динаміку руху транспортних одиниць та поведінку пасажирів як окремих агентів. Це забезпечує можливість детального збору статистичних даних щодо часу очікування у вузлах пересадки. Завдяки вбудованим механізмам генерації випадкових величин, бібліотека враховує стохастичний

характер попиту пасажирів, створюючи адекватне середовище для апробації алгоритмів оптимізації розкладів.

Розроблено методику для синхронізації розкладів, що ґрунтується на комплексному імітаційному моделюванні пасажирських систем. Завдяки ієрархічній структурі моделей забезпечується висока точність прогнозування результатів управлінських рішень у реальних експлуатаційних умовах. Гнучкість інструментарію дозволяє адаптувати його до різних рівнів проектування — від локального до загальноміського. Поєднання стохастичного моделювання з генетичними алгоритмами гарантує адекватне врахування випадкових чинників, що є критичним для реального підвищення якості транспортного обслуговування.

Результати багаторівневої апробації (на макро- та мікрорівнях), проведеної із застосуванням розроблених симуляційних моделей, дозволили верифікувати спроможність запропонованої методики забезпечувати скорочення середнього часу очікування пасажирів у транспортних вузлах і мережах. Встановлено, що ефективність оптимізації в умовах імовірнісного попиту визначається параметричним налаштуванням ГА.

Розмір популяції є одним із найбільш стабільних чинників підвищення якості рішень як на стадії ініціалізації пошуку, так і при досягненні алгоритмом точки збіжності. Водночас виявлено, що ймовірність кросовера чинить мінімальний вплив на ранніх етапах ітераційного процесу, проте її роль стає статистично значущою для формування фінальної якості евристики та досягнення високої загальної результативності оптимізації.

Виявлено статистично значущу позитивну кореляцію між параметрами розміру популяції, ймовірністю кросинговеру і якістю отриманих результатів, а негативну — між ймовірністю мутацій, кількістю мутацій і результатами застосування ГА.

В роботі *вперше* розроблено комплексний підхід до синхронізації розкладів руху міського громадського транспорту, який, на відміну від існуючих, дозволяє формувати субоптимальні розклади руху шляхом визначення раціональних меж

налаштувань генетичного алгоритму за встановленими закономірностями впливу його параметрів на середній час очікування пасажирів.

Удосконалено методику синхронізації розкладів руху міського громадського пасажирського транспорту, яка, на відміну від існуючих підходів, базується на інтеграції генетичних алгоритмів та дискретно-подієвого імітаційного моделювання процесу обслуговування пасажирів у вузлах пересадки, що дозволило реалізувати механізм динамічної оцінки функції пристосованості особин популяції за показниками функціонування транспортної системи з урахуванням стохастичних затримок транспортних засобів та нерівномірності попиту на транспортні послуги.

Набув подальшого розвитку підхід до імітаційного моделювання процесів транспортного обслуговування пасажирів міським громадським пасажирським транспортом, що полягає у розробленні та впровадженні модуля генерації нестационарного випадкового попиту; запропоноване рішення дозволяє відтворювати коливання пасажирських кореспонденцій у часі та просторі, що підвищує адекватність імітаційної моделі під час оцінювання ефективності синхронізації розкладів руху.

Практичне значення результатів дослідження полягає у розробці методики синхронізації розкладів руху на маршрутах мережі міського громадського пасажирського транспорту на основі генетичних алгоритмів, що дозволяє формувати субоптимальні розклади руху за критерієм мінімізації середнього часу очікування пасажирів у пересадочних вузлах.

Результати роботи використовуються у навчальному процесі Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» при підготовці бакалаврів і магістрів спеціальності 275 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)», а також при викладанні дисциплін «Управління автомобільними перевезеннями» і «Пасажирські перевезення», що підтверджується відповідним актом впровадження.

Ключові слова: транспортна система, пасажирські перевезення, міський громадський пасажирський транспорт, пасажиропотік, синхронізація розкладів,

пересадочний вузол, імітаційне моделювання, генетичний алгоритм, оптимізація, параметри генетичного алгоритму.

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Мельнікова, Ю.І., Наумов, В.С., Таран, І.О., Бовін, Д.П. Синхронізація розкладів руху міського громадського транспорту у пересадочному вузлі з використанням генетичних алгоритмів. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті 2024, 23, 180-187. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1540>

2. Naumov, V., Taran, I., Melnikova, Yu., 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>

3. Kapica, D., Melnikova, Yu., Naumov, V. Synchronization in public transportation: A review of challenges and techniques. Future Transportation 2025, 5(1), 6. <https://doi.org/10.3390/futuretransp5010006>

4. 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), 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)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Melnikova, Yu.I., Nagorni, Ye.V. Problems of synchronizing the public transport schedule in the cities of Ukraine // Розумний транспорт та інтегровані транспортні технології: Міжнародна науково-практична конференція, м. Харків, Україна, 21-22 листопада 2023 р.: збірник матеріалів наукових робіт. Харків: ХНАДУ, 2023, 25-27.

2. Нагорний Є.В., Мельнікова Ю. І. Математичне моделювання мережі громадського транспорту при вирішенні задачі синхронізації розкладів їх руху // Автошляховик України. Збірка тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції: «Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури», 5-7 грудня 2023 р., Київ, 2023, 125-128.

3. Kapica, D., Melnikova, Yu. Synchronizacja rozkładów jazdy wybranych linii zielonogórskiej sieci publicznego transportu zbiorowego za pomocą algorytmu genetycznego. Młodzi Naukowcy 2.0. T. 4 / Korpysa, J. [i in.] (red.), 2025, Szczecin, Fundacja Centrum Badań Socjologicznych, 63-71, ISBN 978-83-973513-2-5

4. Вдовиченко, В.О., Мельнікова, Ю.І. Синхронізація розкладів руху міського громадського транспорту у пересадочному вузлі з використанням генетичних алгоритмів. Матеріали 89-ої науково-технічної та науково-методичної конференції ХНАДУ. Секція транспортних технологій, Харків, 2025, 206-209.

5. Вдовиченко В.О., Мельнікова Ю.І. Синхронізація розкладів руху громадського транспорту: перспективні напрямки досліджень. Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту», 15-17 квітня 2025 р.: збірник наукових праць [Електронний ресурс] / Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та ін.] – Вінниця: ВНТУ, 2025, 100-104.

ABSTRACT

Melnikova Yu.I. Synchronization of public transport schedules using heuristic methods and simulation modeling. – Qualification scientific work in the form of a manuscript

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 275.03 “Transport technologies (in road transport)”. – Kharkiv National Automobile and Highway University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2026.

The study is devoted to the development of theoretical and methodological principles for improving the level of public transport service by developing an approach to synchronizing public transport schedules using modern heuristic methods and simulation modeling. The complexity of solving the problem in modern conditions is increased by the stochastic nature of demand and nonlinear traffic dynamics, which reduces the accuracy of deterministic models. The use of heuristic methods becomes a necessary response to the high computational complexity (NP-complexity) of the

schedule synchronization problem, which provides high computational efficiency and adaptability to variable conditions and allows obtaining a solution in real time. That is why it is relevant to create models and methods that can consider the stochastic nature of passenger transport demand and obtain an approximate optimal solution, which will reduce the overall operating costs of urban passenger transport systems.

The dissertation conducted a comparative analysis of scientific works devoted to solving the problem of synchronization of traffic schedules using different approaches and methods, classified the research into four separate groups according to the main optimization methods, found that the most common method is genetic algorithms (GA), which are successfully applied in synchronization of schedules at different levels, including nodes, selected lines and entire networks and for different types of transport. The obtained research results indicate the presence of a significant dissonance between a solid theoretical basis and a low level of implementation of scientific developments in the practical activities of transport enterprises. It should be noted that scientists do not pay enough attention to the problem of parametric tuning of GAs when solving the problem of synchronization of traffic schedules. Therefore, the work is devoted to overcoming the existing gap between theoretical achievements and practical applications of the developed solutions.

One of the key results of the study is the development of an approach to the synchronization of public transport schedules using modern heuristic methods, which allows to level the destabilizing stochastic impact of the environment on the level of satisfaction of the population's needs in transportation.

A special place in the work is occupied by the assessment of the statistical significance of GA parameters on the effectiveness of its practical implementation in the synchronization of traffic schedules and determining the nature of their impact on the quality of transport service. The criterion of the quality of transport service is the average waiting time of passengers at transfer nodes and the transport network. The obtained research results determine the rational limits of the heuristic algorithm settings to obtain quasi-optimal schedules in a time regime close to real. Scientifically based

recommendations will help to effectively implement and configure GA to solve the problems of synchronization of traffic schedules.

The research presents the author's software library in Python, designed for simulation modeling of urban passenger transport. The model is based on the structure of a graph, where nodes and edges correspond to elements of the transport network (stops, routes). The software package allows you to reproduce the dynamics of transport unit traffic and the behavior of passengers as individual agents. This provides the ability to collect detailed statistical data on waiting times at transfer nodes. Thanks to the built-in mechanisms for generating random variables, the library considers the stochastic nature of passenger demand, creating an adequate environment for testing schedule optimization algorithms.

A schedule synchronization methodology based on comprehensive simulation modeling of passenger systems has been developed. The hierarchical structure of the models ensures high accuracy in predicting the results of management decisions in real operating conditions. The flexibility of the toolkit allows you to adapt it to different levels of design - from local to citywide. The combination of stochastic modeling with genetic algorithms ensures adequate consideration of random factors, which is critical for a real improvement in the quality of transport service.

The results of multi-level testing (at macro and micro levels) conducted using the developed simulation models allowed the author to verify the ability of the proposed method to reduce the average waiting time of passengers in transport nodes and networks. It was established that the efficiency of optimization in conditions of probabilistic demand is determined by the parametric setting of the GA.

The population size is one of the most stable factors in improving the quality of solutions both at the stage of search initialization and when the algorithm reaches the convergence point. At the same time, it was found that the crossover probability has a minimal impact at the early stages of the iterative process, but its role becomes statistically significant for forming the final quality of the heuristic and achieving high overall optimization efficiency.

A statistically significant positive correlation was found between the parameters of the population size and crossover probability and the quality of the results obtained, and a negative one between the probability of mutations and the number of mutation attempts and the results of the GA application.

The work *first established* a comprehensive approach to urban public transport schedule synchronization has been developed, which, unlike existing ones, allows for the formation of sub-optimal schedules by determining the rational limits of genetic algorithm settings based on the established regularities of its parameters' impact on the average passenger waiting time.

The method of synchronization of public transport schedules has been *improved*, which, unlike existing approaches, is based on the integration of genetic algorithms and discrete-event simulation modeling, which made it possible to implement a mechanism for dynamic assessment of the adaptability function of individuals of the population based on real indicators of the system's functioning, taking into account stochastic delays of vehicles and uneven demand for transportation.

The approach to simulation modeling of passenger service processes has been *further developed*, which consists in the development and implementation of a module for generating non-stationary random demand; the proposed solution allows us to reproduce fluctuations in correspondences in time and space, which ensures higher adequacy of the simulation model.

The practical significance of the research results lies in the development of a methodology for determining traffic schedules on public transport network routes that meet the minimum waiting time for passengers at interchanges.

The results of the work are used in the educational process of the National Technical University “Dnipro Polytechnic” in the training of bachelors and masters in specialty 275 “Transport technologies (in road transport)”, as well as in teaching the disciplines “Road transport management” and “Passenger transport”, which is confirmed by the relevant act.

Keywords: transport system, passenger transportation, urban public transport, passenger traffic, schedule synchronization, interchange node, simulation modeling, genetic algorithm, optimization, genetic algorithm parameters.

List of publications of the candidate:

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Melnikova, Yu.I., Naumov, V.S., Taran, I.O., Bovin, D.P. Synchronization of urban public transport schedules at a transfer hub using genetic algorithms. *Modern Technologies in Mechanical Engineering and Transport* 2024, 23, 180-187. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1540>

2. Naumov, V., Taran, I., Melnikova, Yu., 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>

3. Kapica, D., Melnikova, Yu., Naumov, V. Synchronization in public transportation: A review of challenges and techniques. *Future Transportation* 2025, 5(1), 6. <https://doi.org/10.3390/futuretransp5010006>

4. Melnikova, Yu.I. Analysis of the influence of parameters on the efficiency of the application of the genetic algorithm in solving the problem of synchronization of public transport traffic. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences* 2026, 13(44), 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)

Scientific works that confirm the approbation of the dissertation materials:

1. Melnikova, Yu.I., Nagornyi, Ye.V. Problems of synchronizing the public transport schedule in the cities of Ukraine // *Smart transport and integrated transport technologies: International scientific and practical conference, Kharkiv, Ukraine, November 21-22, 2023: collection of scientific papers. Kharkiv: KhNADU, 2023, 25-27.*

2. Nagornyi Ye.V., Melnikova Yu.I. Mathematical modeling of the public transport network when solving the problem of synchronizing their traffic schedules // *Avtoshlyakhovyk Ukrainy. Collection of abstracts of reports of the International scientific*

and practical conference: “Prospects for the development of automobile transport and infrastructure”, December 5-7, 2023, Kyiv, 2023, 125-128.

3. Kapica, D., Melnikova, Yu. Synchronization of timetables of selected lines of the Zielona Góra public transport network using a genetic algorithm. Young Scientists 2.0. Vol. 4 / Korpysa, J. [i in.] (ed.), 2025, Szczecin, Fundacja Centrum Badań Socjologicznych, 63-71, ISBN 978-83-973513-2-5

4. Vdovichenko, V.O., Melnikova, Yu.I. Synchronization of timetables of urban public transport in a transfer node using genetic algorithms. Proceedings of the 89th Scientific, Technical and Scientific-Methodological Conference of the KhNADU. Section of Transport Technologies, Kharkiv, 2025, 206-209.

5. Vdovichenko, V.O., Melnikova Yu.I. Synchronization of timetables of public transport: promising research directions. Materials of the XIII International Scientific and Technical Internet Conference “Problems and Prospects for the Development of Road Transport”, April 15-17, 2025: Collection of Scientific Papers [Electronic resource] / Ministry of Education and Science of Ukraine, Vinnytsia National Technical University [etc.] – Vinnytsia: VNTU, 2025, 100-104.

ЗМІСТ

Вступ.....	16
1 Аналіз наукової літератури та практичних підходів щодо синхронізації розкладів міського громадського пасажирського транспорту.....	22
1.1 Огляд існуючих підходів до синхронізації розкладів міського громадського пасажирського транспорту.....	24
1.1.1 Генетичні алгоритми.....	25
1.1.2 Імітація відпалу.....	29
1.1.3 Інші методи вирішення задачі синхронізації.....	31
1.2 Застосування методів синхронізації в системах міського громадського пасажирського транспорту.....	33
1.2.1 Застосування генетичних алгоритмів.....	33
1.2.2 Застосування методу імітації відпалу.....	40
1.2.3 Застосування методів цілочисельного програмування.....	41
1.2.4 Застосування інших підходів до синхронізації міського громадського пасажирського транспорту.....	47
1.3 Аналіз популярності застосування методів синхронізації розкладів руху..	51
1.4 Висновки по першому розділу.....	56
2. Розробка імітаційної моделі системи міського громадського пасажирського транспорту.....	59
2.1 Вибір інструментів для моделювання систем міського громадського пасажирського транспорту.....	60
2.2 Загальна структура бібліотеки класів для моделювання систем міського громадського пасажирського транспорту.....	65
2.3 Поля і методи класів розробленої об'єктної моделі.....	68
2.3.1 Поля і методи класу Net.....	68
2.3.2 Поля і методи класу Node.....	71
2.3.3 Поля і методи класу Link.....	72
2.3.4 Поля і методи класу Line.....	72

2.3.5 Поля і методи класу Vehicle.....	74
2.3.5 Поля і методи класу Vehicle.....	74
2.3.6 Поля і методи класу Passenger.....	76
2.3.7 Поля і методи класу Stochastic.....	77
2.4 Висновки по другому розділу.....	78
3. Розробка методики синхронізації розкладів руху міського громадського пасажирського транспорту.....	80
3.1 Синхронізація розкладів руху у транспортному вузлі.....	81
3.1.1 Модель пересадочного вузла.....	81
3.1.2 Формалізація проблеми синхронізації у пересадочному вузлі.....	86
3.1.3 Генетичний алгоритм для вирішення проблеми синхронізації у пересадочному вузлі.....	89
3.1.3.1 Репрезентація альтернативних рішень.....	90
3.1.3.2 Оцінка функції пристосування.....	93
3.2 Синхронізація в мережі міського громадського пасажирського транспорту.....	94
3.2.1 Модель мережі міського громадського пасажирського транспорту.....	94
3.2.2 Формалізація проблеми синхронізації у мережі міського громадського пасажирського транспорту.....	99
3.2.3 Генетичний алгоритм для вирішення проблеми синхронізації у мережі міського громадського пасажирського транспорту.....	101
3.2.3.1 Репрезентація альтернативних рішень.....	102
3.2.3.2 Оцінка функції пристосування.....	103
3.3 Висновки по третьому розділу.....	104
4. Експериментальні дослідження процесу синхронізації розкладів руху із використанням генетичних алгоритмів.....	106
4.1 Характеристика об'єкту проведення експериментальних досліджень.....	107
4.1.1 Модель транспортного вузла.....	115
4.1.2 Модель мережі міського громадського пасажирського транспорту.....	116
4.1.3 Результати моделювання для існуючого розкладу руху.....	118

4.2 Результати синхронізації розкладів руху.....	123
4.2.1 Синхронізація у транспортному вузлі «Автовокзал».....	125
4.2.2 Синхронізація у мережі міського громадського пасажирського транспорту.....	128
4.3 Дослідження впливу параметрів генетичного алгоритму на результати синхронізації розкладів руху.....	130
4.3.1 Результати аналізу для процедури синхронізації у транспортному вузлі	136
4.3.1.1 Вплив розміру популяції на ефективність процедури синхронізації....	136
4.3.1.2 Вплив імовірності кросинговеру на ефективність процедури синхронізації.....	138
4.3.1.3 Вплив імовірності мутації та кількості мутованих генів на ефективність процедури синхронізації.....	140
4.3.2 Результати аналізу для процедури синхронізації у міського громадського пасажирського транспорту.....	144
4.3.2.1 Вплив розміру популяції на ефективність процедури синхронізації.....	144
4.3.2.2 Вплив імовірності кросинговеру на ефективність процедури синхронізації.....	146
4.3.2.3 Вплив імовірності мутації та кількості мутованих генів на ефективність процедури синхронізації.....	148
4.4 Висновки по четвертому розділу.....	151
Висновки.....	153
Список використаних джерел.....	156
Додаток А Акти впровадження результатів дослідження.....	170
Додаток Б Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	173
Додаток В Розподіл середньої кількості пасажирів, що висаджуються у пересадочному вузлі «автовокзал», за маршрутами.....	175
Додаток Г Розподіл інтервалу часу між послідовними моментами підходу пасажирів до пересадочного вузла «Автовокзал».....	178

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальність даної дисертаційної роботи обумовлена необхідністю трансформації систем МГПТ у напрямку підвищення їхньої ефективності та привабливості для населення, що неможливо без мінімізації часових втрат на пересадочних вузлах. Синхронізація розкладів руху МГПТ виступає одним з ключових інструментів покращення якості обслуговування, оскільки вона дозволяє узгодити моменти прибуття та відправлення транспортних засобів різних маршрутів, забезпечуючи безперервність пересування. Окрім соціального ефекту у вигляді економії часу пасажирів, такий підхід сприяє оптимізації експлуатаційних показників парку перевізників, зменшуючи нераціональні простой рухомого складу та вирівнюючи навантаження на інфраструктуру міста.

Проблема оптимізації транспортних потоків у межах сучасного мегаполісу ускладнюється вираженим стохастичним характером процесів перевезення, де параметри попиту та тривалість руху транспортних засобів зазнають постійних коливань через затори, погодні чинники та дорожньо-транспортні пригоди. Висока розмірність мультимодальних мереж і нелінійність взаємодії між їхніми елементами обмежують застосування класичних аналітичних моделей, роблячи їх недостатньо точними для практичного використання. За таких умов імітаційне моделювання постає як найбільш релевантний інструмент, що дає змогу верифікувати розклади на стійкість до зовнішніх збоїв та отримати об'єктивні показники якості обслуговування на етапі предиктивного аналізу.

Враховуючи, що задача пошуку оптимального розкладу належить до класу NP-складних проблем, знаходження глобального екстремуму відповідно до поточного стану розгалужених мереж є практично недосяжним за допомогою класичних методів оптимізації. Це визначає гостру потребу в розробці та адаптації інтелектуальних евристичних методів, які здатні генерувати раціональні рішення за обмежений проміжок часу.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Наукові положення даної дисертаційної роботи розроблені в межах реалізації Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року, затвердженої розпорядженням Кабінету Міністрів України № 430-р. Дослідження сприяє виконанню стратегічних завдань із впровадження інновацій у транспортний процес та формування цілісних інформаційних систем, що дозволяє забезпечити ефективне обслуговування пасажирів у мережах МГПТ та посилити потенціал вітчизняних перевізників.

Мета та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення якості обслуговування пасажирів шляхом синхронізації розкладів руху міського громадського пасажирського транспорту на основі комплексного підходу, що інтегрує евристичні алгоритми та дискретно-подієве імітаційне моделювання.

Для досягнення поставленої мети визначено та розв'язано такі **задачі**:

- здійснити критичний аналіз існуючих наукових підходів до синхронізації розкладів МГПТ та обґрунтувати доцільність застосування евристичних методів для оптимізації пасажирських перевезень;
- сформулювати комплексну методику імітаційного моделювання системи МГПТ як інструментальну базу для верифікації та оцінки якості транспортного обслуговування при різних варіаціях розкладу;
- запропонувати методичний підхід до формування синхронізованих розкладів руху, адаптований до роботи в умовах динамічного та стохастичного характеру пасажирського попиту;
- виконати серію експериментальних досліджень з метою встановлення закономірностей впливу параметрів обраної евристики на ефективність процесу транспортного обслуговування пасажирів.

Об'єктом дослідження є процес транспортного обслуговування пасажирів у мережі міського громадського пасажирського транспорту в умовах стохастичного попиту на перевезення.

Предметом дослідження є методи та алгоритми синхронізації розкладів руху міського громадського пасажирського транспорту на основі евристичної оптимізації та імітаційного моделювання.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених задач застосовано комплекс загальнонаукових та спеціальних методів дослідження, що ґрунтується на фундаментальних засадах системного підходу. Зокрема, використано системний аналіз для декомпозиції структури процесу транспортного обслуговування, що дозволило виявити складну ієрархію взаємозв'язків між окремими підсистемами – від індивідуальної поведінки пасажирів до мережевої взаємодії маршрутів у вузлах пересадки. З метою врахування високого рівня невизначеності транспортного середовища застосовано методи теорії ймовірностей та математичної статистики. Проектування архітектури досліджуваної системи базується на принципах об'єктно-орієнтованого моделювання, що дало змогу представити транспортні одиниці, зупинки та пасажирів як автономні об'єкти із заданими властивостями та логікою взаємодії. Для аналізу динамічних аспектів функціонування мережі маршрутного транспорту та оцінки її ефективності використано імітаційне моделювання. Враховуючи комбінаторну складність та NP-складність задачі синхронізації розкладів руху, для пошуку субоптимальних рішень застосовано генетичні алгоритми. На завершальному етапі використано регресійний аналіз для встановлення кількісних математичних залежностей між часом очікування пасажирів та внутрішніми параметрами евристичного алгоритму.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

- *вперше* розроблено комплексний підхід до синхронізації розкладів руху міського громадського транспорту, який, на відміну від існуючих, дозволяє формувати субоптимальні розклади руху шляхом визначення раціональних меж налаштувань генетичного алгоритму за встановленими закономірностями впливу його параметрів на середній час очікування пасажирів;

- *удосконалено* методіку синхронізації розкладів руху міського громадського пасажирського транспорту, яка, на відміну від існуючих підходів, базується на інтеграції генетичних алгоритмів та дискретно-подієвого імітаційного

моделювання процесу обслуговування пасажирів у вузлах пересадки, що дозволило реалізувати механізм динамічної оцінки функції пристосованості особин популяції за показниками функціонування транспортної системи з урахуванням стохастичних затримок транспортних засобів та нерівномірність попиту на перевезення;

- *набув подальшого розвитку* підхід до імітаційного моделювання процесів транспортного обслуговування пасажирів міським громадським пасажирським транспортом, що полягає у розробленні та впровадженні модуля генерації нестационарного випадкового попиту; запропоноване рішення дозволяє відтворювати коливання пасажирських кореспонденцій у часі та просторі, що підвищує адекватність імітаційної моделі під час оцінювання ефективності синхронізації розкладів руху.

Практичне значення результатів дослідження полягає у розробці методики синхронізації розкладів руху на маршрутах мережі міського громадського пасажирського транспорту на основі генетичних алгоритмів, що дозволяє формувати субоптимальні розклади руху за критерієм мінімізації середнього часу очікування пасажирів у пересадочних вузлах.

Важливим перспективним аспектом розширення практичного значення дослідження є інтеграція розробленого алгоритму синхронізації, реалізованого у вигляді програмного коду мовою Python, безпосередньо до програмного комплексу макроскопічного транспортного моделювання та планування PTV Visum через архітектуру COM (Component Object Model).

Результати роботи використовуються у навчальному процесі Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» при підготовці бакалаврів і магістрів спеціальності 275 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)», а також при викладанні дисциплін «Управління автомобільними перевезеннями» і «Пасажирські перевезення», що підтверджується відповідним актом впровадження.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати, представлені в дисертаційній роботі, отримані автором особисто або за його безпосередньої участю під керівництвом наукового керівника. У наукових працях, опублікованих у

співавторстві (4 статті у фахових виданнях), здобувачеві належать основна ідея та безпосередня реалізація розрахунково-експериментальної частини.

Здобувачем особисто здійснено критичний аналіз існуючих наукових підходів до синхронізації розкладів руху в системах МГПТ, що дало змогу обґрунтувати вибір евристичних методів як найбільш ефективних інструментів для вирішення завдань за реальний час; удосконалено методологію імітаційного моделювання мереж МГПТ шляхом розробки та інтеграції спеціалізованого модуля генерації стохастичного пасажирського попиту; спроектовано та програмно реалізовано імітаційну модель функціонування системи пасажирських перевезень на автобусних маршрутах міста Верхньодніпровськ; проведено серію комп'ютерних експериментів із застосуванням класичних генетичних алгоритмів для оптимізації та синхронізації розкладів руху в реальній транспортній мережі міста; побудовано регресійні моделі, які дозволяють кількісно оцінити ступінь впливу керуючих параметрів генетичного алгоритму на ефективність процесу синхронізації розкладів.

Апробація результатів дисертації. Матеріали та результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та були схвалені на:

- 87-89-их науково-технічних конференціях і науково-методичних сесіях Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (Харків, 2023-2025 рр.);
- Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури» (Київ, 5-7.12.2023 р.);
- наукових семінарах кафедри управління на транспорті Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (Дніпро, 2022-2026 рр.);
- 28-й Міжнародній конференції Transport Means (Kaunas University of Technology, Каунас, Литва, 2-4.10.2024 р.);
- IV Міжнародній конференції докторантів Щецинського університету MKDUS 2.0 (Uniwersytet Szczeciński, Щецин, Польща, 19-21.06.2024 р.);

– XIII-ій Міжнародній науково-технічній інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту» (Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 15-17.04.2025 р.).

Дисертаційна робота в повному обсязі доповідалась на сумісному науковому семінарі випускових кафедр факультету транспортних систем Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (м. Харків, 2026 р.).

Публікації. По матеріалам дисертаційної роботи опубліковано 9 наукових праць, із них: 2 статті у періодичних фахових виданнях, що входять до переліку МОН України (включені до міжнародної наукометричної бази Scholar Google); 2 статті у виданнях, що включені до наукометричної бази SCOPUS; 5 тез доповідей у збірках праць за матеріалами наукових конференцій.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, бібліографії з 121 найменувань і 4 додатки. Загальний обсяг роботи складає 178 сторінок, обсяг основного тексту 140 сторінок, 21 рисунок, 22 таблиці.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ НАУКОВОЇ ЛІТЕРАТУРИ ТА ПРАКТИЧНИХ ПІДХОДІВ ЩОДО СИНХРОНІЗАЦІЇ РОЗКЛАДІВ МІСЬКОГО ГРОМАДСЬКОГО ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

Ефективна координація часу прибуття та відправлення МГПТ, відома як синхронізація розкладу, є важливою для безперебійного пересування пасажирів у міських та регіональних транспортних мережах. Ця практика має вирішальне значення для ефективного функціонування міст, агломерацій і країн, оскільки дозволяє пасажиром зручно пересідати між різними видами транспорту.

Концепція розкладів, орієнтованих на пересадку, вивчалася ще перед Другою світовою війною: у 1932 р. Нідерландська залізниця запровадила новаторський розклад, який оптимізував стикування у конкретному транспортному вузлі, забезпечуючи пасажиром наскрізні маршрути до місць призначення [1]. Однак використання цього підходу у практиці не сталося поширеним через географічні та бюджетні обмеження, що зазвичай вимагають компромісу між частотою відправлень і ресурсами, виділеними на надання послуг.

Процес планування роботи МГПТ можна розділити на чотири основні етапи [2]. Початковий крок передбачає проектування мережі маршрутів і зупинок. Згодом розробляється розклад, який охоплює такі аспекти, як час першого та останнього пересувань, а також частоту та швидкість надання послуг. Третій і четвертий етапи зосереджені на плануванні розкладів для транспортних засобів та водіїв відповідно. Планування пересадок можна інтегрувати між першим і другим кроками, при цьому кількість пересадочних вузлів у мережі МГПТ залежить від розміру та географічних характеристик регіону.

Синхронізація розкладу є обчислювальною проблемою, що класифікується як не поліноміальна складна (англ., Nonpolynomial Hard, NP-hard) [3]. Існує багато методів вирішення задач подібної складності, що зазвичай враховують досить специфічні обмеження реальних транспортних систем. Зокрема, автори дослідження [4] запропонували методи ідентифікації важливих транспортних

вузлів та визначення пріоритетів підмножин маршрутів у цих вузлах для синхронізації: зосередившись на цій критичній області, можна зменшити загальну складність проблеми синхронізації розкладів МГПТ.

Хоча пасажирів не завжди віддають перевагу пересадкам між транспортними засобами [11], мережі, що базуються на пересадках, часто можуть забезпечити більш ефективне та повне покриття обслуговуваної території, що призводить до підвищення задоволеності користувачів якістю отримуваних транспортних послуг [5]. Дослідження за даною тематикою, проведені в Барселоні (Іспанія), продемонстрували ефективність нової автобусної мережі, яка надає пріоритет частому сполученню та повсюдним пунктам пересадки. Ця мережа суттєво змінила попит пасажирів: відсоток пересадок зріс з 1,5% до 16% у звичайних мережах до 26% у новій мережі та, за прогнозами, зросте до 44% із розширенням ліній [6].

Важливо відзначити, що добре спланована та ефективна мережа МГПТ позитивно впливає на різні аспекти міського життя. Такі мережі можуть сприяти зменшенню забруднення [7], послабленню заторів на дорогах [8, 9] і просуванню більш екологічного виду транспорту. Крім того, пасажирів часто покладаються на всю систему МГПТ, а не на один маршрут, що підкреслює важливість ефективної синхронізації [10].

Щоб забезпечити задовільний досвід пасажирів, вкрай важливо мінімізувати час очікування між транспортними засобами під час здійснення пересадки. Дослідження, проведене в Окленді (Нова Зеландія), показало, що пасажирів з більшою ймовірністю погодяться на пересадки, якщо вони призведуть до значного скорочення часу та вартості пресування [12]. Однак важливо підтримувати надійність і уникати збоїв у запланованих коридорах, щоб запобігти розчаруванню пасажирів системою МГПТ.

Проблема синхронізації розкладу досліджується вже майже століття. Незважаючи на таку довгу історію та обширні дослідження, притаманна їй обчислювальна складність і багатогранність формулювань продовжують створювати значні проблеми. Це особливо вражає, враховуючи значний прогрес обчислювальної потужності за останні десятиліття. У той час як сучасні

комп'ютери пропонують безпрецедентні можливості, існуючі евристики для транспортної синхронізації часто не можуть повністю використовувати ці досягнення. Отже, з'являється постійний потік нових підходів, спрямованих на вирішення проблеми покращення якості послуг МГПТ шляхом синхронізації технологічних операцій.

1.1 Огляд існуючих підходів до синхронізації розкладів міського громадського пасажирського транспорту

Пошук літературних джерел проведено з використанням баз даних Scopus, Web of Science і Google Scholar, використовуючи наступні ключові слова:

- timetable synchronization (синхронізація розкладу),
- schedule synchronization (синхронізація розкладу),
- transfer coordination (координація пересадок),
- transfer optimization (оптимізація пересадок),
- public transport coordination (координація громадського транспорту).

Крім того, відповідні статті були виявлені шляхом вивчення посилань, цитованих у існуючих публікаціях. Пошук завершився в квітні 2024 року, охоплюючи широкий спектр досліджень, опублікованих у період з 1988 по 2023 рік. Слід зазначити, що більше половини включених документів (приблизно 60%) були опубліковані в 2013 році або пізніше, що відображає зростаючий інтерес до цієї галузі досліджень.

У той час як деякі попередні дослідження були зосереджені на конкретних цілях, таких як мінімізація витрат пасажирів на очікування або максимізація можливостей пересадок, сучасний етап досліджень характеризується переходом до оптимізації комплексних багатофакторних цільових функцій. Наприклад, сучасні дослідження часто присвячені знаходженню балансу між часом очікування пасажирів і експлуатаційними витратами або прагнуть мінімізувати час очікування пасажирів, час пересування та кількість необхідних транспортних засобів, а також забезпечити максимізацію безпересадкових сполучень.

Визначені дослідження були класифіковані на чотири окремі групи за основними методами оптимізації:

- Генетичні алгоритми (англ., Genetic Algorithms, GA): ця група, що характеризується найбільшою кількістю публікацій, використовує генетичні алгоритми для вирішення проблем синхронізації розкладу.
- Цілочисельне програмування (англ., Integer Programming, IP): ця група застосовує різні варіанти цілочисельного програмування для вирішення проблеми синхронізації.
- Симуляція відпалу (англ., Simulated Annealing, SA): менша група праць приймає моделювання відпалу як фундаментальний підхід до вирішення проблеми синхронізації.
- Інші методи: ця категорія охоплює різноманітні альтернативні методи, які використовуються в літературі.

Вибір конкретного евристичного методу суттєво впливає на якість та обчислювальну ефективність розв'язань задачі синхронізації. Різні евристики можуть давати різні рівні продуктивності та вимагати різного часу обчислення для досягнення збіжностей. Оптимальний евристичний вибір сильно залежить від характеристик системи МГПТ, включаючи такі фактори, як попит на пересування пасажирів, кількість маршрутів і транспортних засобів, щільність мережі зупиночних пунктів і стохастичний характер величини часу пересування.

1.1.1 Генетичні алгоритми

Генетичні алгоритми (ГА), натхненні теорією природного відбору, є класом еволюційних алгоритмів, вперше запропонованих Дж. Холландом [13]. Вони широко застосовуються для вирішення задач оптимізації та як метод попередньої обробки. Однією з значних переваг ГА є їх здатність ефективно вирішувати складні проблеми. Застосовуючи популяційний підхід, ГА можуть паралельно досліджувати простір пошуку, причому окремі особини (або хромосоми) діють як

незалежні агенти. Це підвищує ефективність алгоритму та зменшує ризик застрягти в локальних оптимумах.

Однак ГА також мають певні обмеження. Ретельний вибір параметрів має вирішальне значення для успіху алгоритму, оскільки невідповідний вибір може перешкодити конвергенції або призвести до безглузвих результатів [14]. Термінологія, яка використовується в ГА, запозичена з природної генетики, де розв'язок задачі називають хромосомою. Хромосоми складаються з генів, кожен з яких може мати певне значення, відоме як алель [15]. Набір хромосом формує популяцію, і ці особини можуть зазнавати генетичних операцій, таких як кросинговер (схрещування) і мутація. Кожна ітерація ГА називається поколінням. Спрощена візуалізація процесу ГА зображена на рисунку 1.1.

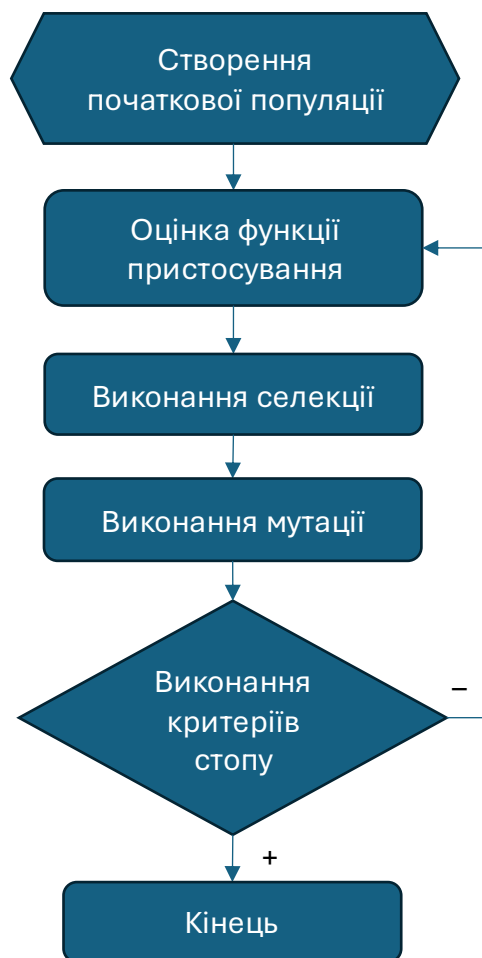


Рисунок 1.1 – Спрощена візуалізація процедури ГА

Генетичний алгоритм працює циклічно, ітеративно уточнюючи сукупність потенційних рішень. Як показано на рисунку 1.1, процес починається з випадкової генерації початкової популяції особин, кожний з яких закодований як хромосома, що представляє рішення проблеми оптимізації. Потім придатність кожної особини оцінюється на основі її продуктивності по відношенню до цільової функції. Ця оцінка є мірою придатності особи як рішення.

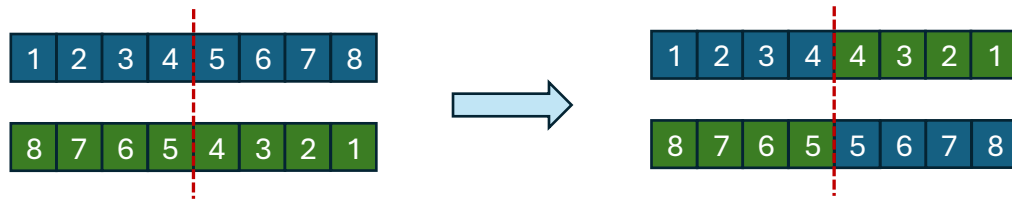
Після оцінки пристосування особин в популяції, ГА переходить до фази відбору, де з популяції вибираються особини для участі в наступному поколінні. Цей відбір зазвичай базується на показниках їхньої фізичної підготовки, при цьому ймовірніше буде обрано особини, які демонструють вищу фізичну форму. Загальні методи відбору включають:

- пропорційний вибір колеса рулетки: хромосоми з вищими значеннями пристосованості мають більшу ймовірність бути обраними [16],
- ранговий вибір: хромосоми ранжуються відповідно до їх значень придатності, а ймовірності відбору призначаються на основі їх рангу [17].

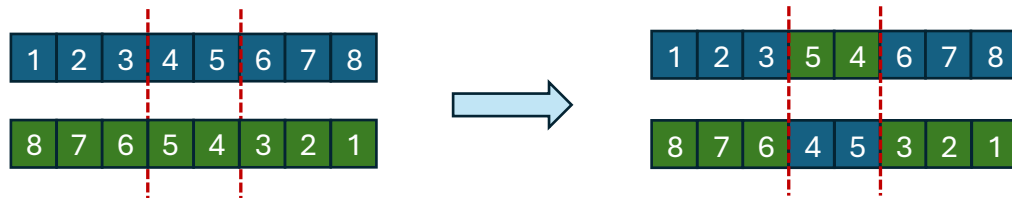
Вибрані особини піддаються кросинговеру, генетичній операції, яка передбачає обмін генетичним матеріалом між парами батьків для створення потомства. Цей процес спрямований на створення нових рішень шляхом поєднання бажаних характеристик батьків [18]. Три поширені методи кросинговеру включають (рисунок 1.2):

- одноточкове схрещування (кросинговер): кожна з хромосом розрізається в одній випадково вибраній точці, і отримані сегменти генетичного матеріалу обмінюється між двома батьками,
- двоточкове схрещування: кожна з хромосом розрізають у двох випадково вибраних точках, і отримані сегменти генетичного матеріалу обмінюється між двома батьками,
- випадкове схрещування: кількість і розташування точок кросинговеру визначаються випадковим чином для кожної пари батьків.

а) одноточкове схрещування:



б) двоточкове схрещування:



в) випадковий кросинговер:

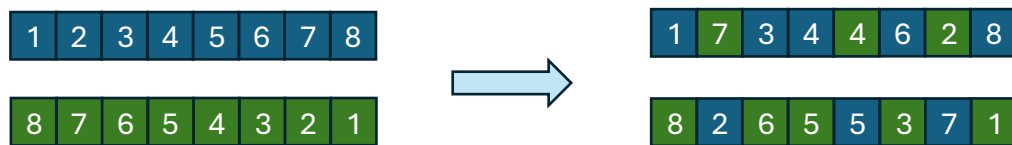


Рисунок 1.2 – Візуалізація методів кросинговеру

Генетичні алгоритми включають процес мутації для впровадження різноманітності в популяцію та запобігання передчасній конвергенції. Під час мутації генетичний матеріал нащадків випадково змінюється, що дозволяє виникати варіаціям. Мутації зазвичай включають одну або більше змін у хромосомах [19]. Проста мутація передбачає зміну одного гена в хромосомі. Інші методи мутації включають мутацію обміну та зворотну мутацію. При мутації обміну два гени вибираються випадковим чином, і їх місця міняються. У зворотній мутації дві позиції генів вибираються випадковим чином, і послідовність генів між цими позиціями змінюється [20]. Візуалізація цих методів мутації представлена на рисунку 1.3.

а) проста мутація:



б) мутація обміну:



в) зворотна мутація:



Рисунок 1.3 – Візуалізація методів мутації

ГА продовжує виконувати ці кроки, доки не буде виконано умову завершення.

Загальні критерії припинення включають:

- заздалегідь визначена кількість поколінь: алгоритм може бути зупинений після визначеної кількості ітерацій;
- відсутність покращення вартостей функції пристосування: якщо алгоритму не вдається знайти краще рішення протягом певної кількості поколінь, він може бути припинений;
- досягнення цільового значення функції пристосування: якщо знайдено рішення зі значенням функції пристосування, що дорівнює або перевищує заздалегідь визначене порогове значення, алгоритм може припинити роботу.

Успішне застосування ГА часто залежить від відповідного кодування генетичної інформації та ретельного вибору параметрів ГА. Ці фактори можуть суттєво вплинути на продуктивність алгоритму та його здатність до конвергенції.

1.1.2 Імітація відпалу

Метод моделювання (або імітації) відпалу (англ., Simulated Annealing, SA) черпає натхнення з металургійного процесу відпалу, коли нагріте тверде тіло повільно охолоджується для покращення його кристалічної структури. У цьому

процесі метал спочатку нагрівається до високої температури, що дозволяє його атомам вільно рухатися в розплавленому стані. Оскільки температура поступово знижується, рухи атомів стають обмеженими, що призводить до більш упорядкованої та стабільної структури [21].

Алгоритм SA вимагає специфікації кількох ключових параметрів:

- початкова температура, при якій алгоритм починає пошук,
- коефіцієнт зниження температури: швидкість, з якою температура знижується в процесі відпалу,
- діапазон сусідства: розмір досліджуваного простору пошуку при кожному значенні температури,
- максимальна кількість ітерацій, дозволена для кожного значення температури.

Алгоритм SA працює ітеративно, поступово вдосконалюючи пошук майже оптимального (наближеного до оптимального) рішення. Ключові кроки алгоритму включають:

1. Фаза ініціалізації з виконанням двох операцій:
 - встановлення початкової температури, яка контролює ймовірність прийняття субоптимальних рішень на ранніх етапах пошуку;
 - початкове рішення генерується випадковим чином або вибирається з попередньо визначеної початкової точки.
2. Етап оцінки, на якому виконується розрахунок функції витрат, що кількісно характеризує якість поточного рішення. Ця функція зазвичай призначена для вимірювання мети задачі оптимізації.
3. Пошук околиць, який включає збурення рішення: нове рішення генерується шляхом збурення поточного рішення в межах визначеної околиці. Це сусідство визначає діапазон потенційних ходів, які можна досліджувати на кожному кроці.
4. Етап прийняття, на якому вартість нового рішення порівнюється з вартістю поточного найкращого рішення. Застосовуються такі критерії прийняття:

– якщо нове рішення краще поточного найкращого, воно автоматично приймається як нове найкраще рішення;

– якщо нове рішення гірше поточного найкращого, воно може бути прийняте з імовірністю, визначеною розподілом Больцмана. Ця ймовірність залежить від температури та різниці у вартості між двома розчинами. Вища температура збільшує ймовірність прийняття неоптимальних рішень, дозволяючи алгоритму досліджувати ширший діапазон можливостей.

5. Фаза зниження температури, що використовує графік охолодження: температура поступово знижується відповідно до попередньо визначеного графіка охолодження (зазвичай передбачає множення поточної температури на коефіцієнт зниження температури). Зі зниженням температури ймовірність прийняття субоптимальних рішень також зменшується, зосереджуючи пошук на більш перспективних областях простору рішень.

6. Фаза завершення перевіряє критерії зупинки: алгоритм продовжує проходити кроки 2-5, доки не буде виконано умову завершення. Загальні критерії зупинки включають наступні умови завершення: досягнуто попередньо визначеної максимальної кількості ітерацій або температура досягає мінімального значення (так званого температурного порогу). Якщо алгоритму не вдається знайти краще рішення протягом певної кількості ітерацій, можна вважати, що він збігся.

Дотримуючись описаних кроків, алгоритм SA ефективно досліджує простір рішень, врівноважуючи дослідження та використання для пошуку майже оптимальних рішень.

1.1.3 Інші методи вирішення задачі синхронізації

Крім генетичних алгоритмів і симуляції відпалу, у науковій літературі описано кілька інших методів вирішення проблем синхронізації розкладу. До них належать система мурашиних колоній, оптимізація роїв частинок, метод функції дефіциту та пошук табу та інші.

Система мурашиних колоній (англ., Ant Colony System, ACS) – це евристичний алгоритм оптимізації, натхненний поведінкою мурашиних колоній. Мурахи відкладають феромони вздовж свого шляху, створюючи слід, який спрямовує наступних мурах до найбільш відвідуваних маршрутів [22, 23, 24]. Потужність феромонного сліду вказує на популярність певного шляху.

Оптимізація роїв частинок (англ., Particle Swarm Optimization, PSO) є популяційним метаевристичним алгоритмом, який імітує поведінку зграї птахів. Кожна частинка, що представляє потенційне рішення, рухається через простір пошуку з власною швидкістю та орієнтуючись на найкращий результат, знайдений нею та іншими частинками в рої [25, 26]. Цей колективний інтелект дозволяє PSO ефективно досліджувати простір рішень і переходити до перспективних регіонів в області можливих рішень.

Метод функції дефіциту (англ., Deficit Function, DF) – це математичний інструмент, який використовується для вимірювання дефіциту транспортних засобів на певному терміналі багатотермінальної системи МГПТ. Функція дефіциту збільшується з кожним відправленням і зменшується з кожним прибуттям, забезпечуючи оцінку поточного дефіциту у транспортних засобах в реальному часі. Аналізуючи значення функції дефіциту на різних терміналах, можна виявити дисбаланс у мережі МГПТ та скоригувати розклад [27].

Пошук табу (англ., Tabu Search) є метаевристичним алгоритмом, який розширює локальний пошук шляхом включення механізму на основі пам'яті, щоб уникнути повторного перегляду раніше досліджених рішень. Це запобігає потраплянню алгоритму в локальні оптимуми. Підтримуючи табу-список нещодавно відвіданих рішень, алгоритм може досліджувати нові регіони простору пошуку та потенційно знаходити кращі рішення [28, 29].

Оптимізатор сірого вовка (англ., Gray Wolf Optimizer, GWO) – це натхненний природою метаевристичний алгоритм, який імітує соціальну ієрархію та мисливську поведінку сірих вовків. Алгоритм використовує чотири типи вовків – альфа, бета, дельта й омега – для представлення різних рівнів лідерства. Процес полювання включає три основних етапи: пошук здобичі, оточення здобичі та напад

на здобич [30, 31]. Ці кроки реалізовані в алгоритмі GWO, щоб керувати пошуком оптимальних рішень.

1.2 Застосування методів синхронізації в системах міського громадського пасажирського транспорту

Для наведених у попередньому підрозділі підходів до синхронізації розкладів руху додатково виконано аналіз особливостей їх використання в реальних системах міського громадського пасажирського транспорту

1.2.1 Застосування генетичних алгоритмів

До 2013 року дослідницькі роботи в області синхронізації розкладу МГПТ зосереджувались на оптимізації однієї цільової функції, найчастіше зосередженої на мінімізації часу очікування пасажирів або загальних витрат, які зазвичай охоплювали як експлуатаційні витрати, так і час очікування пасажирів. Однак у останніх дослідженнях дедалі частіше застосовують багатокритеріальний підхід, враховуючи ширший діапазон цілей. Ці цілі включають витрат часу пасажирів, зменшення відхилень від розкладу, мінімізацію кількості необхідних транспортних засобів та максимізацію можливостей здійснення пересадок. Цей перехід до багатокритеріальної оптимізації відображає зростаюче визнання складної та взаємопов'язаної природи проблеми синхронізації розкладу.

З точки зору параметричного налаштування ГА, ймовірність кросинговеру, яка визначає частоту генетичної рекомбінації, зазвичай встановлюється між 50% і 60%. Найпоширенішим значенням ймовірності мутації є 10%, що забезпечує баланс між дослідженням нових областей простору пошуку та використанням вже знайдених ефективних рішень. У дослідженнях зазвичай обирають розмір популяції, який не перевищує 100 хромосом. Більші популяції можуть призвести до збільшення часу обчислень, що може нівелювати переваги більшої різноманітності.

Скорочений перелік проаналізованих підходів з відповідними цільовими функціями і параметрами ГА представлено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Підходи до синхронізації розкладу з використанням ГА

Автори (рік)	Цільова функція	Вид транспорту	Об'єкт	Регіон	Параметри ГА*
1	2	3	4	5	6
Chakroborty, Deb, Subrahmanyam (1995) [32]	Мінімізація часу пересадки та часу очікування	Автобуси	Вузол	-	Cr 95%, Mu 0,5%, Pop 350, Gen 200
Nachtigall і Voget (1996) [33]	Мінімізація часу очікування	Залізниця	Тестова мережа	-	-
Bielli, Caramia, Carotenuto (2002) [34]	Мінімізація кількості транспортних засобів	Автобуси	Мережа	Парма (Італія)	Cr 80%, Mu 10%
Shrivastava, Dhingra, Gundaliya (2002) [35]	Мінімізація загальних витрат	Автобуси	Вибрані лінії	Мумбаї (Індія)	Cr 80%, Mu 1%, Pop 420%
Shrivastava і Dhingra (2002) [36]	Мінімізація загальних витрат	Автобуси	Вибрані лінії	Мумбаї (Індія)	Cr 80%, Mu 1%, Pop 420
Ngamchai і Lovell (2003) [37]	Мінімізація загальних витрат	Автобуси	Тестова мережа	-	-
Cevallos і Zhao (2006) [38]	Мінімізація часу очікування	Автобуси	Мережа	Бровард (США)	Cr 50%, Mu 10%, Pop 20
Cevallos і Zhao (2006) [39]	Мінімізація часу очікування	Автобуси	Мережа	Бровард (США)	Cr 50%, Mu 10%, Pop 80, Gen 20
Shrivastava і O'Mahony (2016) [40]	Мінімізація загальних витрат	Автобуси	Вибрані лінії	Дублін (Ірландія)	Cr 95%, Mu 10%
Shafahi і Khani (2010) [41]	Мінімізація часу очікування	Автобуси	Мережа	Мешхед (Іран)	Cr 50%, Mut 50%, Pop 20

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6
Yu, Yang, Yao (2010) [42]	Мінімізація часу очікування	Автобуси	Мережа	Далянь (Китай)	-
Niu і Zhou (2013) [43]	Мінімізація часу очікування	Залізниця	Лінія	Гуанчжоу (Китай)	Cr 98%, Mu 15%, Pop 40
Wu, Liu, Sun, Li, Gao, Wang (2014) [44]	Мінімізація загальних витрат	Метро	Мережа	Пекін (Китай)	Cr 80%, Mu 10%, Pop 100
Aksu і Yılmaz (2014) [45]	Мінімізація часу очікування і кількості пропущених потягів	Залізниця	Мережа	Стамбул (Турція)	Cr 90%, Mu 8%, Pop 2000
Kang, Wu, Sun, Zhu, Gao (2015) [46]	Максимізація швидкості пересадки пасажирів	Залізниця	Мережа	Пекін (Китай)	-
Kang, Wu, Sun, Zhu, Wang (2015) [47]	Мінімізація часу пересування, мінімізація відхилень від розкладу	Залізниця	Мережа	Пекін (Китай)	-
Wu, Tang, Yu, Pan (2015) [48]	Мінімізація часу очікування	Автобуси	Тестова мережа	-	Cr 80%, Mu 5%, Pop 100, SR 20%
Wu, Yang, Tang, Yu (2016) [49]	Максимізація кількості пасажирів, мінімізація відхилень від часу відправлення	Автобуси	Мережа	Китай	-
Naumov (2018) [50]	Мінімізація часу очікування	Автобуси	Мережа	Бохня (Польща)	Cr 50%, Mu 10%, Pop 50, Gen 30, SR 20%
Shang, Li, Liu, Xian, Guo (2019) [51]	Мінімізація часу пересування	Метро	Мережа	Шеньчжень (Китай)	Cr 80%, Mu 15%, Pop 2000, SR 5%
Naumov (2020) [52]	Мінімізація часу очікування	Автобуси	Вузол	Краків (Польща)	Cr 50%, Mu 10%, Pop 100, Gen 20, SR 20%

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6
Cao, Ceder, Li, Zhang (2019) [53]	Максимізація кількості синхронізованих зустрічей	Залізниця	Мережа	Пекін (Китай)	-
Yin, Wu, Sun, Kang, Liu (2019) [4]	Максимізація ефективності соціальних послуг, мінімізація втрат доходів оператора	Залізниця	Мережа	Пекін (Китай)	-
Chen, Mao, Bai, Ho, Li (2019) [54]	Максимізація кількості пересувань	Залізниця	Мережа	Шеньчжень (Китай)	Pop 300, Gen 200
Wang, Li, Cao (2020) [55]	Мінімізація часу очікування на початковій станції, фактичного часу очікування на станції пересадки та суми штрафів для пасажирів	Залізниця	Вибрані лінії	Шеньян (Китай)	Cr 80%, Mu 15%, Pop 30
Cao, Tang, Gao (2020) [56]	Мінімізація часу очікування	Залізниця	Вузол	Пекін (Китай)	Cr 70%, Mu 0,5%
Guo, Wu, Sun, Yang, Jin, Wang (2020) [57]	Мінімізація часу очікування	Залізниця	Мережа	Пекін (Китай)	-
Ataeian, Solimanpur, Amiripour, Shankar (2021) [58]	Максимізація кількості одночасних прибуттів, мінімізація розміру парку	Автобуси	Мережа	Тегеран (Іран)	-
Naeini, Shafahi, Taherkhani (2022) [59]	Максимізація загального часу пересування, максимізація кількості пасажирів, які досягають пункту призначення	Залізниця	Вузол	Тегеран (Іран)	Cr 60%, Mu 35%, Pop 90

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6
Wang, Zhou, Yan (2022) [60]	Максимізація кількості пересадок, мінімізація загального часу пересування	Автономні автобуси	Вибрані лінії	Сінгапур	Cr 80%, Mu 10%, Pop 100

* Cr – частота кросинговерів, Mu – частота мутацій, Pop – кількість популяцій, Gen – кількість поколінь, SR – частка індивідумів, що виживає

Chakroborty, Deb і Subrahmanyam [32] використовували ГА, щоб мінімізувати сумарний час пересадок та час очікування в пункті відправлення для пасажирів. Nachtigall і Voged [30] порівняли ефективність ГА, ініціалізованих випадковими рішеннями, і тих, що ініціалізувалися за допомогою жадібного алгоритму. Дослідження показало, що останній підхід дав кращі результати з точки зору мінімізації часу очікування пасажирів.

Bielli, Caramia та Carotenuto [34] застосували ГА для оптимізації автобусної мережі в Пармі (Італія), досягнувши значного покращення (приблизно на 90%) показників багатокритеріальної цільової функції. Shrivastava із співавторами [35, 36] зосереджувалися на синхронізації автобусних і залізничних мереж, запровадивши штраф за час пересадки, що перевищує 10 хвилин. Ngamchai та Lovell [37] звернулися до проблеми мінімізації сумарних витрат на експлуатацію автопарку, часу перебування пасажира в автомобілі та часу очікування пасажира.

Shafahi та Khani [41] успішно синхронізували мережу автобусів у Мешхеді (Іран), продемонструвавши кращу продуктивність ГА порівняно з алгоритмом гілок і меж (англ., Branch and Bound, B&B). Yu, Yang і Yao [42] оптимізували мережу громадського транспорту в Даляні (Китай), що складається з трьох автобусних і однієї залізничної компаній, зберігаючи існуючий парк автобусів і поїздів. Wu зі співавторами [44] розглядав синхронізацію мережі пекінського метрополітену, зосереджуючись на мінімізації загального часу очікування пасажирів і забезпеченні рівномірного часу очікування на всіх станціях. Aksu and Yilmaz [45] сформулювали цільову функцію для мінімізації як часу очікування пасажирів, так і кількості пропущених пересадок.

Kang із співавторами [46] зосередилися на вирішенні проблеми синхронізації останнього поїзда в Пекіні (Китай) з метою мінімізації пересадок пасажирів (англ., Passenger Transfer Connection Headways, PTCN). PTCN визначається як різниця між часом відправлення останнього сполучного поїзда та часом прибуття пасажирів останнього підвізного поїзда. Їхні дослідження показали, що мінімізація PTCN може призвести до більш успішних пересадок порівняно з підходом, орієнтованим виключно на мінімізацію часу очікування пасажирів при незмінній тривалості часу очікування пересадки. У наступному дослідженні [47] автори змінили вектор уваги на мінімізацію часу пересування пасажирів (за винятком часу очікування пересадки), а також мінімізацію відхилень від фактичного розкладу в мережі пекінського метро. Порівнюючи імітацію відпалу, пошук табу, метод гілок і меж, а також генетичні алгоритми, було виявлено, що ГА перевершують інші алгоритми з точки зору знаходження найвищого значення цільової функції, досягаючи аналогічних або подібних результатів за значно менший час (6 секунд порівняно з діапазоном від 5 до 100 секунд для інших альтернативних методів).

Niu з колегами у статті [61] розглянули проблему мінімізації часу очікування пасажирів, одночасно враховуючи фактор скупченості в поїзді, щоб зменшити дискомфорт пасажирів і максимізувати прибуток оператора. Включивши цей фактор у цільову функцію, дослідники мали на меті збалансувати конкуруючі пріоритети задоволеності пасажирів та ефективності експлуатації.

Sao зі співавторами в публікації [53] розглянули проблему максимізації синхронізованих зустрічей на станціях метро в Пекіні, розробивши генетичний алгоритм оптимізації синхронізованого та координованого розкладу (англ., Synchronized and Coordinated Scheduling Optimization Genetic Algorithm, SCSO-GA). Даний алгоритм перевершив модель CPLEX як за швидкістю обчислень, так і за якістю отриманих рішень.

Yin та його колеги [4] підкреслили компроміс між збільшенням робочого часу транспорту та пов'язаними з цим витратами. Системи МПТ часто залежать від субсидій з боку державних або місцевих органів влади, тому повинні ретельно балансувати операційні витрати та рівень надаваних послуг. Науковці

сформулювали цільову функцію, яка відображала цей баланс, одночасно зменшуючи пропущені пересадки, зменшуючи середній час очікування та збільшуючи кількість пасажирів, що встигають на пересадку в останній за розкладом поїзд.

Chen із співавторами [54] використовували ГА для максимізації кількості доступних пар «пункт відправлення — пункт призначення» (англ., Origin-Destination pairs, OD pairs), використовуючи при цьому розклади останніх потягів та демонструючи ефективність запропонованого алгоритму щодо вирішення задачі оптимізації розкладів. Wang, Li і Cao [55] порівнювали ГА та оптимізатор сірого вовка для синхронізації розкладу, розглядаючи цільову функцію, яка включала мінімізацію часу очікування пасажирів на станціях відправлення, фактичного часу очікування пересадки та штраф за пропущені пересадки. Згідно з отриманими результатами експериментальних досліджень, ГА перевершив оптимізатор сірого вовка за якістю рішення, але вимагала втричі більше часу на обчислення.

Ataeian з колегами в дослідженні [58] застосували ГА для оптимізації мережі швидкісного автобусного транспорту в Тегерані (Іран), зосереджуючись на максимізації одночасного прибуття автобусів та мінімізації необхідної кількості транспортних засобів. Naeini, Shafahi та Taherkhani [59] запропонували стратегію синхронізації для мережі метро Тегерану, яка передбачала використання режиму пропуску зупинок, щоб скоротити час пересування та експлуатаційні витрати. Запропонована авторами цільова функція враховувала час очікування пасажирів на зупинках, час у дорозі в транспортному засобі та експлуатаційні витрати.

Wang, Zhou і Yan [60] застосували ГА для синхронізації розкладів автономних автобусів у Сінгапурі, інтегрувавши розподіл пасажиропотоків у процес оптимізації. Це дослідження продемонструвало потенціал ГА для оптимізації автономних транспортних засобів у системі МГПТ.

Зазначені у цьому підрозділі тематичні дослідження ілюструють різноманітні застосування ГА у синхронізації розкладів, демонструючи їх здатність вирішувати різноманітні проблеми та підвищувати ефективність і результативність мереж МГПТ.

1.2.2 Застосування методу імітації відпалу

У той час як генетичні алгоритми широко застосовуються у практиці для вирішення проблем синхронізації розкладів, метод імітації відпалу (SA) також став багатообіцяючим підходом. Хоча кількість досліджень із використанням SA при вирішенні задач синхронізації відносно обмежена порівняно з ГА. Отримані результати демонструють його потенціал для ефективного вирішення проблем синхронізації в мережах автобусів і метро.

Узагальнення досліджень, які використовували метод імітації відпалу для синхронізації розкладів у системах МГПТ, наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Підходи до синхронізації розкладу з використанням SA

Автори (рік)	Цільова функція	Вид транспорту	Об'єкт	Регіон
Zhao і Zeng (2008) [62]	Мінімізація загальних витрат	Автобуси	Мережа	-
Poorjafari, Yue, Holyoak (2014) [63]	Мінімізація часу очікування	-	Мережа	-
Guo, Sun, Wu, Jin, Zhou, Gao (2017) [64]	Максимізація кількості одночасних прибуттів	Метро	Мережа	Пекін (Китай)

Zhao and Zeng [62] представили гібридну модель, яка поєднує моделювання відпалу, жадібний алгоритм і пошук табу для оптимізації структури транспортної мережі та розкладу за умови фіксованої кількості рухомого складу. Такий підхід призвів до збільшення кількості пересувань без пересадок, зменшення кількості пересувань з однією пересадкою та скасування пересувань із двома пересадками, без залучення додаткових автобусів чи інших транспортних засобів.

Poorjafari, Yue і Holyoak [63] застосували SA для мінімізації загального часу очікування пасажирів у меншій мережі МГПТ, продемонструвавши ефективність алгоритму навіть у менш складних сценаріях.

Guo зі співавторами в дослідженні [64] зосередились на оптимізації розкладів під час міжпикових переходів у мережі метрополітену. Науковці застосували гібридний підхід, поєднуючи SA та метод оптимізації роїв частинок, щоб максимально збільшити можливості здійснення пересадок. В результаті запропонована ними оптимізаційна модель перевершила алгоритм меж і гілок та ГА з точки зору якості рішення та ефективності обчислень, досягнувши точного значення цільової функції, вимагаючи менше часу на розрахунки.

1.2.3 Застосування методів цілочисельного програмування

Моделі цілочисельного програмування (англ., Integer Programming, IP) широко використовуються для вирішення проблем синхронізації розкладу як в автобусних, так і в залізничних мережах МГПТ. Ці моделі були застосовані до різних масштабів, починаючи від окремих вузлів і вибраних ділянок у мережі до всієї мережі в цілому. В останні роки спостерігалось помітне збільшення використання методів IP для синхронізації розкладів руху. Ця тенденція відображає зростаюче визнання здатності IP ефективно справлятися зі складними обмеженнями та комбінаторною природою проблем синхронізації.

Узагальнення окремих досліджень, які використовували моделі цілочисельного програмування для синхронізації розкладів міського громадського пасажирського транспорту, наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Методи синхронізації розкладу на базі IP

Автори (рік)	Цільова функція	Тип моделі*	Вид транспорту	Об'єкт	Регіон
1	2	3	4	5	6
Ceder, Golany, Tal (2001) [65]	Максимізація кількості одночасних прибуттів	MIP	Автобуси	Мережа	-

Продовження таблиці 1.3

1	2	3	4	5	6
Eranksi (2004) [66]	Максимізація кількості одночасних прибуттів	MIP	Автобуси	Мережа	-
Vansteenwegen i van Oudheusden (2007) [67]	Мінімізація витрат часу на очікування пасажирів	LP	Залізниця	Мережа	Бельгія
Liebchen (2008) [68]	Мінімізація часу очікування	IP	Міська залізниця	Мережа	Берлін (Німеччина)
Wong, Yuen, Fung, Leung (2008) [69]	Мінімізація часу очікування	MIP	Залізниця	Мережа	Гонконг
Bruno, Improta, Sgalambro (2009) [70]	Мінімізація часу очікування та експлуатаційних витрат	MIP	Автобуси	Вузол	Італія
Nesheli i Ceder (2014) [71]	Мінімізація часу очікування та кількості пропущених автобусів	MIP	Автобуси	Вибрані маршрути	Окленд (Нова Зеландія)
Dou, Meng, Guo (2015) [72]	Мінімізація кількості пересадок	MILP	Автобуси, залізниця	Вибрані лінії	Сінгапур
Ibarra-Rojas, López-Irarragorri, Rios-Solis (2015) [73]	Максимізація кількості одночасних прибуттів	MILP	Автобуси	Мережа	Монтеррей (Мексика)
Guo, Wu, Sun, Liu, Gao (2016) [74]	Мінімізація витрат на пересадку	MILP	Залізниця	Мережа	Пекін (Китай)
Wu, Liu, Jin (2016) [75]	Мінімізація загальних витрат	MINLP	Залізниця	Мережа	-

Продовження таблиці 1.3

1	2	3	4	5	6
Gschwender, Jara-Díaz, Bravo (2016) [76]	Мінімізація загальних витрат	MILP	Швидкісні автобуси	Мережа	-
Dou i Guo (2017) [77]	Мінімізація кількості пересувань, що не відбулися	MILP	Залізниця	Мережа	Сінгапур
Liu, Ceder, Chowdhury (2017) [78]	Максимізація кількості одночасних прибуттів, мінімізація розміру парку	MIP+DF	Автобуси	Вибрані лінії	Окленд (Нова Зеландія)
Kang, Zhu, Sun, Wu, Gao, Hu (2019) [79]	Максимізація кількості пересувань	MILP	Залізниця	Мережа	Відень (Австрія)
Shang, Huang, Wu (2019) [80]	Баланс задоволеності пасажирів та ефективності перевезень	NLIP	Автобуси	Коридор	Пекін (Китай)
Wang, Wei, Zhang, Shi, Shang (2019) [81]	Мінімізація часу очікування, мінімізація кількості пропущених потягів	MILP	Залізниця	Мережа	Пекін (Китай)
Takamatsu i Taguchi (2020) [82]	Мінімізація витрат пасажирів	MIP	Автобуси, залізниця	Коридор	Тохоку (Японія)
Ke, Nie, Liebchen, Yuan, Wu (2020) [83]	Максимізація кількості пересувань	MIP	Залізниця, літаки	Лінія	Шицзячжуан Чжендінг (Китай)

Продовження таблиці 1.3

1	2	3	4	5	6
Lee, Jiang, Ceder, Dauwels, Su, Nielsen (2022) [84]	Мінімізація часу очікування та часу пересувань	MILP	Автобуси	Вибрані лінії	Копенгаген (Данія)

* LP – лінійне програмування (Linear Programming), MIP – змішане цілочисельне програмування (Mixed Integer Programming), MILP – змішане цілочисельне лінійне програмування (Mixed-Integer Linear Programming), NLIP – нелінійне цілочисельне програмування (Nonlinear Integer Programming), MINLP – змішане цілочисельне нелінійне програмування (Mixed-Integer Nonlinear Programming), DF – функція дефіциту (Deficit Function)

Ceder, Golany та Tal [65] представили підхід синхронізації, зосереджений на максимізації кількості одночасних прибуттів у пункти пересадки. Вони визначили одночасне прибуття як прибуття двох автобусів протягом певного часового інтервалу, який не перевищує встановленого часу очікування. Завдяки оптимізації одночасних прибуттів, цей підхід спрямований на підвищення ефективності пересадок та зменшення незручностей для пасажирів.

Eranki в дослідженні [66] розширив модель, запропоновану Ceder із колегами, додатково враховуючи час очікування пасажирів. Враховуючи вартість часу пересування (англ., Value Of Time, VOT), розроблена модель мала на меті зменшити загальні витрати пасажирів на очікування. VOT є загальноживаним показником для вираження відносної важливості часу очікування порівняно з часом у дорозі в транспортному засобі. Типове значення VOT становить 2,5, що вказує на еквівалентність однієї хвилини очікування 2,5 хвилинам пересування в транспорті [85]. Щоб врахувати збільшення незручності від тривалого очікування, модель можна модифікувати шляхом призначення вищого значення VOT для пересадок, що тривають понад 15 хвилин, або для пасажирів, які очікують у транспорті, що запізнюються за розкладом.

Bruno, Importa та Sgalambro [70] розробили модель для пересадочних вузлів в Італії, яка збалансувала експлуатаційні витрати з часом очікування пасажирів.

Такий підхід визнав важливість одночасної оптимізації як ефективності, так і задоволеності пасажирів у системах МПТТ.

Nesheli та Ceder застосували модель змішаного цілочисельного програмування МІР для оптимізації синхронізації розкладу в Окленді (Нова Зеландія), зосередившись на скороченні загального часу пересування пасажирів і максимізації прямих пересадок між обраними автобусними маршрутами [71]. Їхня модель включала дві стратегії: утримування, яке передбачає затримку відправлення автобусів для покращення сполучення, і пропуск зупинок/сегментів, що дозволяє автобусам обходити певні зупинки для дотримання розкладу. Впроваджуючи ці стратегії, вони досягли значного збільшення прямих пересадок (100-150%) та скорочення загального часу пересування пасажирів (2,14-4,1%) порівняно з базовим сценарієм.

Wu, Liu та Jin запропонували двоетапний підхід до синхронізації розкладу в публікації [75]. На етапі планування вони запровадили запаси контролю безпеки для забезпечення гнучкості графіків. Згодом вони запровадили інструменти поточного контролю для коригування розкладів у відповідь на збої в роботі. Їхня модель була спрямована на мінімізацію загальних витрат, включаючи витрати на експлуатацію транспортних засобів, витрати на очікування пасажирів і витрати, пов'язані з пропущеними або затриманими пересадками.

Guo зі співавторами застосували модель змішаного цілочисельного програмування (МІР) для координації розкладів поїздів у мережі міської залізниці Пекіна. Отримані результати продемонстрували перевагу МІР над генетичними алгоритмами, методом імітації відпалу та роєм часток (PSO) з точки зору обчислювальної ефективності при досягненні ідентичного значення цільової функції.

Kang із колегами звернулися до проблеми оптимізації останніх рейсів, запровадивши автобусне заміщення – стратегію, яка передбачає створення тимчасових автобусних перевезень і маршрутів для відновлення зв'язку в порушених залізничних мережах [79]. Їхня модель успішно збільшила кількість пасажирів, що встигають на пересадку, на 20%.

Shang, Huang і Wu оптимізували розклад автобусів у транспортному коридорі між мостом Guomaо та приміськими зонами в Пекіні [80]. Запропонований авторами підхід зосереджувався на балансі між задоволеністю пасажирів і ефективністю перевезень. Задоволеність пасажирів вимірювалася за допомогою комбінації показників часу очікування та комфорту в транспортному засобі, тоді як ефективність оцінювалася на основі коефіцієнта завантаження та місткості автобусів. Це дослідження підкреслює важливість урахування як досвіду пасажирів, так і експлуатаційних показників при оптимізації розкладів.

Takamatsu та Taguchi [82] зосередилися на оптимізації розкладу в регіонах з обмеженою зв'язністю транспортної мережі. Їхня модель мала на меті збільшити можливості пересадок у районі Тохоку в Японії, одночасно зводячи до мінімуму збої існуючих залізничних стикувань для здійснення пересадок. Запровадивши додаткові пересадки в протилежних напрямках, вони прагнули покращити доступність транспортної мережі.

Ke та його співавтори у дослідженні [83] розробили модель синхронізації для високошвидкісних поїздів і авіарейсів, надавши пріоритет максимальному збільшенню синхронізованих з'єднань і охоплення мережі при мінімізації штрафів за пропущену пересадку. Вони по-новому визначили синхронізацію як прибуття поїзда та авіарейсу в межах заданого часового інтервалу (вікна) у пересадочному вузлі. Застосувавши цю модель до Міжнародного аеропорту Шицзячжуан Чжендін (Китай), вони досягли значного збільшення кількості синхронізованих з'єднань на 24% і збільшення охоплення синхронізованих рейсів на 3%.

Наведені дослідження демонструють адаптивність методів синхронізації для вирішення конкретних проблем і оптимізації мереж МГПТ в різних контекстах. Пристосовуючи рішення до унікальних характеристик різних регіонів і видів транспорту, можна посилити мережеву зв'язність, покращити рівень якості обслуговування пасажирів, а також максимально підвищити загальну ефективність систем МГПТ.

1.2.4 Застосування інших підходів до синхронізації міського громадського пасажирського транспорту

Крім методів, розглянутих у попередніх підрозділах, науковці досліджували низку інших підходів до синхронізації розкладів руху, коротка характеристика яких представлена в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Методи синхронізації розкладу на базі інших методів

Автори (рік)	Цільова функція	Метод синхронізації	Вид транспорту	Об'єкт	Регіон
1	2	3	4	5	6
Klemt і Stemme (1988) [87]	Мінімізація часу очікування	Евристика	Метро	Мережа	Берлін (Німеччина)
Daduna і Voß (1995) [88]	Мінімізація часу очікування	Пошук табу	Автобуси	Мережа	-
Jansen, Pedersen, Nielsen (2002) [99]	Мінімізація часу очікування	Пошук табу	-	Мережа	Копенгаген (Данія)
Teodorović і Lučić (2005) [89]	Мінімізація часу очікування	Нечіткий алгоритм оптимізації колонії мурашок	-	Мережа	-
Schröder і Solchenbach (2006) [90]	Максимізація якості обслуговування	Квадратична задача напівпризначення	Автобуси, залізниця	Вибрані вузли	Кайзерслаутерн (Німеччина)
Wang і Shen (2007) [100]	Мінімізація розміру парку	Система мурашиних колоній	Електричні автобуси	Мережа	-
Liu, Shen, Wang, Yang (2007) [101]	Мінімізація часу очікування	Пошук табу	Автобуси	Вибрані вузли	-

Продовження таблиці 1.4

1	2	3	4	5	6
Guihaire i Hao (2008) [102]	Мінімізація кількості автобусів, максимізація можливостей для пересадок	Локальний пошук	Автобуси	-	Франція
Hadas i Ceder (2010) [92]	Мінімізація часу пересування	Динамічне програмування	Автобуси	Вибрані лінії	-
Chowdhury i Chien (2011) [91]	Мінімізація загальних витрат	Метод Пауелла	Автобуси, залізниця	Вибрані лінії	Нью-Джерсі (США)
Parbo, Nielsen, Prato (2014) [93]	Мінімізація часу очікування	Пошук табу	Автобуси	Мережа	Данія
Shen i Wang (2015) [94]	Максимізація кількості одночасних прибуттів	Метод оптимізації рою часток	Автобуси, метро	Вузол	Ухань (Китай)
Liu i Ceder (2017) [95]	Мінімізація кількості автобусів, мінімізація часу очікування	Функція дефіциту	Автобуси	Вибрані вузли	Окленд (Нова Зеландія)
Fonseca, van der Hurk, Roberti, Larsen (2018) [103]	Мінімізація загальних витрат	Метаевристика	Автобуси	Вибрані лінії	Копенгаген (Данія)
Gkiotsalitis i Maslekar (2018) [98]	Мінімізація часу очікування	Метод послідовного сходження на пагорб	Автобуси	Вибрані лінії	Стокгольм (Швеція)
Shang i Liu (2019) [96]	Мінімізація загальних коштів	Функція дефіциту	Автобуси	Вибрані лінії	Пекін (Китай)

Продовження таблиці 1.4

1	2	3	4	5	6
Shang, Liu, Huang, Guo (2019) [97]	Мінімізація кількості автобусів, мінімізація часу очікування	Функція дефіциту	Автобуси	Вибрані лінії	Пекін (Китай)
Abdolmaleki, Masoud, Yin (2020) [104]	Мінімізація часу очікування	Локальний пошук	Автобуси	Мережа	Мешхед (Іран)

Klemt і Stemme у публікації [87] розробили евристичний алгоритм для оптимізації мережі метрополітену U-Bahn у Західному Берліні, успішно синхронізуючи 1000 пересадочних сполучень протягом хвилини. Daduna і Voß [88] зосередилися на мінімізації часу очікування на зупинках для пересадок, створивши математичну модель, засновану на квадратичному напівпризначенні та застосувавши алгоритм імітації відпалу та різні версії пошуку табу для покращення рішень.

Teodorović і Lučić у праці [89] поєднали систему мурашиних колоній з нечіткою логікою, в результаті чого створили нечітку мурашину систему (англ., Fuzzy Ant System, FAS), щоб мінімізувати загальний час очікування на вузлах пересадки. У їхніх чисельних експериментах FAS постійно перевершувала стандартну систему мурашиних колоній, досягаючи значень цільової функції приблизно на 2% краще. Schröder і Solchenbach [90] використали метод квадратичного напівпризначення для підвищення якості обслуговування пасажирів за рахунок синхронізації розкладів міського громадського пасажирського транспорту в Кайзерслаутерні (Німеччина). Вони класифікували пересадки на основі часового розриву між прибуттям і відправленням транспортних засобів, оптимізувавши вибрану групу вузлів шляхом усунення критично коротких інтервалів пресадок.

Chowdhury і Chien [91] розглянули проблему мінімізації загальних витрат, пов'язаних із пересадкою з автобуса на залізничний транспорт в одному вузлі в

Нью-Джерсі (США). Їхня модель враховувала як витрати оператора (розмір автопарку та вартість пересування), так і витрати пасажирів (час очікування та час у транспортному засобі). Застосувавши метод Пауелла, вони продемонстрували потенціал для поширення цього підходу на більші мережі, одночасно збільшуючи пересадки та зменшуючи витрати.

Nadas і Ceder у дослідженні [92] застосували динамічне програмування для оптимізації синхронізації розкладу в Окленді (Нова Зеландія), зосередившись на мінімізації як часу пересадок, так і середнього часу очікування. Вони запровадили декілька оперативних тактичних рішень для досягнення своїх цілей, зокрема утримування транспортних засобів на терміналах або зупинках, коригування швидкості транспортних засобів, виконання операцій із пропуском зупинки та виконання скорочених рейсів або використання маршрутних скорочень. Скорочення маршруту виявилось особливо ефективним у ситуаціях запізнення або неявки транспортного засобу. Скорочення дозволяють автобусам працювати у режимі експрес-рейсів між певними зупинками, якщо всі пасажирів мають пункти призначення за маршрутом. Завдяки цій тактиці Nadas і Ceder досягли значного скорочення середнього часу очікування (приблизно на 10%) і значного збільшення прямих пересадок (сотні відсотків).

Parbo, Nielsen і Prato [93] застосували пошук табу для оптимізації великомасштабної мережі громадського транспорту в Данії, що охоплює 1794 лінії, 8373 маршрутів, понад 22 тис. зупинок, 1077 транспортних районів і 3,5 мільйона комірок у матриці кореспонденцій (англ., Origin-Destination Matrix, ODM). Зосередившись на коригуванні розкладу руху автобусів, вони змогли скоротити час очікування пасажирів більш ніж на 5%.

Shen і Wang [94] використовували метод оптимізації рою часток PSO для синхронізації фідерних автобусів з лініями метро в Ухані (Китай). Вони покращили класичний алгоритм PSO, впровадивши резервну бібліотеку для зберігання найкращих 10% частинок (альтернативних рішень). Ця стратегія дозволила алгоритму виходити зі стану стагнації та продовжити ефективне дослідження простору рішень.

Liu і Ceder [95], Shang і Liu [96] та Shang із співавторами [97] запропонували підхід на основі функції дефіциту для збалансування витрат оператора та часу очікування пасажирів на обраних лініях в Окленді (Нова Зеландія) та Пекіні (Китай). Функція дефіциту допомогла зменшити розмір автопарку та час очікування пасажирів.

Gkiotsalitis і Maslekar [98] запровадили метод послідовного сходження на погорб, щоб мінімізувати час очікування пасажирів, зберігаючи запланований рух. Їхній підхід продемонстрував свою ефективність для великомасштабних задач, забезпечивши перспективне рішення для оптимізації розкладів у складних транспортних мережах.

Ці тематичні дослідження ще більше висвітлюють різноманітність методів, доступних для синхронізації розкладу, і їх застосовність до різних конфігурацій мереж і цільових функцій.

1.3 Аналіз популярності застосування методів синхронізації розкладів руху

Дослідження синхронізації розкладів руху міського громадського пасажирського транспорту слід розглядати як складову багатоаспектного наукового напрямку, пов'язаного з формуванням розкладів, забезпеченням регулярності руху та скороченням часу очікування пасажирів. Методичні засади формування розкладів руху транспортних засобів при організації пасажирських перевезень розглянуто у працях вітчизняних учених Ю. О. Давідіча та Н. В. Давідіч [104, 105], у яких розклад руху визначається як базовий проєктувальний документ організації роботи МГПТ. Оцінюванню часу очікування пасажирів за різних способів організації руху транспортних засобів на маршруті присвячені дослідження П. Ф. Горбачова, О. В. Макаричева та В. М. Чижика [106], що створюють теоретичне підґрунтя для аналізу регулярності руху та якості транспортного обслуговування. Безпосередньо проблематика синхронізації розкладів руху МГПТ в транспортно-пересадочних вузлах розвинута у працях В. О. Вдовиченка [107-109], В. С. Наумова [110], Г. О. Самчук [111] та інших дослідників, де основна увага

приділяється узгодженню моментів прибуття транспортних засобів, мінімізації часу пересадки пасажирів та застосуванню оптимізаційних методів, зокрема генетичних алгоритмів. Водночас, існуючі моделі переважно базуються на усереднених значеннях обсягів пасажиропотоків. Це унеможливорює моделювання навантаження на пересадочні вузли та транспортну мережу в умовах, наближених до реальних, оскільки поза увагою залишаються випадкові коливання попиту на перевезення.

Як показує проведений огляд літератури, науковці використовували різноманітні методи для вирішення проблем синхронізації розкладу. Ці методи включають генетичні алгоритми, цілочисельне програмування, імітований відпал, метод функції дефіциту, локальний пошук, пошук табу, оптимізацію рою частинок, метод послідовного сходження на пагорб, метод Пауеллса, систему мурашиних колоній, нечітку систему мурашок і квадратичні проблеми напівпризначення. Крім того, дослідники часто модифікували існуючі методи або використовували комбінації декількох методик, щоб адаптувати рішення до конкретних завдань і оптимізувати результати синхронізації.

Ефективність евристичних методів для синхронізації розкладу за своєю суттю залежить від контексту – параметрів та розміру транспортної мережі. На їх продуктивність суттєво впливають конкретні характеристики вхідних даних, у тому числі моделі попиту пасажирів, топологія транспортної мережі та інші експлуатаційні фактори.

Безпосереднє порівняння обчислювальної ефективності різних евристик вимагає їх впровадження та подальшої оцінки в результаті проведення розрахункових експериментів. Це передбачає створення реалістичних сценаріїв, програмної реалізації евристик і виконання аналізу отриманих розкладів на основі попередньо визначених показників ефективності.

В межах порівняльного аналізу методів синхронізації розкладів міського громадського пасажирського транспорту, слід розглядати наступні ключові аспекти:

- частота використання методу: визначення найбільш часто використовуваних евристик у літературі, що дає змогу зрозуміти переважаючі тенденції досліджень і відносну популярність різних підходів,
- кількість цільових функцій: аналіз діапазону цільових функцій, розглянутих у різних дослідженнях, виявляє пріоритети та компроміси, що властиві проблемам синхронізації розкладу, а також здатність методу вирішувати задачу оптимізації для різних зацікавлених сторін,
- спрямованість на вид транспорту: вивчення конкретних видів транспорту (наприклад, автобусного, залізничного або змішаного), розглянутих у різних дослідженнях, допомагає зрозуміти застосовність та обмеження різних підходів у різних транспортних контекстах,
- масштаб застосування: дослідження масштабу розглянутих транспортних систем (наприклад, невеликі міські райони проти великих столичних мереж) дає розуміння масштабованості та універсальності різних методологій.

Проведений аналіз дозволяє стверджувати, що ГА є найбільш часто використовуваним методом для синхронізації розкладу (42% проаналізованих джерел). Цілочисельне програмування є другим за популярністю методом, використаним у 29% досліджень. Метод функції дефіциту, імітації відпалу і пошук табу використовувалися в меншій частині досліджень (по 9% на кожен із методів). Решта 17% досліджень присвячені вивченню інших методів.

Таблиця 1.5 дає уявлення про фокус дослідження. Більшість робіт (37 із 70, або 53%) були зосереджені на синхронізації розкладів руху автобусів. Розклади залізничного транспорту були предметом 10 робіт (14%), тоді як 13% досліджень були зосереджені на синхронізації розкладів першого та останнього поїздів. У п'яти роботах розглядалася синхронізація розкладів між автобусними та залізничними мережами на певних вузлах, а одна стаття була зосереджена на синхронізації пересадок між високошвидкісною залізницею та повітряним транспортом.

Таблиця 1.5 – Кількість проаналізованих робіт за методом і кількістю критеріїв цільової функції

Метод	Кількість елементів цільової функції				
	1	2	3	4	5
ГА	20	6	2	-	1
ІР	14	6	-	-	-
Функція дефіциту	-	3	-	-	-
Пошук табу	3	-	-	-	-
Інші	7	5	-	-	-

Аналіз застосування критеріїв у цільових функціях свідчить, що 43% робіт (20 із 47 досліджень) базуються на однокритеріальній оптимізації, де переважно використовуються генетичні алгоритми. Для розв'язання двокритеріальних задач синхронізації розкладів по шість робіт базувалися на використанні ГА та цілочисельного програмування. Водночас у дослідженнях, де цільові функції містили понад два критерії, генетичні алгоритми виявилися безальтернативним інструментом оптимізації. У двох роботах розглядалися три критерії, а одна робота включала п'ять критеріїв у свою цільову функцію.

У таблицях 1.6 і 1.7 узагальнені найбільш використовувані методи синхронізації різних типів мереж і розкладів МГПТ. Генетичні алгоритми були домінуючим вибором для синхронізації розкладів автобусів, залізниць і останніх чи перших поїздів, що застосовані у 29 із 60 робіт. Для синхронізації всієї мережі, вибраних ліній і вузлів ГА також були кращим методом, який використовувався в 28 із 61 статті. Зокрема, у дослідженнях автобусних мереж ГА застосовувалися у 15 із 29 проаналізованих джерел.

Як показано в таблиці 1.7, для синхронізації всієї мережі ГА були основним вибором у 19 із 29 досліджень. П'ять статей були зосереджені на вибраних лініях, а чотири – на синхронізації в конкретних транспортних вузлах. В одному дослідженні синхронізація була обмежена одним транспортним маршрутом.

Комплексний огляд літератури, проведений щодо методів синхронізації розкладу МГПТ, показує, що генетичні алгоритми стали найпоширенішим

підходом. ГА були успішно застосовані для синхронізації розкладів на різних рівнях, включаючи вузли, вибрані маршрути та цілі мережі. Крім того, ГА продемонстрували свою застосовність як до автобусних, так і до залізничних мереж, а також для сполучення між різними видами транспорту.

Таблиця 1.6 – Кількість проаналізованих робіт за типом мережі та способом вирішення

Вид транспорту	ГА	ІР	Функція дефіциту	Пошук табу	SA	Інші
Автобуси	15	8	3	2	1	7
Залізниця	12	7	-	-	-	-
Метро, міська залізниця	2	1	-	-	1	1
Автобуси, залізниця	-	3	-	-	-	3
Залізниця, повітряний транспорт	-	1	-	-	-	-

Таблиця 1.7 – Кількість проаналізованих робіт за об'єктом та способом вирішення

Об'єкт	ГА	ІР	Функція дефіциту	Пошук табу	SA	Інші
Мережа	19	12	-	2	3	5
Вибрані лінії	5	4	2	-	-	4
Вузол	4	1	-	-	-	1
Вибрані вузли	-	-	1	1	-	1
Маршрут	1	1	-	-	-	-
Коридор	-	1	-	-	-	-

З точки зору обчислювальної здатності, ГА переважно перевершують альтернативні методи, такі як цілочисельне програмування, метод меж і гілок, а також метод оптимізації роїв частинок, з точки зору значення цільової функції. Навіть якщо не досягнуто абсолютно оптимального рішення, ГА зазвичай

вимагають менше обчислювального часу, щоб знайти рішення, близькі до оптимальних.

Хоча не всі автори надали точні деталі щодо налаштувань параметрів ГА, найбільш поширені значення включають імовірність кросинговеру між 50% і 60% і імовірність мутації 10%. Розмір відібраної популяції зазвичай становить менше 100 хромосом.

На основі результатів цього огляду можна зробити наступні рекомендації для майбутніх досліджень і практики синхронізації розкладу:

- з огляду на доведену ефективність, ГА повинні залишатися головним інструментом досліджень і розробок при вирішенні задачі синхронізації розкладів МГПТ;
- проведення систематичних досліджень з оптимізації налаштувань параметрів ГА, таких як рівень кросинговеру та ймовірність мутації, для різних типів мереж цільових функцій;
- вивчення інтеграції ГА в системах управління в режимі реального часу для забезпечення динамічного коригування розкладів у відповідь на збої або зміну умов експлуатації.
- розроблення та застосовування у практиці транспортного обслуговування багатоцільових методів оптимізації для вирішення задач для критеріїв задоволеності пасажирів, операційної ефективності та стійкості мережі;
- проведення комплексних досліджень для порівняння ефективності різних методів синхронізації в різних контекстах і для визначення найбільш ефективних підходів у заданих умовах.

1.4 Висновки по першому розділу

1. Результати проведеного огляду існуючих підходів до синхронізації розкладів МГПТ свідчать про чітке зміщення фокусу досліджень, починаючи з 2013 року. Попередні дослідження в основному зосереджувалися на оптимізації окремих аспектів, таких як час очікування пасажирів або загальний час пересування. Проте

зростання кількості робіт, опублікованих після 2014 року, демонструє зростаюче посилення уваги до багатокритеріальної постановки задач оптимізації функціонування міського громадського пасажирського транспорту. Дослідники обґрунтовують необхідність збалансованого врахування низки цілей, серед яких мінімізація необхідної кількості транспортних засобів, підвищення рівня комфорту пасажирів через контроль заповнюваності салону, а також оптимізація умов здійснення пересадок. За таких умов розв'язання задачі синхронізації розкладів руху міського громадського пасажирського транспорту потребує використання методів оптимізації, які забезпечують формування раціональних управлінських рішень з урахуванням стохастичного характеру параметрів транспортного процесу.

2. Результати огляду літератури щодо застосування методів синхронізації в системах МГПТ свідчать про те, що ГА є універсальним і ефективним методом синхронізації розкладів. Вони продемонстрували свою здатність знаходити високоякісні рішення для різних типів мереж і цільових функцій. Незважаючи на те, що ГА не завжди досягають абсолютно оптимального рішення, вони часто потребують менше обчислювального часу порівняно з іншими методами. Водночас ГА має суттєву залежність його ефективності від точності параметричного налаштування, що зумовлює необхідність встановлення раціональних меж його основних параметрів для забезпечення прийнятної якості розв'язку задачі синхронізації розкладів руху МГПТ.

3. Значна частина наукових напрацювань ще не впроваджено до використання в реальних системах МГПТ. Хоча дослідження часто надають інформацію про більш ефективні рішення щодо розкладів МГПТ, їх впровадження в реальних системах може бути складним завданням. Це обумовлено наступними причинами:

- значна частина дослідників надає пріоритет демонстрації потенціалу запропонованого алгоритму чи методології, що більшим чином стосується спрощених моделей синхронізації та контрольованих середовищ, які не можуть повністю відображати складність реальних систем МГПТ.

- Ретельне тестування нових розкладів у реальних робочих середовищах має вирішальне значення для виявлення непередбачених викликів і вдосконалення

запропонованих рішень. Однак таке тестування може бути дорогим і трудомістким, що часто заважає переходу від дослідження до впровадження.

– Інтеграція рішень, заснованих на дослідженнях і ефективних в контрольованому середовищі, в існуючу систему МГПТ може бути ускладнена та може передбачати зміни значної інфраструктури, програмного забезпечення та операційних процедур.

– Системи МГПТ часто є великими за розміром і складними за структурою зі встановленими правилами та процедурами. Впровадження нових технологій або операційні зміни можуть зустріти опір з боку зацікавлених сторін, зокрема водіїв, диспетчерів і пасажирів.

– Впровадження нових підходів до синхронізації МГПТ може потребувати значних фінансових інвестицій. Забезпечення фінансування для таких ініціатив може бути складним завданням для багатьох міських громад через бюджетні обмеження.

Основні результати проведених досліджень в рамках цього розділу опубліковані в роботах [112-114].

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ МІСЬКОГО ГРОМАДСЬКОГО ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

Імітаційне моделювання стало незамінним інструментом у сучасному транспортному інжинірингу, особливо коли мова йде про планування та аналіз складних систем МГПТ. Сьогоднішні урбанізовані середовища характеризуються високим рівнем динаміки та невизначеності, що зумовлюється впливом численних зовнішніх факторів, які мають випадковий характер. Такі фактори, як погодні умови, транспортний потік, непередбачувані події, значно ускладнюють прогнозування поведінки транспортних систем та оцінку ефективності різних управлінських рішень.

Традиційні аналітичні моделі, хоча й мають свою цінність, часто виявляються недостатньо точними для адекватного опису реальних транспортних процесів. Їх обмеження полягають у тому, що вони зазвичай базуються на спрощених припущеннях щодо поведінки системи та не здатні врахувати всю складність взаємодій між різними елементами транспортної інфраструктури.

На відміну від аналітичних моделей, імітаційні моделі дозволяють створювати детальні віртуальні прототипи систем МГПТ, які здатні відтворювати реальні процеси з високою точністю. Завдяки використанню стохастичних елементів, імітаційні моделі можуть адекватно відображати вплив випадкових факторів на функціонування системи. Це дозволяє проводити експерименти в умовах, максимально наближених до реальних, та оцінювати ефективність різних сценаріїв розвитку системи МГПТ.

Ключові переваги імітаційного моделювання в контексті транспортного інжинірингу полягають у наступному:

- Гнучкість: імітаційні моделі легко адаптувати до змін у структурі транспортної системи та параметрах її функціонування.

- Деталізація: моделі дозволяють детально описувати всі компоненти транспортної системи, включаючи транспортні засоби, інфраструктуру, пасажирів та їхню поведінку.
- Візуалізація: імітаційні моделі надають можливість візуалізувати процеси, що відбуваються в транспортній системі, що полегшує розуміння її поведінки та прийняття обґрунтованих рішень.
- Прогнозування: за допомогою імітаційних моделей можна прогнозувати наслідки різних управлінських рішень та розробляти оптимальні стратегії розвитку транспортної системи.

Таким чином, імітаційне моделювання є потужним інструментом, який дозволяє інженерам і планувальникам транспорту приймати обґрунтовані рішення, спрямовані на підвищення ефективності та стійкості систем МГПТ. Використання імітаційного моделювання в транспортному інжинірингу є невід'ємною частиною сучасних підходів до планування та управління міським громадським пасажирським транспортом. Воно дозволяє враховувати складність і динамічність реальних систем МГПТ та розробляти ефективні стратегії їх розвитку.

2.1 Вибір інструментів для моделювання систем міського громадського пасажирського транспорту

На сьогодні до лідерів у сегменті ринку програмних продуктів для моделювання систем МГПТ належать продукти німецької фірми PTV, а також спеціалізований програмний комплекс Aimsun.

Одним з найбільш розповсюджених у європейських країнах інструментів імітаційного моделювання транспортних потоків є PTV Vision VISSIM. Даний інструмент дозволяє моделювати не тільки потоки автомобільного транспорту, але й рух повітряних і морських судів, а також пішохідні потоки в моделях міських транспортних мереж. Можливість виконання проєктів у режимі тривимірної анімації робить VISSIM основним інструментом, що використовується при узгодженні проєктів транспортних систем в органах місцевого самоврядування.

Використання середовища моделювання PTV Vision VISSIM можливе при вирішенні наступних задач:

- оцінка впливу типу перетину доріг на їх пропускну здатність; при цьому можна розглядати нерегульовані та регульовані перехрестя, коловий рух, залізничний переїзд, а також розв'язки на різних рівнях;
- проектування, тестування й оцінка впливу режиму роботи світлофорних об'єктів на характеристики транспортного потоку;
- оцінка ефективності заходів з підвищення ефективності функціонування систем МГПТ;
- аналіз системи управління дорожнім рухом на вулично-дорожній мережі, контроль за напрямками руху на окремих смугах, а також на всій проїзній частині дороги;
- аналіз можливості надання пріоритету міського громадського пасажирського транспорту, у тому числі надання пріоритету трамваям;
- аналіз впливу параметрів управління рухом на ситуацію в транспортній мережі міста (регуляція напливу транспорту, зміна відстані між вимушеними зупинками транспорту, організація одностороннього руху та окремих смуг для руху міського громадського пасажирського транспорту);
- аналіз пропускну здатності великих мереж МГПТ (у тому числі вулично-дорожньої мережі міста) при динамічному перерозподілі транспортних потоків (в такий спосіб обґрунтовується можливість створення перехоплюючих паркінгів);
- аналіз заходів щодо регулювання руху на залізничному транспорті та усунення затримок залізничного транспорту;
- детальна імітація поведінки для кожного учасника руху;
- моделювання зупинок транспорту загального користування та станцій метрополітену з можливістю врахування їх взаємного впливу;
- розрахунок техніко-експлуатаційних показників функціонування системи МГПТ, візуалізація інтенсивності завантаження транспортної мережі та ін.

Середовище розробки PTV VISUM являє собою гнучку систему для транспортного планування, розрахунку параметрів попиту пересування (оцінки елементів матриці кореспонденцій для транспорту загального користування й індивідуального транспорту), аналізу транспортної мережі, розрахунку собівартості послуг міського громадського пасажирського транспорту та прогнозування наслідків впровадження змін в існуючу транспортну систему. PTV VISUM використовується при транспортному плануванні й оптимізації систем МГПТ на рівні міста, області, регіону. PTV VISUM розроблений для мультимодального транспортного аналізу та дозволяє інтегрувати всіх учасників руху до єдиної математичної моделі системи МГПТ.

За допомогою моделей транспортних систем, створених у PTV VISUM, можливим є вирішення наступних задач:

- зберігання в рамках однієї моделі великої бази даних транспортних і соціально-економічних показників;
- розрахунок характеристик існуючих транспортних потоків;
- розрахунок транспортних потреб міст і регіонів;
- оцінка різних транспортних ситуацій і варіантів розвитку транспортної інфраструктури на підставі визначеної системи показників;
- оцінка функціонування транспортної мережі за допомогою визначеної системи показників;
- систематизація та наочне представлення даних щодо транспортної системи міста, регіону, країни;
- прогнозування транспортних потреб, характеристик пасажиропотоків, інтенсивності руху на ділянках мережі;
- техніко-економічне обґрунтування різних інвестиційних проєктів з розвитку транспортної інфраструктури регіону: будівництво і реконструкція автомобільних доріг, реорганізація системи МГПТ, будівництво великих промислових, торговельних, розважальних об'єктів на території регіону з точки зору транспортних проблем;
- оптимізація потоків індивідуального транспорту;

- оптимізація роботи міського громадського пасажирського транспорту: розрахунок обсягів перевезень за видами транспорту; оцінка собівартості послуг міського громадського пасажирського транспорту; розробка пропозицій щодо вдосконалення тарифної системи та їх обґрунтування; аналіз геометрії мережі МГПТ й оцінка її доступності; оптимізація інтервалів і розкладу руху; обґрунтування доцільності впровадження нових маршрутів і відмови від маршрутів існуючих;

- розробка комплексних стратегічних програм розвитку транспортної мережі, що враховують всі види транспорту.

Найбільшого поширення моделі систем МГПТ, створені за допомогою VISUM, набули у більшості країн Європейського Союзу: на підставі даних моделей обґрунтовується доцільність інвестицій у транспортну інфраструктуру міст і регіонів. Також в деяких регіонах (наприклад, в Іспанії та Португалії) популярним інструментом транспортного планування є пакет Aimsun.

Пакет імітаційного моделювання Aimsun являє собою повнофункціональний комплекс інструментів аналізу транспортних потоків і перевезень, які використовуються для планування, детального моделювання та дослідження попиту в сфері транспорту. Програмний продукт надає інтегровану платформу, що дозволяє виконувати як статичне, так і динамічне моделювання систем МГПТ.

Середовище моделювання Aimsun спроектовано таким чином, що його можна використовувати при обробці вхідних даних різних форматів: в середовищі можна імпортувати й у подальшому обробляти дані, що походять з різних геоінформаційних систем (ESRI, TeleAtlas, NAVTEQ та ін.), крім того, програма має можливість зчитувати графічну інформацію систем автоматичного проектування, а також растрові зображення. Система підтримує велику кількість форматів даних (EMME/2, CONTRAM, SATURN, TRANSYT-7F, TRANSYT/12, VS-PLUS та інші формати). З метою моделювання, планування чи візуалізації система Aimsun підтримує можливість завантаження інформації з технічних засобів моніторингу дорожнього руху та роботи МГПТ у базу даних.

Система Aimsun базується на відкритій архітектурі, що дозволяє впроваджувати довільну кількість модулів, створених як розробником (TSS), так і зовнішніми організаціями чи кінцевими користувачами. Користувач середовища має ті ж повні можливості програмного доступу до інструментів Aimsun і засобів їх адаптації, що і розробники системи.

Інструментарій Aimsun для мікро- та мезомодельовання базується на принципах імітаційного відтворення транспортних процесів. На мікрорівні моделюється динаміка руху кожного транспортного засобу в межах мережі з урахуванням деталізованих алгоритмів поведінки водіїв. При мезомодельованні автомобіль розглядається як окремий дискретний об'єкт, проте моделі його взаємодії спрощуються. Це дозволяє дещо знизити обчислювальну складність при незначній втраті деталізації, забезпечуючи водночас високу точність відтворення мережевих подій та логістичних процесів

Макроімітатор Aimsun є компонентом Aimsun, що дозволяє вирішувати завдання транспортного планування й аналізу запитів. Макроімітатор запроєктований і реалізований на підставі аналітичних моделей з практичним використанням чотирьохступеневої моделі транспортного планування. Основними функціями програми є: статичний розподіл (призначення) руху (орієнтований на одного або багатьох користувачів), аналіз запитів (імпорт і експорт матриць, маніпуляції з матрицями, аналіз місця розташування детекторів і корегування матриць), а також формування альтернативних шляхів об'їзду.

Модуль стратегічного планування Aimsun реалізує методологію чотирирівневого моделювання систем МПГТ у межах єдиного інтегрованого середовища. Він забезпечує рівноважний розподіл транспортних потоків, підтримує комплексний аналіз попиту на пересування, а також реалізує механізм конвергенції даних між макро- та мікрорівнями через обмін топологічними моделями мережі й параметрами транспортних потоків. Використання цього інструментарію дозволяє забезпечити методологічну цілісність при поєднанні засобів макро- та мікромодельовання.

Незважаючи на те, що існуючі на ринку програмні продукти для імітаційного моделювання транспортних процесів дозволяють вирішувати досить широке коло задач науково-практичного характеру, їх використання при проведенні наукових досліджень не є прийнятним у великій кількості випадків. Одним з найбільш істотних обмежень щодо використання VISUM або Aimsun є відсутність автоматичної генерації параметрів технологічних процесів і попиту на транспортні послуги. Це зумовлює високу обчислювальну трудомісткість, що обмежує можливість реалізації імітаційних сценаріїв із великою вибіркою повторних прогонів моделі.

Можливим вирішенням цієї проблеми є створення надбудов у відомих середовищах імітаційного моделювання систем МГПТ за допомогою інтегрованих інструментів розробки скриптів (в VISUM та Aimsun підтримується розробка макросів за допомогою мови програмування Python). Створення макросів передбачає використання в програмній моделі вбудованих класів VISUM або Aimsun. Такий підхід до організації імітаційного експерименту є занадто громіздким для більшості наукових задач: створювані екземпляри вбудованих класів містять велику кількість полів і методів, які не використовуються безпосередньо для вирішення наукової задачі; це призводить до непотрібного завантаження оперативної пам'яті комп'ютера і як наслідок – до суттєвого збільшення часу моделювання (при проведенні експерименту для складних імітаційних моделей систем МГПТ процес моделювання може тривати навіть кілька тижнів замість кількох годин).

2.2 Загальна структура бібліотеки класів для моделювання систем міського громадського пасажирського транспорту

Для моделювання процесів функціонування міських пасажирських систем при вирішенні наукових задач синхронізації розкладів розроблено спеціалізовану програмну бібліотеку класів. Реалізацію класів здійснено мовою програмування Python, що дозволяє забезпечити сумісність запропонованої бібліотеки з найбільш

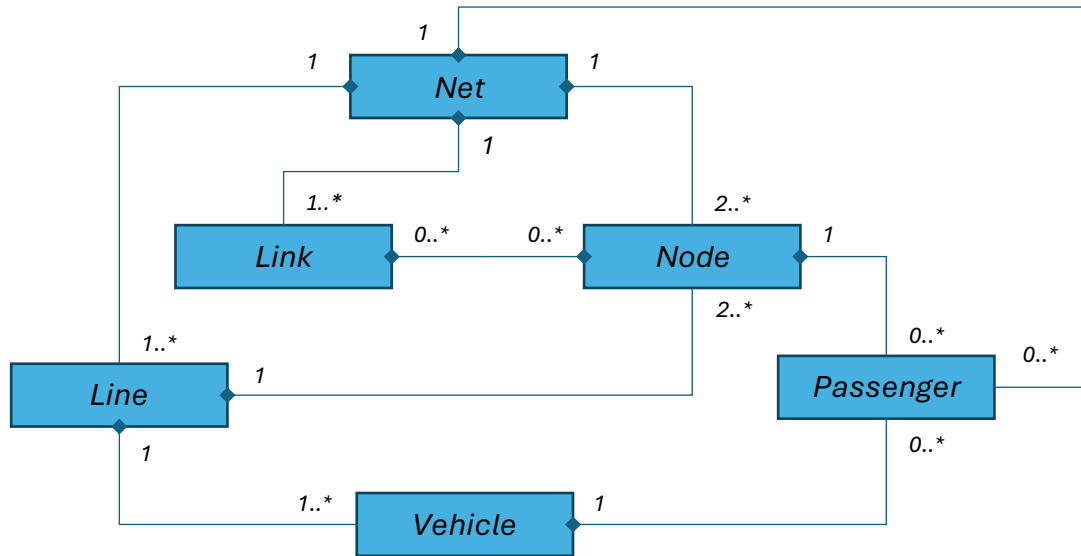
відомими середовищами для імітаційного моделювання транспортних систем – VISUM та Aimsun.

До базових класів, на підставі яких здійснюється моделювання процесів функціонування систем МПТГ, відносяться:

- *Net*: використовується для створення програмної моделі транспортної мережі як орієнтованого зваженого графу;
- *Node*: дозволяє змоделювати пункти транспортної мережі як елементи графу; пункти транспортної мережі можуть розглядатися в імітаційній моделі як програмна реалізація зупинок міського громадського пасажирського транспорту, транспортних пересадочних вузлів або перехресть вулично-дорожньої мережі;
- *Link*: є програмною реалізацією ланки графу, на підставі якого створюється модель транспортної мережі; ланка графу може використовуватись в імітаційній моделі для моделювання відрізків вулично-дорожньої мережі або перегонів маршрутів міського громадського пасажирського транспорту;
- *Line*: використовується для моделювання маршрутів МПТГ; задається для програмної моделі вулично-дорожньої мережі, реалізованої як екземпляр класу *Net*;
- *Vehicle*: дозволяє змоделювати транспортний засіб в рамках моделі транспортної мережі; використовується при розробці імітаційної моделі функціонування маршруту МПТГ;
- *Passenger*: є програмною реалізацією пасажиря як елементу транспортної системи; об'єкт типу *Passenger* є елементарною одиницею, що використовується для опису попиту на послуги пасажирського транспорту в рамках імітаційної моделі системи МПТГ.

Для моделювання параметрів, що описують вплив зовнішнього середовища на систему МПТГ, в рамках розробленої бібліотеки класів створено клас *Stochastic*, який дозволяє змоделювати випадкову величину із заданим законом розподілу та відповідними чисельними характеристиками.

У загальному вигляді UML-модель (англ. Unified Modeling Language - уніфікована мова моделювання) розробленої бібліотеки класів представлено на рисунку 2.1 [110].



$0, 1 \dots n$ – кількість посилок об'єкту типу А на об'єкт типу Б;
 $0^*, 1^* \dots n^*$ - нижня межа кількості посилок об'єкту типу А на об'єкт типу Б.

Рисунок 2.1 – UML-модель бібліотеки класів для імітаційного моделювання систем міського громадського пасажирського транспорту [110]

Основним класом, на підставі якого здійснюється реалізація імітаційної моделі системи МГПТ, є клас *Net*. Об'єкт даного класу створюється в моделі в одному екземплярі, на його підставі проводиться формування моделі транспортної мережі, визначення маршрутів руху міського громадського пасажирського транспорту, генерація попиту на пересування в рамках транспортної мережі та безпосередньо симуляція процесу функціонування системи МГПТ. Об'єкт класу *Net* для можливості запуску імітаційної моделі має містити принаймні два об'єкти класу *Node* (принаймні два транспортних вузли), щонайменше один об'єкт типу *Link* (принаймні одну ланку транспортної мережі), а також не менше одного об'єкту типу *Line* (на транспортній мережі має бути заданий принаймні один маршрут МГПТ), натомість допускається нульова кількість пасажирів в моделі попиту.

Крім опису програмної моделі попиту, об'єкти класу *Passenger* використовуються при створенні екземплярів класу *Node* (для генерації попиту для конкретного вузла транспортної мережі), а також об'єктів типу *Vehicle* (для опису

процесу транспортного обслуговування пасажирів конкретним транспортним засобом).

При створенні екземплярів класу *Line* для визначення траси маршруту використовується колекція об'єктів типу *Node* (маршрут має містити принаймні дві зупинки), для опису транспортних засобів, що обслуговують пасажирів на маршруті, використовуються об'єкти типу *Vehicle* (маршрут має обслуговувати принаймні один транспортний засіб).

2.3 Поля і методи класів розробленої об'єктної моделі

Реалізація імітаційних моделей систем МГПТ проводиться із використанням наведених класів, при цьому привласнюються конкретні вартості полям створюваних об'єктів та використовуються розроблені властивості і методи класів. Поля класів мають чисельний тип даних, або більш складні типи – колекції і словники. Методи класів використовуються для виконання процедур ініціалізації і безпосередньо моделювання процесів функціонування систем МГПТ. Методи-властивості класів використовуються для розрахунку чисельних характеристик об'єктів, що моделюються.

2.3.1 Поля і методи класу *Net*

Полями класу *Net*, що використовуються при моделюванні транспортної мережі, є наступні характеристики:

- *time* – чисельне поле, що містить поточний модельний час, хв.;
- *duration* – чисельне поле, що відображає тривалість процесу моделювання системи МГПТ, хв.;
- *nodes* – колекція об'єктів типу *Node*, що містить усі вершини граф-моделі мережі МГПТ;
- *links* – колекція елементів типу *Link*, що містить усі ланки граф-моделі мережі МГПТ;

- *lines* – колекція елементів типу *Line*, що містить усі маршрути МГПТ, задані на транспортній мережі;
- *demand* – колекція елементів типу *Passenger*, що відображає попит на переміщення в рамках транспортної мережі, який визначений протягом часу, заданого в полі *duration*;
- *total_wait_time* – чисельне поле, що відображає результат функціонування системи МГПТ, – сумарний час очікування пасажирями транспортних засобів на всіх зупинках маршрутної мережі;
- *sum_vehicles_time* – чисельне поле, що відображає результат функціонування системи МГПТ, – сумарний час обслуговування пасажирів усіма транспортними засобами, що задіяні на маршрутах МГПТ;
- *num_services_passengers* – чисельне поле, що відображає результат функціонування системи МГПТ, – загальну кількість пасажирів, що були обслужені на всіх маршрутах.

До основних методів класу *Net*, що забезпечують процес імітаційного моделювання системи МГПТ, відносяться:

- *contains_node* – дозволяє перевірити, чи в граф-моделі транспортної мережі існує вершина із заданим в аргументі функції кодом; функція повертає *True*, якщо вершина з заданим кодом існує, та повертає *False* у протилежному випадку;
- *get_node* – повертає об'єкт типу *Node*, що має код, заданий аргументом метода; якщо вершини з заданим кодом не існує в граф-моделі транспортної мережі, то функція повертає об'єкт *None*;
- *contains_link* – дозволяє перевірити, чи в граф-моделі транспортної мережі існує ланка із заданими як аргументи функції вихідною і вхідною вершинами; функція повертає *True*, якщо така ланка існує, та повертає *False* у протилежному випадку;
- *get_link* – повертає об'єкт типу *Link*, що має вихідну і вхідну вершини, вказані як аргументи метода; якщо вершини з заданим кодом не існує в граф-моделі транспортної мережі, то функція повертає об'єкт *None*;

– *add_link* – дозволяє додати до граф-моделі транспортної мережі нову ланку із заданими кодами вихідної і вхідної вершини; якщо граф-модель не містить однієї або обох вершин із кодами, наданими як аргументи функції, такі вершини створюються (додаються до графу); якщо ланка з вершини, що мають коди, надані у вхідних параметрах функції, вже існує, то змінюється вага відповідної ланки (вага ланки надається як третій аргумент функції, за замовчуванням дорівнює 0); четвертим аргументом функції є вартість логічна (за замовчуванням дорівнює False), яка вказує на те, чи має ланка напрямок руху; якщо ланка, що додається, не має керунку, то додатково створюється ланка із вихідною вершиною, наданою другим аргументом, та вхідною вершиною, наданою першим аргументом (вага такої додаткової ланки приймається рівною третьому аргументу функції);

– *generate* – метод, що дозволяє згенерувати випадкову граф-модель транспортної мережі із заданою кількістю вершин і заданою кількістю ланок (відповідно перший і другий аргумент методу); третім аргументом функції є випадкова величина ваги ланок графу, що є об'єктом типу *Stochastic*;

– *gen_lines* – метод, що дозволяє згенерувати на граф-моделі транспортної мережі маршрути руху МГПТ; кількість маршрутів надається першим аргументом методу; другим аргументом методу є випадкова величина кількості зупинок на маршруті, даний аргумент є об'єктом типу *Stochastic*;

– *gen_demand* – використовується для генерації попиту на переміщення пасажирів у рамках транспортної мережі; єдиним аргументом методу є тривалість часу моделювання, протягом якого генеруються нові пасажирів в системі;

– *simulate* – метод, що безпосередньо запускає процес симуляції системи МГПТ у наступній послідовності: проводиться генерація попиту, визначається розклад руху міського громадського пасажирського транспорту на маршрутах системи МГПТ, запускаються процедури обслуговування пасажирів на всіх маршрутах, розраховуються показники результату – сумарний час очікування пасажирами транспортних засобів, сумарний час роботи транспортних засобів, сумарна кількість обслужених пасажирів; аргументами методу є тривалість періоду

симуляції (за замовчуванням – 8 год.) та точність моделювання (за замовчуванням – 1 хв.);

- *print_characteristics* – дозволяє вивести на консоль геометричні характеристики системи МГПТ: перелік ланок транспортної мережі (вказуються коди вихідної і вхідної вершин та вага ланки) та маршрутів МГПТ (вказується траса та довжина маршруту).

2.3.2 Поля і методи класу *Node*

Вершина у граф-моделі транспортної мережі характеризується наступними полями:

- *code* – чисельна характеристика, що є кодом вершини в граф-моделі;
- *name* – текстове поле, що містить назву вершини (назва транспортного вузла або зупинки МГПТ);
- *out_links* – колекція об'єктів типу *Link*, що вказують на ланки, для яких вершина є вихідною;
- *in_links* – колекція об'єктів типу *Link*, що вказують на ланки, для яких вершина є вхідною;
- *s_interval* – поле типу *Stochastic*, що характеризує випадкову величину інтервалу підходу пасажирів до транспортного вузла (зупинки міського громадського пасажирського транспорту);
- *pass_out* – колекція елементів типу *Passenger*, що вказують на пасажирів у системі МГПТ, для яких вершина є початком пересування;
- *pass_in* – колекція елементів типу *Passenger*, що вказують на пасажирів у системі, для яких вершина є метою пересування.

Клас *Node* не містить методів, крім конструктора. Конструктор має два аргументи – код вершини (за замовчуванням дорівнює 0) та ім'я вершини (за замовчуванням задається пара «Node» і код вершини).

2.3.3 Поля і методи класу *Link*

Полями класу, що описує в граф-моделі ланку транспортної мережі, є наступні характеристики:

- *out_node* – поле типу *Node*, є посиланням на вихідну вершину ланки;
- *in_node* – поле типу *Node*, є посиланням на відповідну вхідну вершину ланки;
- *lines_number* – чисельна характеристика ланки транспортної мережі, що вказує на кількість смуг руху у відповідному напрямку;
- *weight* – чисельна характеристика ланки, що містить її вагу (в рамках даного класу в якості ваги ланки як елементу граф-моделі транспортної мережі розглядається довжина ланки), км;
- *capacity* – чисельна характеристика ланки транспортної мережі, що вказує на її пропускну здатність, од./год.;
- *load* – чисельна характеристика ланки транспортної мережі, що вказує на її поточне завантаження для заданого інтервалу часу, од./год.

Клас *Link* не має методів, крім конструктора. Конструктор класу має три аргументи – посилання на вихідну і вхідну вершини (є обов’язковими) та вагу ланки (за замовчуванням має вартість 0).

2.3.4 Поля і методи класу *Line*

Маршрут міського громадського пасажирського транспорту в запропонованій бібліотеці моделюється за допомогою класу *Line* на підставі наступних характеристик:

- *net* – є посиланням на об’єкт типу *Net* – транспортну мережу, в рамках якої функціонує маршрут МГПТ;
- *nodes* – колекція об’єктів типу *Node*, що містить перелік вершини граф-моделі транспортної мережі, через які проходить маршрут;

- *vehicles* – колекція елементів типу *Vehicle*, що дозволяють описати транспортні засоби, задіяні в обслуговуванні маршруту МГПТ;
- *nodes_sequence* – колекція елементів типу *Node*, що містить посилання на сукупність всіх зупинок маршруту, які обслуговуються транспортними засобами протягом періоду моделювання;
- *end_stop_duration* – чисельна характеристика маршруту, що містить тривалість простою транспортних засобів на кінцевій зупинці, хв.;
- *intermediate_stop_duration* – чисельна характеристика, що містить середню тривалість простою транспортних засобів на проміжних зупинках маршруту МГПТ, хв.;
- *velocity* – чисельна характеристика, що містить середню технічну швидкість транспортних засобів на маршруті, км/год.

Методами, що повертають властивості (розрахункові характеристики) маршруту МГПТ, є:

- *line_length* – чисельна властивість, що повертає значення довжини рейсу для маршруту МГПТ, км;
- *trace_string* – властивість класу, що повертає строку з кодами зупинок маршруту (трасу маршруту);
- *line_end_stops* – властивість класу, що повертає список з двох елементів типу *Node*, які є посиланнями на кінцеві зупинки маршруту;
- *turnaround_time* – чисельна властивість, що повертає значення часу обороту транспортних засобів на маршруті, год.;
- *turns_number* – чисельна властивість класу, що повертає кількість обертів, які можуть виконати транспортні засоби протягом заданого часу моделювання системи МГПТ;
- *nodes_reversed* – властивість класу, що повертає колекцію елементів типу *Node*, які містять посилання на зупинки маршруту, розташовані у зворотній послідовності (для зворотного напрямку руху).

Методами класу *Line*, що використовуються при реалізації процедур імітаційного моделювання процесів транспортного обслуговування, є:

- *define_sequence* – дозволяє визначити послідовність всіх зупинок, які об'їжджають транспортні засоби на маршруті протягом заданого періоду моделювання системи МГПТ;

- *define_schedule* – використовується з метою розрахунку розкладу обслуговування пасажирів для кожного транспортного засобу на маршруті протягом заданого періоду моделювання; розклад руху визначається на підставі припущення про рівний інтервал руху транспортних засобів з урахуванням відомих чисельних характеристик роботи на маршруті – середньої технічної швидкості та часу простою на проміжних і кінцевих зупинках;

- *add_vehicles* – дозволяє призначити для обслуговування маршруту сукупності транспортних засобів – колекції елементів типу *Vehicle*, що додаються до поля *vehicles* класу *Line*;

- *run* – метод, що безпосередньо запускає процес симуляції – процес обслуговування пасажирів кожним з транспортних засобів, що працюють на маршруті.

Конструктор класу *Line* містить два обов'язкові аргументи – посилання на мережу, в рамках якої задається маршрут, а також колекцію чисельних кодів вершин транспортної мережі, що відображають трасу маршруту МГПТ.

2.3.5 Поля і методи класу *Vehicle*

Транспортні засоби у розробленій бібліотеці пропонується описувати на підставі наступних характеристик:

- *line* – посилання на об'єкт типу *Line* – маршрут, що обслуговується транспортним засобом;

- *schedule* – є колекцією впорядкованих наборів, при цьому першим значенням є модельний час прибуття транспортного засобу на зупинку, а другим – посилання на об'єкт типу *Node*, що є моделлю відповідної зупинки маршруту;

- *last_move* – посилання на об'єкт типу *Node*, яке вказує на останню зупинку маршруту, що була обслужена транспортним засобом;

- *servicing* – є словником (об'єктом типу *dictionary*), для якого в якості ключів використовується колекція, що містить послідовність зупинок, обслугованим транспортним засобом на маршруті протягом періоду моделювання, а в якості значень – колекції всіх пасажирів, що обслуговуються на відповідних зупинках маршруту (знаходяться в салоні транспортного засобу – з урахуванням тих, що зайшли, але без урахування тих пасажирів, що вийшли на зупинці);

- *passengers* – колекція елементів типу *Passenger*, що є моделями всіх пасажирів, які знаходяться в салоні транспортного засобу;

- *serviced_passengers* – колекція елементів типу *Passenger*, що є моделями всіх пасажирів, обслугованих транспортним засобом;

- *capacity* – чисельна характеристика, що відображає номінальну місткість транспортного засобу, пас.

При моделюванні процесів обслуговування пасажирів в класі *Vehicle* використовуються наступні властивості:

- *occupancy* – повертає чисельне значення кількості пасажирів, що знаходяться в салоні транспортного засобу, пас.;

- *model_time* – повертає поточний модельний час (є значенням поля *time* об'єкту типу *Net*, що є моделлю транспортної мережі, в рамках якої заданий маршрут, що обслуговується даним транспортним засобом);

- *current_position* – повертає поточну позицію транспортного засобу на маршруті – порядковий номер зупинки в послідовності, що міститься в колекції *schedule*; якщо транспортний засіб ще не виїхав на маршрут, то властивість повертає значення -1 ;

- *moves_number* – повертає загальну кількість позицій у розкладі руху транспортного засобу на маршруті протягом періоду моделювання (визначається як розмір колекції *schedule*);

- *stops_left* – повертає колекцію елементів типу *Node*, що є моделями зупинок у розкладі руху транспортного засобу на маршруті, які залишилось обслужити протягом періоду моделювання.

Методами класу *Vehicle*, до дозволяють змоделювати процес обслуговування пасажирів, є:

- *set_passengers* – використовується для моделювання процесу висадки пасажирів на поточній зупинці: з колекції елементів *passengers*, що є моделлю для сукупності пасажирів у салоні автобуса, видаляються елементи, які відповідають пасажирам, що виходять на поточній зупинці; дані елементи додаються до колекції *serviced_passengers* (поля класу *Vehicle*), що містить посилання на всіх пасажирів, обслужених транспортним засобом;

- *get_passengers* – використовується для моделювання процесу посадки пасажирів до салону транспортного засобу на поточній зупинці: якщо пасажир, які знаходяться на зупинці в поточний момент часу, можуть доїхати до кінцевого пункту призначення, використовуючи даний транспортний засіб, то відповідні елементи типу *Passenger* додаються до колекції *passengers* та видаляються з колекції *pass_out* об'єкту типу *Node*, що є програмною моделлю маршрутної зупинки;

- *move* – використовується безпосередньо для запуску у поточний момент модельного часу процедури моделювання процесу обслуговування пасажирів даним транспортним засобом.

Конструктор класу *Vehicle* містить один необов'язковий параметр – номінальну пасажиромісткість транспортного засобу, який за замовчуванням дорівнює 40 пас.

2.3.6 Поля і методи класу *Passenger*

Полями класу *Passenger*, що дозволяють описати модель пасажира як елемента системи МГПТ, являються:

- *m_appearance* – чисельна характеристика, що відображає модельний час появи пасажира на зупинці, що є елементом транспортної мережі;

- *m_boarding* – чисельна характеристика, що відображає модельний час посадки пасажира до транспортного засобу;

- *m_disembarkation* – чисельна характеристика, що відображає модельний час висадки пасажирів з салону транспортного засобу;
- *origin_node* – посилання на об'єкт типу Node, що є моделлю зупинки, з якої починається пересування пасажирів;
- *destination_node* – посилання на об'єкт типу Node, що є моделлю кінцевої зупинки пересування пасажирів;
- *used_vehicle* – посилання на об'єкт типу Vehicle, що відображає в моделі системи транспортний засіб, яким скористався пасажир для пересування.

Властивостями класу, що використовуються в процесі моделювання, є наступні характеристики:

- *travel_time* – час пересування пасажирів (визначається як різниця часу висадки на кінцевій зупинці і часу появи пасажирів на початковій зупинці);
- *wait_time* – час очікування пасажирів на транспортний засіб (визначається як різниця часу посадки до транспортного засобу і часу появи пасажирів на початковій зупинці);
- *transportation_time* – час транспортування пасажирів (визначається як різниця часу висадки пасажирів з салону транспортного засобу і відповідного часу посадки до транспортного засобу).

Клас *Passenger* не має методів, крім конструктора. Конструктор класу не містить аргументів.

2.3.7 Поля і методи класу *Stochastic*

Клас *Stochastic* використовується для моделювання параметрів системи МГПТ як стохастичних величин і є програмною моделлю випадкової величини.

Полями класу є відповідні характеристики стохастичної величини:

- *law* – чисельна характеристика, що є кодом закону розподілу: код 0 – рівномірний розподіл, код 1 – нормальний розподіл, код 2 – експоненціальний розподіл;
- *location* – чисельна характеристика, що є параметром розташування;

- *scale* – чисельна характеристика, що є параметром масштабу;
- *shape* – чисельна характеристика, що є параметром форми.

Єдиним методом класу є метод `get_value`, який повертає реалізацію випадкової величини – чисельне значення, що згенеровано на підставі заданих параметрів.

Конструктор класу містить чотири необов'язкові аргументи, що задають відповідні характеристики випадкової величини: перший аргумент є кодом закону розподілу (за замовчуванням має значення 0, що відповідає рівномірному розподілу), другий аргумент задає параметр розташування, третій аргумент – параметр масштабу, четвертий аргумент – параметр форми (другий і четвертий аргументи за замовчуванням мають нульове значення, а третій за замовчуванням дорівнює 1).

2.4 Висновки по другому розділу

1. У межах розділу розроблено та реалізовано мовою Python спеціалізовану бібліотеку класів для моделювання функціонування систем МГПТ. Архітектура бібліотеки базується на графовій моделі мережі, що дозволяє формалізувати топологію транспортної інфраструктури через систему орієнтованих зважених зв'язків. Програмна реалізація об'єктів мережі забезпечує імітацію роботи зупинок, пересадочних вузлів та перехресть у вершинах графа, а також детальний опис маршрутних сегментів і перегонів через їхні ланки. Такий підхід створює необхідне підґрунтя для вирішення складних задач координації розкладів у мультимодальних мережах.

2. Функціональна логіка системи реалізується через взаємодію об'єктів, що описують маршрутну конфігурацію та динаміку рухомого складу. Процес перевезення моделюється як активність транспортних одиниць, які переміщуються в межах заданої мережі з дотриманням параметрів розкладу. Важливою складовою моделі є релевантне відображення пасажиропотоків через сукупність автономних об'єктів-пасажирів, що виступають елементарними одиницями транспортного

попиту. Такий підхід дозволяє проводити детальний моніторинг станів кожного індивідуального користувача та накопичувати статистичні дані щодо тривалості очікування у вузлових точках системи.

3. Для забезпечення адекватності моделювання в умовах стохастичної природи транспортних процесів у бібліотеку інтегровано інструментарій генерації випадкових величин. Це дозволяє відтворювати зовнішні збурення через задання відповідних законів розподілу ймовірностей для часових затримок та флуктуацій попиту. Завдяки комплексній взаємодії інтегрованих програмних об'єктів створено цілісне середовище для симуляції процесів пасажирського обслуговування, що створює підґрунтя для проведення верифікованих експериментів з оптимізації розкладів у наближеному до реальності цифровому середовищі.

Основні результати проведених досліджень в рамках цього розділу опубліковані в роботах [115-117].

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ СИНХРОНІЗАЦІЇ РОЗКЛАДІВ РУХУ МІСЬКОГО ГРОМАДСЬКОГО ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

Ефективна синхронізація розкладів міського громадського пасажирського транспорту має важливе значення для мінімізації часу очікування пасажирів і підвищення надійності системи в цілому. Щоб впровадити процедури синхронізації в рамках реальних систем МГПТ та розробити відповідні стратегії функціонування міського громадського пасажирського транспорту, потрібна математична модель, інтегрована в рамках модулю управління транспортною системою.

Прикладами реалізації моделей синхронізації маршрутів міського громадського пасажирського транспорту є мережеві моделі, що використовують генетичний алгоритм для досягнення глобальної синхронізації розкладу [50]. Однак обчислювальна складність такого комплексного підходу може бути значною, що унеможливує його практичне використання через занадто довгий час виконання розрахунків.

Таким чином, для синхронізації розкладів руху міського громадського пасажирського транспорту у вибраних транспортних вузлах виникає потреба у створенні додаткової, локалізованої парадигми оптимізації [52]. У цьому випадку математична модель для проблеми оптимізації буде спрощеною модифікованою версією мережевої моделі, призначеною для вирішення задачі синхронізації у певному пересадочному вузлі. Такий цільовий підхід забезпечує ефективну оптимізацію для вибраних вузлів, пропонуючи практичний інструмент для транспортних підприємств, які здійснюють координацію міського громадського пасажирського транспорту на маршрутах без обчислювального навантаження, необхідного для повного аналізу мережі.

В рамках даної дисертаційної роботи запропоновано розвиток локального і мережевого підходів до синхронізації розкладів МГПТ на базі генетичних алгоритмів: запропоновано авторські версії математичних моделей пересадочного

вузла та мережі МГПТ, формалізовано альтернативні рішення задачі синхронізації у вигляді хромосом, а також визначено критерій задачі оптимізації як функцію значень, представлених у хромосомах.

3.1 Синхронізація розкладів руху у транспортному вузлі

Задача синхронізації розкладів маршрутів міського громадського пасажирського транспорту у вибраному транспортному вузлі вирішується у випадку наявності у цілій мережі МГПТ ключового вузла, де здійснюється більшість пересадок. Подібні пересадочні вузли зазвичай є характерними для невеликих міст, вони розташовані переважно у центральній частині міст біля залізничних вокзалів або міжміських автобусних станцій. Виконання синхронізації у вибраному пересадочному вузлі для великих міст (де зазвичай мережа МГПТ містить велику кількість пересадочних вузлів) також є можливим, але при цьому не враховується системний ефект: синхронізація розкладів руху маршрутів МГПТ у транспортному вузлі забезпечує локальний ефект (наприклад, мінімізацію часу очікування для пасажирів вибраного пересадочного вузла), але при цьому ефективність для системи МГПТ в цілому може виявитися не найкращою, а навіть – може бути гіршою у порівнянні з варіантом до виконання синхронізації.

3.1.1 Модель пересадочного вузла

Пересадочний вузол (англ., transfer node) у мережі МГПТ є критично важливим поєднуючим елементом, що сприяє безперебійному обміну пасажирями між різними маршрутами транспортної системи. Концептуально його можна визначити як структурований набір, що охоплює дві основні підмножини:

- 1) підмножина маршрутів (автобусні, трамвайні, залізничні), які містять даний пересадочний вузол як призначену зупинку в межах своїх робочих розкладів; ця підмножина кількісно визначає доступність вузла та різноманітність варіантів

пересування, які він надає; параметри підмножини маршрутів можна додатково уточнити, враховуючи наступні характеристики:

- частота обслуговування: кількість відправлень за одиницю часу для кожного маршруту, що впливає на час очікування пасажирів і загальну ефективність функціонування транспортного вузла;

- пропускна здатність маршрутів МГПТ: максимально можливий пасажиропотік на маршруті МГПТ, що використовується в якості вихідних даних в алгоритмах управління навантаженням перегонів мережі МГПТ;

- доступність видів транспорту: перелік доступних видів транспорту, що відображає інтеграцію вузла в ширшу мережу;

2) підмножина пасажирів, які використовують вибраний транспортний вузол у процесі пересування міським громадським пасажирським транспортом: дана підмножина охоплює динамічну сукупність пасажирів, які використовують пересадочний вузол як пункт відправлення, призначення або пересадки. Вона характеризує фактичний попит на транспортне обслуговування в межах пересадочного вузла та описується такими параметрами:

- обсяг пасажирообміну – загальна кількість пасажирів, які здійснюють посадку, висадку або пересадку в межах пересадочного вузла протягом визначеного проміжку часу;

- частка пасажирів, які користуються пересадочним вузлом, у загальному обсязі перевезень пасажирів на відповідних маршрутах або в межах досліджуваної транспортної мережі;

- часові коливання кількості пасажирів протягом дня, тижня та року;

- демографічні характеристики пасажирів, що користуються пересадочним вузлом: вік, мета пересування, наявність спеціальних потреб, і інші характеристики;

- характеристики поведінки користувачів транспортних послуг: середній час пересування, вибрані маршрути пересадки, параметри здійснення пересадки (час очікування, час посадки), і інші параметри.

Остаточно, пересадочний вузол η у мережі МГПТ пропонується формально представити як набір, що складається з двох основних компонентів: множини маршрутів міського громадського пасажирського транспорту і моделі попиту на переміщення пасажирів. Це представлення відображає функцію вузла як точки модального обміну та пасажиропотоку

$$\eta = \langle \Lambda_\eta, D_\eta \rangle, \quad (3.1)$$

де $\Lambda_\eta = \{ \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N_\eta^{(A)}} \}$ являє собою множину усіх маршрутів МГПТ, які включають пересадочний вузол η як призначену зупинку в межах своїх робочих розкладів;

λ_i – окремий маршрут міського громадського пасажирського транспорту, $i = 1 \dots N_\eta^{(A)}$;

$N_\eta^{(A)}$ – загальна кількість маршрутів міського громадського пасажирського транспорту, що обслуговують пасажирів у транспортному вузлі η ;

D_η множину пасажирів пересадочного вузла η можна розбити на три підмножини

$$D_\eta = \{ D_\eta^{(o)}, D_\eta^{(d)}, D_\eta^{(t)} \}, \quad (3.2)$$

де $D_\eta^{(o)}$ – підмножина пасажирів, які починають своє пересування з вузла η ;

$D_\eta^{(d)}$ – підмножина пасажирів, які закінчують своє пересування у вузлі η ;

$D_\eta^{(t)}$ – підмножина пасажирів, що здійснюють пересадку між маршрутами міського громадського пасажирського транспорту у транспортному вузлі η .

Слід зауважити, що оскільки пасажирів з підмножини $D_\eta^{(d)}$ не витрачають у пересадочному вузлі час в очікуванні транспортного засобу, то розклади руху транспортних засобів у вузлі не будуть впливати на результат функціонування

системи МГПТ для цієї групи користувачів. Тому в рамках задачі синхронізації розкладів руху вистачить прийняти $\mathbf{D}_\eta = \{\mathbf{D}_\eta^{(o)}, \mathbf{D}_\eta^{(t)}\}$.

Маршрут міського громадського пасажирського транспорту λ у математичній моделі функціонування пересадочного вузла пропонується представити у вигляді набору наступних ключових характеристик

$$\lambda = \langle \psi_\lambda, \delta_\lambda, \tilde{p}_\lambda^{(in)}, \tilde{p}_\lambda^{(out)} \rangle, \lambda \in \Lambda_\eta, \quad (3.3)$$

де ψ_λ – часовий зсув (англ., time-shift) першого відправлення для першого транспортного засобу, що обслуговує маршрут λ , від базового часу, хв.; даний параметр визначає початкову точку графіка роботи маршруту міського громадського пасажирського транспорту;

δ_λ – інтервал часу між транспортними засобами (англ., headway time), що працюють на маршруті λ , хв.; даний параметр визначає частоту обслуговування та безпосередньо впливає на час очікування пасажирів у транспортному вузлі;

$\tilde{p}_\lambda^{(in)}$ – стохастична змінна, що описує кількість пасажирів, які починають пересування у пересадочному вузлі η і маршруті міського громадського пасажирського транспорту λ ; дана змінна фіксує попит на пересування маршрутом λ з боку пасажирів, які починають пересування у вузлі; параметри, що характеризують випадкову величину $\tilde{p}_\lambda^{(in)}$, можуть залежати від часу доби, дня тижня, а також зовнішніх факторів;

$\tilde{p}_\lambda^{(out)}$ – стохастична змінна, що описує кількість пасажирів, які пересідають з інших маршрутів МГПТ на маршрут λ у транспортному вузлі η ; дана змінна фіксує попит на перевезення маршрутом λ з боку пасажирів, які змінюють маршрут у пересадочному вузлі; параметри даної випадкової величини додатково залежать від розкладу інших маршрутів міського громадського пасажирського транспорту, що функціонують у транспортному вузлі.

Розклад руху маршруту міського громадського пасажирського транспорту λ визначається зсувом у часі ψ_λ і інтервалом між транспортними засобами δ_λ , тоді як

попит на перевезення пасажирів враховується у моделі за допомогою стохастичних змінних, що характеризують кількість пасажирів, які починають пересування у транспортному вузлі $\tilde{p}_\lambda^{(in)}$ і здійснюють у ньому пересадку $\tilde{p}_\lambda^{(out)}$. Зокрема, ψ_λ і δ_λ встановлюють часові рамки обслуговування на маршруті λ , а $\tilde{p}_\lambda^{(in)}$ і $\tilde{p}_\lambda^{(out)}$ моделюють коливання завантаження транспортного вузла η .

Розклад маршруту λ міського громадського пасажирського транспорту, виражений як послідовність моментів часу прибуття транспортних засобів у пересадочний вузол, можна змодельовати як упорядковану сукупність значень дискретного часу. За припущення рівномірного руху транспортних засобів на маршруті (незмінності значень параметру δ_λ), j -ий момент прибуття транспортного засобу до пересадочного вузла можна розрахувати наступним чином

$$t_j^{(\lambda)} = t_0 + \psi_\lambda + j \cdot \delta_\lambda, j = 1 \dots \omega_\lambda, \quad (3.4)$$

де t_0 – момент часу, коли система МГПТ починає роботу, або базовий час запуску системи, хв.;

ω_λ – загальна кількість прибуттів транспортних засобів, що обслуговують маршрут λ , протягом розглянутого періоду часу.

Кількість прибуттів транспортних засобів ω_λ визначається тривалістю розглянутого періоду часу й інтервалом між транспортними засобами

$$\omega_\lambda = \left\lfloor \frac{T_M}{\delta_\lambda} \right\rfloor, \quad (3.5)$$

де T_M – тривалість періоду моделювання, хв.; даний параметр може представляти тривалість пікового періоду, що охоплює інтервали високого попиту у системі МГПТ, за припущення, що робочі параметри маршрутів залишаються незмінними протягом пікового періоду.

$[x]$ – оператор округлення до найближчого меншого цілого числа; застосування даної функції у формулі (3.5) забезпечує дотримання умови цілочисельності для змінної ω_λ .

Кожен пасажир π як елемент моделі попиту на перевезення пасажирів D_η , пов'язаний з вузлом пересадки η , може бути представлений набором наступних ключових атрибутів

$$\pi = \langle t_\pi^{(ap)}, t_\pi^{(b)}, \lambda_\pi, \beta_\pi \rangle, \pi \in D_\eta, \quad (3.6)$$

де $t_\pi^{(ap)}$ – момент часу, коли пасажир π прибуває до пересадочного вузла η , хв.; даний параметр характеризує час надходження заявки на транспортне обслуговування;

$t_\pi^{(b)}$ – момент часу, коли пасажир π сідає в транспортний засіб запланованого маршруту міського громадського пасажирського транспорту λ_π , хв.; даний параметр характеризує фактичний час початку обслуговування заявки (під заявкою розуміється сукупність вимог до системи МГПТ щодо пересування пасажирів π до певного пункту призначення);

λ_π – посилання (англ., reference) на об'єкт маршруту МГПТ, послугами якої пасажир π має намір скористатися у пересадочному вузлі;

β_π – логічна змінна, що вказує, чи пасажир π здійснює пересадку у вузлі: у випадку, коли $\beta_\pi = True$, пасажир π у даному вузлі пересідає з одного маршруту на інший, якщо $\beta_\pi = False$, то пересування пасажирів π починається у пересадочному вузлі.

3.1.2 Формалізація проблеми синхронізації у пересадочному вузлі

Синхронізація розкладів міського громадського пасажирського транспорту у пересадочному вузлі є комплексною оптимізаційною задачею, спрямованою на підвищення ефективності процесів обслуговування пасажирів. Для ефективного

вирішення цієї проблеми розглядається набір ключових вхідних змінних і параметрів обслуговуючої системи, що впливають на результат функціонування транспортного вузла. Відповідними кількісними показниками є:

1) характеристики топології мережі громадського транспорту та характеристики маршрутів:

- кількість маршрутів міського громадського пасажирського транспорту $N_{\eta}^{(A)}$ та їх маршрути;
- топологія мережі, що включає координати розташування пересадочних вузлів та маршрутів, що мають суміжні перегони з пересадочними вузлами;
- частота обслуговування на кожному маршруті, яка безпосередньо обумовлює потенціальні можливості процедури синхронізації;
- тип транспортних засобів, що працюють на кожному маршруті (автобус, трамвай, потяг тощо).

2) параметри транспортних засобів, що використовуються на маршрутах МГПТ:

- кількість транспортних засобів, що працюють на кожному з маршрутів МГПТ;
- місткість транспортних засобів; даний параметр може впливати на час очікування пасажирів у транспортному вузлі (у випадку, коли транспортний засіб заповнений і пасажир через це не може скористатися послугою даного маршруту МГПТ);

3) параметри розкладу руху транспортних засобів на маршрутах міського громадського пасажирського транспорту:

- параметри часового зсуву, що дозволяють коригування запланованого часу відправлення або прибуття транспортних засобів на маршрутах МГПТ, що обслуговують пересадочний вузол: часові зсуви ψ_{λ} , застосовані до початку обслуговування пасажирів на маршруті λ , та часові зсуви, застосовані до прибуття або відправлення транспортних засобів на зупинках маршруту;

– ритм обслуговування на маршруті міського громадського пасажирського транспорту – сталий інтервал δ_λ між послідовними відправленнями транспортних засобів на маршруті λ ;

– час перебування транспортних засобів у пересадочному вузлі (за розкладом або фактичний);

4) параметри попиту на пересування пасажирів:

– матриця кореспонденцій, що є основною кількісною характеристикою попиту на перевезення в системі МГПТ; для вибраного пересадочного вузла при цьому розглядаються відповідні рядок матриці кореспонденцій (елементами якого є математичні сподівання кількості пасажирів, що пересуваються з даного вузла до інших зупинок маршрутної мережі) та стовпець матриці кореспонденцій (елементи якого є очікуваною кількістю пасажирів, що прибувають до даного вузла з інших зупинок системи МГПТ);

– інтенсивність прибуття пасажирів у пересадочний вузол (вхідна) та відправлення пасажирів з пересадочного вузла (вихідна); на підставі матриці кореспонденцій, очікуване значення вхідної інтенсивності попиту у транспортному вузлі оцінюється як сума елементів відповідного стовпця, а значення вихідної інтенсивності – як сума елементів відповідного рядка, що представляє транспортний вузол.

В рамках запропонованої моделі функціонування пересадочного вузла, у базовому сценарії, що забезпечує мінімальне втручання у функціонування існуючої системи МГПТ, синхронізації можна досягти шляхом коригування зміщення часу початку обслуговування для кожного маршруту. Ці зсуви для сукупності маршрутів пересадочного вузла η зручно представити у вигляді вектору цілочисельних значень

$$\Psi_\eta = \langle \psi_1, \psi_2, \dots, \psi_{N_\eta} \rangle, \quad (3.7)$$

де ψ_i – часовий зсув початку обслуговування для i -го маршруту міського громадського пасажирського транспорту, що містить зупинку у транспортному вузлі η , $i = 1 \dots N_\eta^{(A)}$.

Основним технологічним параметром, що відображає ефективність синхронізації маршрутів МГПТ у пересадочному вузлі η , є загальний час очікування $T_\eta^{(w)}$ пасажирів у даному транспортному вузлі. На підставі цього показника, цільову функцію задачі синхронізації розкладів руху у транспортному вузлі можна виразити як мінімізацію загального часу очікування

$$T_\eta^{(w)} = f(\Psi_\eta) = \sum_{\pi \in D_\eta} t_\pi^{(w)} \rightarrow \min, \quad (3.8)$$

де $t_\pi^{(w)}$ – час очікування пасажирів π у пересадочному вузлі η , хв.

Проблема синхронізації розкладів руху зазвичай деталізується додатковими обмеженнями, до яких належить віднести передусім наступні параметри задачі синхронізації у вибраному транспортному вузлі:

- верхня межа допустимих часових зсувів у розкладі руху, встановлення якої дозволяє уникнути зриву існуючих розкладів;
- нижня межа допустимих значень інтервалів руху між транспортними засобами, встановлення якої обумовлене вимогами забезпечення безпеки руху та недопущення надмірної концентрації рухомого складу на маршруті;
- обмеження місткості транспортних засобів – значення нижньої та верхньої меж інтервалу, які визначаються наявним парком рухомого складу, що використовується при обслуговуванні пасажирів.

3.1.3 Генетичний алгоритм для вирішення проблеми синхронізації у пересадочному вузлі

Враховуючи аналітичну складність представленої проблеми синхронізації маршрутів міського громадського пасажирського транспорту у пересадочному

вузлі, використання евристичних методів (зокрема – генетичних алгоритмів) є інструментом для отримання практичних рішень. Ефективність ГА при вирішенні задачі синхронізації виникає з їхньої здатності обробляти складні стохастичні моделі (до яких, безумовно, належить представлена модель функціонування пересадочного вузла) шляхом ітеративного вдосконалення потенційних рішень. Для ефективного використання ГА необхідно сформулювати наступні ключові елементи евристики:

1) представлення альтернативних рішень у вигляді хромосоми, яка забезпечує кодування вхідних параметрів оптимізаційної моделі та робить можливим застосування генетичних операторів;

2) визначення способу оцінки функції пристосування, що дозволяє розрахувати бажану ефективність процесу синхронізації та служить в якості метрики для оцінки альтернативних рішень проблеми синхронізації.

3.1.3.1 Репрезентація альтернативних рішень

У рамках генетичного алгоритму хромосома використовується як контейнер для набору незалежних змінних в оптимізаційній задачі, по суті представляючи собою потенційне її вирішення. У конкретному контексті проблеми синхронізації у транспортному вузлі вектор Ψ_{η} , який відображає вхідні змінні, якими є зсуви у часі для розкладів маршрутів міського громадського пасажирського транспорту, потребує кодування в межах хромосомної структури ГА. При реалізації ГА вектор часових зсувів Ψ_{η} інтерпретується як повна хромосома, у якій зсуви в часі для розкладу кожного окремого маршруту формують відповідний набір генів.

За умови вибору бінарного представлення для хромосоми дані кодуються як послідовність двійкових цифр або генів, що складаються з 0 і 1.

Щоб перевести дійсне число x , яке знаходиться у замкнутому інтервалі $[x_{min}, x_{max}]$, у двійковий еквівалент числа з використанням хромосоми заданого розміру, використовується наступне перетворення

$$\hat{x} = \left[\frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \cdot \sum_{i=0}^{s-1} 2^i \right]_{(2)}, \quad (3.9)$$

де x – дійсне число до закодування (у десятковій системі числення);

\hat{x} – бінарне кодування x у хромосомі;

s – розмір хромосоми (кількість бітів для кодування числа у бінарній системі числення).

Процес кодування полягає у нормалізації дійсного числа x відносно діапазону інтервалу $[x_{min}, x_{max}]$ з подальшим його масштабуванням до максимального значення, яке можна представити заданою кількістю бітів s . Даний коефіцієнт масштабування обчислюється як цифра 2, зведена до ступеня кожної позиції біта, від 0 до $(s - 1)$. Після кодування отримане нормалізоване і масштабоване значення перетворюється на двійкове представлення числа.

Процедура декодування двійкового представлення у дійсне число в десятинній системі числення здійснюється за допомогою зворотної операції. Двійкове значення \hat{x} спочатку перетворюється на його десятковий еквівалент. Отримане десяткове значення зміщується мінімальним значенням інтервалу x_{min} і масштабується за діапазоном інтервалу можливих значень $[x_{min}, x_{max}]$ та нормалізується за максимальним значенням, яке можна представити заданим числом бітів s

$$x = x_{min} + (x_{max} - x_{min}) \cdot \hat{x}_{(10)} / \sum_{i=0}^{s-1} 2^i. \quad (3.10)$$

Генерація хромосом, що представляють альтернативні рішення у ГА, здійснюється шляхом застосування представленого принципу двійкового кодування для кожного елемента вектору Ψ_{η} . Кожне окреме значення часового зсуву перетворюється на своє двійкове представлення з використанням заздалегідь визначеної кількості генів, призначених для кодування значення незалежної змінної. На наступному етапі отримані двійкові послідовності з'єднуються,

утворюючи єдину безперервну послідовність, яка представляє повну хромосому, що представляє всі значення елементів вектору Ψ_{η} .

При цьому верхня межа значень часового зсуву, які можна представити у вирішенні задачі синхронізації розкладів, безпосередньо визначається кількістю генів, виділених кожному елементу. Наприклад, виділення трьох генів дозволяє представляти значення в діапазоні від 0 до 7 хвилин, оскільки $2^3 = 8$ од. (кількість значень часових зсувів початку роботи автобусів на маршруті) Відповідно, чотири гени дозволяють представляти значення від 0 до 15 хвилин ($2^4 = 16$), а п'ять генів розширюють діапазон від 0 до 31 хвилини ($2^5 = 32$), і так далі. Цей зв'язок підкреслює пряму залежність між кількістю генів і точністю відтворення рішень у ГА та діапазоном значень, які можуть бути закодовані в хромосомі.

На рисунку 3.1 наведено схематичне зображення хромосоми, що представляє потенційне рішення для задачі синхронізації розкладу системи МГПТ у пересадочному вузлі.

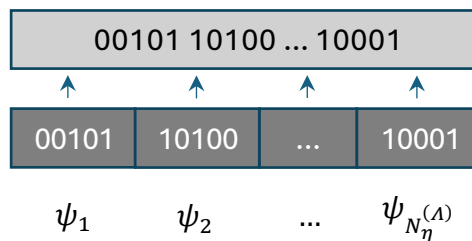


Рисунок 3.1 – Приклад кодування хромосоми для вирішення задачі синхронізації

Представлена хромосома кодує значення часового зсуву для кожного маршруту МГПТ, що обслуговує транспортний вузол. Зокрема, перший набір генів (5 бітів) вказує на 5-хвилинний зсув у часі для першого маршруту, другий набір генів визначає 20-хвилинний зсув у часі для другого маршруту, а останній набір генів, що відповідає останньому маршруту в переліку, позначає 17-хвилинний зсув у часі. Дані значення представляють коригування стандартного часу відправлення

для кожної з маршрутів, виступаючи альтернативним вирішенням задачі синхронізації у пересадочному вузлі.

3.1.3.2 Оцінка функції пристосування

Оцінку загального часу очікування $T_{\eta}^{(w)}$ як функції пристосування в процедурі ГА пропонується реалізувати на підставі результатів імітаційної моделі, що симулює процес обслуговування пасажирів у пересадочному вузлі. Оскільки отримані значення загального часу очікування будуть випадковими, то для оцінки функції пристосування необхідно сформувати вибірку значень загального часу очікування для кожного альтернативного варіанту вектору Ψ_{η} ; на підставі цих даних, значення функції пристосування можна оцінити як середнє значення з отриманої вибірки.

Код імітаційної моделі функціонування транспортного вузла міститься у репозиторії github.com/melnikovayuliia/publictransportnet/tree/master/transfernode. Основною процедурою, що запускає процес симуляції, є метод *simulate* класу *Node*.

Програмна реалізація методу *simulate* для заданого аргументу *duration*, що відповідає періоду симуляції системи у хвиликах, передбачає генерацію запитів на транспортне обслуговування у пересадочному вузлі як колекцію об'єктів типу *Passenger*, при цьому виділяється підмножина $\mathbf{D}_{\eta}^{(o)}$ для пасажирів, які розпочинають пересування у транспортному вузлі, та підмножина $\mathbf{D}_{\eta}^{(t)}$ для пасажирів, які виконують у транспортному вузлі пересадку. Для кожного запиту процедура імітаційної моделі визначає час очікування пасажиром – від моменту підходу до зупинки (або висадки на зупинці) до моменту посадки у транспортний засіб. Значення, що повертає метод *simulate*, є сума часу очікування для всіх пасажирів, що скористалися послугами транспортного вузла.

3.2 Синхронізація в мережі міського громадського пасажирського транспорту

При оптимізації процесів функціонування міського громадського пасажирського транспорту, у випадку критичного аспекту синхронізації розкладів для маршрутів системи МГПТ, математична модель цілої транспортної системи є основним знаряддям для оцінки ефективності процесів обслуговування пасажирів. Процедури синхронізації, які закладають узгоджене прибуття та відправлення транспортних засобів різними маршрутами, за своєю суттю залежать від фундаментальних характеристик і динаміки роботи всієї мережі МГПТ, тому вирішення задачі синхронізації має відбуватися в рамках моделі всієї транспортної системи.

Модель системи міського громадського пасажирського транспорту має служити основою для оцінки результатів її функціонування, отриманих на підставі комп'ютерного моделювання, а також для розробки практичних рекомендацій, заснованих на результатах експериментальних досліджень. Результати імітаційного моделювання системи МГПТ дозволяють досліджувати різні сценарії розвитку системи, тестувати альтернативні стратегії синхронізації розкладів на маршрутах транспортної мережі та оцінювати вплив цих стратегій на загальну продуктивність системи. Основою для програмної реалізації імітаційної моделі системи є її математична модель, яка охоплює основні елементи системи МГПТ, такі як топологія маршрутно мережі, робочі параметри кожного маршруту (швидкість транспортних засобів, часові характеристики процесу обслуговування), а також параметри попиту на послуги міського громадського пасажирського транспорту, що відображають часовий і просторовий розподіл пасажиропотоків.

3.2.1 Модель мережі міського громадського пасажирського транспорту

На макросистемному рівні мережу міського громадського пасажирського транспорту Ω можна формально визначити як структурований набір, що

складається з двох основних компонентів – множини Λ , що представляє сукупність усіх маршрутів МГПТ, які працюють у просторових і робочих межах мережі, і множини D , яка відображає популяцію пасажирів, чії потреби у пересуванні обслуговуються системою МГПТ

$$\Omega = \langle \Lambda, D \rangle. \quad (3.11)$$

Кожний маршрут міського громадського пасажирського транспорту λ , $\lambda \in \Lambda$, формально пропонується визначати як упорядковану пару множин

$$\lambda = \{L_\lambda, V_\lambda\}, \quad (3.12)$$

де L_λ – впорядкований набір сегментів маршруту, які як сукупність визначають трасу маршруту λ ; порядок сегментів відображає послідовність, у якій вони долаються транспортними засобами, що працюють на маршруті;

V_λ – набір транспортних засобів, призначених для роботи на маршруті λ ; даний набір охоплює всі транспортні засоби, які обслуговують маршрут.

Кожен відрізок маршруту ϑ , який є елементом упорядкованої множини L_λ , $\vartheta \in L_\lambda$, визначається як упорядкована трійка

$$\vartheta = \langle n, m, w \rangle, \quad (3.13)$$

де n і m – початкова і кінцева зупинки відповідно для сегмента ϑ маршруту МГПТ, $n \in N_\lambda$, $m \in N_\lambda$;

w – вага сегмента маршруту, км; даний параметр відповідає фізичній довжині сегмента маршруту, визначаючи міру відстані між зупинками n і m ; параметр необхідний для розрахунку часу пересування в імітаційній моделі;

N_λ – множина автобусних зупинок маршруту λ , що охоплює всі автобусні зупинки, які обслуговує маршрут МГПТ; дана множина є фундаментальним компонентом у визначенні просторової протяжності та сполучності маршруту;

кожна зупинка як елемент N_λ служить потенційним пунктом відправлення або призначення для пасажирів даного маршруту, а послідовність зупинок в елементах L_λ визначає трасу маршрут λ .

Кожен транспортний засіб ν , $\nu \in V_\lambda$, характеризується впорядкованою парою, яка відображає параметри його експлуатації на маршруті λ

$$\nu = \langle c_\nu, s_\nu \rangle, \quad (3.14)$$

де c_ν – максимальна пасажиромісткість транспортного засобу ν , пас.; даний параметр є ключовим для визначення загальної пропускної здатності маршруту міського громадського пасажирського транспорту;

s_ν – оперативний розклад транспортного засобу ν ; даний параметр відображає структуровану форму запланованого розкладу руху маршруту λ .

Оперативний розклад може включати послідовність зупинок, які обслуговує транспортний засіб, запланований час прибуття та відправлення на кожній зупинці, запланований час перебування на кожній зупинці, запланований час простою або перерви. Розклад може бути представлений у вигляді впорядкованих пар зупинки та часу або більш складних структур даних. Таке структуроване представлення s_ν дозволяє детально проаналізувати процес обслуговування пасажирів транспортним засобом ν , включаючи дотримання розкладу, час у дорозі між зупинками та показники якості обслуговування.

Елемент розкладу (його k -та позиція) для транспортного засобу ν маршруту λ пропонується представити у вигляді набору $s_k^{(\lambda, \nu)} = \langle p_k^{(\lambda, \nu)}, t_k^{(\lambda, \nu)} \rangle$, для якого перша складова $p_k^{(\lambda, \nu)}$ є позицією у розкладі (зупинка маршруту МГПТ), а друга $t_k^{(\lambda, \nu)}$ – моментом прибуття транспортного засобу ν на зупинку $p_k^{(\lambda, \nu)}$. Таким чином, розклад $s_k^{(\lambda, \nu)}$ транспортного засобу ν на маршруті λ є сукупністю наборів

$$s_\nu = \bigcup_{k=1}^{N_s^{(\lambda, \nu)}} s_k^{(\lambda, \nu)} = \bigcup_{k=1}^{N_s^{(\lambda, \nu)}} \langle p_k^{(\lambda, \nu)}, t_k^{(\lambda, \nu)} \rangle, \forall p_k^{(\lambda, \nu)} \in N_\lambda, \quad (3.15)$$

де $N_s^{(\lambda, \nu)}$ – кількість позицій у послідовності зупинок, які проїжджає транспортний засіб ν , що обслуговує маршрут λ .

Запланований час прибуття $t_k^{(\lambda, \nu)}$ транспортного засобу ν на маршрут λ на k -ій зупинці (k -та позиція розкладу) визначається наступним рівнянням

$$t_k^{(\lambda, \nu)} = t_0 + \psi_\lambda + (j_\nu - 1) \cdot \delta_\lambda + \frac{d_k}{V}, \quad (3.16)$$

де t_0 – момент часу запуску системи (аналогічно параметру, що визначає час початку обслуговування у моделі функціонування транспортного вузла); даний параметр є базовим значенням для інших часових параметрів розкладу руху;

ψ_λ – зміщення для часу початку обслуговування маршруту λ системи МГПТ, хв.; даний параметр враховує будь-яку затримку або випередження початку роботи для конкретного маршруту відносно часу запуску системи t_0 ; параметр дозволяє змінювати час початку обслуговування на всіх маршрутах системи, що надає можливість оптимізувати розподіл ресурсів обслуговуючої системи;

j_ν – порядковий номер транспортного засобу ν у розкладі, $j_\nu = 1 \dots |\mathbf{V}_\lambda|$;

d_k – відстань до k -ої зупинки від початкового пункту, км;

V – технічна швидкість транспортних засобів на маршруті, км/год.;

δ_λ – інтервал між послідовними відправленнями транспортних засобів, що визначає частоту обслуговування на маршруті λ , хв.

Параметри ψ_λ і δ_λ , аналогічні параметрам у моделі пересадочного вузла, є ключовими показниками, що визначають розклад руху для маршруту λ .

Одиницю попиту на послуги міського громадського пасажирського транспорту пропонується моделювати на підставі набору π , що представляє заявку на пересування. Кожен запит на пересування, який є елементом множини пасажирів, визначається наступною упорядкованою сукупністю

$$\pi = \langle \eta_\pi, \mu_\pi, P_\pi, \tau_\pi \rangle, \pi \in D, \quad (3.17)$$

де η_{π} – початкова зупинка пересування пасажирів π , що вказує на існуючу зупинку в мережі міського громадського пасажирського транспорту, $\eta_{\pi} \in N_{\lambda}$;

μ_{π} – кінцева зупинка пересування пасажирів π у системі МГПТ, $\mu_{\pi} \in N_{\lambda}$;

P_{π} – сукупність зупинок, де здійснюються пересадки, необхідні для того, щоб пасажир π здійснив заплановане пересування (включає всі проміжні зупинки, на яких пасажир має виконати пересадку, щоб дістатися від зупинки початку пересування η_{π} до зупинки місця призначення μ_{π}); дана сукупність може бути порожньою, якщо пересування можна виконати без пересадок;

τ_{π} – час надходження заявки (час прибуття пасажирів π на початкову зупинку з метою здійснення пересування міським громадським пасажирським транспортом), хв.

Для реалізації процедури моделювання попиту на транспортні послуги множина пасажирів D розбивається на непересічні підмножини D_j на основі початкової зупинки пересування кожного пасажирів. Тоді на підставі цих підмножин попит визначається в наступний спосіб

$$D = \bigcup_{j=1}^{N_s} D_j, \quad (3.18)$$

де N_s – загальна кількість зупинок у мережі МГПТ;

D_j – підмножина пасажирів, які розпочинають своє пересування з j -ої зупинки системи МГПТ

$$D_j = \{\pi_j: \eta_{\pi} = j\}. \quad (3.19)$$

У цьому контексті η_{π} означає початкову зупинку пасажирів π_j , гарантуючи, що всі пасажирів в межах D_j мають однозначно визначене місце відправлення.

Інтервали часу ξ_j між прибуттям пасажирів на j -ту зупинку в імітаційній моделі системи МГПТ визначаються як випадкові величини, що дозволяє реалістично врахувати стохастичний характер попиту на перевезення пасажирів.

Для кожної підмножини пасажирів D_j час τ_i початку пересування i -го пасажирів генерується на основі реалізації випадкової величини ξ_j . При цьому час прибуття у даному випадку визначається рекурсивно

$$\tau_i = \begin{cases} \xi_j, & i = 1, \\ \tau_{i-1} + \xi_j, & i > 1, \end{cases} \quad (3.20)$$

де ξ_j – реалізація випадкової величини ξ_j , що представляє в імітаційній моделі інтервал часу між послідовним прибуттям пасажирів на j -ту зупинку системи МПТ, хв.

3.2.2 Формалізація проблеми синхронізації у мережі міського громадського пасажирського транспорту

У рамках описаної моделі для опису системи громадського транспорту задача синхронізації розкладу використовує набір вхідних параметрів для оптимізації розкладу руху транспортних засобів. Ці параметри включають кількість транспортних засобів, що обслуговують кожний з маршрутів громадського транспорту, пасажиромісткість транспортних засобів та числові параметри розкладів руху, зокрема початкові зсуви ψ_λ і параметри інтервалів руху транспортних засобів δ_λ на кожному маршруті транспортної системи. Ці параметри у сукупності визначають робочий контекст (вихідні дані і незалежні змінні), в рамках якого виконується синхронізація.

Аналогічно з задачею синхронізації розкладів у пересадочному вузлі, у найпростішому сценарії, спрямованому на мінімізацію збоїв у існуючій системі пасажирського транспорту, синхронізації можна досягти шляхом коригування зміщення часу початку обслуговування для кожного маршруту громадського транспорту. Дані зсуви в рамках задачі синхронізації розкладів в системі представлені вектором Ψ цілих значень

$$\Psi = \langle \psi_1, \psi_2, \dots, \psi_{N_A} \rangle. \quad (3.21)$$

де N_A – загальна кількість маршрутів громадського транспорту в мережі, $N_A = |\Lambda|$.

Вектор Ψ є керуючим параметром, що дозволяє регулювати відносний час початку обслуговування пасажирів на маршрутах транспортної системи, тим самим забезпечуючи координацію процесів обслуговування пасажирів.

Основним технологічним показником для оцінки ефективності синхронізації є середній час очікування пасажирів $T^{(w)}$ для всіх зупинок громадського транспорту. Цей показник кількісно визначає сукупні втрати часу, яких зазнають пасажирів через невідповідність розкладів у мережі громадського транспорту моментам виникнення потреб на переміщення. Метою задачі синхронізації в мережі є мінімізація загального часу очікування пасажирів, який пропонується визначати аналогічно до підходу для задачі синхронізації у пересадочному вузлі

$$T^{(w)} = f(\Psi) = \sum_{\pi \in D} t_{\pi}^{(w)} \rightarrow \min. \quad (3.22)$$

де $t_{\pi}^{(w)}$ – час очікування окремого пасажирів π , хв.

Варто зазначити, що проблему синхронізації у мережі можна сформулювати з альтернативними цільовими функціями, такими як:

- максимізація прибутку транспортної компанії; у цьому випадку враховуються операційні витрати підприємства, доходи від плати за проїзд і кількість обслужених пасажирів;
- мінімізація сукупних операційних витрат і часових втрат пасажирів, пов'язаних із очікуванням на зупинках; дана цільова функція враховує як витрати транспортної компанії, так і витрати, які зазнають пасажирів при пересуванні;
- максимізація рівня обслуговування пасажирів; при цьому функція мети може включати показники, що враховують дотримання розкладу, наповненість транспортних засобів та задоволеність пасажирів;

- мінімізація енерговитрат у транспортній системі;
- максимізація надійності мережі громадського транспорту, і т.д.

Представлені альтернативні цільові функції дозволяють більш повно оцінювати стратегії синхронізації, беручи до уваги ширший спектр факторів. Вибір відповідної цільової функції залежить від конкретного контексту та бажаних результатів процесу синхронізації.

3.2.3 Генетичний алгоритм для вирішення проблеми синхронізації у мережі міського громадського пасажирського транспорту

Задача синхронізації розкладів у мережі міського громадського пасажирського транспорту, сформульована в даному розділі, характеризується комплексністю і стохастичним характером. Наявність численних взаємозалежних змінних, таких як параметри транспортних засобів, кількісні характеристики розкладів руху та динамічного попиту пасажирів на пересування, визначають багатовимірність і нелінійність даної оптимізаційної задачі. Крім того, стохастичні елементи задачі, зокрема випадковий час прибуття пасажирів, вносять невизначеність, що робить аналітичні рішення непрактичними. Традиційні методи оптимізації, які використовують детерміновані та безперервні функції, не дозволяють вирішити представлену проблему. Тому евристичні підходи, які пропонують приблизні, але обчислювально здійсненні рішення, є важливим (у практиці управління великими транспортними системами – єдиним можливим) інструментом, що дозволяє отримати рішення за реальний час. Аналогічно до описаного попередньо підходу до синхронізації у пересадочному вузлі, для синхронізації розкладів у мережі МГПТ пропонується використовувати метод на базі генетичного алгоритму.

3.2.3.1 Репрезентація альтернативних рішень

У пропонованому ГА хромосома служить фундаментальною одиницею, що представляє потенційне рішення проблеми синхронізації розкладів у мережі пасажирського транспорту. Хромосома відображає набір значень незалежних змінних, які під час декодування визначають певну конфігурацію незалежних змінних, тобто є варіантом вирішення задачі. У контексті сформульованої задачі синхронізації розкладів для всіх маршрутів транспортної системи хромосома кодує вектор Ψ , який представляє набір початкових зсувів у розкладі для кожного маршруту у системі МГПТ.

Процес кодування хромосом є ключовим при формуванні евристичного метода вирішення задачі на базі ГА, оскільки він визначає, як алгоритм створює та розвиває потенційні рішення. У випадку, коли керуючі змінні представлені вектором цілих значень, простим і ефективним підходом є представлення хромосоми як бінарного ряду, що відображає лінійний масив цілих чисел. Аналогічно задачі синхронізації у пересадочному вузлі – кожен елемент у масиві відповідає певному зміщенню часу початку обслуговування на маршруті, а порядок елементів у масиві відповідає переліку маршрутів у мережі. Натомість, для задачі синхронізації розкладів у мережі, розмір бінарного ряду є набагато більшим у порівнянні з задачею синхронізації у вузлі, оскільки хромосома використовується при кодуванні всіх маршрутів мережі МГПТ.

Дане представлення хромосоми має кілька переваг:

- простота реалізації;
- однозначне відображення елементів вектору Ψ у хромосомі;
- сумісність із генетичними операторами: структура лінійного масиву добре підходить для застосування стандартних генетичних операторів, таких як кросинговер і бінарна мутація;
- безпосереднє декодування у цілочисельні елементи вектору Ψ .

Завдяки описаному принципу кодування вектору Ψ в хромосомі, ГА може ефективно досліджувати простір альтернативних рішень і визначати оптимальні

або близькі до оптимальних зміщення часу початку обслуговування для розкладів у мережі МГПТ.

3.2.3.2 Оцінка функції пристосування

Оцінка вартості функції пристосування, критичного компонента ГА, потребує підходу на основі імітаційного моделювання, оскільки розроблена модель системи МГПТ має стохастичний характер. Зокрема, загальний час очікування пасажирів на всіх маршрутах міського громадського пасажирського транспорту є випадковою змінною, на яку впливають такі фактори, як коливання попиту пасажирів і коливання часу прибуття транспортних засобів. Конкретну реалізацію цієї випадкової величини, що представляє конкретний результат роботи системи, можна отримати за допомогою одного запуску імітаційної моделі. Таким чином, результат запуску імітаційної моделі дозволяє запропонувати оцінку ефективності системи для даного набору параметрів розкладу, закодованих у хромосомі.

В даній роботі використано програмну реалізацію запропонованої математичної моделі для мережі МГПТ, що доступна в репозиторії github.com/melnikovayuliia/publictransportnet/tree/master/transportnet. Дана програмна реалізація дозволяє побудувати детальну імітаційну модель системи МГПТ, що дає можливість оцінити функцію пристосування. Програмна реалізація моделі побудована на засадах об'єктно-орієнтованого програмування, що передбачає створення класів, які представляють відповідні компоненти системи МГПТ.

Конфігурація мережі міського громадського пасажирського транспорту встановлюється за допомогою класу *Net*. Цей клас створює граф-модель, де автобусні зупинки представлені як вершини, а сегменти маршруту як ребра графу. Вершини створюються як сутності класу *Node*, кожна з яких представляє певну автобусну зупинку в мережі. Ребра, що представляють перегони між зупинками, створюються як сутності класу *Link*. Дані елементи моделі визначають сегменти, що входять у трасу маршруту МГПТ.

Маршрути міського громадського пасажирського транспорту визначаються з використанням попередньо створеної граф-моделі як сутності класу *Line*. Кожен об'єкт типу *Line* відображає послідовність зупинок і сегментів маршруту, які визначають трасу маршруту МГПТ.

Транспортні засоби, що працюють на маршрутах транспортної мережі, моделюються за допомогою класу *Vehicle*. Екземпляри цього класу включені як поля у відповідні сутності *Line*, що представляють автобуси чи інші транспортні засоби, призначені для обслуговування на кожного з маршрутів. Це дозволяє в рамках імітаційної моделі відстежувати рух окремих транспортних засобів у мережі.

Стохастичний характер попиту на пересування пасажирів враховується шляхом моделювання числових параметрів попиту як випадкових змінних. Це досягається завдяки використанню класу *Stochastic*, який дозволяє визначати та генерувати випадкові величини, що представляють час прибуття пасажирів та інші параметри, пов'язані з попитом. На наступному етапі дані параметри включаються як поля в сутності класу *Node*, що представляють автобусні зупинки.

У сформованій імітаційній моделі системи МГПТ для попиту на транспортні послуги, згенерованого за допомогою методу *gen_demand* класу *Net*, можна оцінити функцію пристосування, яка розраховується як загальний час очікування пасажирів на зупинках. Оцінка значення функції пристосування виконується шляхом запуску методу *simulate* класу *Net*. Метод *simulate* повертає набір значень, у якому перший елемент представляє загальний час очікування.

3.3 Висновки по третьому розділу

1. Розроблені моделі пересадочного вузла та мережі міського громадського пасажирського транспорту забезпечують базову структуру для вирішення проблем синхронізації розкладів руху громадського транспорту на підставі результатів імітаційного моделювання транспортних систем. Структура запропонованих моделей визначає пріоритетність представлення ключових

системних компонентів та їх взаємодії, що дозволяє моделювати реалістичні сценарії та оцінювати потенційні рішення. Представлені базові моделі можуть бути адаптовані та розширені, що дозволяє включати до процесу прийняття рішень більшу кількість параметрів та обмежень.

2. Основну увагу в даній дисертаційній роботі приділено створенню універсального інструменту, який можна використовувати для дослідження широкого діапазону проблем синхронізації розкладів руху, від синхронізації у вибраному транспортному вузлі до більш складних задач перепроєктування мережі МГПТ. Перевагою запропонованих моделей є їх здатність відтворювати стохастичний характер реальних систем міського громадського пасажирського транспорту.

Запропоновані підходи до вирішення задачі синхронізації на базі генетичних алгоритмів є ефективними інструментами для дослідження процесів синхронізації розкладів руху у системах МГПТ.

Основні результати проведених досліджень в рамках цього розділу опубліковані в роботах [115-119].

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СИНХРОНІЗАЦІЇ РОЗКЛАДІВ РУХУ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ

Запропоновані евристичні алгоритми синхронізації розкладів міського громадського пасажирського транспорту дозволяють покращити існуючий розклад. При цьому ефективність отриманого рішення, виражена через зменшення середнього часу очікування пасажирів на зупиночних пунктах для запропонованого варіанту розкладу у порівнянні з базовим (існуючим), може змінюватися в залежності від коливань попиту на пересування міським громадським пасажирським транспортом (зовнішні фактори, що враховуються у запропонованому методі, однак не є регульованими параметрами алгоритму), а також у залежності від параметрів ГА, що використовуються для запуску обчислювальної процедури.

Завдання, що вирішуються в результаті проведення експериментальних досліджень в рамках даної роботи є:

- визначення відносної ефективності використання запропонованої методики синхронізації розкладів руху на прикладі реальної мережі МГПТ,
- визначення впливу параметрів ГА на результати застосування процедури синхронізації розкладів на маршрутах міського громадського пасажирського транспорту.

Експериментальні дослідження проведено окремо для кожного типу синхронізації розкладів руху – на макрорівні мережі міського громадського пасажирського транспорту (синхронізація розкладів виконується для всіх пересадочних вузлів у мережі) та мікрорівні окремого пересадочного вузла (синхронізація проводиться для розкладів тільки тих маршрутів, що обслуговують вибраний пересадочний вузол). В якості показника ефективності синхронізації розкладів руху при проведенні експериментальних досліджень, у відповідності до вибраних функцій пристосування (3.8) та (3.22), для обох підходів

використовується середній час очікування пасажиром транспортного засобу на зупинках мережі МГПТ.

4.1 Характеристика об'єкту проведення експериментальних досліджень

Об'єктом експериментальних досліджень у межах цієї дисертаційної роботи було обрано мережу автобусних маршрутів міста Верхньодніпровськ, що входить до складу Кам'янського району Дніпропетровської області. Місто виконує функцію адміністративного центру Верхньодніпровської територіальної громади та характеризується сталими пасажиропотоками, зумовленими його промисловим профілем та соціально-географічним розташуванням. Станом на початок 2022 року чисельність населення міста становила понад 15,5 тис. осіб.

Економічний потенціал міста та попит на транспортні послуги формується переважно потужними промисловими вузлами, серед яких ключове значення мають машинобудівний, ливарно-механічний та авторемонтний заводи. Специфічною особливістю транспортної інфраструктури є віддаленість залізничного вузла. Станція «Верхньодніпровськ» розташована за 12 км від міської межі (у смт. Новомиколаївка), що підвищує роль автобусного сполучення як основного засобу мобільності населення.

Існуюча топологія маршрутної мережі (рис. 4.1) представлена п'ятьма автобусними маршрутами:

- внутрішньоміські маршрути №1, №2 та №3, що забезпечують зв'язок між житловими масивами та промисловими зонами;
- приміські маршрути №4 та №5, які інтегрують міську мережу з прилеглими населеними пунктами.

Характерною рисою мережі міського громадського пасажирського транспорту міста Верхньодніпровськ є її компактність – протяжність кожного з маршрутів не перевищує 15 км. Перевезення пасажирів на досліджуваній мережі забезпечує єдиний оператор – ТОВ "ДІНАТ-С" (місце реєстрації – м. Верхньодніпровськ, дата реєстрації 28.09.2004 р.). Концентрація управління

мережею в межах одного перевізника дозволяє забезпечити єдиний підхід до формування розкладів руху.

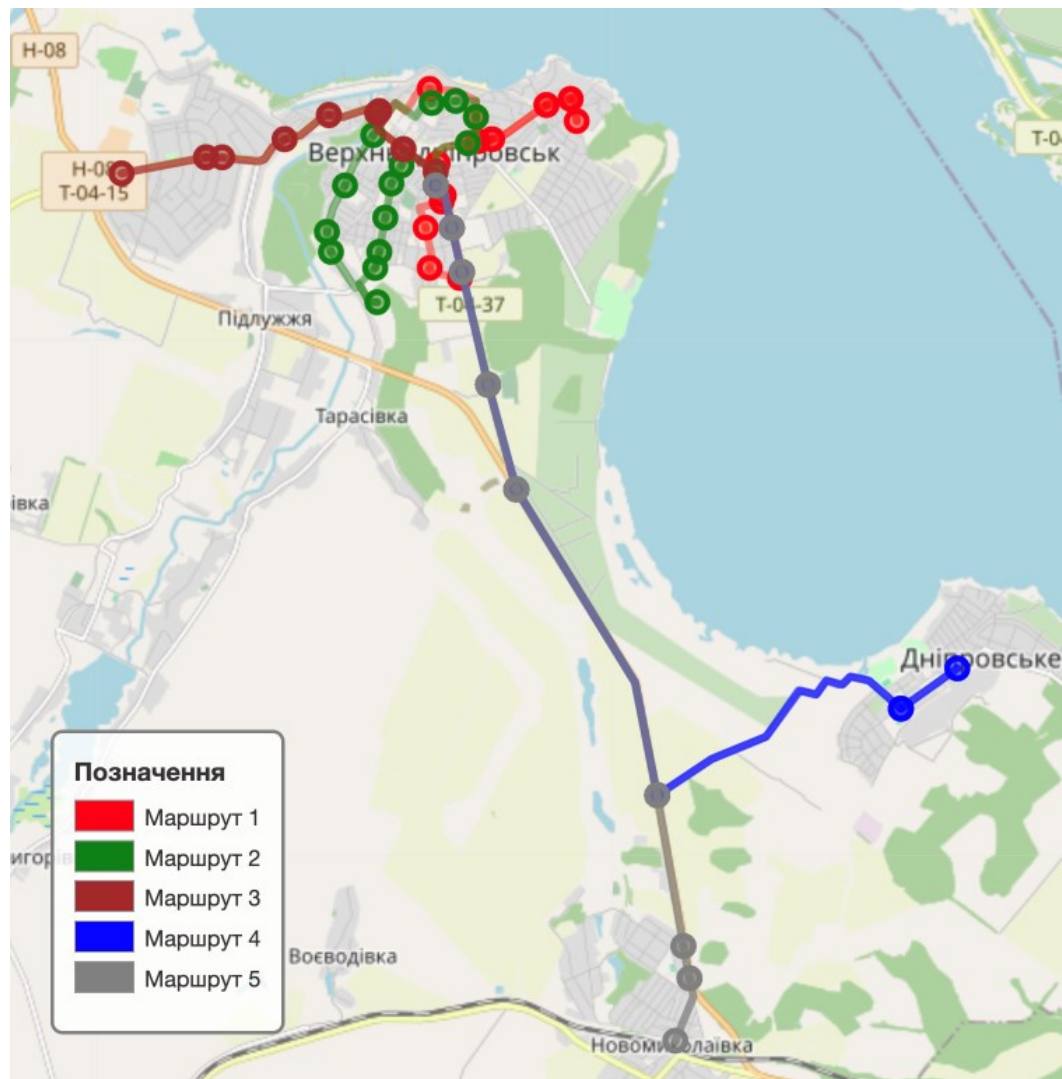


Рисунок 4.1 – Схема мережі міського громадського пасажирського транспорту м. Верхньодніпровськ

Рухомий склад підприємства представлений автобусами різних класів, що дозволяє диференціювати провізну здатність залежно від специфіки маршруту:

– малий клас – автобуси Mercedes-Benz Sprinter 312D (пасажиромісткість 18 місць): використовуються на міських маршрутах №1 та №3 з помірним пасажиропотоком;

– великий клас – автобуси MAN A21 NL223 (пасажиромісткість 50 місць): закріплений за маршрутом №2, що вказує на значне пікове навантаження на даному напрямку;

– середній клас – автобуси БАЗ А079.31 «Пролісок» (пасажиромісткість 38 загальних / 25 сидячих місць) обслуговують приміські сполучення №4 та №5, що забезпечують необхідний баланс між місткістю та маневреністю на замських ділянках.

Маршрут №1 «Автовокзал – Інтернат» (характеристика представлена у таблиці 4.1) характеризується асиметрією довжини та часу обороту. Протяжність у прямому напрямку складає 6,05 км (час у дорозі – 20 хв.), у зворотному – 5,2 км (15 хв.). Кількість зупинок складає 14 у прямому і 10 у зворотному напрямках. Графік руху має виражену нерівномірність: при базовому інтервалі 30–80 хв. спостерігається значний розрив у 190 хв. у денний час. Режим роботи з 06:15 до 18:20.

Таблиця 4.1 – Характеристика маршруту №1 «Автовокзал – Інтернат»

Номер зупинки	Назва зупинки	Позначення перегону	Довжина перегону, м
1	2	3	4
Прямий напрямок			
1	Автовокзал	-	-
2	Автосвіт	1-2	350
3	вул. Київська	2-3	150
4	Пам'ятник «Танк»	3-4	600
5	вул. Кам'янська	4-5	400
6	вул. Шкільна	5-6	500
7	Школа №2	6-7	500
8	Магазин «Цитрон»	7-8	600
9	Магазин «Веселка»	8-9	500
10	Лікарня	9-10	600
11	ДНЗ «Золота рибка»	10-11	300

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4
12	Магазин «Литвинівський»	11-12	700
13	вул. Упорна	12-13	400
14	Інтернат	13-14	350
Зворотний напрямок			
14	Інтернат	-	-
13	вул. Упорна	14-13	350
12	Магазин «Литвинівський»	13-12	390
11	ДНЗ «Золота рибка»	12-11	710
15	Магазин «Трійка»	11-15	250
16	вул. Затишна	15-16	300
17	Школа №5	16-17	800
18	Пам'ятник «Літак»	17-18	1000
19	Магазин «Наш край»	18-19	600
1	Автовокзал	19-1	800

Кільцевий маршрут №2 «Автовокзал – Автовокзал» (таблиця 4.2) забезпечує охоплення центральної та периферійних частин міста за кільцевою схемою. Довжина одного обороту становить 9,23 км, тривалість рейсу – 30 хв. при 18 зупинках. Інтервали руху коливаються від 30 до 170 хв. Робота на маршруті триває з 06:30 до 19:20.

Таблиця 4.2 – Характеристика маршруту №2 «Автовокзал – Автовокзал»

Номер зупинки	Назва зупинки	Позначення перегону	Довжина перегону, м
1	2	3	4
1	Автовокзал	-	-
2	бул. Слави	1-2	240
3	Ринок	2-3	660
4	вул. Коротка	3-4	300

Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4
5	вул. Робоча	4-5	400
6	Магазин «Продукти»	5-6	400
7	Автосервіс	6-7	200
8	ПрАТ «ВЛМЗ»	7-8	700
9	вул. Яблунева	8-9	900
10	Магазин «Продукти»	9-10	300
11	ВУЕГГ	10-11	700
12	Будівельний магазин	11-12	700
13	Пам'ятник «Літак»	12-13	500
14	Парк Семенова	13-14	850
15	Коледж ДДАУ	14-15	350
16	вул. Затишна	15-16	450
17	Лікарня	16-17	500
1	Автовокзал	17-1	1080

Маршрут №3 «Автовокзал – вул. Миру» (характеристика представлена у таблиці 4.3) є найбільш коротким маршрутом мережі МГПТ протяжністю 5,1 км в обох напрямках. Кількість зупинок на маршруті найменша у порівнянні з іншими маршрутами мережі – по 8 у кожному напрямку. Час рейсу складає 20 хв. Інтервальний графік демонструє значну амплітуду (від 20 до 225 хв.). Обслуговування пасажирів на маршруті триває з 05:30 до 18:40.

Маршрут №4 «Автовокзал – смт Дніпровське» з'єднує місто з великим промисловим селищем Дніпровське. Довжина становить 13,35 км, загальний час у дорозі відповідно розкладу – 28 хв. Попри приміський статус, маршрут має лише 8 зупинок, що вказує на швидкісний характер обслуговування пасажирів, траса маршруту в обох напрямках дублюється. Інтервали руху в прямому напрямку досить щільні у ранкові години (від 10 до 15 хв.), тоді як зворотний напрямок характеризується тривалими міжрейсовими перервами (до 275 хв.). Робота автобусів на маршруті триває з 06:35 до 17:38.

Таблиця 4.3 – Характеристика маршруту №3 «Автовокзал – вул. Миру»

Номер зупинки	Назва зупинки	Позначення перегону	Довжина перегону, м
Прямий напрямок			
1	Автовокзал		
2	бул, Слави	1-2	350
3	Магазин «Театральний»	2-3	700
4	Магазин «Берізка»	3-4	830
5	РЕМ	4-5	680
6	вул. Коцюбинського	5-6	670
7	Амбулаторія	6-7	820
8	вул. Миру	7-8	1050
Зворотний напрямок			
8	вул. Миру		
7	Амбулаторія	8-7	1050
9	вул. Дружби народів	7-9	810
6	вул. Коцюбинського	9-6	680
5	РЕМ	6-5	680
10	Пам'ятник «Літак»	5-10	830
11	Магазин «Наш край»	10-11	650
1	Автовокзал	11-1	400

Маршрут №5 «Автовокзал – ст. Новомиколаївка» забезпечує зв'язок маршрутної мережі із найближчим залізничним вузлом. Протяжність маршруту становить 11,77 км, час сполучення – 26 хв., 9 зупинок, траса маршруту в обох напрямках дублюється. Розклад руху на маршруті синхронізований із основними часовими проміжками прибуття поїздів, проте має нестабільні інтервали (від 10 до 275 хв.). Маршрут №5 має найбільш ранній початок часу роботи транспортних засобів (початок обслуговування о 05:00), що функціонує до 19:15.

Характеристика маршрутів №4 і №5 представлена у таблиці 4.4 та 4.5 відповідно.

Таблиця 4.4 – Характеристика маршруту №4 «Автовокзал – смт Дніпровське»

Номер зупинки	Назва зупинки	Позначення перегону	Довжина перегону, м
1	Автовокзал	-	-
2	вул. Київська	1-2	400
3	Пам'ятник «Літак»	2-3	600
4	Майдан	3-4	1700
5	5-й кілометр	4-5	1400
6	КПК смт Дніпровське	5-6	4400
7	вул. Центральна	6-7	3850
8	смт. Дніпровське	7-8	1000

Таблиця 4.5 – Характеристика маршруту №5 «Автовокзал – ст. Новомиколаївка»

Номер зупинки	Назва зупинки	Позначення перегону	Довжина перегону, м
1	Автовокзал		
2	вул. Київська	1-2	400
3	Пам'ятник «Літак»	2-3	600
4	Майдан	3-4	1700
5	5-й кілометр	4-5	1400
6	КПК смт Дніпровське	5-6	4400
7	с. Новомиколаївка	6-7	1900
8	с. Новомиколаївка (на вимогу)	7-8	500
9	станція Новомиколаївка	8-9	870

Аналіз просторової організації мережі МГПТ м. Верхньодніпровськ дозволив ідентифікувати ключові точки концентрації пасажиропотоків. Мережа міського громадського пасажирського транспорту міста включає 11 пересадочних вузлів, які визначено як зупиночні пункти, що обслуговуються двома або більше маршрутами одночасно. Географічне розташування цих об'єктів представлено на картосхемі (рис. 4.2).

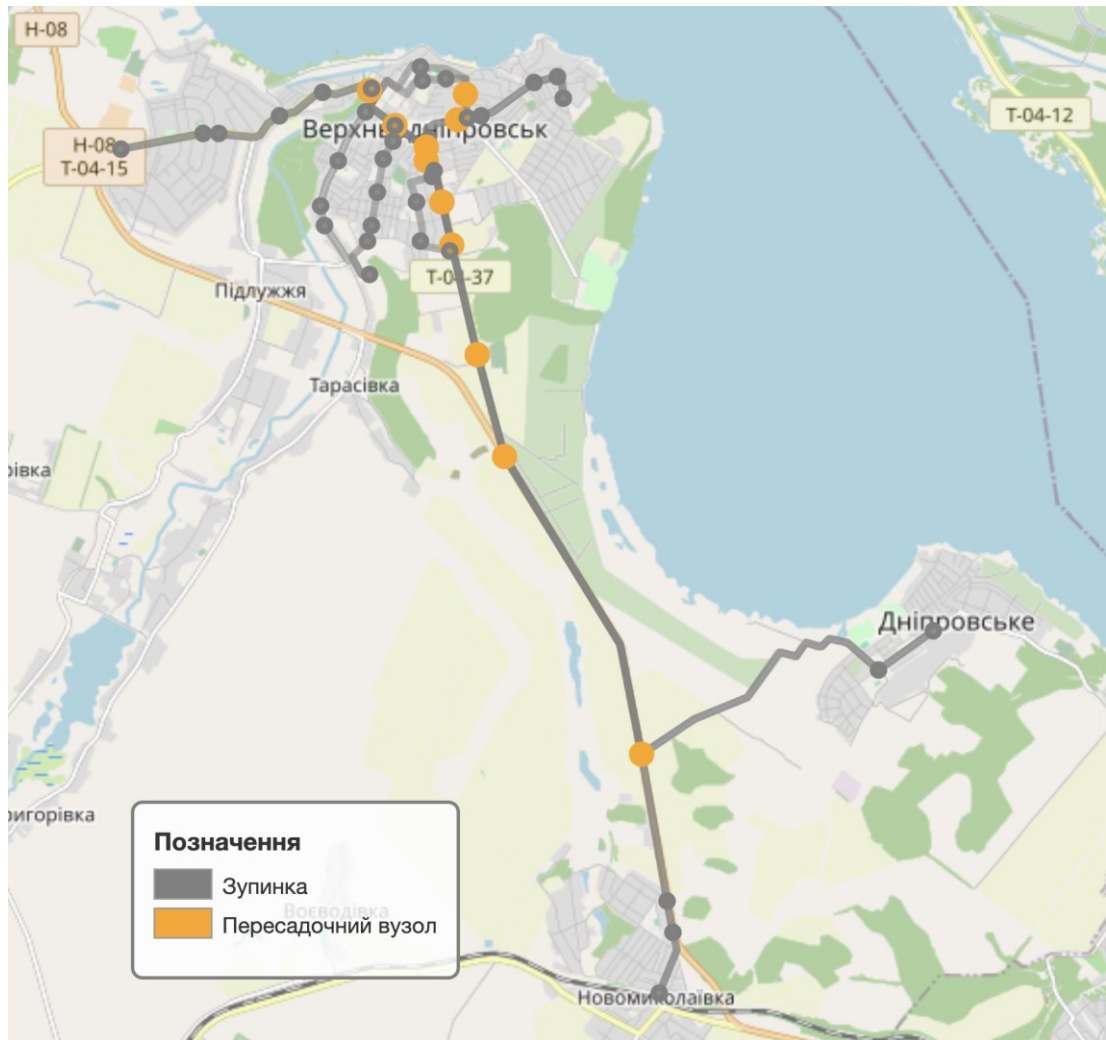


Рисунок 4.2 – Пересадочні вузли у мережі міського громадського пасажирського транспорту м. Верхньодніпровськ

Фундаментальним елементом мережі міського громадського пасажирського транспорту м. Верхньодніпровськ є пересадочний вузол «Автовокзал». Його стратегічне значення для міської транспортної системи обумовлено наступними факторами:

- це єдиний вузол, через який проходять усі 5 діючих маршрутів мережі;
- об'єкт є початковою та кінцевою точкою для кожного з маршрутів, що робить його головним розподільчим пунктом пасажиропотоків між міськими (маршрути №1, №2, №3) та приміськими (маршрути №4 і №5) сполученнями;
- географічне розташування вузла сприяє ефективній інтеграції міжміських та локальних пасажиропотоків, забезпечуючи зручну пересадочну кореспонденцію.

Крім пересадочного пункту «Автовокзал», решта 10 пересадочних вузлів забезпечують зв'язність мережі всередині житлових масивів та поблизу промислових підприємств. На ділянках суміщення маршрутів №1, №2 та №3 (зокрема в центральній частині міста) сформовані вузли, що дозволяють пасажиром мінімізувати час очікування, обираючи перший прибулий транспортний засіб. Пересадочні вузли, що розташовані на межі міста, забезпечують умови для ефективного перерозподілу пасажиропотоків між міськими та приміськими маршрутними мережами. Враховуючи, що всі маршрути є радіальними з центром у транспортному вузлі «Автовокзал», структура мережі має виражений зіркоподібний характер з центральним ядром.

4.1.1 Модель транспортного вузла

Процес розробки імітаційної моделі, орієнтованої на аналіз пасажирських потоків у пересадочних пунктах мережі міського громадського пасажирського транспорту, базується на використанні спеціалізованого модуля *transfernote*. Інструменти даного модуля дозволяють детально відтворити логіку взаємодії між різними маршрутами МГПТ в моменти пересадок у вибраному транспортному вузлі. Архітектура моделі фокусується на дискретно-подієвому відтворенні процесів, де ключовим об'єктом виступає клас *Node*, що виконує роль керуючого центру для симуляції процесів обслуговування у конкретному пересадочному вузлі. Ініціалізація моделі розпочинається зі створення екземпляра цього класу, який згодом акумулює в собі всі вхідні дані про маршрути міського громадського пасажирського транспорту та параметри пасажиропотоків.

Функціонування транспортного вузла визначається через визначення поля *lines* класу *Node*, яке містить колекцію об'єктів типу *Line*. Кожен такий об'єкт у контексті модуля *transfernote* відображає структуру розкладу руху транспортних засобів на маршруті та попиту на послуги даного маршруту у транспортному вузлі. Під час ініціалізації конструктор класу *Line* приймає параметри часового зміщення відносно початку періоду обслуговування та часові інтервали між рейсами, що

дозволяє синхронізувати розклади за рахунок зміщення моментів прибуття автобусів різних маршрутів. Одночасно з цим задаються стохастичні характеристики попиту на послуги маршрутів, які визначаються як випадкові величини. До параметрів попиту належать кількість пасажирів, що завершують пересування саме в цьому вузлі, а також відповідний коефіцієнт – частка пасажирів, які здійснюють пересадку для продовження пересування іншим маршрутом. Такий підхід до визначення моделі маршруту МГПТ дозволяє враховувати імовірнісну природу попиту.

Модель пересадочного вузла «Автовокзал» в рамках мережі міського громадського пасажирського транспорту міста Верхньодніпровськ містить 5 об'єктів типу *Line* у колекції *lines* класу *Node*, що представляє усі маршрути мережі.

Безпосередня активація обчислювального процесу здійснюється через виклик методу *simulate*, інтегрованого у клас *Node*. Цей метод запускає ітераційне відтворення подій прибуття транспортних засобів, накопичення пасажирів у транспортному вузлі та їх розподіл між доступними маршрутами згідно із параметрами випадкових величин, що характеризують попит. В результаті виконання симуляції метод повертає структуровану колекцію даних, яка є основою для подальшого аналізу ефективності функціонування пересадочного вузла. Перший елемент цієї колекції відображає інтегральний показник загального часу очікування пасажирів, що є прямим індикатором якості синхронізації розкладів. Другий елемент фіксує сумарну кількість пасажирів, які скористалися послугами вузла протягом періоду моделювання, що дозволяє розраховувати питомі показники ефективності та оцінювати пропускну здатність вузла.

4.1.2 Модель мережі міського громадського пасажирського транспорту

Програмна реалізація моделі транспортної мережі міста Верхньодніпровськ базується на принципах об'єктно-орієнтованого проектування, де елементи існуючої транспортної інфраструктури знаходять своє відображення у відповідній абстракції коду, створеній за допомогою класів бібліотеки *publictransportnet*.

Центральною ланкою архітектури для моделі маршрутної мережі виступає базовий клас *Net* із модуля *transportnet*, який виконує роль контейнера та координатора для всіх компонентів системи. Створення екземпляра цього класу ініціалізує порожню структуру майбутньої мережі, яка згодом наповнюється топологічними та операційними даними.

Процес формування базової структури моделі транспортної мережі розпочинається з виклику спеціалізованого методу *load_nodes_from_file*, який трансформує дані з текстового файлу *verkhnodniprovsk_nodes.txt*, представленого у репозиторії, у сукупність об'єктів типу *Node*. Кожен такий об'єкт представляє конкретну зупинку МГПТ, причому для Верхньодніпровська було інтегровано 47 таких пунктів. Важливою особливістю ідентифікації є використання унікальних цілочисельних кодів у діапазоні від 1 до 47, що забезпечує швидкий доступ до властивостей кожної зупинки під час виконання розрахунків та пошуку маршрутів.

Наступним кроком у побудові цифрового двійника маршрутної мережі є визначення перегонів між зупинками, що реалізується через завантаження перегонів до моделі. Екземпляри класу *Link* описують геометрію та пропускну здатність 45 перегонів, що з'єднують існуючі вузли мережі. Ці дані завантажуються за допомогою методу *load_from_file* із файлу *verkhnodniprovsk_edges.txt*, що дозволяє відокремити опис дорожньої топології від логіки обслуговування пасажирів у імітаційній моделі.

Функціональне наповнення моделі завершується описом маршрутної мережі, де ключову роль відіграє клас *Line*. Кожен маршрут ініціалізується як окремий об'єкт, траєкторія якого визначається через упорядковану колекцію ідентифікаторів зупинок (поле *code* об'єкта *Node*). Конструктор класу *Line* вимагає визначення початкового та кінцевого пунктів, що вказуються у відповідній колекції як другий аргумент конструктору. Така структура дозволяє відтворювати в рамках імітаційної моделі послідовність руху транспортних засобів між зупинками (зокрема – між пересадочними вузлами), що є критичним для вирішення задач синхронізації.

Завершальним етапом розгортання моделі є визначення парку рухомого складу для кожного з маршрутів, що реалізується через метод *add_vehicles*. Ця

функція дозволяє прив'язати до конкретних маршрутів об'єкти типу *Vehicle*, що виступають динамічними агентами в імітаційній моделі. На підставі колекції об'єктів типу *Vehicle*, модель отримує інформацію про кількість і місткість рухомого складу на кожному з маршрутів мережі МГПТ. Це створює умови для проведення імітаційного моделювання, де обслуговування кожним з віртуальних автобусів моделей Mercedes-Benz Sprinter, MAN A21 або БАЗ «Пролісок» відтворюється з урахуванням часових затримок та пасажиропотоків, визначених за допомогою відповідних методів класу *Net*.

Запуск імітаційної моделі відбувається за посередництвом методу *simulate* класу *Net* з модулю *transportnet*. Даний метод повертає середній час очікування для всіх пасажирів маршрутної мережі як показник, що описує результат функціонування мережі міського громадського пасажирського транспорту.

4.1.3 Результати моделювання для існуючого розкладу руху

В рамках експериментальних досліджень запуск імітаційних моделей для пересадочного вузла «Автовокзал», а також для всієї мережі громадського транспорту міста Верхньодніпровськ проведено для ранішнього періоду пік (з 6:30 до 8:30) робочого дня. Для базового варіанту розроблених імітаційних моделей використано існуючий розклад руху з часовими зсувами, представленими вектором $\Psi_0 = \langle 75, 90, 30, 95, 0 \rangle$ (елементи вектору представлені у хвилинах). Момент початку роботи системи міського громадського пасажирського транспорту визначається за найбільш раннім часом початку роботи автобусів на маршруті №5 о 5:00 год. Оскільки проведення експерименту починалося о 06:30 год., то з урахуванням наявних інтервалів руху вектор часових зсувів трансформується у вектор $\Psi'_0 = \langle 20, 0, 0, 5, 14 \rangle$ (таблиця 4.6).

Оскільки середній час очікування пасажирів, отриманий як результат запуску імітаційної моделі, є випадковою величиною, для отримання статистично значущих результатів моделювання проводилося по 300 запусків для детермінованих вхідних параметрів (вектору Ψ_0 і характеристик попиту). Таким чином, результат

імітаційного експерименту оцінюється на підставі вибірки, що характеризує середній час очікування пасажирів мережі МГПТ.

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 05–09 серпня 2024 року (загалом 15 годин безперервних спостережень). На зупиночному пункті проведено обстеження пасажиропотоку з фіксацією кількості пасажирів, які прибували до зупинки пішки для початку пересування або транспортним засобом громадського транспорту для подальшої пересадки чи закінчення пересування. Для кожного пасажирів визначено номер маршруту, яким він скористався. Додатково визначалася кількість пасажирів, які здійснювали висадку з автобусів за кожним маршрутом. Для пасажирів, які вийшли з транспортного засобу, фіксувався подальший намір переміщення – завершення пересування або продовження її іншим маршрутом.

В результаті спостережень була отримана вибірка розміром 3750 пасажирів, які використали зупинку «Автовокзал» під час свого пересування. 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 спостережень представлені у таблиці 4.6. Значення параметру середньої кількості пасажирів, що висаджуються, підпорядковується нормальному розподілу, що було підтверджено збіжністю теоретичної моделі з реальними (Додаток В).

Обґрунтованість використання експоненціального розподілу була підтверджена під час натурних обстежень, проведених у ключовому пересадочному вузлі «Автовокзал». Статистичний аналіз отриманих результатів хронометражних досліджень за критерієм Пірсона засвідчив високу збіжність теоретичної моделі з реальною динамікою надходження запитів на обслуговування, оскільки розраховане значення критерію Пірсона ($\chi^2_{\phi}=11,4$) виявилось меншим за критичне ($\chi^2_{\text{табл}}=15,5$) для рівня значущості 0,05 (Додаток Г).

Таблиця 4.6 – Параметри базового розладу та параметри попиту у пересадочному вузлі «Автовокзал»

Номер маршруту	Часовий зсув початку роботи першого автобуса, хв.	Інтервал руху, хв.	Частка пасажирів, що обирають маршрут	Середня кількість пасажирів, що висаджується, пас.
1	20	35	0,35	3
2	0	30	0,2	4
3	0	20	0,25	5
4	5	28	0,1	4
5	14	26	0,1	4

Розподіл середнього часу очікування у транспортному вузлі «Автовокзал», отриманий в результаті імітаційного експерименту, представлено на рисунку 4.3.

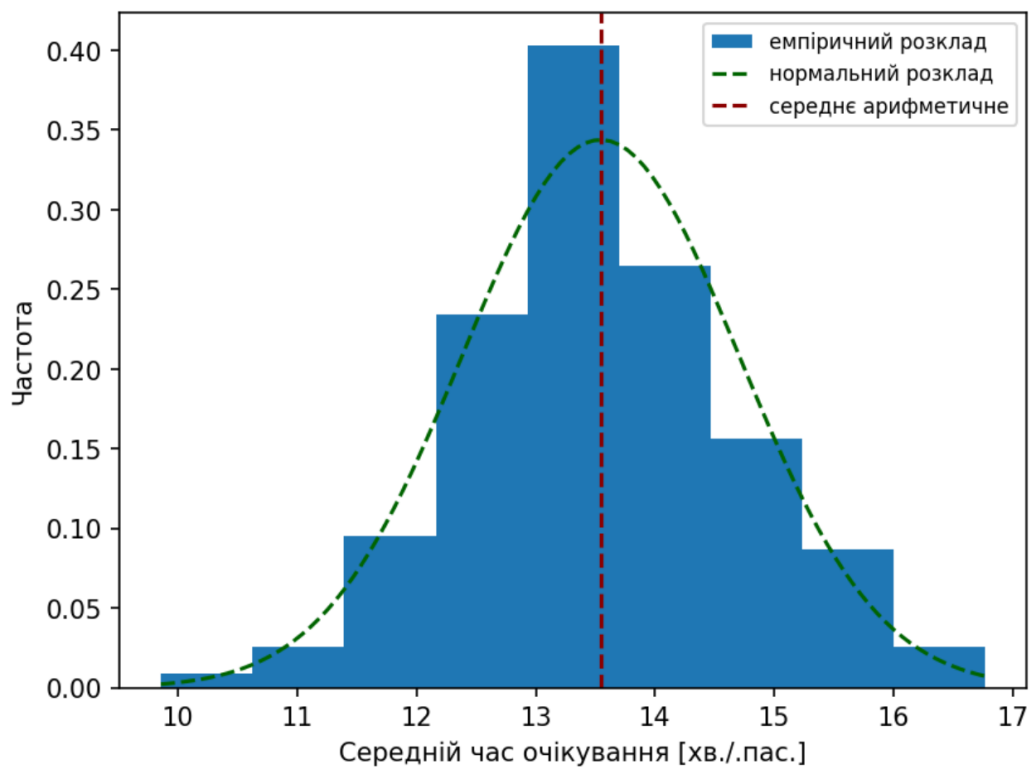


Рисунок 4.3 – Розподіл середнього часу очікування у транспортному вузлі «Автовокзал»

Це дозволило використовувати параметри, отримані під час польових досліджень, як детерміновану основу для налаштування імітаційної моделі центрального вузла мережі.

Водночас для решти зупиночних пунктів маршрутної мережі, де проведення суцільного інструментального обстеження було обмежене, використано метод стохастичного генерування параметрів випадкової величини. Зокрема, значення параметра масштабу експоненціального розподілу (середнього інтервалу підходу пасажирів) для цих зупинок було визначено на основі рівномірного розподілу в межах розрахункових інтервалів.

Розподіл середнього часу очікування, отриманий на підставі імітаційного експерименту для всієї маршрутної мережі м. Верхньодніпровськ, представлений на рисунку 4.4.

Для підтвердження статистичної достовірності отриманих даних було проведено перевірку гіпотези про відповідність розподілу випадкової величини середнього часу очікування пасажирів закону розподілу Гауса. Ця процедура виконувалася для кожного з реалізованих варіантів імітаційної моделі.

Основним інструментом перевірки гіпотез про нормальний розподіл було обрано критерій узгодженості Колмогорова-Смирнова, який дозволяє оцінити міру розбіжності між емпіричною та теоретичною функціями розподілу. Результати розрахунків підтвердили, що при прийнятому рівні значущості 5% нульові гіпотези про нормальний закон розподілу досліджуваних величин не відхиляються ($\lambda_{\text{емп}} = 0,72$) значно менше за критичне значення $\lambda_{\text{кр}} = 1,36$).

Відповідність розподілу середнього часу очікування нормальному закону дозволяє стверджувати, що варіативність часу очікування зумовлена сукупністю великої кількості незалежних стохастичних чинників, а не систематичними похибками моделі. Це підтверджує адекватність розробленого програмного інструментарію та дає змогу використовувати отримані середні значення часу очікування як надійний критерій для оцінки ефективності розкладів, оптимізованих за допомогою генетичного алгоритму.

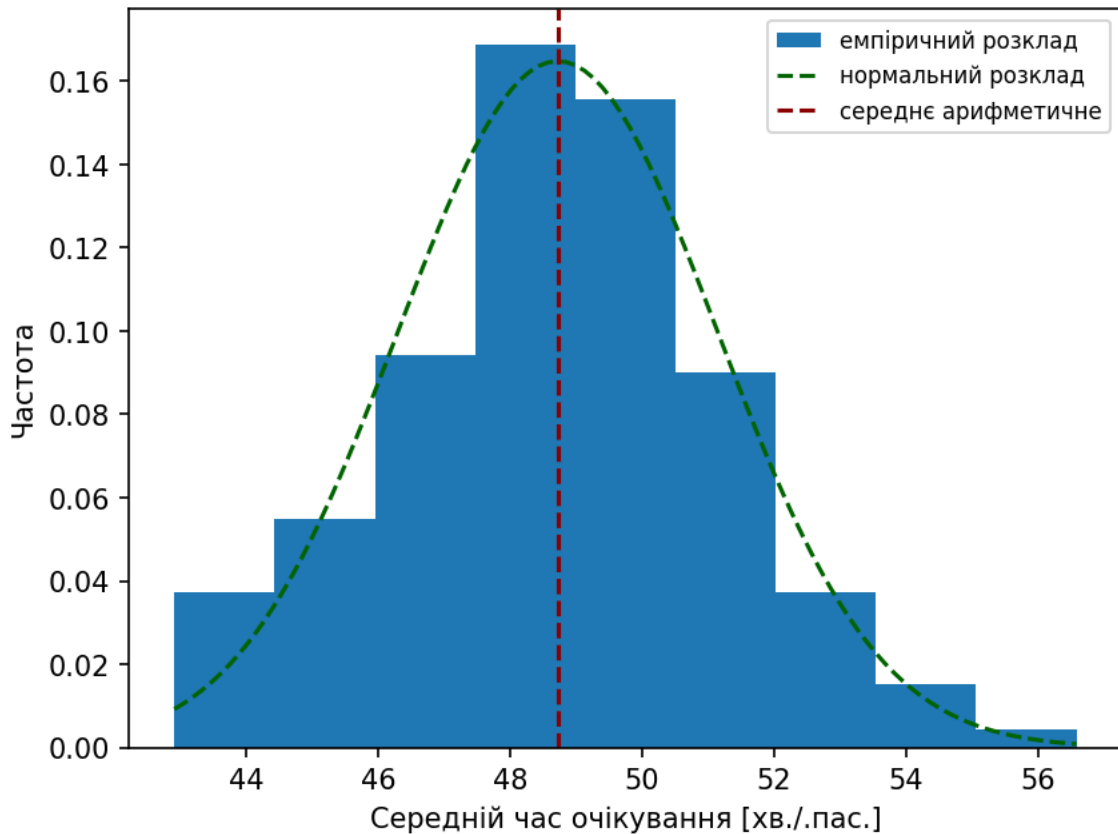


Рисунок 4.4 – Розподіл середнього часу очікування на зупинках мережі міського громадського пасажирського транспорту. м. Верхньодніпровськ

Результати моделювання вказують на суттєву диференціацію часових витрат пасажирів залежно від локації в межах системи МГПТ. Середній час очікування у центральному вузлі «Автовокзал» становить приблизно 14 хвилин, що є значно нижчим показником порівняно з аналогічним параметром для всієї маршрутної мережі міста, де середній час очікування сягає 48 хвилин.

Така значна розбіжність знаходить своє обґрунтування у топологічних та операційних особливостях функціонування системи. У вузлі «Автовокзал» зосереджена максимальна інтенсивність транспортного обслуговування, оскільки через цей пункт проходять усі діючі маршрути мережі. Висока частота прибуття транспортних засобів з різних напрямків забезпечує мінімізацію інтервалів очікування для пасажирів, які здійснюють посадку або пересадку у даному вузлі.

Натомість високе значення середнього мережевого часу очікування зумовлене наявністю значної кількості периферійних зупинок з низькою інтенсивністю руху,

де графіки обслуговування характеризуються тривалими інтервалами. Оскільки загальномережевий показник інтегрує дані з усіх зупиночних пунктів, включно з тими, де транспортне сполучення є менш регулярним, підсумкове значення у 48 хвилин відображає кумулятивний вплив нерівномірності розподілу провізної здатності за межами центрального ядра мережі. Така нерівномірність підкреслює критичну роль синхронізації розкладів саме для периферійних ділянок та приміських маршрутів №4 і №5, де оптимізація моментів прибуття до центрального вузла потенційно може знизити сумарні витрати часу пасажирів навіть за умови збереження існуючих інтервалів руху.

4.2 Результати синхронізації розкладів руху

У межах проведених експериментальних досліджень для розв'язання проблеми синхронізації розкладів руху було застосовано генетичний алгоритм, який виступив базовою евристичною процедурою пошуку глобального оптимуму. Реалізація цього підходу вимагала трансформації змінної рішення у специфічну структуру даних, придатну для еволюційних маніпуляцій, що було досягнуто через кодування вектору часових зсувів Ψ у форматі двійкової хромосоми. Цей вектор, що визначає параметри синхронізації для кожного маршруту міського громадського пасажирського транспорту, стає генетичним фундаментом для формування популяції потенційних рішень.

Процедура формування хромосоми розпочинається з дискретного кодування кожного окремого елемента ψ_λ вектора часового зсуву у двійковий рядок із використанням фіксованої кількості бітів, що виконують роль окремих генів. Наступним етапом є конкатенація цих двійкових представлень у єдину безперервну послідовність, яка формує повну хромосому конкретної особини в популяції. Таке об'єднання дозволяє однозначно відобразити параметри всього вектора Ψ та зафіксувати унікальну конфігурацію часових параметрів функціонування всієї транспортної мережі в межах одного математичного об'єкта.

Оцінка якості кожного сформованого рішення здійснюється через розрахунок функції пристосування на основі розробленої імітаційної моделі. Враховуючи високу стохастичність процесів формування пасажирського попиту та випадковий характер відхилень у середньому часі очікування $T^{(w)}$, одиничне виконання моделювання не може вважатися достовірним показником ефективності. Для нівелювання впливу випадкових факторів та отримання надійних результатів очікуване значення середнього часу очікування пасажирів визначається як середнє арифметичне за результатами серії незалежних імітаційних запусків моделі для кожної хромосоми. Такий підхід забезпечує статистичну стабільність показників та дозволяє використовувати отримані значення як показовий критерій пристосованості особини під час еволюційного відбору.

Для проведення пілотного запуску ГА було визначено комплекс специфічних параметрів евристики, спрямованих на досягнення раціонального балансу між глобальним дослідженням простору рішень та локальною експлуатацією знайдених екстремумів.

Одним із ключових показників став розмір вибірки для статистично значимої оцінки функції пристосування, встановлений на рівні 30 одиниць [121]. Цей параметр визначає кількість незалежних прогонів імітаційної моделі для кожного окремого кандидата на рішення, що дозволяє суттєво мінімізувати вплив стохастичної мінливості пасажиропотоків та отримати достовірну оцінку часу очікування пасажирів. Еволюційний процес був обмежений 20 поколіннями, що забезпечує достатній ітераційний прогрес для ґрунтовного вивчення ландшафту рішень та досягнення збіжності алгоритму.

Структура популяції в кожному поколінні підтримувалася на рівні 100 особин, де кожен екземпляр представляє унікальну комбінацію вектору часових зсувів Ψ . Враховуючи наявність у транспортній мережі Верхньодніпровська п'яти маршрутів, загальна довжина хромосоми склала 35 біт. Така конфігурація передбачає використання 7 біт для кодування значення часового зсуву ψ_λ кожного маршруту, що дозволяє варіювати зміщення графіків у діапазоні від 0 до 127 хв.

Для управління механізмами спадковості та мінливості було встановлено ймовірність кросинговеру на рівні 0,5. Даний показник регулює частоту обміну генетичним матеріалом між батьківськими хромосомами, сприяючи акумуляції корисних ознак у нових поколіннях рішень. Процес внесення випадкових змін у структуру популяції контролювався параметром мутації, згідно з яким для кожної обраної хромосоми випадковим чином інвертувалися 3 специфічні гени (біти). При загальній ймовірності мутації 0,2 такий підхід забезпечує необхідний рівень генетичної різноманітності, що дозволяє алгоритму ефективно уникати потрапляння в пастки локальних оптимумів.

Завершальною складовою налаштування став тиск відбору, встановлений на позначці 0,2. Це означає, що лише 20% найбільш пристосованих особин, які продемонстрували найкращі показники мінімізації часу очікування, зберігалися та використовувалися як основа для відтворення наступного покоління. Така стратегія елітизму в поєднанні з інтенсивною мутацією дозволила сформувати стійкий тренд до покращення цільової функції в пілотному експерименті.

4.2.1 Синхронізація у транспортному вузлі «Автовокзал»

Процес оптимізації розкладів для центрального пересадочного вузла «Автовокзал» за допомогою ГА продемонстрував чітку динаміку покращення цільової функції протягом еволюційного циклу. На початкових етапах моделювання значення середнього часу очікування характеризувалися значним розкидом та сягали показників від 14,5 хв. до 5,0 хв., проте вже після п'ятого покоління спостерігається стрімке зниження цього параметру. Аналіз окремих запусків процедури ГА, представлених на рисунку 4.5, підтверджує стабільну збіжність алгоритму до єдиного рішення, оскільки траєкторії різних обчислювальних циклів починають синхронізуватися після десятого покоління.

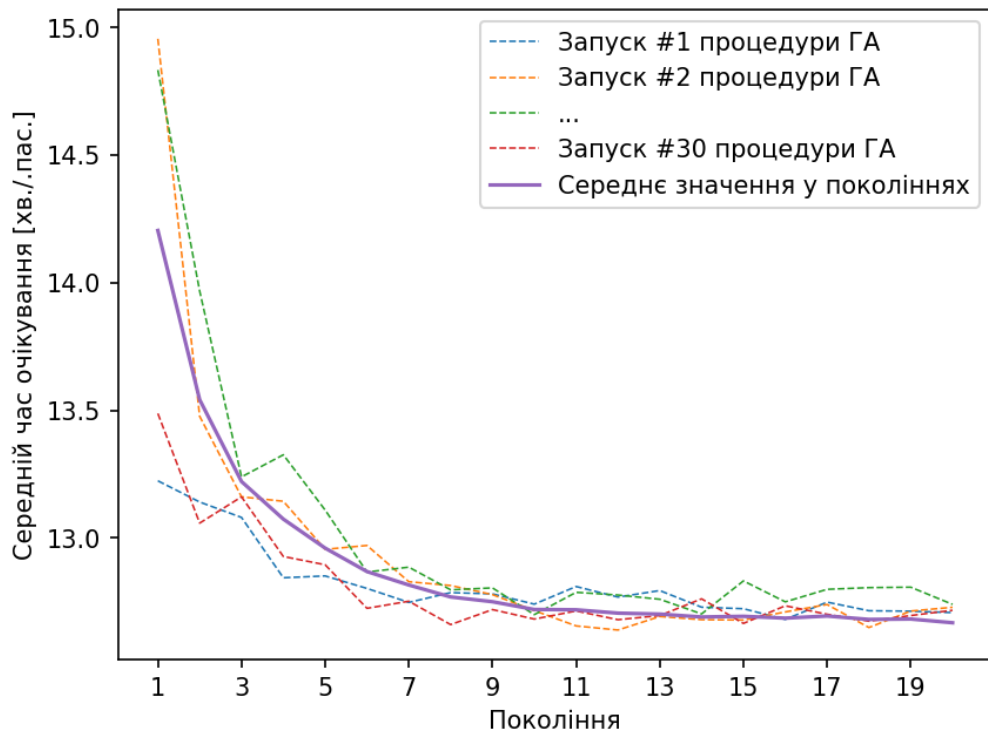


Рисунок 4.5 – Збіжність ГА при синхронізації у транспортному вузлі
«Автовокзал»

Завершальна фаза пілотного експерименту показує, що середнє значення часу очікування у поколіннях остаточно стабілізується після десятої ітерації, досягаючи рівня 12,6...12,7 хв. Це підтверджує успішну ідентифікацію близьких до оптимальних часових зсувів для всіх п'яти маршрутів, що обслуговують вузол «Автовокзал». Отримані результати валідують обраний розмір вибірки та параметри ГА, доводячи, що раціональна синхронізація розкладів дозволяє суттєво підвищити якість обслуговування пасажирів у центральній точці мережі МПТТ навіть за умови стохастичного характеру попиту.

У результаті реалізації процедури оптимізації за допомогою ГА визначено вектор часових зсувів $\Psi_1 = \langle 20, 15, 13, 22, 8 \rangle$. Для верифікації отриманого результату та оцінки досягнутого ефекту було проведено порівняльний аналіз початкової конфігурації розкладу, що відповідає вектору Ψ_0 , та оптимізованої конфігурації. Порівняння базується на статистичних даних, отриманих шляхом виконання 300 незалежних запусків імітаційної моделі для обох сценаріїв, що гарантує високу репрезентативність вибірки. Візуалізація розподілу середнього

часу очікування пасажирів для зазначених конфігурацій розкладу представлена на рисунку 4.6, де чітко простежується зміщення значень у бік мінімізації часових витрат після застосування алгоритму.

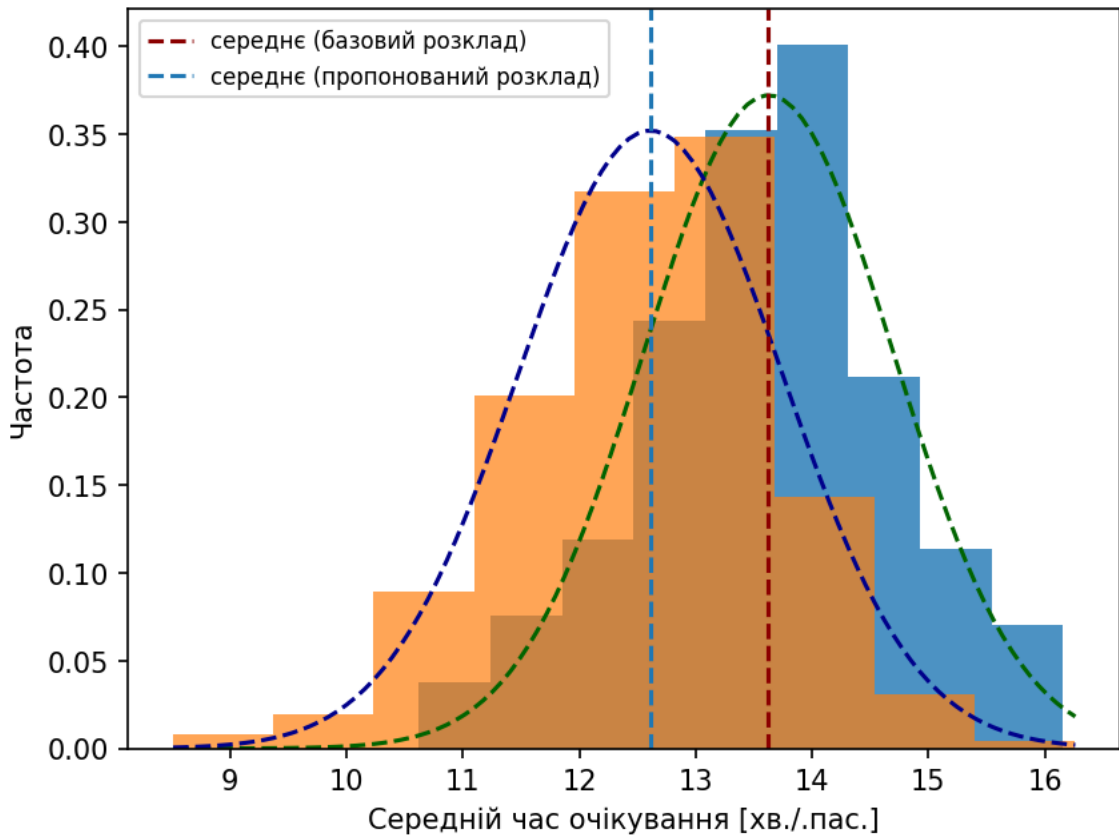


Рисунок 4.6 – Розподіл середнього часу очікування для базового та оптимізованого розкладу у вузлі «Автовокзал»

Необхідно зауважити, що процедура ГА дає змогу визначити один із можливих варіантів вектору часових зсувів, який забезпечує досягнення близьких до мінімальних значень функції пристосування. Водночас отриманий результат не є єдиним безальтернативним розв'язанням задачі, оскільки специфіка ландшафту цільової функції в системах міського громадського пасажирського транспорту передбачає існування інших варіантів вектору Ψ , здатних забезпечити аналогічний рівень середнього часу очікування пасажирів.

4.2.2 Синхронізація у мережі міського громадського пасажирського транспорту

Запуск ГА для синхронізації розкладів у мережі МГПТ дозволив сформувати масив рішень-кандидатів, спрямованих на стратегічну оптимізацію синхронізації розкладів громадського транспорту міста Верхньодніпровськ. Динаміка результатів цього пілотного експерименту, яка відображена на рисунку 4.7, демонструє виражену збіжність обчислювального процесу. Значення функції придатності для найкращого рішення в кожному поколінні зазнає суттєвої стабілізації після 15-ої ітерації, що свідчить про високу ефективність ГА в дослідженні простору рішень та його здатність ідентифікувати близькі до оптимальних конфігурації часових зсувів за відносно невелику кількість генерацій.

Паралельно з ітераційним пошуком було проведено верифікацію статистичної адекватності обраної методики оцінювання. Зокрема, перевірка розміру вибірки, що включала 30 незалежних запусків моделювання для кожної оцінки придатності, підтвердила надійність отриманих даних. Розрахунок необхідної кількості спостережень для забезпечення 95% довірчої ймовірності (при рівні значущості 5%) показав, що фактична потреба в даних ніколи не перевищувала встановленого ліміту у 30 ітерацій. Ця статистична валідація гарантує надійність оцінок цільової функції в межах функціонування генетичного алгоритму та підтверджує об'єктивність і достовірність знайдених оптимальних розв'язків.

Для наочної демонстрації переваг процедури синхронізації було виконано розширене імітаційне моделювання, що охопило 300 циклів симуляції для двох сценаріїв. Перший сценарій базувався на існуючій конфігурації розкладу, визначеній вектором часових зсувів Ψ_0 , тоді як другий сценарій представляв оптимізований за допомогою ГА розклад із вектором $\Psi_2 = \langle 24, 1, 5, 44, 8 \rangle$.

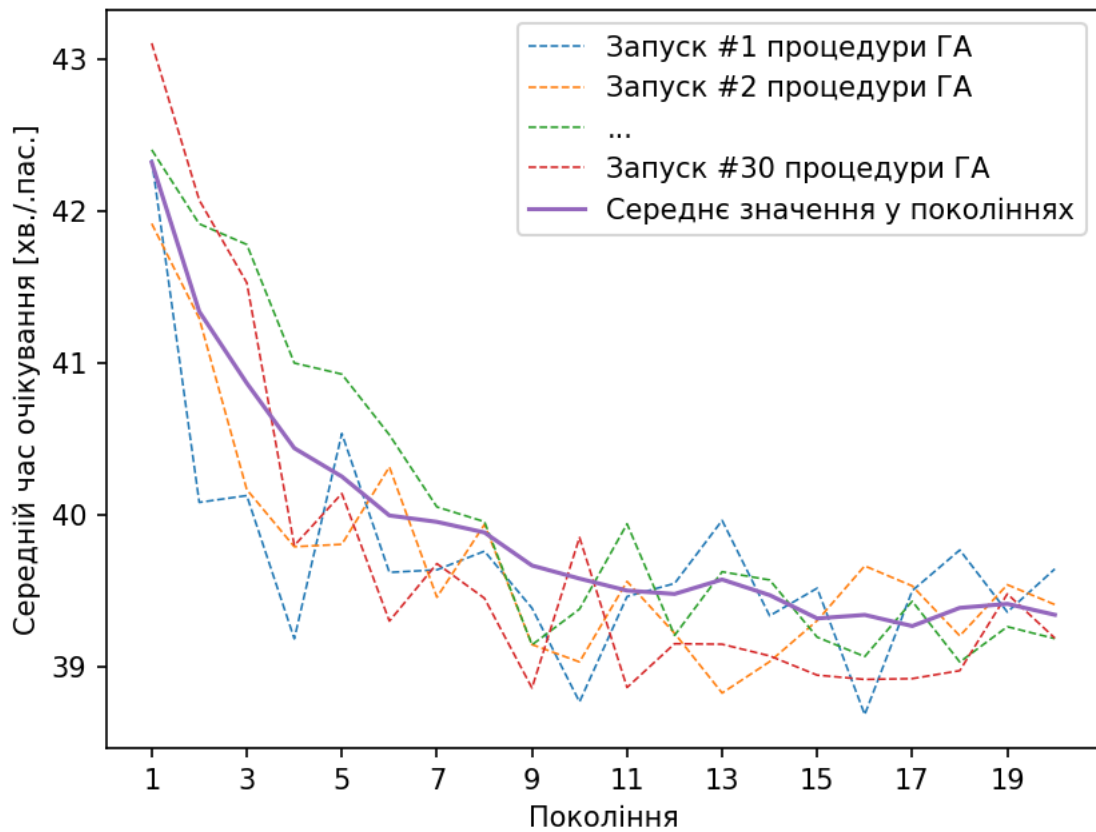


Рисунок 4.7 – Збіжність ГА при синхронізації у мережі
м. Верхньодніпровськ

Порівняльний аналіз розподілу середнього часу очікування пасажирів, представлений на рисунку 4.8, ілюструє якісну перевагу другого варіанта.

Важливою характеристикою отриманих результатів є не лише зменшення середнього часу очікування, а й помітне звуження діапазону значень у розподілі для оптимізованого варіанта. Обидві вибірки успішно проходять перевірку на відповідність закону нормального розподілу, проте менша дисперсія для запропонованого розкладу свідчить про вищу надійність транспортної системи.

Варто зазначити, що знайдений вектор часових зсувів Ψ_2 дозволяє мінімізувати негативні наслідки стохастичного формування пасажиропотоків та забезпечує максимально можливу синхронізацію прибуття транспортних засобів до пересадочних вузлів у межах існуючих ресурсних обмежень.

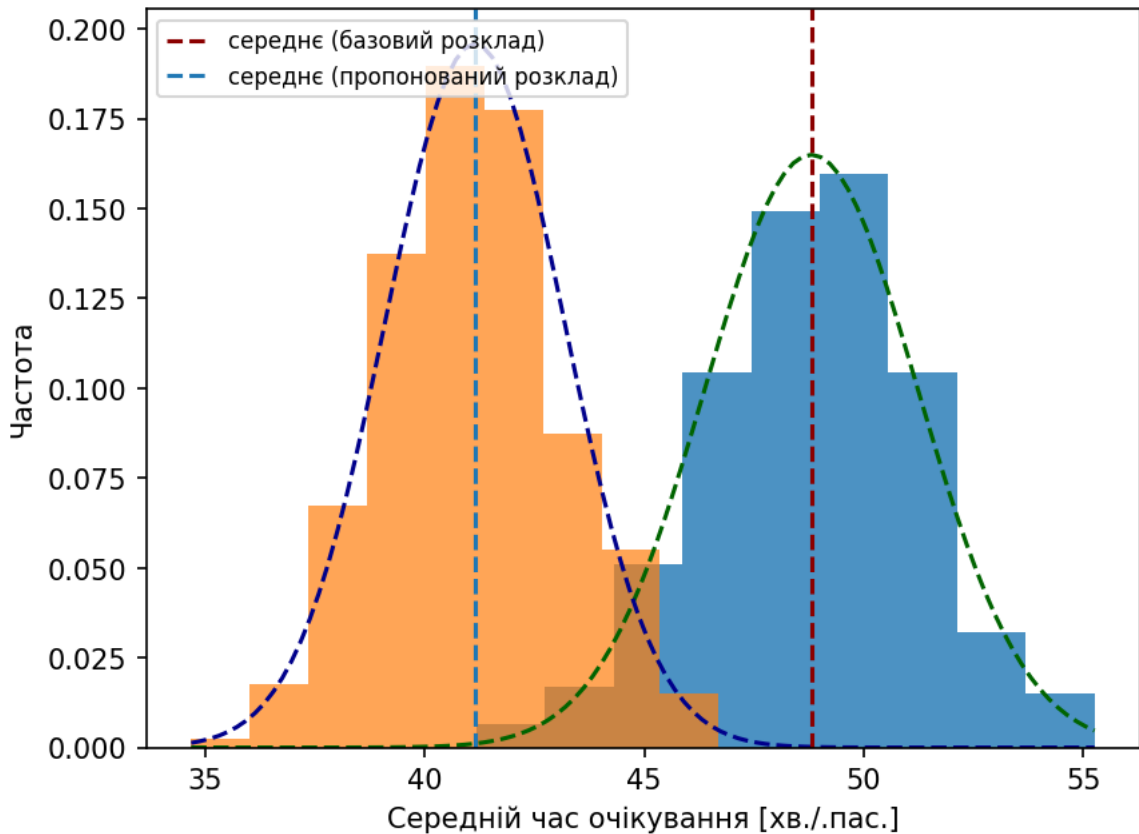


Рисунок 4.8 – Розподіл загального часу очікування для базового та оптимізованого розкладу у мережі м. Верхньодніпровськ

Аналогічно до сценарію синхронізації в окремому транспортному вузлі, робота генетичного алгоритму в масштабах усієї мережі дозволяє ідентифікувати один із множини потенційних векторів часових зсувів, що гарантує досягнення показників цільової функції, максимально наближених до глобального оптимуму. Тобто отриманий вектор Ψ_2 не є єдиним безальтернативним рішенням задачі синхронізації у всій мережі МГПТ.

4.3 Дослідження впливу параметрів генетичного алгоритму на результати синхронізації розкладів руху

Процес налаштування генетичного алгоритму вимагає глибокого розуміння взаємодії між його внутрішніми механізмами, оскільки продуктивність пошуку безпосередньо залежить від коректності вибору евристичних параметрів. Кожен із цих параметрів відіграє специфічну роль у забезпеченні балансу між розширенням

області пошуку та зосередженням на перспективних рішеннях. До параметрів із прямим впливом на якість результату належить кількість поколінь, оскільки тривалість еволюційного процесу визначає глибину опрацювання ландшафту цільової функції. До певної межі систематичне збільшення ітерацій сприяє стабілізації розв'язку, проте після досягнення точки збіжності подальші обчислення стають надлишковими, що вимагає точного визначення моменту зупинки.

Окрему групу становлять контекстно-залежні параметри, налаштування яких неможливе без врахування фізичних характеристик транспортної мережі Верхньодніпровська. Наприклад, структура генетичного кодування, зокрема бітова довжина хромосоми, жорстко детермінована кількістю діючих маршрутів та встановленими межами часових інтервалів руху. Це означає, що параметри, які є ефективними для невеликої мережі з п'яти маршрутів, можуть виявитися непридатними для складніших систем, оскільки кожний новий маршрут додає додатковий вимір у простір пошуку, вимагаючи індивідуальної адаптації розрядності генів.

Для системної оцінки ефективності синхронізації в даній дисертаційній роботі виділено чотири параметри ГА, серед яких розмір популяції S_p визначає обсяг одночасного дослідження альтернативних варіантів у кожному поколінні. Велика популяція забезпечує ширше охоплення простору рішень, але пропорційно збільшує обчислювальні витрати на імітаційне моделювання кожного зразка. Ймовірність кросинговеру p_c керує інтенсивністю обміну успішними фрагментами розкладів між батьківськими особинами, тоді як ймовірність мутації p_m та кількість мутацій на одну хромосому t_m виконують роль механізмів виходу з локальних оптимумів. Через випадкову інверсію окремих бітів у векторі часових зсувів ці параметри дозволяють генетичному алгоритму більш ефективно досліджувати ландшафт функції придатності, запобігаючи передчасній збіжності.

Методологія експериментального дослідження передбачала послідовне варіювання кожного з цих параметрів у заздалегідь визначених межах із фіксованим кроком зміни. Такий підхід дозволив проаналізувати чутливість моделі до налаштувань алгоритму та виявити ті зони значень, де досягається найшвидша

збіжність при мінімальних витратах часу очікування пасажирів. Отримана в ході тестів аналітична база стала основою для формулювання практичних рекомендацій щодо конфігурування генетичних алгоритмів при вирішенні аналогічних задач синхронізації розкладів руху у системах МГПТ.

Для глибинного розуміння того, як саме налаштування алгоритму впливають на якість транспортного обслуговування, застосовано математичний апарат регресійного аналізу. Цей метод дозволяє вийти за межі простого спостереження за результатами та перейти до кількісної оцінки внеску кожного параметра у процес мінімізації часу очікування пасажирів. Використання регресії дає змогу виділити чистий ефект від зміни конкретної характеристики алгоритму, ігноруючи випадкові коливання, що виникають під час імітаційного моделювання. Статистична значущість отриманих коефіцієнтів регресії виступає надійним індикатором того, чи є покращення результатів наслідком цілеспрямованого коригування параметрів, чи воно має випадковий характер.

Центральною метрикою та залежною змінною в усіх побудованих моделях виступає середній час очікування пасажирів $T^{(w)}$. Оскільки ця величина безпосередньо відображає якість синхронізації розкладів, вона стає ідеальним індикатором для оцінки перебігу генетичного алгоритму: чим ефективніше алгоритм досліджує простір рішень, тим нижчим стає значення цієї змінної. Для проведення детального аналізу було сформовано три типи лінійних моделей, кожна з яких фокусується на окремих аспектах еволюційного пошуку:

$$T^{(w)} = \beta_0 + \beta_s \cdot S_p, \quad (4.1)$$

$$T^{(w)} = \beta_0 + \beta_c \cdot p_c, \quad (4.2)$$

$$T^{(w)} = \beta_0 + \beta_m \cdot p_m + \beta_t \cdot t_m, \quad (4.3)$$

де β_0 – коефіцієнт регресійної моделі, що встановлює базову лінію для прогнозованого середнього часу очікування, від якої потім додаються або віднімаються ефекти параметрів ГА;

β_s , β_c , β_m та β_t – коефіцієнти регресії, які кількісно визначають питомий вплив розміру популяції, ймовірності кросинговера, ймовірності мутації та кількості поворотів мутації на хромосому відповідно на результати оптимізації.

Модель (4.1) досліджує вплив розміру популяції S_p , де коефіцієнт β_s показує, як розширення пулу альтернативних рішень у кожному поколінні корелює зі зміною часу очікування.

Модель (4.2) фокусується на операторі кросинговеру, де параметр β_c дозволяє оцінити роль інтенсивності обміну генетичним матеріалом між батьками розкладами, що є підставою для формування нових альтернативних варіантів розкладів громадського транспорту.

Регресійна модель (4.3) аналізує мутаційні процеси, поєднуючи в одному рівнянні ймовірність мутації p_m та кількість мутаційних змін у хромосомі t_m . Це дозволяє виявити не лише індивідуальний, а й сукупний вплив механізмів випадкового пошуку на здатність алгоритму виходити з локальних оптимумів.

У кожній із наведених моделей критично важливу роль відіграє вільний член β_0 . Він встановлює теоретичну базову лінію — середній час очікування, який би спостерігався при нульових або мінімальних значеннях параметрів. Коефіцієнти β_s , β_c , β_m та β_t виступають у ролі вагових множників: їхній знак вказує на напрямок впливу (зменшення або збільшення часу очікування), а абсолютне значення демонструє чутливість системи МГПТ до відповідного налаштування. Такий підхід перетворює процес налаштування ГА з емпіричного підбору на науково обґрунтоване проектування оптимальної пошукової стратегії для конкретної мережі МГПТ.

Для систематичної оцінки впливу параметрів ГА на ефективність застосування алгоритму, в експериментальних дослідженнях, проведених в рамках даної наукової роботи, прийнято межі та розміри кроків для кожного з цих параметрів, які представлені в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Границі варіювання параметрів ГА при проведенні експериментальних досліджень

Параметр евристики	Нижня границя	Верхня границя	Крок зміни значень
Розмір популяції	20	200	20
Ймовірність кросинговеру	0,1	1,0	0,1
Ймовірність мутації	0,05	0,5	0,05
Кількість мутацій	1	10	1

Для оцінювання статистичної значущості впливу кожного параметра генетичного алгоритму на ефективність синхронізації розкладів використовується аналіз довірчих інтервалів отриманих коефіцієнтів регресії. У межах даного дослідження встановлено стандартний для наукових розрахунків поріг значущості на рівні 5%, що відповідає 95% довірчої ймовірності. Ключовим критерієм значущості є відсутність нуля в межах розрахованого довірчого інтервалу для конкретного коефіцієнта β . Якщо інтервал не перетинає нульову позначку, це свідчить про наявність стійкого причинно-наслідкового зв'язку між налаштуванням алгоритму та кінцевим результатом. Такий статистичний висновок дозволяє з високим ступенем впевненості стверджувати, що варіація відповідного параметра ГА спричиняє прогнозовані та відтворювані зміни в ефективності оптимізації.

Окрім підтвердження самого факту впливу, принципове значення має алгебраїчний знак значущого коефіцієнта, оскільки він визначає вектор спрямованості впливу параметра на цільову функцію. Від'ємне значення коефіцієнта ($\beta < 0$) свідчить про обернену залежність: підвищення значення відповідного параметра (наприклад, збільшення розміру популяції) сприяє досягненню кращих результатів оптимізації, що математично виражається у зниженні середнього часу очікування пасажирів $T^{(w)}$. Це вказує на те, що параметр стимулює пошукову здатність алгоритму, дозволяючи швидше знаходити ефективні комбінації часових зсувів.

Натомість додатне значення коефіцієнта ($\beta > 0$) вказує на пряму залежність, за якої збільшення параметра призводить до погіршення показників роботи транспортної мережі, зумовлюючи небажане зростання часових витрат. Такий ефект може спостерігатися, наприклад, при надмірній інтенсивності мутацій, яка починає руйнувати вже знайдені вдалі рішення, перетворюючи спрямований еволюційний пошук на хаотичне блукання. Таким чином, аналіз знаків і значущості коефіцієнтів регресії стає інструментом прецизійного налаштування алгоритму, дозволяючи досліднику точно визначити, які параметри слід максимізувати, а які – обмежувати для досягнення найвищої якості обслуговування пасажирів системи міського громадського пасажирського транспорту.

У даному розділі дисертації представлено аналіз результатів проведених експериментальних досліджень, де особлива увага приділяється впливу параметрів ГА на показники ефективності функціонування системи МГПТ. Основною метрикою оцінки виступає середній час очікування пасажирів, динаміка якого в процесі еволюційного пошуку дозволяє судити про якість досягнутої синхронізації.

Представлені результати інтегрують три фундаментальні показники ефективності, що дозволяють оцінити роботу ГА з різних аналітичних ракурсів. Зокрема, розглядається найменше значення середнього часу очікування, яке ідентифікує межу потенційної ефективності системи та вказує на найкращу з можливих конфігурацій розкладу, знайдених ГА. Поряд із цим аналізується усереднений показник часу очікування, що відображає загальну збіжність популяції та стабільність пошукового процесу в межах заданих параметрів. Нарешті, фіксація найбільших значень часу очікування дозволяє оцінити розмах варіації та стійкість алгоритму до передчасної збіжності, що є критично важливим для верифікації надійності запропонованих рішень у реальних умовах обслуговування пасажирів міського громадського пасажирського транспорту.

Такий підхід до інтерпретації результатів дозволяє обґрунтувати вибір конкретних налаштувань алгоритму як найбільш раціональних для конкретної мережі міського громадського пасажирського транспорту. Аналіз амплітуди між екстремальними та середніми значеннями в процесі синхронізації виступає

індикатором щільності пошуку, підтверджуючи, що знайдений вектор часових зсувів є результатом ґрунтового дослідження простору станів, а не випадкового збігу обставин.

4.3.1 Результати аналізу для процедури синхронізації у транспортному вузлі

Цей розділ присвячено викладу результатів серії обчислювальних експериментів, метою яких було встановлення причинно-наслідкових зв'язків між внутрішніми налаштуваннями ГА та результативністю синхронізації розкладів у межах конкретного пересадочного вузла. Завдяки залученню апарату статистичного моделювання та методів лінійної регресії в рамках даної роботи отримано кількісні оцінки впливу розміру популяції, ймовірності кросинговеру та специфічних операторів мутації на середній час очікування пасажирів як цільової функції. Сформований масив результатів проведених експериментальних досліджень створює необхідне підґрунтя для розробки науково обґрунтованої методики конфігурування ГА при синхронізації розкладів у конкретному пересадочному вузлі.

4.3.1.1 Вплив розміру популяції на ефективність процедури синхронізації

Представлені на рисунку 4.9 результати експерименту відображають емпіричну залежність, що описує вплив розміру популяції S_p на середній час очікування пасажирів $T^{(w)}$ під час проведення процедури синхронізації в окремому пересадочному вузлі. Графік демонструє зміну трьох ключових показників ефективності – найменшого, найбільшого та середнього значень часу очікування – у діапазоні зміни розміру популяції від 20 до 200 одиниць. Для кожної з цих метрик на рисунку 4.9 нанесено відповідні лінії трендів, які мають виражений негативний нахил, що візуально підтверджує послідовну зворотну кореляцію між збільшенням розміру популяції та часовими витратами пасажирів.

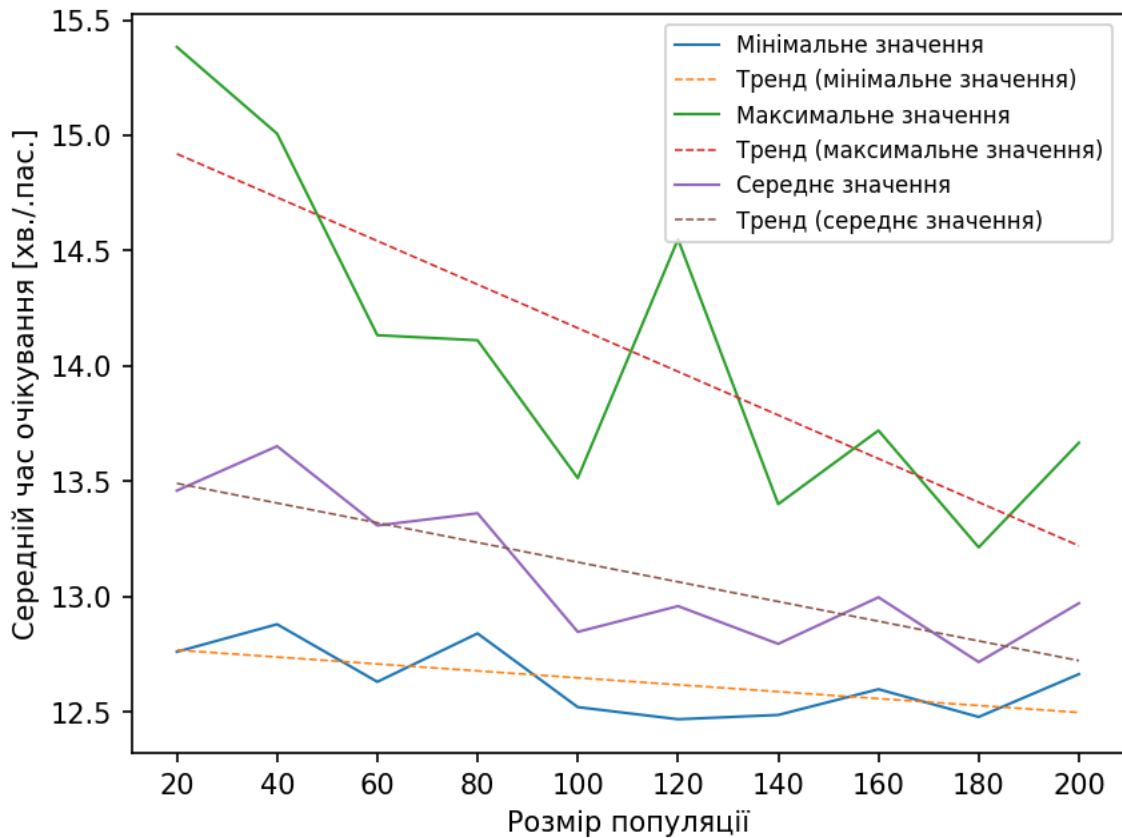


Рисунок 4.9 – Залежність часу очікування від розміру популяції для процедури синхронізації в пересадочному вузлі

Найменше значення часу очікування, позначене синьою лінією, демонструє тенденцію до стабілізації на рівні близько 12,5-12,7 хв./пас. при досягненні популяцією розміру понад 100 одиниць, що вказує на поступове наближення алгоритму до оптимальних рішень. Водночас максимальні значення, представлені зеленою лінією, характеризуються суттєвою стохастичною мінливістю, проте їхній загальний тренд спрямований донизу, що свідчить про зростання здатності алгоритму уникати найменш ефективних рішень за умови залучення більшої кількості особин. Лінія середніх значень виступає інтегральним показником загальної продуктивності генетичного алгоритму, демонструючи покращення якості оптимізації розкладу зі зростанням S_p .

Об'єктивність візуальних спостережень, зафіксованих на рисунку 4.9, повністю узгоджується з даними регресійного аналізу, наведеними у таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Результати оцінки статистичної значущості впливу розміру популяції на ефективність ГА при синхронізації в пересадочному вузлі

Рівень значень $T^{(w)}$	Коефіцієнт регресії β_s	Довірчий інтервал	Значимість параметра
Найменший	-0,0015	(-0,0026; -0,0004)	Так
Найбільший	-0,0094	(-0,0153; -0,0036)	Так
Середній	-0,0043	(-0,0067; -0,0018)	Так

Для всіх трьох рівнів значень $T^{(w)}$ розрахований коефіцієнт регресії β_s має від’ємне значення, що підтверджує факт зниження часу очікування при збільшенні розміру популяції. Відсутність нуля в межах усіх зазначених довірчих інтервалів дозволяє стверджувати, що вплив розміру популяції на результати синхронізації є статистично значущим і прогнозованим для даної транспортної моделі.

4.3.1.2 Вплив імовірності кросоверу на ефективність процедури синхронізації

Результати емпіричного аналізу, представлені на рисунку 4.10, ілюструють характер залежності середнього часу очікування пасажирів від зміни ймовірності кросинговеру при синхронізації розкладів у пересадочному вузлі. Візуалізація даних вказує на поступове зниження часових витрат при підвищенні інтенсивності оператора кросинговеру, що найбільш чітко простежується для показників мінімального та середнього часу очікування. Найменші значення при максимальній імовірності кросинговеру стабілізуються на рівні нижче 12,5 хв./пас., що підтверджує ефективність посилення обміну генетичним матеріалом для пошуку оптимальних розкладів. Водночас крива максимальних значень демонструє значну амплітуду коливань, свідчачи про те, що даний параметр не має вирішального впливу на початкові невдалі ітерації алгоритму.

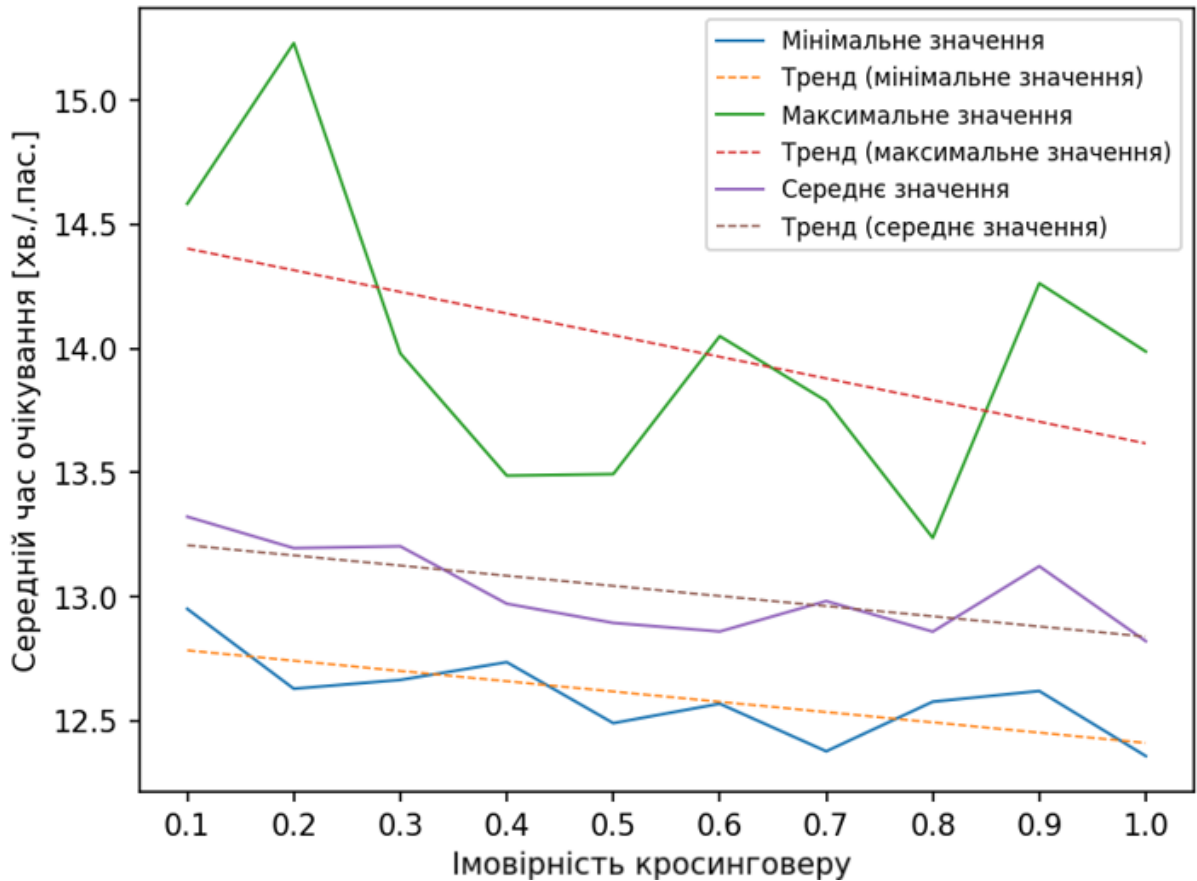


Рисунок 4.10 – Залежність часу очікування від імовірності кросингверу для процедури синхронізації в пересадочному вузлі

Статистичне обґрунтування наведених спостережень базується на даних таблиці 4.9, де систематизовано розраховані коефіцієнти регресії β_c та їхні відповідні довірчі інтервали для різних рівнів значень $T^{(w)}$. Для найменшого рівня значень коефіцієнт регресії становить $-0,415$, а для середнього показника він дорівнює $-0,409$. Оскільки в обох зазначених випадках довірчі інтервали, а саме $(-0,738; -0,091)$ та $(-0,748; -0,070)$ відповідно, не містять нуля, можна стверджувати, що вплив ймовірності кросингверу на ці параметри є статистично значущим. Від’ємне значення цих коефіцієнтів підтверджує, що інтенсифікація процесу кросингверу безпосередньо сприяє покращенню якості синхронізації.

На противагу цьому, аналіз найбільшого рівня значень виявляє іншу закономірність, де коефіцієнт регресії $-0,872$ супроводжується широким довірчим інтервалом від $-2,293$ до $0,548$. Оскільки цей інтервал охоплює нульове значення, параметр визнається статистично незначущим для даного рівня значень $T^{(w)}$. Це

вказує на відсутність підтвердженого та передбачуваного впливу ймовірності кросинговеру на найгірші результати процедури. Хоча збільшення ймовірності кросинговеру гарантовано покращує середні та найкращі показники розкладу, вона не є інструментом, здатним стабільно нівелювати появу окремих невдалих рішень з високим часом очікування.

Таблиця 4.9– Результати оцінки статистичної значущості впливу ймовірності кросинговеру на ефективність ГА при синхронізації в пересадочному вузлі

Рівень значень $T^{(w)}$	Коефіцієнт регресії β_c	Довірчий інтервал	Значимість параметра
Найменший	-0,415	(-0,738; -0,091)	Так
Найбільший	-0,872	(-2,293; 0,548)	Ні
Середній	-0,409	(-0,748; -0,070)	Так

Таким чином, сукупний аналіз графічних та табличних даних дозволяє зробити висновок про доцільність встановлення високих значень ймовірності кросинговеру для підвищення загальної операційної ефективності генетичного алгоритму. Таке налаштування забезпечує стабільніше досягнення цілей оптимізації та дозволяє суттєво знизити очікувані витрати часу пасажирів у транспортній системі. Незважаючи на стохастичну природу окремих невдалих прогонів, загальний вектор впливу параметра залишається позитивним для більшості метрик ефективності.

4.3.1.3 Вплив ймовірності мутації та кількості мутованих генів на ефективність процедури синхронізації

Результати аналізу чутливості середнього часу очікування пасажирів до зміни ймовірності мутації p_m у процесі синхронізації розкладів у пересадочному вузлі представлено на рисунку 4.11 та в таблиці 4.10.

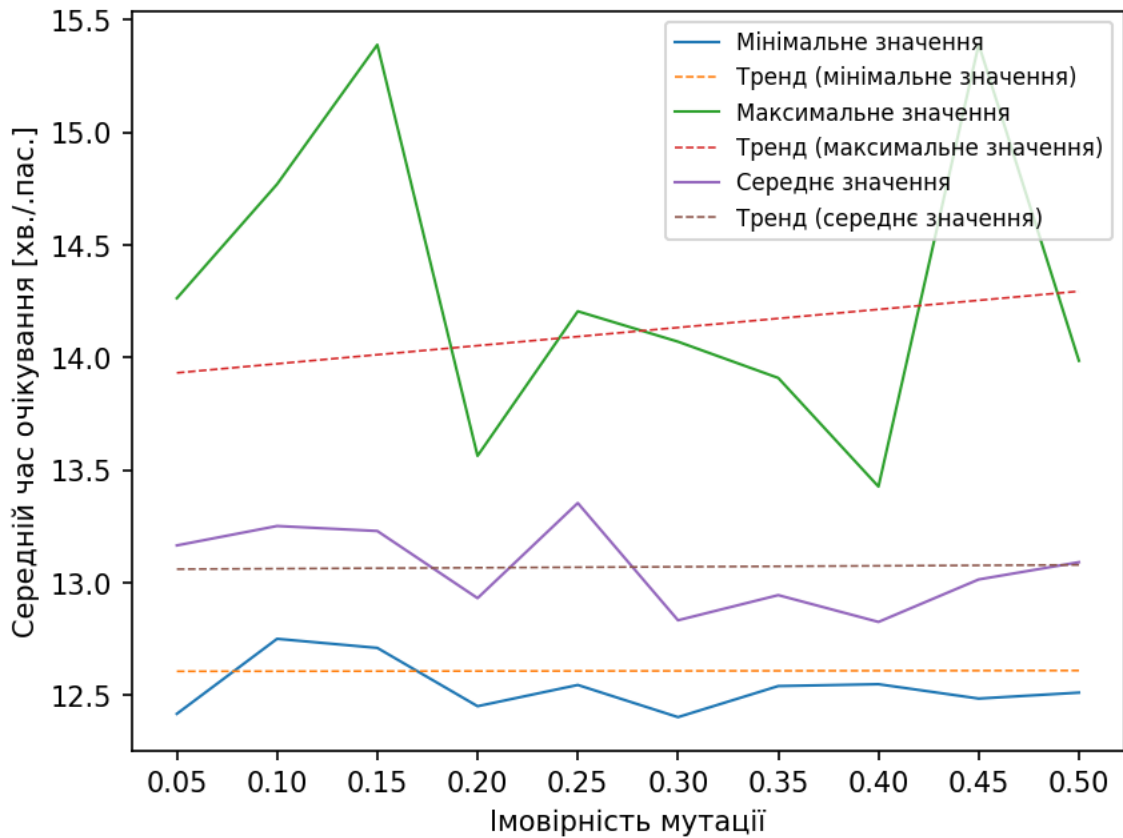


Рисунок 4.11 – Залежність часу очікування від імовірності мутації для процедури синхронізації в пересадочному вузлі

Статистичні дані, наведені у таблиці 4.10, повністю підтверджують візуальні спостереження щодо низької значущості цього параметра. Ключовим моментом є те, що довірчі інтервали для всіх трьох представлених рівней значень $T^{(w)}$ охоплюють нульове значення. Наявність нуля в межах довірчих інтервалів підтверджує, що в межах проведеного експерименту ймовірність мутації не має статистично значущого впливу на жоден із рівнів значень середнього часу очікування. Це дозволяє стверджувати, що для розглянутої задачі синхронізації у вузлі просте коригування імовірності мутацій не є дієвим інструментом підвищення операційної ефективності ГА.

Результати аналізу впливу кількості мутацій на хромосому t_m на ефективність процедури синхронізації у транспортному вузлі представлено на рисунку 4.12 та у таблиці 4.11.

Таблиця 4.10 – Результати оцінки статистичної значущості впливу ймовірності мутації на ефективність ГА при синхронізації в пересадочному вузлі

Рівень значень $T^{(w)}$	Коефіцієнт регресії β_m	Довірчий інтервал	Значимість параметра
Найменший	0,0026	(-0,0071; 0,0124)	Ні
Найбільший	-0,0252	(-0,0771; 0,0267)	Ні
Середній	-0,0065	(-0,0199; 0,0069)	Ні

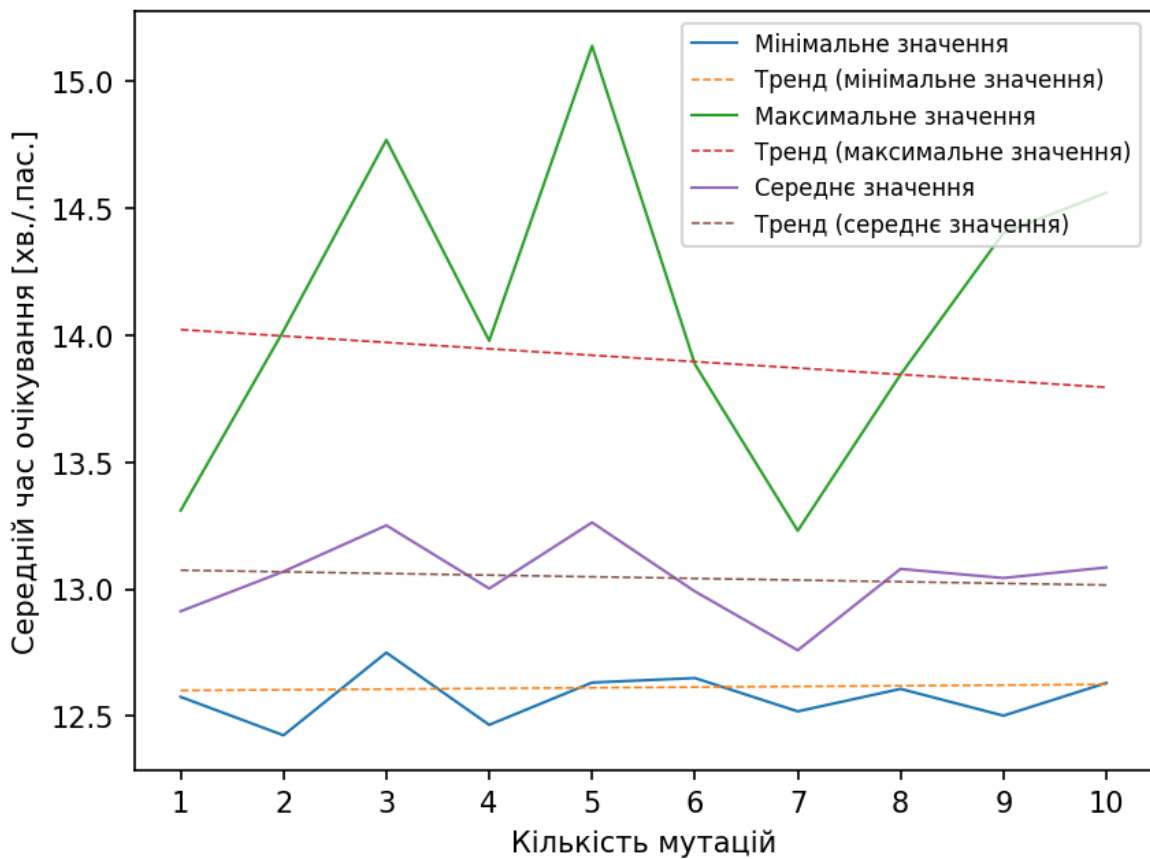


Рисунок 4.12 – Залежність часу очікування від кількості мутацій для процедури синхронізації в пересадочному вузлі

Графічна інтерпретація даних на рисунку 4.12 демонструє відносно стабільну динаміку всіх показників середнього часу очікування при зміні параметра t_m у діапазоні від 1 до 10. Лінії трендів для мінімального, середнього та максимального значень мають майже горизонтальний характер, що вказує на відсутність вираженої лінійної залежності між кількістю мутацій та результативністю пошуку

оптимального розкладу. Як і у випадку з ймовірністю мутації, показник найбільшого часу очікування відрізняється суттєвою амплітудою коливань, проте загальний вектор змін залишається несуттєвим для загальної оцінки продуктивності алгоритму.

Таблиця 4.11 – Результати оцінки статистичної значущості впливу кількості мутацій на ефективність ГА при синхронізації в пересадочному вузлі

Рівень значень $T^{(w)}$	Коефіцієнт регресії β_t	Довірчий інтервал	Значимість параметра
Найменший	0,0077	(-0,1873; 0,2027)	Ні
Найбільший	0,8052	(-0,2330; 1,8435)	Ні
Середній	0,0420	(-0,2266; 0,3106)	Ні

Результати статистичних розрахунків, наведені у таблиці 4.10, надають кількісне підтвердження візуально зафіксованій низькій значущості даного параметра. Коефіцієнт регресії β_t для найменшого рівня значень становить 0,0077, для найбільшого – 0,8052, а для середнього – 0,042. Аналіз довірчих інтервалів свідчить про те, що всі вони охоплюють нуль. Наявність нуля в межах довірчих інтервалів для кожного з досліджуваних рівнів значень $T^{(w)}$ дозволяє зробити остаточний висновок про відсутність статистично значущого впливу кількості мутацій на результати роботи генетичного алгоритму в межах даного дослідження. Це підтверджує, що інтенсифікація оператора мутації через збільшення кількості на кожному хромосому не є критичним фактором для досягнення цілей мінімізації часу очікування пасажирів, а основний внесок у якість синхронізації забезпечується іншими параметрами, такими як розмір популяції та ймовірність кросинговеру.

4.3.2 Результати аналізу для процедури синхронізації у мережі міського громадського пасажирського транспорту.

4.3.2.1 Вплив розміру популяції на ефективність процедури синхронізації

Аналіз емпіричних залежностей між середнім часом очікування пасажирів $T^{(w)}$ та розміром популяції S_p , представлений на рисунку 4.13, дозволяє простежити чітку закономірність впливу обсягу генетичного пошуку на ефективність синхронізації. Побудовані моделі регресії та відповідні статистичні показники, наведені у таблиці 4.12, надають кількісне підтвердження виявленим трендам, фіксуючи значення коефіцієнтів та межі їхніх довірчих інтервалів.

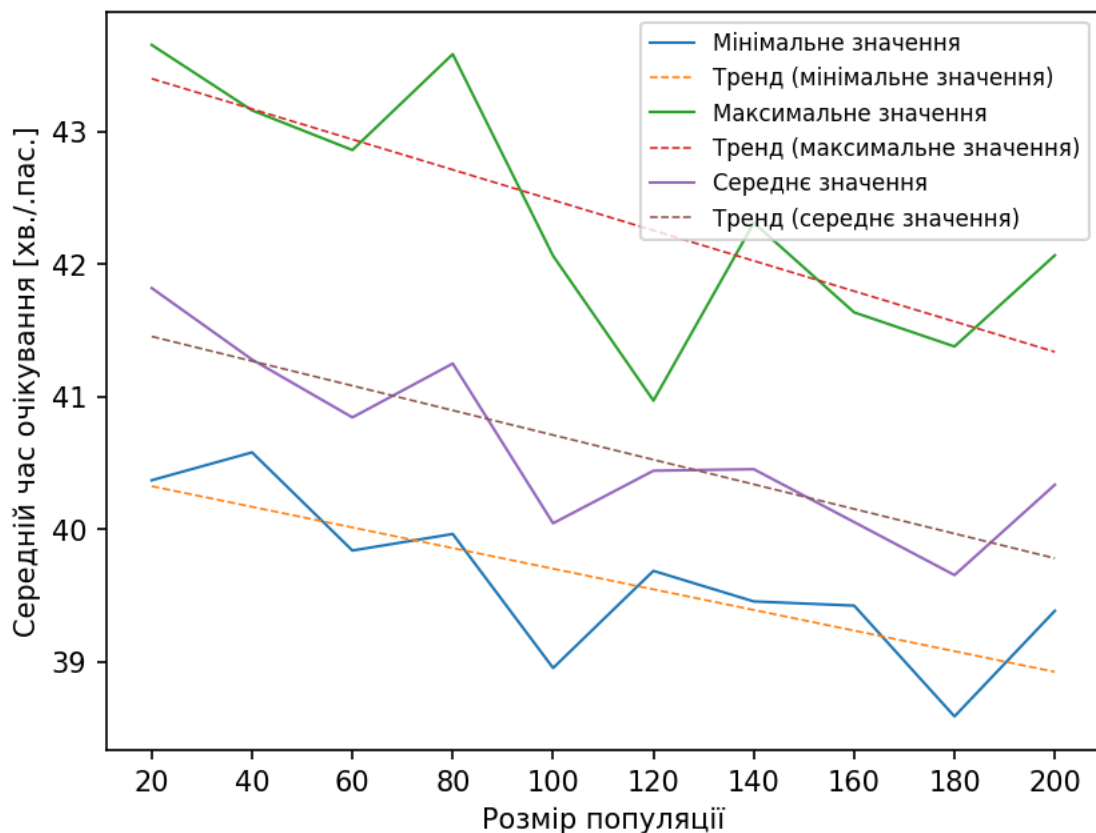


Рисунок 4.13 – Залежність часу очікування від розміру популяції для процедури синхронізації в маршрутній мережі

Візуалізація результатів на рисунку 4.13 демонструє стабільну негативну кореляцію: зі зростанням розміру популяції спостерігається одночасне зниження

мінімального, середнього та максимального значень часу очікування. Така тенденція емпірично доводить, що в межах досліджуваного діапазону збільшення пулу альтернативних рішень сприяє глибшому дослідженню простору станів системи МПТТ. Більша кількість особин у популяції підвищує ймовірність появи вдалих комбінацій часових зсувів уже на ранніх етапах еволюції, що в кінцевому підсумку призводить до суттєвої оптимізації часових витрат пасажирів під час імітаційного моделювання.

Таблиця 4.12 – Результати оцінки статистичної значущості впливу розміру популяції на ефективність ГА при синхронізації в мережі

Рівень значень $T^{(w)}$	Коефіцієнт регресії β_s	Довірчий інтервал	Значимість параметра
Найменший	-0,008	(-0,010; -0,005)	Так
Найбільший	-0,011	(-0,015; -0,008)	Так
Середній	-0,009	(-0,012; -0,007)	Так

Статистична достовірність цих спостережень підкріплюється розрахунком довірчих інтервалів, які для всіх рівнів аналізованого параметра $T^{(w)}$ не перетинають нульову позначку. Це однозначно підтверджує статистичну значущість коефіцієнта регресії та вказує на те, що розмір популяції є детермінованим чинником успіху процедури ГА. Вплив цього параметра є наскрізним: він позитивно коригує як характеристики початкових випадкових розкладів, так і параметри фінальних рішень, отриманих після завершення всіх ітерацій. Таким чином, розширення популяції виступає ефективним інструментом підвищення загальної продуктивності алгоритму, забезпечуючи високу якість синхронізації маршрутної мережі міста.

4.3.2.2 Вплив імовірності кросинговеру на ефективність процедури синхронізації

Аналіз емпіричних взаємозв'язків між середнім часом очікування пасажирів та зміною ймовірності кросинговеру, представлений на рисунку 4.14, дозволяє оцінити роль генетичної рекомбінації у процесі формування оптимальних розкладів.

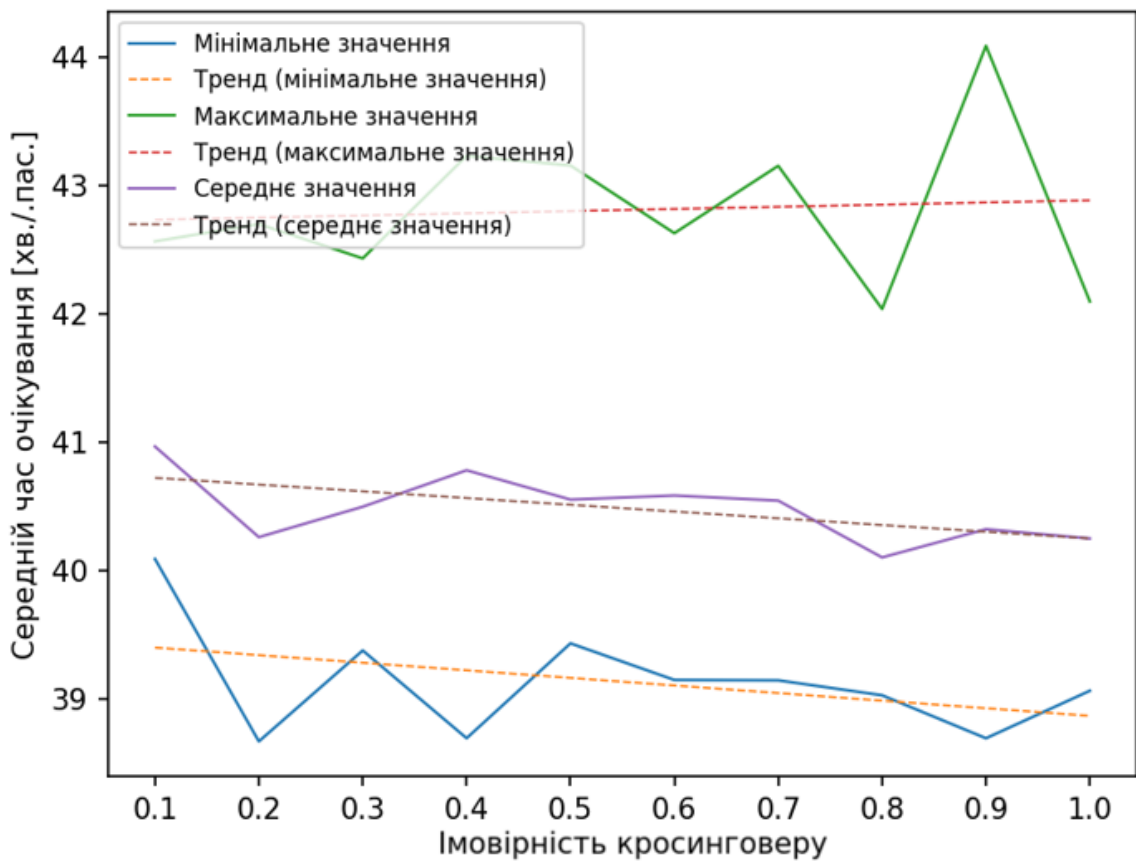


Рисунок 4.14 – Залежність часу очікування від імовірності кросинговеру для процедури синхронізації в маршрутній мережі

У таблиці 4.13 наведено результати регресійного аналізу, що включають коефіцієнти β_c та відповідні їм довірчі інтервали. Ці статистичні показники є основою для оцінки надійності та значущості впливу оператора кросинговеру на цільову метрику $T^{(w)}$.

Графічна інтерпретація даних на рисунку 4.14 вказує на те, що збільшення ймовірності кросинговеру сприяє поступовому покращенню (зниженню) показників як для найменшого, так і для середнього часу очікування пасажирів. Це свідчить про те, що інтенсивний обмін фрагментами розкладів між успішними особинами в популяції позитивно впливає на швидкість виявлення ефективних часових зсувів. Проте характер кривої для максимального часу очікування залишається відносно стабільним або демонструє незначну тенденцію до зростання. Така динаміка вказує на обмежену здатність оператора кросинговеру впливати на початкові невдалі конфігурації або нівелювати високу мінливість у менш адаптованих гілках еволюційного пошуку, навіть якщо екстремальні значення оптимуму дещо покращуються.

Таблиця 4.13 – Результати оцінки статистичної значущості впливу ймовірності кросинговеру на ефективність ГА при синхронізації в мережі

Рівень значень $T^{(w)}$	Коефіцієнт регресії β_c	Довірчий інтервал	Значимість параметра
Найменший	-0,591	(-1,083; -0,100)	Так
Найбільший	0,168	(-0,596; 0,933)	Ні
Середній	-0,526	(-0,785; -0,266)	Так

Особливої уваги заслуговує аналіз довірчих інтервалів для коефіцієнта β_c , який розкриває специфіку часового впливу цього параметра на роботу алгоритму. Математично підтверджено, що на початковому етапі функціонування ГА ймовірність кросинговеру не чинить статистично значущого впливу на середній час очікування, що пояснюється хаотичністю першої генерації та відсутністю накопиченого «корисного» генетичного матеріалу. Водночас для результатів, отриманих на завершальних стадіях роботи евристики, та для загального показника продуктивності алгоритму вплив цього параметра є значущим. Це доводить, що кросинговер відіграє критичну роль саме у процесі накопичення успішних структурних елементів розкладу протягом еволюційного циклу.

4.3.2.3 Вплив імовірності мутації та кількості мутованих генів на ефективність процедури синхронізації

На рисунку 4.15 наведено результати емпіричного дослідження залежності середнього часу очікування пасажирів від варіації ймовірності мутації (при фіксованому значенні t_m). Для забезпечення математичної достовірності графічного аналізу, у таблиці 4.14 представлено розраховані коефіцієнти регресії та їхні довірчі інтервали, що дозволяють оцінити статистичну значущість впливу даного параметра на показник $T^{(w)}$.

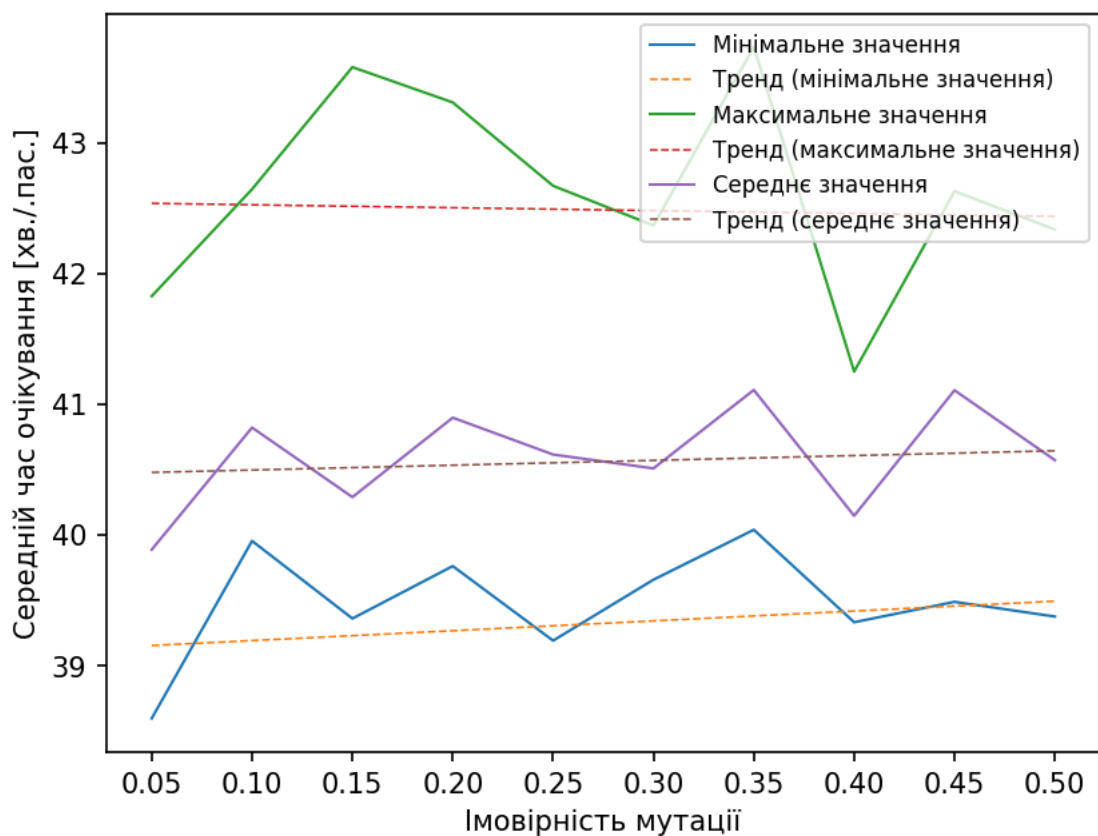


Рисунок 4.15 – Залежність часу очікування від імовірності мутації для процедури синхронізації в маршрутній мережі

Візуальний аналіз рисунку 4.15 свідчить про те, що зміна ймовірності мутації в межах обраного тестового діапазону чинить лише незначний та непослідовний вплив на цільову функцію. У контексті задачі синхронізації розкладів це означає

відсутність прямої сильної кореляції між імовірністю мутацій та здатністю алгоритму ідентифікувати глобальні оптимуми. Така ситуація суттєво контрастує з результатами попередніх етапів аналізу, де параметри розміру популяції та ймовірності кросинговеру демонстрували значно чіткіші тенденції.

Таблиця 4.14 – Результати оцінки статистичної значущості впливу ймовірності мутації на ефективність ГА при синхронізації в мережі

Рівень значень $T^{(w)}$	Коефіцієнт регресії β_m	Довірчий інтервал	Значимість параметра
Найменший	0,753	(0,300; 1,206)	Так
Найбільший	-0,222	(-0,922; 0,478)	Ні
Середній	0,368	(0,055; 0,681)	Так

Статистична перевірка підтвердила, що на початкових фазах роботи алгоритму імовірність мутацій не має підтверженого впливу на час очікування. Проте аналіз кінцевих стадій оптимізації дозволив зробити важливий науковий висновок: вплив ймовірності мутації на фінальні результати та загальну продуктивність ГА є статистично значущим, але має негативний вектор. Додатне значення відповідного коефіцієнта регресії вказує на те, що надмірне збільшення інтенсивності мутацій призводить до зростання часу очікування пасажирів. Це свідчить про деструктивну роль високих темпів мутації, які на етапі тонкого налаштування розкладу починають руйнувати вже знайдені ефективні комбінації часових зсувів, перетворюючи спрямований еволюційний пошук на хаотичне блукання.

На рисунку 4.16 представлено візуалізацію емпіричної залежності між середнім часом очікування та кількістю мутацій на хромосому t_m , де розрахунки проводилися при фіксованій ймовірності мутації $p_m = 0,2$. Дані рисунка доповнюються показниками таблиці 4.15, у якій наведено розраховані коефіцієнти регресії для t_m та їхні довірчі інтервали, що дозволяють встановити рівень статистичної значущості отриманих результатів.

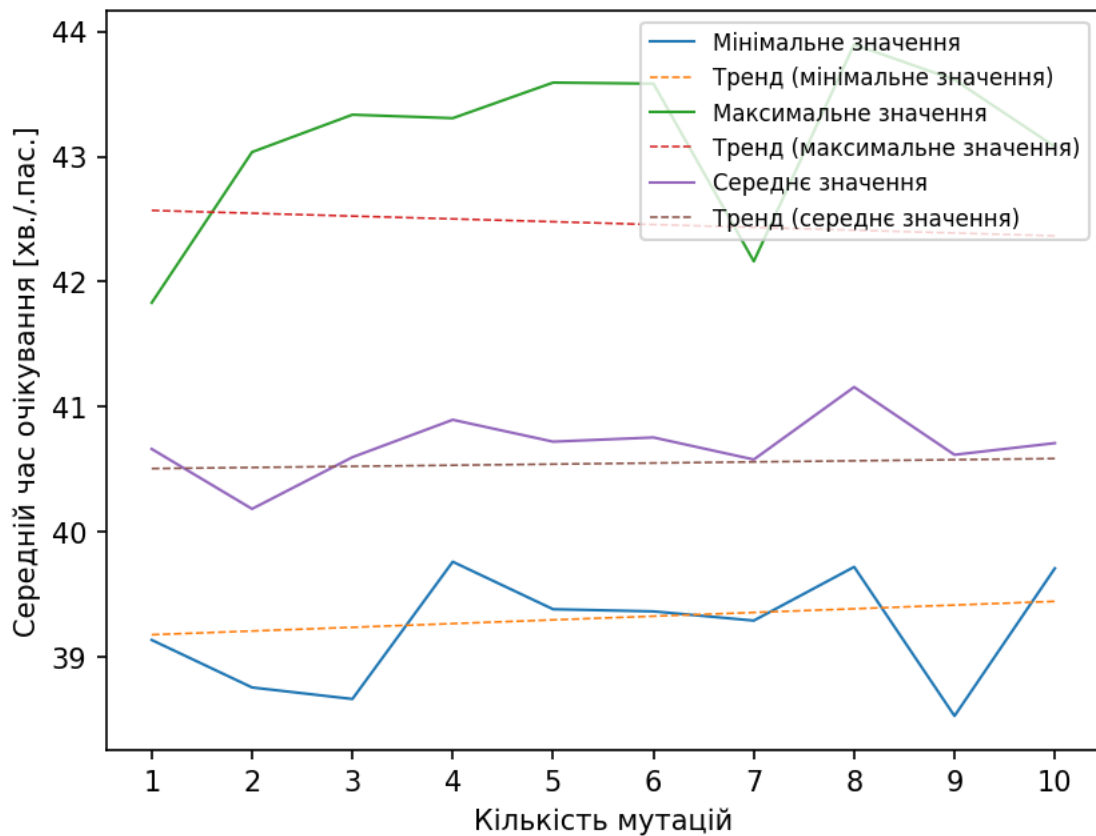


Рисунок 4.16 – Залежність часу очікування від кількості мутацій для процедури синхронізації в маршрутній мережі

Таблиця 4.15 – Результати оцінки статистичної значущості впливу кількості мутацій на ефективність ГА при синхронізації в мережі

Рівень значень $T^{(w)}$	Коефіцієнт регресії β_t	Довірчий інтервал	Значимість параметра
Найменший	0,030	(0,007; 0,052)	Так
Найбільший	-0,023	(-0,058; 0,012)	Ні
Середній	0,009	(-0,007; 0,025)	Ні

Відповідно до результатів, відображених на рисунку 4.16, зміна кількості мутацій на хромосому в межах досліджуваного діапазону чинить відносно незначний та нестабільний вплив на всі три ключові показники: мінімальний, максимальний та середній час очікування. Графічні тренди для цих значень залишаються переважно горизонтальними, що свідчить про відсутність суттєвого

лінійного покращення загальної операційної ефективності генетичного алгоритму при варіюванні t_m .

Проте аналіз статистичної значущості коефіцієнта β_t дозволяє зробити глибші висновки. Хоча зміна кількості мутацій не має вагомого впливу на результати початкової фази ГА або на загальну усереднену продуктивність алгоритму, виявлено статистично значущий вплив на фінальний, оптимізований результат процедури. Це вказує на те, що параметр t_m володіє кумулятивним ефектом, який безпосередньо формує якість найкращого знайденого рішення на пізніх етапах еволюції. Знак відповідного коефіцієнта β_t підтверджує, що цей кумулятивний вплив є негативним: надмірне зростання кількості мутацій у хромосомі призводить до збільшення $T^{(w)}$, фактично погіршуючи точність фінальної синхронізації розкладу.

4.4 Висновки по четвертому розділу

1. Експериментальні дослідження в межах даної роботи проведено диференційовано для двох рівнів організації транспортних процесів – макрорівня, що передбачає комплексну синхронізацію розкладів для всіх пересадочних вузлів міської мережі, та мікрорівня, орієнтованого на координацію розкладів руху виключно тих маршрутів, що обслуговують конкретний вибраний вузол. Основним показником ефективності для обох підходів, відповідно до структури функцій пристосованості, було визначено середній час очікування пасажирів на зупинках. Результати проведених експериментів підтвердили критичну роль раціонального вибору параметрів генетичного алгоритму, який через бінарне кодування хромосом та інтеграцію з імітаційною моделлю забезпечує динамічне оцінювання варіантів розкладу в умовах стохастичного попиту.

2. Систематизація отриманих даних дозволила встановити, що розмір популяції є одним із найбільш стабільних чинників підвищення якості рішень як на стадії ініціалізації пошуку, так і при досягненні алгоритмом точки збіжності. Водночас виявлено, що ймовірність кросинговеру чинить мінімальний вплив на

ранніх етапах ітераційного процесу, проте її роль стає статистично значущою для формування фінальної якості евристики та досягнення високої загальної результативності оптимізації.

3. На противагу позитивному впливу попередніх параметрів, у роботі зафіксовано статистично значущу негативну кореляцію між імовірністю мутацій та якістю отриманих результатів, оскільки надмірна інтенсивність цього оператора руйнує структуру корисних генів та перешкоджає здатності алгоритму до збіжності, що призводить до погіршення показників розкладу. Аналогічно встановлено, що кількість мутацій на одну хромосому не виявляє суттєвого впливу на початкову фазу пошуку, проте має накопичувальний негативний ефект на фінальному етапі, що безпосередньо виражається у збільшенні середнього часу очікування пасажирів у кінцевому варіанті розкладу руху.

Основні результати проведених досліджень в рамках цього розділу опубліковані в роботах [116-117, 121].

ВИСНОВКИ

1. У дисертаційній роботі на основі ретроспективного аналізу наукових джерел встановлено фундаментальну трансформацію дослідницьких підходів до синхронізації розкладів громадського транспорту, що характеризується переходом від вузькоспеціалізованої однокритеріальної оптимізації до розробки комплексних багатокритеріальних моделей. Сучасний вектор розвитку галузі визначає необхідність одночасного врахування інтересів пасажирів і перевізників, координації мультимодальних вузлів та інтеграції інноваційних видів транспорту в єдину мережу. В роботі показано, що в умовах високої розмірності та стохастичності транспортних систем найбільш ефективним інструментарієм вирішення задач координації є генетичні алгоритми. Попри імовірнісну природу пошуку рішень, саме цей клас евристичних методів забезпечує необхідну адаптивність до складних конфігурацій мереж та дозволяє отримувати раціональні розклади в межах прийняттого обчислювального часу. Це підтверджує доцільність їх використання як базису для оперативного планування перевезень та мінімізації часових втрат у сучасних системах міського громадського пасажирського транспорту.

2. Для моделювання процесів функціонування міських пасажирських систем при вирішенні наукових задач синхронізації розкладів в рамках дисертаційної роботи розроблено спеціалізовану програмну бібліотеку. Її реалізація здійснена мовою програмування Python, що забезпечує високу сумісність із провідними середовищами імітаційного моделювання та дозволяє інтегрувати розроблені інструменти у наявні транспортні моделі. Архітектура бібліотеки базується на системі об'єктів, що дозволяють відтворити структуру міського громадського пасажирського транспорту через орієнтований зважений граф. У межах цієї моделі реалізовано об'єкти для представлення пунктів мережі, які можуть функціонувати як зупинки, пересадочні вузли або перехрестя вулично-дорожньої мережі. Зв'язок між ними забезпечується через спеціальні програмні елементи, що імітують ланки графу, тобто відрізки доріг або перегони між зупинками. Логіка транспортного

процесу відтворюється через об'єкти, що описують маршрутну мережу та рухомий склад. Програмна реалізація маршрутів накладається на модель вулично-дорожньої мережі, а функціонування кожної транспортної одиниці моделюється як активність окремого об'єкта, що здійснює пересування між заданими пунктами. Окрему увагу приділено моделюванню поведінки пасажирів, які виступають елементарними одиницями опису попиту на транспортні послуги. Кожен такий об'єкт дозволяє детально відстежувати стан пасажирів в системі та збирати статистику щодо часу очікування у пересадочних вузлах. Для адекватного відображення впливу зовнішнього середовища та стохастичної природи систем МППТ розроблено інструментарій для роботи з випадковими величинами. Він дозволяє імітувати параметри системи із заданими законами розподілу та відповідними чисельними характеристиками, що є необхідним для відтворення затримок руху та коливань пасажиропотоку. Сукупність інтегрованих об'єктів утворює цілісне середовище для симуляції процесів обслуговування пасажирів, надаючи можливість проводити експерименти з оптимізації розкладів у наближених до реальності умовах.

3. Сформований у межах дослідження комплекс імітаційних моделей (мікро- та макрорівня) пересадочного вузла та мережі міського громадського пасажирського транспорту створює фундамент для розв'язання задач координації розкладів руху на основі багатоваріантного моделювання транспортних процесів. Архітектура цих моделей відображає ієрархію взаємодії ключових компонентів системи, що дозволяє відтворювати реалістичні експлуатаційні сценарії та здійснювати об'єктивну предиктивну оцінку управлінських рішень. Запропонований інструментарій відзначається високим ступенем адаптивності, що дає змогу розширювати перелік вхідних параметрів та обмежень залежно від конкретних умов проєктування. Основний акцент роботи зосереджено на створенні універсального методологічного базису, придатного для дослідження широкого спектру проблем – від локальної синхронізації в окремих вузлах до стратегічного перепроєктування всієї маршрутної мережі. Ключовою перевагою розроблених підходів є їхня здатність адекватно інтегрувати стохастичну природу функціонування міського громадського пасажирського транспорту, що у поєднанні

з оптимізаційним потенціалом генетичних алгоритмів робить їх ефективним засобом підвищення якості пасажирських перевезень.

4. Експериментальна апробація розроблених підходів, проведена диференційовано на макро- та мікрорівнях організації транспортних процесів, підтвердила ефективність запропонованої методики мінімізації середнього часу очікування пасажирів у вузлах мережі. Результати досліджень довели визначальну роль прецизійного налаштування керуючих параметрів генетичного алгоритму для досягнення високої якості оптимізації в умовах стохастичного попиту. Зокрема, встановлено, що розмір популяції виступає стабільним чинником підвищення результативності пошуку на всіх етапах роботи алгоритму, тоді як вплив ймовірності кросинговеру стає статистично значущим переважно на фінальних стадіях формування субоптимальних розкладів. Натомість виявлена стійка негативна кореляція між інтенсивністю мутацій та якістю отриманих рішень свідчить про ризик деструктивного впливу надмірної мінливості на структуру адаптивних генів, що перешкоджає збіжності алгоритму. Аналогічний накопичувальний негативний ефект зафіксовано і для параметру кількості мутацій, збільшення якого призводить до погіршення підсумкових показників ефективності. Сформульовані закономірності дозволяють обґрунтовано підходити до вибору стратегії пошуку розкладів, забезпечуючи баланс між обчислювальними витратами та якістю транспортного обслуговування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Münchschwander P., Jänsch E., Rump R. Schienenschnellverkehr: Hochgeschwindigkeitsverkehr international. R. v. Decker's Verlag. 1990. Heidelberg. Germany.
2. Ceder A. Public Transport Planning and Operation – Theory, Modelling and Practice. Elsevier, 2007. Butterworth-Heinemann. Oxford. UK
3. Ibarra-Rojas O. J., Rios-Solis Y. A. Synchronization of bus timetabling // Transportation Research Part B: Methodological 2012. 46(5). <https://doi.org/10.1016/j.trb.2012.01.006>
4. Yin H., Wu J., Sun H., Kang, L., Liu R. Optimizing last trains timetable in the urban rail network: social welfare and synchronization // Transportmetrica B: Transport Dynamics. 2019. 7(1). <https://doi.org/10.1080/21680566.2018.1440361>
5. Allen J., Muñoz J. C., Rosell J. Effect of a major network reform on bus transit satisfaction : Transportation Research Part A: Policy and Practice 2019. 124. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.04.002>
6. Badia H., Argote-Cabanero J., Daganzo C. F. How network structure can boost and shape the demand for bus transit : Transportation Research Part A: Policy and Practice 2017. 103. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.05.030>
7. González L., Perdiguero J., Sanz À. Impact of public transport strikes on traffic and pollution in the city of Barcelona : Transportation Research Part D: Transport and Environment 2021. 98. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102952>
8. Adler M. W., van Ommeren J. N. Does public transit reduce car travel externalities? Quasi-natural experiments' evidence from transit strikes // Journal of Urban Economics 2016. 92. <https://doi.org/10.1016/j.jue.2016.01.001>
9. Anderson M. L., Subways, Strikes, and Slowdowns: The Impacts of Public Transit on Traffic Congestion // American Economic Review 2014. 104(9). 2763–96. <https://doi.org/10.1257/aer.104.9.2763>

10. Clever R. Intermodal integrated timed transfer: A European perspective // *Transportation Research Record* 1997. 1571(1). 107–115. <https://doi.org/10.3141/1571-14>.
11. Susilo Y. O., Cats O. Exploring key determinants of travel satisfaction for multi-modal trips by different traveler groups : *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 2014, 67. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.08.002>
12. Chowdhury S., Ceder A., Schwalger B. The effects of travel time and cost savings on commuters' decision to travel on public transport routes involving transfers // *Journal of Transport Geography* 2015. 43. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.01.009>
13. Holland J. H. *Adaptation in natural and artificial systems*, University of Michigan Press, 1975, Ann Arbor, Michigan, USA.
14. Yang X.-S. *Nature-Inspired Optimization Algorithms*, Elsevier, 2014, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416743-8.00006-3>
15. Ansari N., Hou E. Genetic Algorithms. In: *Computational Intelligence for Optimization*. Springer, 1997. Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6331-0_6
16. Lipowski A., Lipowska D. Roulette-wheel selection via stochastic acceptance // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 2012. 391(6). <https://doi.org/10.1016/j.physa.2011.12.004>
17. Shukla A., Pandey H. M., Mehrotra D. Comparative review of selection techniques in genetic algorithm // *International Conference on Futuristic Trends on Computational Analysis and Knowledge Management*. 2015. P. 515–519. <https://doi.org/10.1109/ABLAZE.2015.7154916>
18. Lin W.-Y., Lee W.-Y., Hong T.-P. Adapting Crossover and Mutation Rates in Genetic Algorithms // *Journal of Information Science and Engineering* 2003. 19(5). P. 889–903. <http://dx.doi.org/10.6688%2fJISE.2003.19.5.9>
19. Aibinu A. M., Bello Salau H., Rahman N. A. Nwohu M. N. Akachukwu C. M. A novel Clustering based Genetic Algorithm for route optimization // *Engineering Science and Technology*. 2016. 19(4). <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.08.003>

20. Asadujjaman M., Rahman H. F., Chakraborty R. K., Ryan M. J. Multi-operator immune genetic algorithm for project scheduling with discounted cash flows : Expert Systems with Applications. 2022. 195. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116589>
21. Tambe P. Selective maintenance optimization of a multi-component system based on simulated annealing algorithm // Procedia Computer Science. 2022. 200. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.342>
22. Dorigo M., Gambardella L. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 1997. 1(1). P. 53–66. <https://doi.org/10.1109/4235.585892>
23. Baltierra S., Valdebenito J., Mora M. A proposal of edge detection in images with multiplicative noise using the Ant Colony System algorithm // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2022. 110. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.104715>
24. Dong L., Gan X. An energy-saving path planning method using adaptive ant colony system for marine surface vehicles // Soft Computing. 2024. 28. P. 6637–6656. <https://doi.org/10.1007/s00500-023-09513-x>
25. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization. Proceedings of ICNN'95 // International Conference on Neural Networks. 1995. 4. P. 1942–1948. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
26. Yang S., Wang H., Xu Y., Guo Y., Pan L., Zhang J., Guo X., Meng D., Wang J. A coupled simulated annealing and particle swarm optimization reliability-based design optimization strategy under hybrid uncertainties // Mathematics. 2023. 11. 4790. <https://doi.org/10.3390/math11234790>
27. Liu T., Ceder A. Deficit function related to public transport: 50 year retrospective, new developments, and prospects // Transportation Research Part B: Methodological. 2017. 100. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.01.015>
28. Glover F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence // Computers & Operations Research. 1986. 13(5). [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(86\)90048-1](https://doi.org/10.1016/0305-0548(86)90048-1)

29. Glover F. Tabu Search: A Tutorial. *Interfaces*. 1990. 20. P. 74–94. <https://doi.org/10.1287/inte.20.4.74>
30. Mirjalili S., Mirjalili S. M., Lewis A. Grey Wolf Optimizer // *Advances in Engineering Software*. 2014. 69. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>
31. Qiu Y., Yang X., Chen S. An improved gray wolf optimization algorithm solving to functional optimization and engineering design problems // *Scientific Reports* 2024. 14. 14190. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64526-2>
32. Chakroborty P., Deb K., Subrahmanyam P. Optimal scheduling of urban transit systems using genetic algorithms // *Journal of Transportation Engineering*. 2005. 28(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1995\)121:6\(544\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1995)121:6(544))
33. Nachtigall D., Voget S. A genetic algorithm approach to periodic railway synchronization // *Computers & Operations Research*. 1996. 23(5). [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(95\)00032-1](https://doi.org/10.1016/0305-0548(95)00032-1)
34. Bielli M., Caramia M., Carotenuto P. Genetic algorithms in bus network optimization // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2002. 10(1). [https://doi.org/10.1016/S0968-090X\(00\)00048-6](https://doi.org/10.1016/S0968-090X(00)00048-6)
35. Shrivastava P., Dhingra S. L., Gundaliya P. J. Application of genetic algorithm for scheduling and schedule coordination problems // *Journal of Advanced Transportation*. 2002. 36. P. 23–4. <https://doi.org/10.1002/atr.5670360103>
36. Shrivastava P., Dhingra S. L. Development of coordinated schedules using Genetic Algorithms // *Journal of Transportation Engineering*. 2002. 128(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2002\)128:1\(89\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:1(89))
37. Ngamchai S., Lovell D. J. Optimal time transfer in bus transit route network design using a genetic algorithm // *Journal of Transportation Engineering*. 2003. 129(5). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2003\)129:5\(510\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2003)129:5(510))
38. Cevallos F., Zhao F. A. Genetic Algorithm for bus schedule synchronization : Applications of Advanced Technology in Transportation. 2006. [https://doi.org/10.1061/40799\(213\)118](https://doi.org/10.1061/40799(213)118)

39. Cevallos F., Zhao F. Minimizing transfer times in public transit network with Genetic Algorithm // *Transportation Research Record*. 2006. 1971(1). P. 74–79. <https://doi.org/10.1177/0361198106197100109>
40. 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). <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2006.03.002>
41. 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>
42. Yu B., Yang Z., Yao J. Genetic Algorithm for bus frequency optimization // *Journal of Transportation Engineering*. 2010. 136(6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000119](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000119)
43. Niu H., Zhou X. Optimizing urban rail timetable under time-dependent demand and oversaturated conditions // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2013. 36. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.08.016>
44. 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>
45. Tuzun A. D., Yilmaz S. Transit coordination with heterogeneous headways // *Transportation Planning and Technology*. 2014. 37(5). <https://doi.org/10.1080/03081060.2014.912419>
46. Kang L., Wu J., Sun H., Zhu X., Gao Z. A case study on the coordination of last trains for the Beijing subway network // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2015. 72. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.09.003>
47. Kang L., Wu J., Sun H., Zhu X., Wang B. A practical model for last train rescheduling with train delay in urban railway transit networks // *Omega*. 2015. 50. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.07.005>
48. 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. P. 15–31.
<https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.12.012>
49. Wu Y., Yang H., Tang J., Yu Y. Multi-objective re-synchronizing of bus timetable: Model, complexity and solution // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2016. 67. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.02.007>
50. Naumov V. Synchronisation of timetables for public bus lines using genetic algorithms and computer simulations // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2018. 36. P. 44–53. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74454-4_4
51. 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). P. 243–254. <https://doi.org/10.1177/0361198118772958>
52. Naumov V. Genetic-based algorithm of the public transport lines synchronization in a transfer node // *Transportation Research Procedia*. 2020. 47. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.104>
53. Cao Z., Ceder A., Li D., Zhang S. Optimal synchronization and coordination of actual passenger-rail timetables // *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2019. <https://doi.org/10.1080/15472450.2018.1488132>
54. 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). P. 110–129. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.01.003>
55. 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>
56. Cao N., Tang T., Gao C. Multiperiod Transfer Synchronization for Cross-Platform Transfer in an Urban Rail Transit System // *Symmetry*. 2020. 12. 1665. <https://doi.org/10.3390/sym12101665>

57. Guo X., Wu J., Sun H., Yang X., Jin J., Wang D. Scheduling synchronization in urban rail transit networks: Trade-offs between transfer passenger and last train operation // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2020. 138. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.06.008>
58. Ataeian S., Solimanpur M., Amiripour S., Shankar R. Synchronized timetables for bus rapid transit networks in small and large cities // *Scientia Iranica*. 2021. 28(1). P. 477–491. <https://doi.org/10.24200/sci.2019.51501.2220>
59. Naeini H. M., Shafahi Y., Taherkhani M. S. 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>
60. Wang Y., Zhou Y., Yan X. Autonomous bus timetable synchronization for maximizing smooth transfers with passenger assignment // *Expert Systems with Applications*. 2022. 193. P. 478–492. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116430>
61. Niu H., Tian X., Zhou X. Demand-driven train schedule synchronization for high-speed rail lines // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2015. 16(5). P. 2642–2652. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2415513>
62. Zhao F., Zeng X. Optimization of transit route network, vehicle headways and timetables for large-scale transit networks // *European Journal of Operational Research*. 2008. 186(2). <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.02.005>
63. Poorjafari V., Yue W. L., Holyoak N. Application of simulated annealing in transit schedule synchronization // *International Journal of Modeling and Optimization*. 2014. 4(6). P. 476–481. <http://dx.doi.org/10.7763/IJMO.2014.V4.420>
64. Guo X., Sun H., Wu J., Jin J., Zhou J., Gao Z. Multiperiod-based timetable optimization for metro transit networks // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2017. 96. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.11.005>
65. Ceder A., Golany B., Tal O. Creating bus timetables with maximal synchronization // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2001. 35(10). [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(00\)00032-X](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(00)00032-X)

66. Eranki A. A model to create bus timetables to attain maximum synchronization considering waiting times at transfer stops. University of South Florida, 2004. Master's Thesis
67. Vansteenwegen P., van Oudheusden D. Decreasing the passenger waiting time for an intercity rail network // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2007. 41(4). P. 478–492. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2006.06.006>
68. Liebchen C. The first optimized railway timetable in practice // *Transportation Science*. 2008. 42(4). P. 420–435. <https://doi.org/10.1287/trsc.1080.0240>
69. Wong R., Yuen T., Fung K., Leung J. Optimizing timetable synchronization for rail mass transit // *Transportation Science*. 2008. 42(1). P. 57–69. <https://doi.org/10.1287/trsc.1070.0200>
70. Bruno G., Improta G., Sgalambro A. Models for the schedule optimization problem at a public transit terminal // *OR Spectrum*. 2009. 31. P. 465–481. <https://doi.org/10.1007/s00291-008-0161-4>
71. Nesheli M., Ceder A. Optimal combinations of selected tactics for public-transport transfer synchronization // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2014. 48. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.09.013>
72. Dou X., Meng Q., Guo X. Bus schedule coordination for the last train service in an intermodal bus-and-train transport network // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2015. 60. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.09.006>
73. Ibarra-Rojas O. J., López-Irarragorri F., Rios-Solis Y. A. Multiperiod bus timetabling // *Transportation Science*. 2015. 50(3). P. 805–822. <https://doi.org/10.1287/trsc.2014.0578>
74. Guo X., Wu J., Sun H., Liu R., Gao Z. Timetable coordination of first trains in urban railway network: A case study of Beijing // *Applied Mathematical Modelling* 2016. 40(17–18). <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.04.004>
75. Wu W., Liu R., Jin W. Designing robust schedule coordination scheme for transit networks with safety control margins // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2016. 93. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.07.009>

76. Gschwender A., Jara-Díaz S., Bravo C. Feeder-trunk or direct lines? Economies of density, transfer costs and transit structure in an urban context // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2016. 88. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.03.001>
77. Dou X., Guo X. Schedule coordination method for last train transfer problem // *Transportation Research Record*. 2017. 2648(1). P. 86–95. <https://doi.org/10.3141/2648-10>
78. Liu T., Ceder A., Chowdhury S. Integrated public transport timetable synchronization with vehicle scheduling // *Transportmetrica A: Transport Science*. 2017. 13(10). P. 932–954. <https://doi.org/10.1080/23249935.2017.1353555>
79. Kang L., Zhu X., Sun H., Wu J., Gao Z., Hu B. Last train timetabling optimization and bus bridging service management in urban railway transit networks // *Omega*. 2019. 84. P. 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.04.003>
80. Shang H.-Y., Huang H.-J., Wu W.-X. Bus timetabling considering passenger satisfaction: An empirical study in Beijing // *Computers & Industrial Engineering*. 2019. 135. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.057>
81. Wang Y., Wei Y., Zhang Q., Shi H., Shang P. Scheduling overnight trains for improving both last and first train services in an urban subway network. *Advances in Mechanical Engineering*. 2019. <https://doi.org/10.1177/1687814019848920>
82. Takamatsu M., Taguchi A. Bus timetable design to ensure smooth transfers in areas with low-frequency public transportation services // *Transportation Science*. 2020. 54(5). P. 1238–1250. <https://doi.org/10.1287/trsc.2019.0918>
83. Ke Y., Park D., Nie L., Liebchen C., Yuan W., Wu X. Improving synchronization in an air and high-speed rail integration service via adjusting a rail timetable: A Real-world case study in China // *Journal of Advanced Transportation*. 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/5081315>
84. Wardman M. Public transport values of time. *Transport Policy* 2004. 11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2004.05.001>

85. Jin J. G., Teo K., Odoni A. Optimizing bus bridging services in response to disruptions of urban transit rail networks // *Transportation Science*. 2015. 50(3). P. 790–804. <https://doi.org/10.1287/trsc.2014.0577>
86. Klemm W. D., Stemme W. Schedule synchronization for public transit networks : Lecture Note in Economics Mathematical Systems. 1988. 308. https://doi.org/10.1007/978-3-642-85966-3_28
87. Daduna J. R., Voß S. Practical experiences in schedule synchronization : Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 1995. 430. https://doi.org/10.1007/978-3-642-57762-8_4
88. Teodorović D., Lučić P. Schedule synchronization in public transit using the fuzzy ant system // *Transportation Planning and Technology*. 2005. 28(1). P. 47–76. <https://doi.org/10.1080/0308106052000340387>
89. Schröder M., Solchenbach I. Optimization of transfer quality in regional public transit : *Berichte des Fraunhofer ITWM* 2006. 84.
90. Chowdhury M., Chien S. Joint optimization of bus size, headway, and slack time for efficient timed transfer // *Transportation Research Record*. 2011. 2218(1). P. 48–58. <https://doi.org/10.3141/2218-06>
91. Hadas Y., Ceder A. Optimal coordination of public-transit vehicles using operational tactics examined by simulation // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2010. 18(6). <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.04.002>
92. Parbo J., Nielsen O. A., Prato C. G. User perspectives in public transport timetable optimization // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 2014. 48. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.09.005>
93. Shen Y., Wang S. Maximal synchronization of feeder buses to metro using particle swarm optimization // *Communications in Computer and Information Science*. 2015. 562. https://doi.org/10.1007/978-3-662-49014-3_32
94. Liu T., Ceder A. User and operator perspectives in public transport timetable synchronization design // *Transportation Research Record*. 2017. 2667(1). P. 154–163. <https://doi.org/10.3141/2667-15>

95. Shang H., Liu Y. An extended vehicle scheduling model considering interests of both passengers and bus operators, 2019 // Chinese Control Conference (CCC), 2019. P. 1995–2000. <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2019.8865735>
96. Shang H., Galante F., Liu Y., Huang H., Guo R. Vehicle scheduling optimization considering the passenger waiting cost // Journal of Advanced Transportation. 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/4212631>
97. Gkiotsalitis K., Maslekar N. Towards transfer synchronization of regularity-based bus operations with sequential hill-climbing // Public Transportation. 2018. 10. P. 335–361. <https://doi.org/10.1007/s12469-018-0178-2>
98. Jansen L., Pedersen M., Nielsen O. Minimizing passenger transfer times in public transport timetables // Proceedings of the 7th Conference of the Hong Kong Society for Transportation Studies: Transportation in the Information Age, 2002.
99. Wang H., Shen J. Heuristic approaches for solving transit vehicle scheduling problem with route and fueling time constraints // Applied Mathematics and Computation 2007. 190(2). <https://doi.org/10.1016/j.amc.2007.02.141>
100. Liu Z., Shen J., Wang H., Yang W. Regional bus timetabling model with synchronization // Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology. 2007. 7(2). [https://doi.org/10.1016/S1570-6672\(07\)60018-X](https://doi.org/10.1016/S1570-6672(07)60018-X)
101. Guihaire V., Hao J. K. Transit Network Re-timetabling and Vehicle Scheduling // Communications in Computer and Information Science. 2008. 14. https://doi.org/10.1007/978-3-540-87477-5_15
102. Fonseca J. P., van der Hurk E., Roberti R., Larsen A. A metaheuristic for transfer synchronization through integrated timetabling and vehicle scheduling // Transportation Research Part B: Methodological 2018. 109. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.01.012>
103. Abdolmaleki M., Masoud N., Yin Y. Transit timetable synchronization for transfer time minimization // Transportation Research Part B: Methodological. 2020. 131. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.12.002>
104. Григорова Т. М., Давідіч Ю. О., Доля В. К. Визначення факторів, які впливають на вибір пасажирями виду приміського транспорту // Вісник Нац.

- техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Механіко-технологічні системи та комплекси. 2015. № 21 (1130). С. 29–37.
105. Давідіч Н. В., Чумаченко І. В. Моніторинг впливу параметрів системи міського пасажирського транспорту на якість обслуговування населення // Комунальне господарство міст. 2016. № 128. С. 89–93.
106. Горбачов П. Ф., Макарічев О. В., Чижик В. М. Оцінка середнього часу очікування пасажирів транспортних засобів для маршрутної мережі міста // Вісник ХНАДУ. 2016. Вип. 72. С. 61–65.
107. Vdovychenko V., Driuk O., Samchuk G. Method of traffic optimization of urban passenger transport at transfer nodes // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. № 3/3 (87). С. 47–53.
108. Вдовиченко В.О. Розподіл маршрутів між зупиночними пунктами транспортно-пересадочного терміналу міського громадського пасажирського транспорту // Комунальне господарство міст. 2017. №139. С. 33–38.
109. Вдовиченко В.О. Оцінка доцільності пріоритетного руху міського громадського пасажирського транспорту з позицій стабілізації часу прибуття в транспортно-пересадочний термінал // Наукові нотатки. 2017. №60. С. 75–79.
110. Naumov V., Samchuk G. Class Library for Simulations of Passenger Transfer Nodes as Elements of the Public Transport System // Procedia Engineering. 2017. Vol. 187. С. 77–81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.352>.
111. Самчук Г.О. Підвищення ефективності функціонування транспортно-пересадочних вузлів наземного міського пасажирського транспорту: дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01. Харків, 2018. 206 с.
112. Melnikova Y. I. , Nagornyy Y. V. Problems of synchronizing the public transport schedule in the cities of Ukraine// Розумний транспорт та інтегровані транспортні технології: Міжнародна науково-практична конференція, м. Харків, Україна, 21–22 листопада 2023 року: збірник матеріалів наукових робіт. Харків: ХНАДУ, 2023, 25–27.
113. Нагорний Є.В., Мельнікова Ю. І. Математичне моделювання мережі громадського транспорту при вирішенні задачі синхронізації розкладів їх

- руху// Автошляховик України. Окремий випуск 2023. Збірка тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури», 5-7 грудня 2023. Київ, 125–128.
114. Kapica, D., Melnikova, Yu., Naumov, V. Synchronization in public transportation: A review of challenges and techniques. *Future Transportation* 2025, 5(1), 6. <https://doi.org/10.3390/futuretransp5010006>.
115. Kapica, D., Melnikova, Yu. Synchronizacja rozkładów jazdy wybranych linii zielonogórskiej sieci publicznego transportu zbiorowego za pomocą algorytmu genetycznego. *Młodzi Naukowcy 2.0. T. 4 / Korpysa, J. [i in.] (red.)*, 2025, Szczecin, Fundacja Centrum Badań Socjologicznych, 63-71, ISBN 978-83-973513-2-5.
116. Мельнікова, Ю.І., Наумов, В.С., Таран, І.О., Бовін, Д.П. Синхронізація розкладів руху міського громадського транспорту у пересадочному вузлі з використанням генетичних алгоритмів // *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті* 2024, 23, 180–187. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1540>.
117. Naumov, V., Taran, I., Melnikova, Yu., 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>.
118. Вдовиченко, В.О., Мельнікова, Ю.І. Синхронізація розкладів руху міського громадського транспорту у пересадочному вузлі з використанням генетичних алгоритмів // *Матеріали 89-ї науково-технічної та науково-методичної конференції ХНАДУ. Секція транспортних технологій* 2025, Харків, 2025, 206–209.
119. Вдовиченко В.О., Мельнікова Ю.І. Синхронізація розкладів руху громадського транспорту: перспективні напрямки досліджень // *Матеріали XIII-ої Міжнародної науково-технічної інтернетконференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту»*, 15-17 квітня 2025 року : збірник наукових праць [Ел. ресурс] Вінниця: ВНТУ, **2025**. 100–104.

120. Gibbons J.D., Chakraborti S. *Nonparametric Statistical Inference : Fourth Edition, Revised and Expanded*. New York: Marcel Dekker, 2003. 672 p.
121. 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), 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).

Додаток А

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Перший проректор
 НТУ «Дніпровська політехніка»
 д.т.н., проф. Павличенко А. В.

«29» квітня 2026 р.

АКТ

**про впровадження в навчальний процес результатів дисертації здобувача наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 275.03 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)»
 «Синхронізація розкладів руху громадського транспорту із використанням евристичних методів і імітаційного моделювання»
 Мельнікової Юлії Ігорівни**

Результати дисертаційної роботи Мельнікової Ю. І. впроваджені в навчальний процес НТУ «Дніпровська політехніка» для здобувачів спеціальності 275 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)». Розроблена автором методика визначає найбільш ефективний розклад громадського транспорту, застосування якого призводить до скорочення часу очікування пасажирів.

Матеріали дисертаційного дослідження, зокрема методика синхронізації розкладів руху на основі генетичних алгоритмів, впроваджено в навчальний процес кафедри при проведенні лекційних і практичних занять з дисциплін «Пасажирські перевезення» обсягом 180 годин, «Управління автомобільними перевезеннями» – 120 годин. При виконанні практичних робіт здобувачі використовують розроблену імітаційну модель, яка дозволяє дослідити вплив зміни розкладу на рівень обслуговування пасажирів з урахуванням стохастичного характеру попиту пасажирів; обґрунтовують параметричне налаштування генетичного алгоритму для його ефективної адаптації до задач синхронізації розкладів руху.

Розроблену спеціалізовану програмну бібліотеку класів мовою програмування Python планується використовувати здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти під час виконання кваліфікаційних робіт для імітаційного моделювання транспортних вузлів у містах, що дозволить підвищити рівень обґрунтованості їхніх проектних рішень.

Результати дисертаційного дослідження Мельнікової Ю. І. інтегровані в освітній процес кафедри управління на транспорті. Це дозволило вдосконалити методичне забезпечення навчальних дисциплін, підвищити рівень фахової підготовки здобувачів та сприяти формуванню їхніх професійних компетентностей.

Завідувач кафедри управління
 на транспорті, к.т.н., доц.

Я. В. Літвінова

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

ТОВ «ДІНАТ-С»



О. В. Лень

2026 року

Акт

впровадження результатів дисертаційної роботи
Мельнікової Юлії Ігорівни,
представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за
спеціальністю 275.03 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)»
на ТОВ «ДІНАТ-С»

Найменування пропозиції, яка впроваджена:

Методичний алгоритм до синхронізації графіків руху громадського транспорту.

Ким розроблено:

Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ),
кафедра транспортних технологій, автор — Мельнікова Ю. І.

Де, коли і ким впроваджено:

Методику впроваджено на підприємстві ТОВ «ДІНАТ-С» при удосконаленні
організації роботи автомобільного парку для обслуговування пасажирів у
м. Верхньодніпровськ. Вона була використана для розробки нових графіків
руху маршрутів №1, 2, 3, 4, 5 (м. Верхньодніпровськ).

Напрямки, результати, ефективність впровадження:

Розроблений методичний підхід ґрунтується на застосуванні сучасних
евристичних методів і імітаційного моделювання. Поєднання стохастичного
імітаційного моделювання та генетичних алгоритмів дозволяє отримати
рішення, стійкі до випадкових коливань у системі.

Висновки, зауваження, пропозиції:

Використання цього підходу дозволило підприємству підвищити якість
транспортного обслуговування (скоротити середній час очікування пасажирів)
і підвищити ефективність транспортної системи м. Верхньодніпровськ.

Начальник відділу
експлуатації ТОВ «ДІНАТ-С»

Е. Ю. Остапенко

ЗАТВЕРДЖУЮ



С. В. Шепель

«6» квітня 2026 року

Акт

впровадження результатів дисертаційної роботи

Мельнікової Юлії Ігорівни ,

представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 275.03 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)»

на ТОВ «ДНІПРОПЕТРОВСЬКЕ АВТОТРАНСПОРТНЕ

ПІДПРИЄМСТВО 11201»

Представлений в дисертаційній роботі Мельнікова Ю. І. алгоритм синхронізації розкладів руху громадського транспорту на основі евристичної оптимізації та імітаційного моделювання, що враховує нестационарний випадковий попит, забезпечує високий рівень адекватності цифрового двійника транспортної системи. Отримана методика має вагоме прикладне значення для підвищення ефективності синхронізації графіків руху міського транспорту.

Імітаційні моделі, розроблені в дисертаційній роботі Мельнікової Ю. І., можуть бути використані в практиці ТОВ «ДНІПРОПЕТРОВСЬКЕ АВТОТРАНСПОРТНЕ ПІДПРИЄМСТВО 11201», а саме при:

- прогнозуванні поведінки пасажирів;
- розробці нових графіків руху автобусів із забезпеченням їхньої синхронізації з іншими видами громадського транспорту.

Заступник директора ТОВ «ДАТП 11201»

В. О. Козаченко

Додаток Б

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО
АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Мельнікова, Ю.І., Наумов, В.С., Таран, І.О., Бовін, Д.П. Синхронізація розкладів руху міського громадського транспорту у пересадочному вузлі з використанням генетичних алгоритмів. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті **2024**, 23, 180–187. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1540>
2. Naumov, V., Taran, I., Melnikova, Yu., 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>
3. Kapica, D., Melnikova, Yu., Naumov, V. Synchronization in public transportation: A review of challenges and techniques. Future Transportation **2025**, 5(1), 6. <https://doi.org/10.3390/futuretransp5010006>
4. Мельнікова, Ю.І. Аналіз впливу параметрів на ефективність застосування генетичного алгоритму при вирішенні задачі синхронізації руху громадського транспорту. Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки **2026**, 13(44), 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)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Y. I. Melnikova, Y. V. Nagornyy. Problems of synchronizing the public transport schedule in the cities of Ukraine// Розумний транспорт та інтегровані транспортні технології: Міжнародна науково-практична конференція, м. Харків, Україна, 21–22 листопада 2023 року: збірник матеріалів наукових робіт. Харків: ХНАДУ, 2023, 25–27.
2. Нагорний Є.В., Мельнікова Ю. І. Математичне моделювання мережі громадського транспорту при вирішенні задачі синхронізації розкладів їх руху// Автошляховик України. Окремий випуск **2023**. Збірка тез доповідей Міжнародної

науково-практичної конференції: «Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури», 5,6,7 грудня **2023**. Київ, 125–128.

3. Karica, D., Melnikova, Yu. Synchronizacja rozkładów jazdy wybranych linii zielonogórskiej sieci publicznego transportu zbiorowego za pomocą algorytmu genetycznego. Młodzi Naukowcy 2.0. T. 4 / Korpysa, J. [i in.] (red.), **2025**, Szczecin, Fundacja Centrum Badań Socjologicznych, 63-71, ISBN 978-83-973513-2-5

4. Вдовиченко, В.О., Мельнікова, Ю.І. Синхронізація розкладів руху міського громадського транспорту у пересадочному вузлі з використанням генетичних алгоритмів. Матеріали 89-ї науково-технічної та науково-методичної конференції ХНАДУ. Секція транспортних технологій **2025**, Харків, 2025, 206-209.

5. Вдовиченко В.О., Мельнікова Ю.І. Синхронізація розкладів руху громадського транспорту: перспективні напрямки досліджень. Матеріали XIII-ої Міжнародної науково-технічної інтернетконференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту», 15-17 квітня 2025 року : збірник наукових праць [Електронний ресурс] / Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та інш.] – Вінниця: ВНТУ, **2025**. 100–104.

Додаток В

РОЗПОДІЛ СЕРЕДНЬОЇ КІЛЬКОСТІ ПАСАЖИРІВ, ЩО
ВИСАДЖУЮТЬСЯ У ПЕРЕСАДОЧНОМУ ВУЗЛІ «АВТОВОКЗАЛ», ЗА
МАРШРУТАМИ

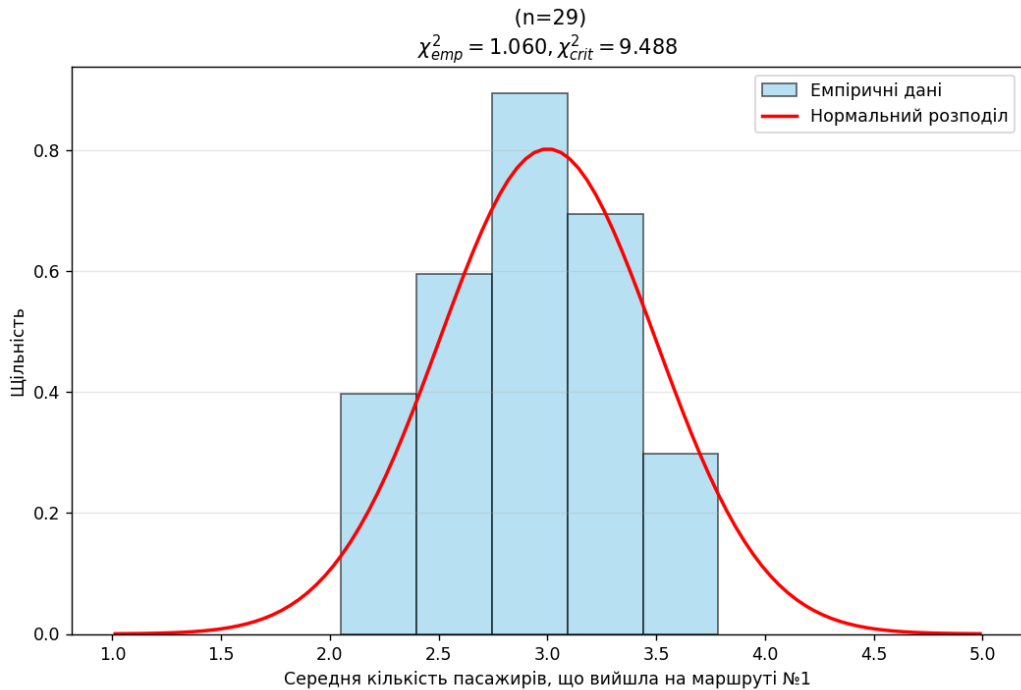


Рисунок Б.1 – Розподіл середньої кількості пасажирів, що висаджуються у пересадочному вузлі «Автовокзал», з маршруту №1

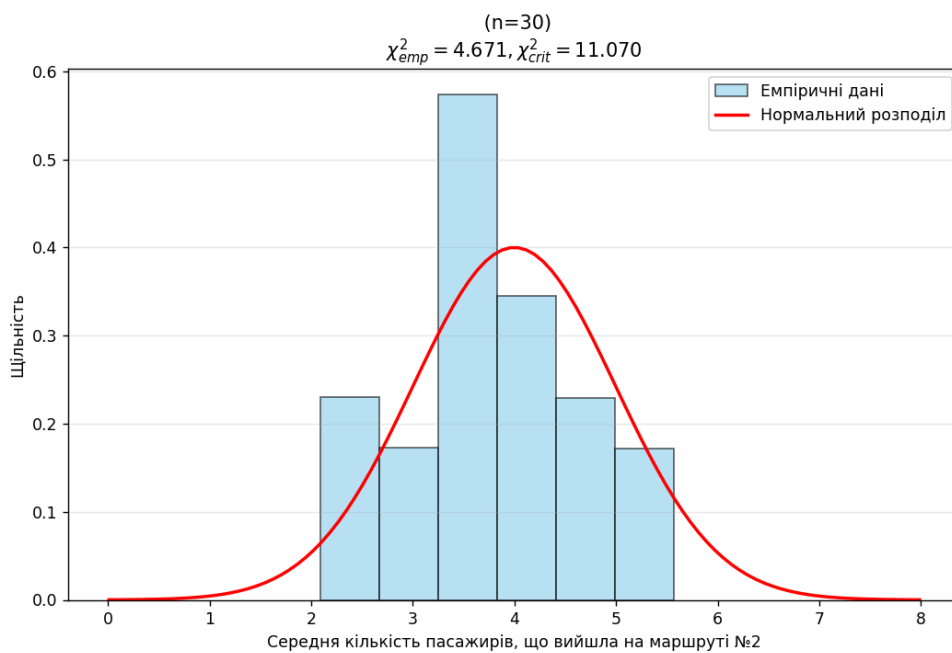


Рисунок Б.2 – Розподіл середньої кількості пасажирів, що висаджуються у пересадочному вузлі «Автовокзал», з маршруту №2

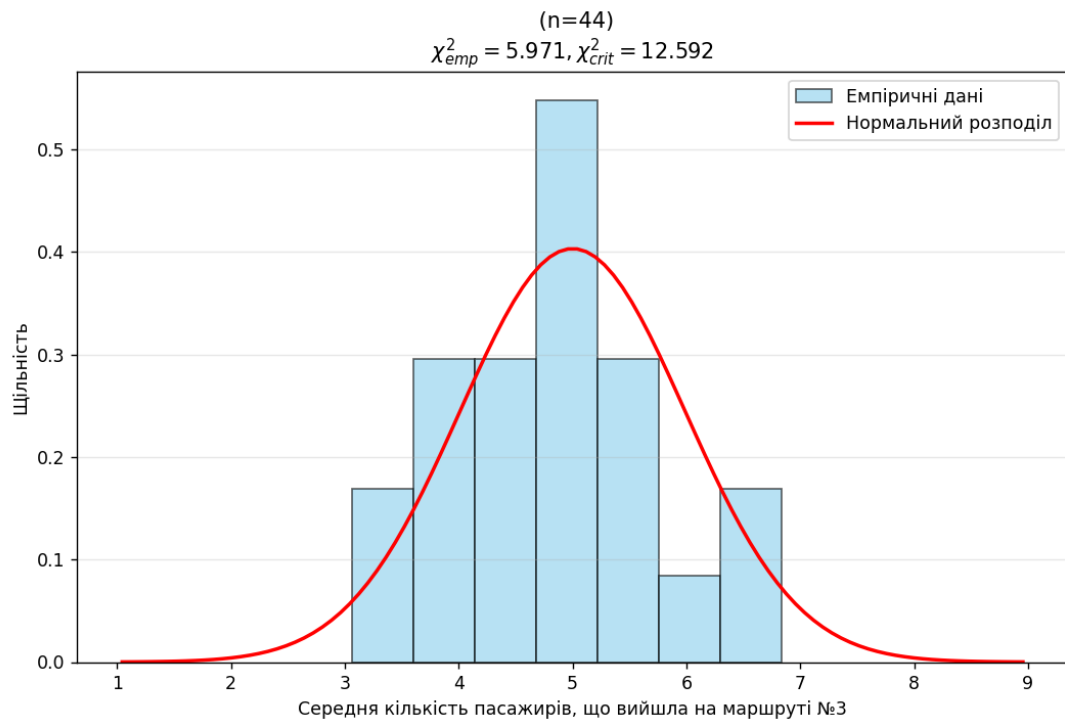


Рисунок Б.3 – Розподіл середньої кількості пасажирів, що висаджуються у пересадочному вузлі «Автовокзал», з маршруту №3, пас./рейс

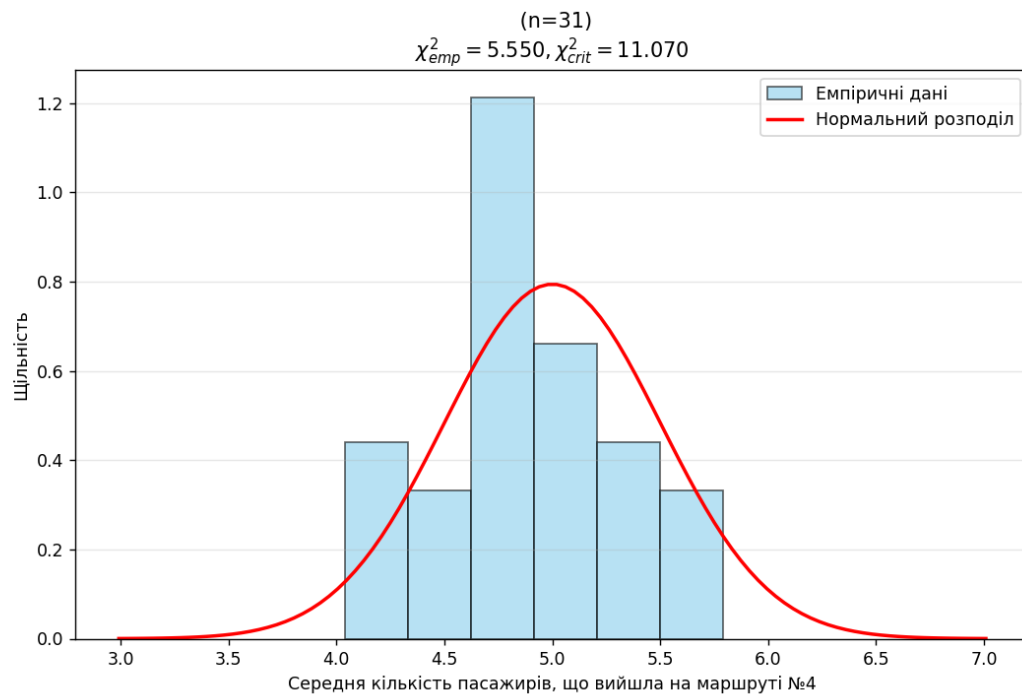


Рисунок Б.4 – Розподіл середньої кількості пасажирів, що висаджується у пересадочному вузлі «Автовокзал», з маршруту №4, пас./рейс

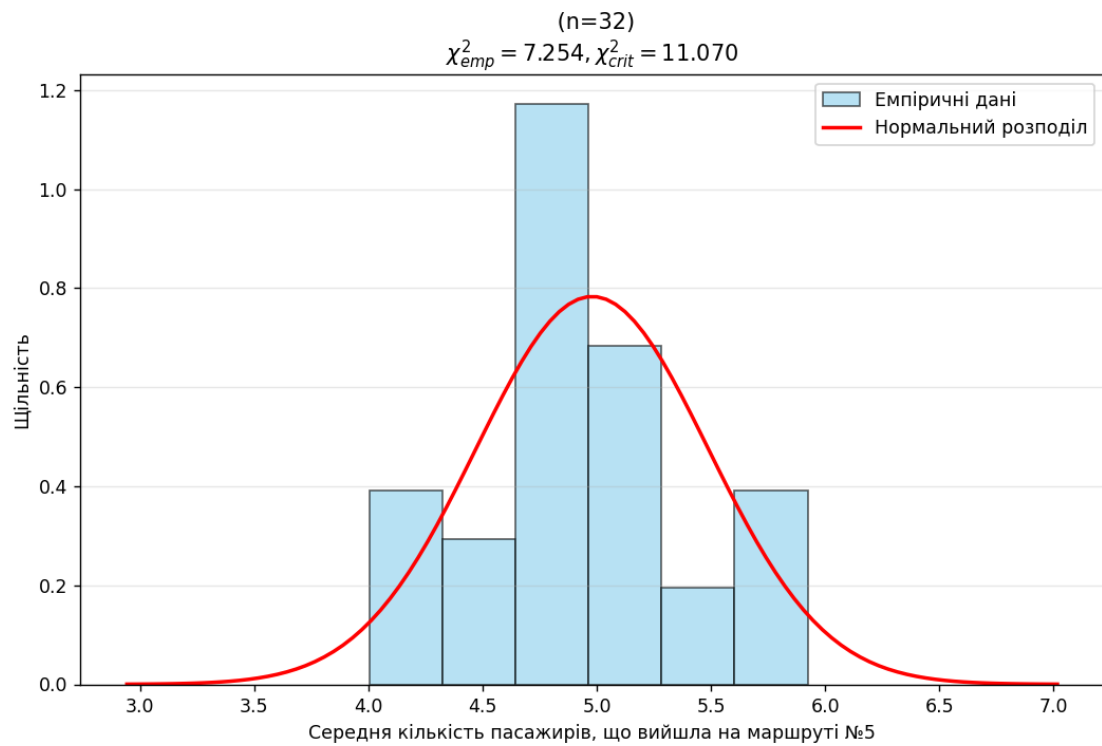


Рисунок Б.5 – Розподіл середньої кількості пасажирів, що висаджується у пересадочному вузлі «Автовокзал», з маршруту №2, пас./рейс

Додаток Г

РОЗПОДІЛ ІНТЕРВАЛУ ЧАСУ МІЖ ПОСЛІДОВНИМИ МОМЕНТАМИ
ПІДХОДУ ПАСАЖИРІВ ДО ПЕРЕСАДОЧНОГО ВУЗЛА «АВТОВОКЗАЛ»

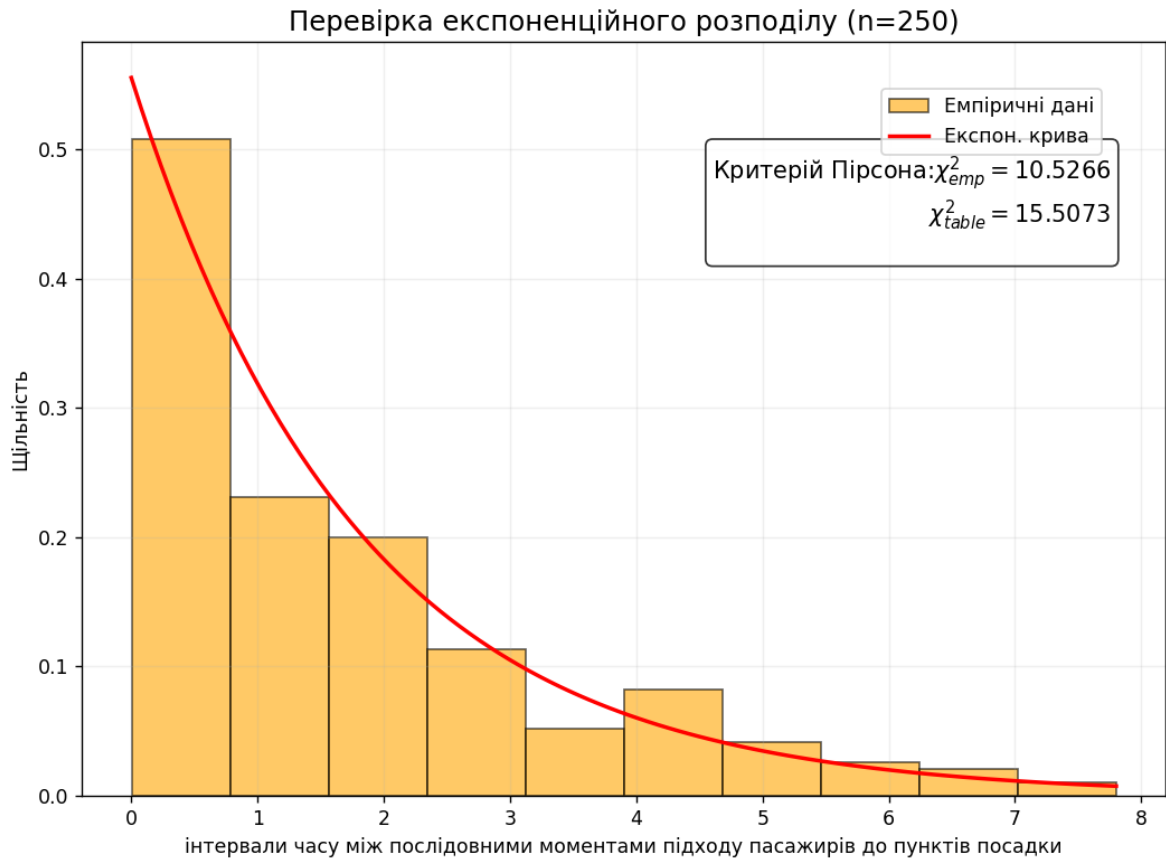


Рисунок В.1 – Розподіл інтервалу часу між послідовними моментами підходу пасажирів до пересадочного вузла «Автовокзал», хв.