

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Орда Олександр Миколайович

УДК 656.072

## ДИСЕРТАЦІЯ

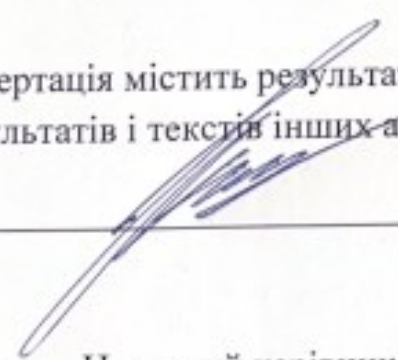
ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ  
НАСЕЛЕННЯ МІСТ ЗА РАХУНОК ВПРОВАДЖЕННЯ  
ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА МІСЬКОМУ  
ПАСАЖИРСЬКОМУ ТРАНСПОРТІ

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

  
\_\_\_\_\_ О.М. Орда

Науковий керівник Павленко Олексій Вікторович, к.т.н., доцент

Харків – 2026

## АНОТАЦІЯ

*Орда О.М.* Підвищення якості транспортного обслуговування населення міст за рахунок впровадження інтегрованих технологій на міському пасажирському транспорті. – 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.

Дисертацію присвячено вирішенню науково-прикладного завдання підвищення якості транспортного обслуговування населення міст шляхом розробки та впровадження інтегрованих технологій на міському пасажирському транспорті (МПТ) у пересадочних вузлах на принципах сталої міської мобільності. Міські пасажирські перевезення в сучасних умовах в Україні характеризуються зростанням вимог до якості транспортного обслуговування, необхідністю розвитку інтегрованих транспортних систем та формування безшовної міської мобільності в межах міських транспортних вузлів (Urban Nodes), які відіграють важливу роль в інтеграції вітчизняної транспортної мережі з Транс'європейською транспортною мережею TEN-T. Водночас значна частка приватних перевізників, які обслуговують маршрути за історично сформованими маршрутними мережами у містах, створює нерівномірний розподіл транспортної пропозиції, знижує ефективність роботи міського електротранспорту, як опорного виду громадського транспорту, та ускладнює впровадження змін, спрямованих на реалізацію принципів сталої міської мобільності. Унаслідок цього зберігається високий рівень дублювання маршрутів, що спричиняє скупчення рухомого складу громадського транспорту в ключових пересадочних вузлах, нерівномірність інтервалів руху, зниження якості транспортного обслуговування населення та рівня безпеки дорожнього руху. Все це, в свою чергу, посилює відмову частини населення від послуг громадського транспорту на користь приватних автомобілів. Саме тому актуальним є розвиток моделей, методів і адаптивних управлінських рішень, що

забезпечують координацію роботи різних видів МПТ шляхом динамічного узгодження параметрів їх функціонування з метою підвищення якості транспортного обслуговування населення відповідно до принципів сталої міської мобільності.

У дисертації проведено систематизацію наукових джерел та розглянуто теоретичні засади забезпечення якості транспортного обслуговування населення міст у контексті сталої міської мобільності, досліджено закономірності порушення регулярності руху в умовах високого рівня дублювання маршрутів та обґрунтовано необхідність інтегрованої координації міжмаршрутної і міжвидової взаємодії МПТ у пересадочних вузлах з урахуванням ролі міського електротранспорту як опорного елемента транспортної системи. Встановлено, що одним із ключових чинників забезпечення якості транспортного обслуговування є координація МПТ, узгодження моментів прибуття транспортних засобів в ключових пересадочних вузлах, особливо в умовах функціонування різних видів транспорту. Водночас недостатньо дослідженими залишаються питання координації роботи МПТ на муніципальних та приватних автобусних маршрутах із тролейбусними маршрутами в умовах нерівномірності транспортної пропозиції в міських транспортних мережах з урахуванням експлуатаційних обмежень міського електротранспорту. Більшість запропонованих підходів зосереджено або на статичному оцінюванні часу очікування пасажирів на зупиночних пунктах і в пересадочних вузлах, або на динамічному управлінні інтервалами руху в межах однорідних транспортних потоків, що не повною мірою враховує взаємодію різних видів МПТ.

У роботі запропоновано розглядати інтегровану координацію маршрутів різних видів МПТ як комплекс організаційних, інформаційних, управлінських та економічних рішень, спрямованих на підвищення якості транспортного обслуговування населення міст. За результатами аналізу існуючих підходів обґрунтовано доцільність розробки інтегрованої адаптивної системи координації (ІАСК) роботи різних видів МПТ та механізму компенсації перевізникам як ключових складових збалансування транспортної пропозиції, підвищення якості

транспортного обслуговування населення і привабливості громадського транспорту.

Одним із ключових результатів дослідження є формування науково-методичного підходу до адаптивного управління координацією роботи різних видів МПТ у пересадочних вузлах, який враховує умови скупчення рухомого складу у пересадочних вузлах та експлуатаційні обмеження міського електротранспорту. Запропонований підхід базується на мережево-динамічній моделі координації роботи різних видів МПТ, побудованій із використанням адаптованої моделі Курамото та спектрального аналізу графа маршрутної мережі, де параметр порядку  $R$  використовується в якості індикатору координаційної складової якості транспортного обслуговування через здатність системи досягати та утримувати стан функціональної сталості у пересадочних вузлах. Модель адаптує класичне формулювання Курамото шляхом обмеження матриці зв'язку структурою графа маршрутної мережі, тобто маршрути взаємодіють лише у пересадкових вузлах. Розроблена модель забезпечує міжвидову координацію з електротранспортом як опорним елементом транспортної системи з фіксованою фазою з урахуванням експлуатаційних обмежень. Адаптовано класифікацію фазових станів системи до задачі координації різних видів МПТ, що дозволяє ідентифікувати неузгоджений, частково узгоджений режими функціонування транспортної системи та режим стійкої координації за рівнем узгодженості інтервалів прибуття транспортних засобів у пересадочний вузол.

Експериментальні дослідження в роботі реалізовані на трьох рівнях: транспортне моделювання у програмному середовищі PTV VISUM, статистична перевірка гіпотез дослідження та імітаційне моделювання динамічного процесу координації різних видів МПТ в пересадочному вузлі для трьох типів: «тролейбус – муніципальний автобус», «тролейбус – тролейбус» та «тролейбус – маршрутне таксі». Транспортне моделювання проведено у програмному комплексі PTV VISUM з метою отримання матриці маршрутних пересадок на прикладі зупиночного пункту «Філармонія» у м. Хмельницькому, що функціонує як перевантажений пересадочний вузол із високим рівнем дублювання маршрутів

різних видів транспорту. Валідацію транспортної моделі проведено шляхом порівняння змодельованих значень із даними, отриманими в результаті натурних спостережень у період пікового навантаження, за показником накопиченої кількості моментів прибуття транспортних засобів у пересадочний вузол протягом цього періоду. Цей показник дозволяє порівняти фактичну та змодельовану інтенсивність обслуговування вузла, а також оцінити рівномірність прибуття транспортних засобів у часі. За результатами моделювання із застосуванням принципу Парето визначено групу найбільш значущих маршрутів, частка яких становить близько 20 % від загальної кількості маршрутів, що проходять через пересадочний вузол, тоді як на них припадає близько 80 % обсягу маршрутних пересадок у досліджуваній маршрутній мережі.

Для оцінки фактичного рівня координації МПТ в пересадочному вузлі виконано розрахунок параметра порядку Курамото  $R(t)$  за моментами прибуття транспортних засобів на зупиночний пункт, отриманими на основі GPS-даних інформаційного сервісу EasyWay. Програмний модуль збору GPS-даних реалізовано мовою *Python* з використанням бібліотек *requests* та *beautifulsoup* для парсингу веб-сторінок. Отримане значення параметру порядку  $R(0,3)$  характеризує неузгодженість руху та відсутність стійкої синхронізації інтервалів та моментів прибуття транспортних засобів. Це узгоджується з результатами натурних спостережень, які засвідчили нерівномірність прибуття транспортних засобів і випадки їх скупчення в пересадочному вузлі.

Імітаційну модель реалізовано мовою *Python* для групи значущих маршрутів за сценарним підходом моделювання фазових станів транспортної системи: частково узгоджений режим функціонування, за якої маршрути тролейбусів і комунальних автобусів є керованими централізованою диспетчерською системою, тоді як маршрутні таксі функціонують поза системою координації; неузгоджений режим функціонування відповідає поточному режиму функціонування без адаптивного управління, за якого інтервали руху постійно змінюються, а транспортні засоби поступово зближуються між собою. Режим стійкої координації розглянуто як цільовий режим адаптивного управління з прогнозованими

інтервалами руху для всіх маршрутів. Такий підхід дозволив оцінити узгодженість параметрів роботи різних видів МПТ та врахувати роль тролейбусного транспорту як опорного елемента інтегрованої системи координації. За результатами імітаційного моделювання визначено емпіричні межі фазових станів функціонування системи МПТ за значенням  $R_{mod}$ , зниження якого нижче встановленого порогу свідчить про втрату узгодженості прибуття транспортних засобів, зростання нерівномірності інтервалів руху та зниження якості транспортного обслуговування пасажирів під час пересадки, що може розглядатися як чинник зниження привабливості громадського транспорту.

Для оцінки впливу факторів на показники якості координації проведено повнофакторний експеримент. Результати дисперсійного аналізу повнофакторного експерименту підтвердили статистично значущий вплив варіативності інтервалів прибуття на модифікований параметр порядку  $R_{mod}$  за критерієм Фішера. За поточної структури маршрутної мережі, вплив інших факторів на параметр  $R_{mod}$  є менш вираженим порівняно з варіативністю інтервалів руху. Такий результат пояснюється структурною заблокованістю системи у неузгодженому режимі функціонування МПТ, що зумовлено низькою алгебраїчною зв'язністю графа пересадочних зв'язків (0,0079). Таким чином, за наявної конфігурації пересадочних зв'язків збільшення сили керуючого впливу або частки інтегрованих перевізників до централізованої диспетчерської системи саме по собі не гарантує переходу системи до режиму стійкої координації. Це свідчить, що першочерговим завданням є не лише посилення диспетчерського регулювання, а насамперед зменшення варіативності інтервалів прибуття та підвищення структурної зв'язності маршрутної мережі.

На основі отриманих результатів сформовано практичні рекомендації щодо впровадження ІАСК роботи різних видів МПТ, які передбачають вирівнювання інтервалів руху значущих маршрутів, переорієнтацію маршрутів, що обслуговуються в режимі маршрутного таксі, з дублюючих магістральних ділянок на підвізні напрямки, формування єдиної інформаційної бази, впровадження системи підтримки прийняття рішень диспетчером з можливістю API-інтеграції до

автоматизованої системи диспетчерського управління та використання результатів моніторингу для впровадження та реалізації механізму компенсації перевізникам. Запропонований підхід сприяє збалансуванню транспортної пропозиції, підвищенню якості транспортного обслуговування та реалізації принципів сталої міської мобільності.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що *вперше* запропоновано підхід до координації різних видів міського пасажирського транспорту у пересадочних вузлах на принципах сталої міської мобільності, який на відміну від існуючих, забезпечує узгодження параметрів роботи транспорту на основі розробленої мережево-динамічної моделі.

*Набула подальшого розвитку* технологія оперативної координації роботи різних видів міського пасажирського транспорту у пересадочних вузлах, яка, на відміну від існуючих, враховує фазовий стан транспортної системи під час вибору керуючих впливів для різних типів міжвидової взаємодії транспорту, що забезпечує вирівнювання інтервалів прибуття транспортних засобів у пересадочний вузол.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробленні методики оперативної оцінки та алгоритму автоматизованої системи підтримки прийняття рішень диспетчером щодо вибору керуючих впливів для адаптивного управління координацією роботи різних видів МПТ у пересадочних вузлах. Використання розроблених моделей, алгоритмів і рекомендацій для впровадження ІАСК дозволяє органам місцевого самоврядування обґрунтовувати рішення щодо збалансування транспортної пропозиції та зменшення рівня дублювання маршрутів, диспетчерським службам – оперативно виявляти порушення узгодженості прибуття транспортних засобів і запобігати їх скупченню, а замовнику транспортних послуг і перевізникам – застосовувати механізм компенсації з урахуванням виконаної транспортної роботи, якості послуг і відповідності рухомого складу екологічним стандартам.

Результати дослідження рекомендовано до впровадження в практичну діяльність диспетчерської служби Управління наземної інфраструктури КП «Харківський метрополітен» м. Харків, що здійснює оперативний контроль та

диспетчерське управління роботою МПТ; та використовуються у навчальному процесі ХНАДУ під час викладання дисципліни «Пасажирські перевезення», що підтверджується актами впровадження.

Ключові слова: міський пасажирський транспорт, громадський транспорт, стала міська мобільність, якість транспортного обслуговування, маршрут, пересадочний вузол, маршрутні пересадки, дублювання маршрутів, міський електротранспорт, міжвидова координація, інтервал руху, фазова синхронізація, стійкість транспортної системи, інтегрована система, динамічна модель, транспортне моделювання, адаптивне управління, механізм компенсації, експеримент.

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Потаман Н. В., Орда О. О., Орда О. М. Аналіз аспектів планування сталої міської мобільності в контексті євроінтеграційних реформ в Україні. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки* 2024. 10(41), Ч II. С. 189–195. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.188-195](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.188-195)

2. Орда О. О., Орда О. М. Методика формування раціональної технології перевезень пасажирів міським пасажирським транспортом. *Комунальне господарство міст*. 2025, том 3, випуск 191, С.650-656 DOI: 10.33042/2522-1809-2025-3-191-650-656

3. Potaman N., Hamed A., Orda O. Adaptation of European experience in compensation mechanisms for public transport operators in urban public transport in Ukraine. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2026, 13(44), 451–461, DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13\(44\).451-461](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13(44).451-461)

4. Yashchuk, Y., Orda, O., Orda, O., Butko, T. Adaptive Management of Urban Intermodal Hubs Under Risk: A Crowdsourced Demand Forecasting Approach. // In: Sierpiński, G., Naumann, S., Macioszek, E. (eds) *Transport Systems Development – Methods and Solutions. TSTP 2025. Lecture Notes in Networks and Systems*, 2026, vol 1789. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-032-14826-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-032-14826-1_7)

5. Orda O.M., Pavlenko O.V. The formalization of the process of coordinating the

operation of different modes of urban passenger transport based on a network-dynamic model. *Automobile Transport*. 2026. (58). 94–103. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2026.58.0.11>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Нагорний Є. В., Орда О. О., Орда О. М. Аналіз стану та розвитку інтегрованих технологій перевезень пасажирів міським електротранспортом. // *Інтелектуальні транспортні технології: зб. матеріалів 3-ї Міжнар. наук.-техн. конф.*, Харків, 22–23 листопада 2022 р., м. Харків: УкрДУЗТ, 2022. С. 81-83.

2. Нагорний Є. В., Орда О. М. Щодо питання впровадження інтегрованих технологій на міському пасажирському транспорті. // *79-а Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету: зб. тез доп.*, м. Київ, 17–19 травня 2023 р. Київ: НТУ, 2023. Вип. 79. С. 112.

3. Nahornyı Ye., Orda O. Using of logistics approach in the organisation of transport services by public passenger transport // *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустриальні центри та корпоративна логістика: матеріали дев'ятнадцятої міжнар. наук.-практ. конф.*, м. Харків, 1–2 червня 2023 р. Харків: УкрДУЗТ, 2023. С. 166.

4. Нагорний Є. В., Орда О. М. Аналіз теоретичних підходів підвищення якості транспортного обслуговування населення міст міським пасажирським транспортом // *Збірник тез доповідей 86-ї науково-технічної та науково-методичної конференції університету. Секція транспортних технологій*, м. Харків, 10–11 травня 2023 р. Харків: ХНАДУ, 2023. С. 3–5.

5. Нагорний Є. В., Орда О. М. Роль інтелектуальних транспортних систем у вирішенні проблем міської мобільності. // *Інтелектуальні транспортні технології: тези доп.* 4-ї Міжнар. наук.-техн. конф, м. Харків, 27–28 листопада 2023 р. Харків: УкрДУЗТ, 2023. С. 147.

6. Орда О. М. Принципи формування інтегрованих технологічних процесів функціонування пасажирського електротранспорту. // *Збірник матеріалів доповідей 86-ї Міжнародної наукової конференції студентів. Секція*

*транспортних технологій*. Харків, 08–12 квітня 2024 р., Харків: ХНАДУ, 2024. С. 164–166.

7. Орда О. О., Орда О. М. Основні напрями підвищення якості транспортного обслуговування населення міст за рахунок впровадження інтегрованих технологій на пасажирському транспорті. // *Стратегія якості в промисловості і освіті: матеріали XVIII міжнар. конф.*. Варна, Болгарія, 03–06 червня 2024 р., Технічний університет – ТУ Варна, 2024. С. 373–376.

8. Потаман Н. В. , Орда О. О., Орда О. М. Аспекти планування сталої міської мобільності в контексті євроінтеграційних реформ в Україні. *Автошляховик України*. 2023. Окремий випуск 277'2023: зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф. «Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури», м. Київ, 5–7 груд. 2023 р. С. 52–55. DOI: 10.33868/0365-8392-2023-277

9. Орда О. О., Орда О. М. Аналіз практик імплементації політик сталого транспорту на прикладі Чехії та їх перспектив в Україні. // *Збірник матеріалів 89-ї науково – технічна та науково – методична конференція ХНАДУ. Секція транспортних технологій*. Харків, 07–11 квітня 2025 р. Харків: ХНАДУ, 2025. С. 177–180.

10. Орда О. М. Обґрунтування методології моделювання інтегрованих технологій на міському пасажирському транспорті. // *Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*: зб. тез доп. 13–15 травня 2025 року, Київ: НТУ, 2025. Вип. 81. С. 378–379.

11. Павленко О. В., Орда О. М. Модель інтегрованої системи обслуговування населення міським громадським пасажирським транспортом. // *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика*: матеріали двадцять першої міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 5–6 червня 2025 р. Харків: УкрДУЗТ, 2025. С. 171–174.

12. Yashchuk, Y., Orda, O., Orda, O., Butko, T. Adaptive Management of Urban Intermodal Hubs Under Risk: A Crowdsourced Demand Forecasting Approach. // *Transport Systems Development – Methods and Solutions. TSTP 2025: Book of Abstracts*

of the 21st Scientific and Technical Conference Transport Systems Theory and Practice, September 9-10, 2025, Katowice. P. 59.

13. Ящук Ю. І., Орда О. М. Архітектура адаптивного управління міськими інтермодальними хабами в умовах ризику // *Інновації у системах управління безпекою та дорожнім рухом: зб. тез доп. VI міжнар. наук.-практ. конф.*, м. Харків, 18–19 листопада 2025 р., Харків: ХНАДУ, 2025. С. 81–83.

## ABSTRACT

*Orda O.M.* Improving the quality of transport services in cities through the implementation of integrated technologies in urban passenger transport. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for obtaining the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 275.03 «Transport Technologies (in Road Transport)». – Kharkiv National Automobile and Highway University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2026.

The research is dedicated to solving the scientific problem of improving the quality of urban transport services for the population by developing an adaptive management system for the integrated coordination of routes for various modes of urban passenger transport, based on the principles of sustainable urban mobility. Urban passenger transport in contemporary Ukraine is characterized by growing demands for the quality of transport services, the need to develop integrated transport systems, and the need to establish seamless urban mobility within urban transport nodes, which play an important role in integrating the national transport network with the Trans-European Transport Network (TEN-T). At the same time, the significant share of private carriers operating routes within historically established urban route networks creates an uneven distribution of transport supply, reduces the operational efficiency of urban electric transport as the backbone mode of public transport, and complicates the implementation of changes aimed at realizing the principles of sustainable urban mobility. As a result, excessive route duplication persists, leading to the accumulation of public transport rolling stock at key transfer hubs, irregular service headways, a decline in the quality of transport services for

the population, and reduced road traffic safety. This, in turn, further encourages some members of the population to abandon public transport in favor of private cars. Therefore, the development of models, methods, and adaptive management solutions that ensure the integrated coordination of routes of various modes of urban passenger transport through the dynamic alignment of their operational parameters is highly relevant for improving the quality of transport services for the population in accordance with the principles of sustainable urban mobility.

The research systematizes scientific sources and examines the theoretical foundations of ensuring the quality of urban passenger transport services in the context of sustainable urban mobility. The regularity patterns of service disruptions under conditions of a high level of route duplication are investigated, and the necessity of integrated coordination of inter-route and intermodal interactions of urban public transport at transfer nodes is substantiated, taking into account the role of urban electric transport as a backbone element of the transport system. It has been established that one of the key factors in ensuring the quality of transport services is the coordination of urban public transport and the synchronization of vehicle arrival times at key transfer nodes, particularly under conditions where different transport modes operate simultaneously. At the same time, the issues of coordinating municipal and private bus routes with trolleybus routes under conditions of uneven transport supply in urban transport networks, considering the operational constraints of urban electric transport, remain insufficiently studied. Most existing approaches focus either on the static assessment of passenger waiting times at stops and transfer nodes or on the dynamic management of headways within homogeneous transport flows, which does not fully account for the interaction among different modes of urban public transport.

The research proposes considering the integrated coordination of routes of different types of urban public transport as a set of organizational, informational, managerial, and economic solutions aimed at improving the quality of urban passenger transport services. Based on the analysis of existing approaches, the feasibility of developing an integrated adaptive coordination system (IACS) for different types of urban public transport and a compensation mechanism for carriers is substantiated as key components of balancing

transport supply, improving the quality of transport services, and increasing the attractiveness of public transport.

One of the key results of the study is the formation of a scientific and methodological approach to adaptive management of coordination of different types of urban public transport at transfer nodes, which takes into account the conditions of rolling stock bunching at transfer nodes and the operational constraints of urban electric transport. The proposed approach is based on a network-dynamic model for coordinating the operation of different types of urban public transport, developed using the adapted Kuramoto model and spectral analysis of the route network graph, where the order parameter ( $R$ ) is used as an indicator of the coordination component of transport service quality through the system's ability to achieve and maintain a state of functional stability at transfer nodes. The model adapts the classical Kuramoto formulation by restricting the coupling matrix to the structure of the route network graph, meaning that routes interact only at transfer nodes. The developed model ensures intermodal coordination with electric transport as a supporting element of the transport system with a fixed phase, taking into account operational constraints. The classification of phase states of the system has been adapted to the task of coordinating different types of urban public transport, which makes it possible to identify uncoordinated, partially coordinated, and coordinated modes of transport system operation according to the level of coordination of vehicle arrival intervals at the transfer node.

Experimental studies in the dissertation were carried out at three levels: transport modelling in the PTV VISUM software environment, statistical testing of the research hypotheses, and simulation modelling of the dynamic process of coordinating different types of urban public transport at a transfer node for three interaction types: “trolleybus – municipal bus”, “trolleybus – trolleybus”, and “trolleybus – route taxi”. Transport modelling was performed in the PTV VISUM software package to obtain a matrix of transfer correspondences using the example of the “Philharmonia” stopping point in Khmelnytskyi, which functions as an overloaded transfer node with a high level of route duplication of different transport modes. The transport model was validated by comparing the simulated values with the data obtained from field observations during the peak-load

period, using the indicator of the cumulative number of vehicle arrival moments at the transfer node during this period. This indicator makes it possible to compare the actual and simulated intensity of node service, as well as to assess the uniformity of vehicle arrivals over time. Based on the modelling results and the application of the Pareto principle, a group of the most significant routes was identified (oscillator routes), accounting for about 20% of the total number of routes passing through the transfer node, while they account for about 80% of the volume of route transfers in the studied route network.

For assessing the actual level of UPT coordination at the transfer node, the order parameter  $R(t)$  was calculated based on the vehicle arrival times at the stopping point obtained from GPS data of the EasyWay information service. The GPS data collection software module was implemented in Python using the *requests* and *beautifulsoup* libraries for webpage parsing. The obtained value of the order parameter  $R$  (0,3) characterizes the lack of movement coordination and the absence of stable synchronization of headways and vehicle arrivals. This is consistent with the results of field observations, which confirmed uneven vehicle arrivals and cases of vehicle bunching at the transfer node.

The simulation model was implemented in Python for a group of significant routes using a scenario-based approach to modelling the phase states of the transport system: a partially coordinated operating mode (chimera state), in which trolleybus and municipal bus routes are controlled by a centralized dispatching system, while route taxis operate outside the coordination system; an uncoordinated operating mode (phase drift state), which corresponds to the current operating regime without adaptive management, where headways constantly change and vehicles gradually converge. The stable coordination mode (phase-locking state) is considered the target mode of adaptive management with predictable headways for all routes. This approach made it possible to assess the coordination of operating parameters of different UPT modes and to take into account the role of trolleybus transport as a supporting element of the integrated coordination system. Based on the simulation modelling results, empirical boundaries of the phase states of the UPT system operation were determined according to the value of  $R_{mod}$ . A decrease in  $R_{mod}$

below the established threshold indicates a loss of vehicle arrival coordination, an increase in headway unevenness, and a decline in the quality of passenger transport services during transfers, which may be considered a factor reducing the attractiveness of public transport.

For assessing the influence of factors on coordination quality indicators, a full factorial experiment was conducted. The results of the analysis of variance confirmed, according to Fisher's criterion, a statistically significant effect of arrival headway variability on the modified order parameter  $R_{mod}$ . Under the current structure of the route network, the influence of other factors on  $R_{mod}$  is less pronounced compared with headway variability. This result is explained by the structural blocking of the system in the uncoordinated operating mode of UPT, caused by the low algebraic connectivity of the transfer connection graph (0,0079). Thus, under the existing configuration of transfer connections, increasing the strength of the control influence or the share of carriers integrated into the centralized dispatching system alone does not guarantee the transition of the system to a stable coordination mode. This indicates that the priority task is not only to strengthen dispatch regulation but, above all, to reduce arrival headway variability and improve the structural connectivity of the route network.

Based on the obtained results, practical recommendations for implementing the IACS for the operation of different types of UPT have been developed. These recommendations include equalizing the headways of significant routes, reorienting routes operated as route taxis from duplicating arterial sections to feeder directions, forming a unified information database, implementing a dispatcher decision support system with the possibility of API integration into an automated dispatch control system, and using monitoring results to introduce and implement a carrier compensation mechanism. The proposed approach contributes to balancing transport supply, improving the quality of transport services, and implementing the principles of sustainable urban mobility.

The scientific novelty of the obtained results is as follows: for the first time, an approach to the coordination of different modes of urban passenger transport at transfer nodes based on the principles of sustainable urban mobility has been proposed, which, in

contrast to known ones, ensures the coordination of transport operating parameters on the basis of the developed network-dynamic model.

The technology of operational coordination of different modes of urban passenger transport at transfer nodes has been further developed, which, in contrast to existing approaches, takes into account the phase state of the transport system when selecting control actions for different types of intermodal interactions, thereby ensuring the equalization of vehicle arrival headways at transfer nodes.

The practical significance of the research results lies in the development of a methodology for operational assessment and an algorithm for an automated dispatcher decision support system for selecting control actions aimed at adaptive management of the coordination of different modes of urban public transport at transfer nodes. The use of the developed models, algorithms, and recommendations for implementing the IACS enables local authorities to substantiate decisions on balancing transport supply and reducing route duplication, dispatching services to promptly identify disruptions in vehicle arrival coordination and prevent vehicle bunching, and transport service authorities and carriers to apply a compensation mechanism that takes into account the volume of transport work performed, service quality, and compliance of rolling stock with environmental standards.

The research results are recommended for implementation in the practical activities of the Ground Infrastructure Management dispatching service and are used in the educational process at Kharkiv National Automobile and Highway University in teaching the course “Passenger Transportation”, as confirmed by implementation acts.

Keywords: urban passenger transport, public transport, sustainable urban mobility, transport service quality, route, transfer node, route transfers, route duplication, urban electric transport, intermodal coordination, headway, phase synchronization, transport system robustness, integrated system, dynamic model, transport modelling, adaptive management, compensation mechanism, experiment.

List of publications of the candidate:

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

1. Potaman N.V., Orda O.O., Orda O.M. Analysis of Aspects of Sustainable Urban Mobility Planning in the Context of European Integration Reforms in Ukraine // *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2024. Issue 10(41), Part II. 188–195. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.188-195](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.188-195)
2. Orda O.O., Orda O.M. Methodology for Forming a Rational Technology of Passenger Transportation by Urban Passenger Transport // *Municipal Economy of Cities*. 2025, Volume 3, Issue 191, 650–656. DOI: 10.33042/2522-1809-2025-3-191-650-656.
3. Potaman N., Hamed A., Orda O. Adaptation of European Experience in Compensation Mechanisms for Public Transport Operators in Urban Public Transport in Ukraine // *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2026, 13(44), 451–461. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13\(44\).451-461](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13(44).451-461)
4. Yashchuk Y., Orda O., Orda O., Butko T. Adaptive Management of Urban Intermodal Hubs Under Risk: A Crowdsourced Demand Forecasting Approach // *In: Sierpiński G., Naumann S., Macioszek E. (eds) Transport Systems Development – Methods and Solutions. TSTP 2025. Lecture Notes in Networks and Systems*, 2026, Vol. 1789. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-032-14826-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-032-14826-1_7)
5. Orda O.M., Pavlenko O.V. The formalization of the process of coordinating the operation of different modes of urban passenger transport based on a network-dynamic model. *Automobile Transport*. 2026. (58). 94–103. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2026.58.0.11>

Scientific works that confirm the approbation of the dissertation materials:

1. Nahornyi Ye.V., Orda O.O., Orda O.M. Analysis of the State and Development of Integrated Technologies for Passenger Transportation by Urban Electric Transport // *Intelligent Transport Technologies: Proceedings of the 3rd International Scientific and Technical Conference*, November 22–23, 2022. Kharkiv, UkrSURT, 81–83.
2. Nahornyi Ye.V., Orda O.M. On the Issue of Implementing Integrated Technologies in Urban Passenger Transport // *Collection of Abstracts of the 79th Scientific Conference of Academic Staff, Postgraduate Students, Students, and Employees of Separate Structural Subdivisions of the University*. May 17–19, 2023. Kyiv, NTU. 2023. Issue 79. 112.

3. Nahornyi Ye., Orda O. Using of Logistics Approach in the Organisation of Transport Services by Public Passenger Transport // *International Transport Infrastructure, Industrial Centers and Corporate Logistics: Proceedings of the Nineteenth International Scientific and Practical Conference*, Kharkiv, June 1–2, 2023. Kharkiv: UkrSURT, 2023. 166.
4. Nahornyi Ye. V., Orda O. M. Analysis of Theoretical Approaches to Improving the Quality of Transport Services for the Urban Population by Urban Passenger Transport // *Collection of Abstracts of the 86th Scientific, Technical and Scientific-Methodical Conference of the University. Section of Transport Technologies*, Kharkiv, May 10–11, 2023. Kharkiv: KhNAHU, 2023. 3–5.
5. Nahornyi Ye. V., Orda O. M. The Role of Intelligent Transport Systems in Solving Urban Mobility Problems // *Intelligent Transport Technologies: Abstracts of the 4th International Scientific and Technical Conference*, Kharkiv, November 27–28, 2023. Kharkiv: UkrSURT, 2023. 147.
6. Orda O. M. Principles of Forming Integrated Technological Processes of Passenger Electric Transport Functioning // *Collection of Proceedings of the 86th International Scientific Conference of Students. Section of Transport Technologies*. Kharkiv, April 08–12, 2024. Kharkiv: KhNAHU, 2024. 164–166.
7. Orda O. O., Orda O. M. Main Directions for Improving the Quality of Transport Services for the Urban Population through the Implementation of Integrated Technologies in Passenger Transport // *Quality Strategy in Industry and Education: Proceedings of the XVIII International Conference*. Varna, Bulgaria, June 03–06, 2024. Technical University of Varna, 2024. 373–376.
8. Potaman N. V., Orda O. O., Orda O. M. Aspects of Sustainable Urban Mobility Planning in the Context of European Integration Reforms in Ukraine. // *Avtoshliakhovyk Ukrainy*. 2023. Special Issue 277'2023: Collection of Abstracts of the International Scientific and Practical Conference “Prospects for the Development of Road Transport and Infrastructure”, Kyiv, December 5–7, 2023. 52–55. DOI: 10.33868/0365-8392-2023-277.

9. Orda O. O., Orda O. M. Analysis of Practices of Implementing Sustainable Transport Policies on the Example of the Czech Republic and Their Prospects in Ukraine // *Proceedings of the 89th Scientific, Technical and Scientific-Methodical Conference of Kharkiv National Automobile and Highway University*. Section of Transport Technologies. Kharkiv, April 07–11, 2025. Kharkiv: KhNAHU, 2025. 177–180.

10. Orda O. M. Substantiation of the Methodology for Modeling Integrated Technologies in Urban Passenger Transport // Scientific Conference of Academic Staff, Postgraduate Students, Students and Employees of Separate Structural Subdivisions of the University: Collection of Abstracts, May 13–15, 2025. Kyiv: NTU, 2025. Issue 81. 378–379.

11. Pavlenko O. V., Orda O. M. Model of an Integrated System for Serving the Population by Urban Public Passenger Transport // *International Transport Infrastructure, Industrial Centers and Corporate Logistics: Proceedings of the Twenty-First International Scientific and Practical Conference*, Kharkiv, June 5–6, 2025. Kharkiv: Ukrainian State University of Railway Transport, 2025. 171–174.

12. Yashchuk Y., Orda O., Orda O., Butko T. Adaptive Management of Urban Intermodal Hubs Under Risk: A Crowdsourced Demand Forecasting Approach // *Transport Systems Development – Methods and Solutions. TSTP 2025: Book of Abstracts of the 21st Scientific and Technical Conference Transport Systems Theory and Practice*, September 9–10, 2025, Katowice. p. 59.

13. Yashchuk Yu. I., Orda O. M. Architecture of Adaptive Management of Urban Intermodal Hubs under Risk Conditions // *Innovations in Safety and Road Traffic Management Systems: Collection of Abstracts of the VI International Scientific and Practical Conference*, Kharkiv, November 18–19, 2025. Kharkiv: KhNAHU, 2025. 81–83.

## ЗМІСТ

Вступ.....	23
Розділ 1 Огляд сучасного стану теорії та практики організації транспортного обслуговування населення міським пасажирським транспортном.....	30
1.1 Аналіз теоретичних підходів до підвищення якості транспортного обслуговування населення міст міським пасажирським транспортом.....	30
1.2 Аспекти планування сталої міської мобільності в контексті євроінтеграційних реформ в Україні.....	45
1.3 Принципи формування інтегрованих технологічних процесів функціонування міського пасажирського транспорту.....	53
Висновки по першому розділу.....	69
Розділ 2 Теоретичні основи підвищення якості транспортного обслуговування населення за рахунок впровадження інтегрованих технологій на міському пасажирському транспорті.....	71
2.1 Інформаційно-технологічне забезпечення координації роботи різних видів міського пасажирського транспорту у пересадочних вузлах.....	71
2.2 Формування інтегрованої адаптивної системи координації роботи різних видів міського пасажирського транспорту.....	75
2.3 Розробка мережево-динамічної моделі координації роботи різних видів міського пасажирського транспорту.....	79
2.3.1 Адаптація моделі Курамото до задачі координації	79
2.3.2 Класифікація фазових станів транспортної системи за рівнем фазової узгодженості.....	91
2.4 Формування організаційно-економічного механізму реалізації інтегрованих технологій на міському пасажирському транспорті.....	96
Висновки по другому розділу.....	103

Розділ 3 Експериментальні дослідження підвищення якості транспортного обслуговування населення міським пасажирським транспортом.....	105
3.1 Формування емпіричної бази дослідження.....	106
3.1.1 Характеристика об'єкту проведення експериментальних досліджень..	106
3.1.2 Актуалізація та верифікація транспортної моделі.....	109
3.1.3 Формування когерентного ядра маршрутної мережі за результатами транспортного моделювання.....	112
3.1.4 Методика парсингу даних EasyWay для фіксації фактичних моментів прибуття транспортних засобів.....	119
3.2 Розробка імітаційної моделі процесу координації різних видів міського пасажирського транспорту у пересадочних вузлах.....	122
3.3 Результати моделювання процесу координації різних видів міського пасажирського транспорту у пересадочних вузлах.....	127
Висновки по третьому розділу.....	133
Розділ 4 Аналіз результатів експериментальних досліджень підвищення якості транспортного обслуговування населення міським пасажирським транспортом.....	135
4.1 Визначення впливу параметрів транспортного процесу у пересадочних вузлах на критерій ефективності.....	135
4.2 Розробка практичних рекомендацій щодо впровадження інтегрованої адаптивної системи координації різних видів МПТ.....	141
Висновки по четвертому розділу.....	151
Висновки.....	152
Список використаних джерел.....	155
Додаток А Акти впровадження результатів дослідження.....	170
Додаток Б Лістинг програмного коду визначення спектру власних значень (матриця Лапласа D) мовою <i>Python</i> .....	173
Додаток В Лістинг програмного модуля збору GPS-даних інформаційного сервісу EasyWay мовою <i>Python</i> .....	175

Додаток Г Лістинг програмної реалізації процесу координації різних видів міського пасажирського транспорту у пересадочних вузлах мовою <i>Python</i> (фрагмент).....	179
Додаток Д Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	184

## ВСТУП

**Актуальність теми.** З огляду на поточний стан пасажирських перевезень в населених пунктах України, гостро постає питання щодо необхідності комплексного вирішення проблем стабільного функціонування міського пасажирського транспорту (МПТ) та забезпечення належного рівня якості транспортного обслуговування населення. Вирішення низки існуючих проблем полягає у впровадженні системи надання суспільно важливих послуг з перевезень пасажирів автобусними маршрутами, що обслуговують оператори різних форм власності, маршрутами міського електротранспорту за рахунок впровадження інтегрованих транспортних технологій, заснованих на узгодженій взаємодії різних видів МПТ.

Важливим засобом впровадження інтегрованих транспортних технологій у МПТ для ефективного розвитку та покращення якісного рівня транспортного обслуговування населення є створення ефективної системи управління, яка включає організацію і координацію роботи всіх видів МПТ. Комплексному вирішенню важливих проблем повинно передувати системне дослідження процесів управління інтелектуальною транспортною системою міст (ІТС). ІТС відносять до складних систем, і тому важливим засобом забезпечення належного рівня якості і безпеки перевезень пасажирів є створення ефективних методів організації та координації системи перевезень пасажирів автомобільним та міським електротранспортом на основі сучасних інформаційних технологій з урахуванням інтересів всіх учасників транспортного процесу.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота відповідає положенням оновленої Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року, Указу Президента України «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року», Стратегії сталого розвитку України до 2030 року, європейським підходам до формування планів сталої міської мобільності, положенням «Sustainable and Smart Mobility Strategy» від Європейської Комісії, а також проєкту ООН SD21 «Sustainable Development in

the 21st Century», а також з пріоритетами проєктів «Міський громадський транспорт в Україні» та «Міський громадський транспорт в Україні II» від Міністерства розвитку громад та територій України, спрямованих на оновлення рухомого складу, розвиток міського електротранспорту, модернізацію транспортної інфраструктури, підвищення якості пасажирських перевезень і покращення екологічного стану міст. Тематика дослідження узгоджується з пріоритетами розвитку сталої, безпечної, доступної, цифрової та ефективної транспортної системи, підвищення якості транспортного обслуговування населення, інтеграції різних видів транспорту у функціональну мультимодальну систему, розвитку інтелектуальних транспортних систем і концепції «Mobility as a Service» (MaaS). У межах зазначених стратегічних документів дисертаційна робота спрямована на розв'язання наукового завдання підвищення якості транспортного обслуговування населення міст шляхом розробки та впровадження інтегрованих технологій на МПТ з урахуванням принципів сталої міської мобільності, цифровізації транспортних процесів і підвищення привабливості громадського транспорту.

**Мета та задачі дослідження.** Метою даного дисертаційного дослідження є підвищення якості транспортного обслуговування населення міст шляхом розробки моделей координації роботи різних видів МПТ у пересадочних вузлах на засадах концепції сталої міської мобільності.

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

– проаналізувати теоретичні засади забезпечення якості транспортного обслуговування населення міст за рахунок впровадження інтегрованих технологій на МПТ у контексті сталої міської мобільності;

– формалізувати модель координації роботи різних видів МПТ у пересадочних вузлах на основі моделі Курамото та спектрального аналізу графа пересадочних зв'язків маршрутів;

– розробити методику до розрахунку суми компенсації перевізникам за виконану транспортну роботу у рамках договірних зобов'язань перевізників за умови участі їх в системі координації;

– розробити інтегровану адаптивну систему координації (ІАСК) на основі імітаційної моделі;

– провести експериментальні дослідження впливу факторів на показники якості координації роботи різних видів транспорту у пересадочних вузлах за сценарним підходом, розробити практичні рекомендації щодо впровадження розробленої ІАСК.

**Об’єктом дослідження** є процес координації різних видів міського пасажирського транспорту у пересадочних вузлах.

**Предметом дослідження** є залежності показників якості транспортного обслуговування населення від рівня динамічної координації інтервалів прибуття різних видів міського пасажирського транспорту у пересадочних вузлах.

**Методи дослідження.** Розв’язання поставлених у роботі завдань здійснювалося із застосуванням комплексу загальнонаукових і спеціальних методів дослідження, що базуються на принципах системного підходу до аналізу й моделювання транспортних процесів. Зокрема, використано методи системного аналізу для дослідження процесу транспортного обслуговування населення МПТ як складної соціально-технічної системи. Методи теорії графів та спектрального аналізу матриці Лапласа застосовано для оцінки алгебраїчної зв’язності графа пересадочних зв’язків маршрутів; метод Парето використано для відбору маршрутів з найбільшим обсягом маршрутних пересадок за розрахунковий період, що формують когерентне ядро мережево-динамічної моделі. Для формалізації координації різних видів МПТ у пересадочних вузлах та ідентифікації фазових станів системи застосовано методи нелінійної динаміки та теорії синхронізації на основі адаптованої моделі Курамото. Збір емпіричних даних щодо параметрів функціонування транспортних засобів у пересадочному вузлі здійснювався методом натурних спостережень. Для статистичної обробки отриманих даних, оцінювання варіативності інтервалів прибуття та встановлення закономірностей прибуття транспортних засобів використано методи теорії ймовірностей і математичної статистики. Для аналізу динамічних аспектів взаємодії різних видів МПТ у пересадочних вузлах використано імітаційне моделювання. Транспортне

моделювання із застосуванням математичного моделювання у програмному комплексі PTV Visum проведено для актуалізації матриці маршрутних пересадок у пересадочному вузлі. Для розробки методики до розрахунку суми компенсації перевізникам відповідно до Регламенту ЄС №1370/2007 застосовано методи економічного аналізу.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає в тому, що:

– *вперше* запропоновано підхід до координації різних видів міського пасажирського транспорту у пересадочних вузлах на принципах сталої міської мобільності, який на відміну від існуючих, забезпечує узгодження параметрів роботи транспорту на основі розробленої мережево-динамічної моделі;

– *набула подальшого розвитку* технологія оперативної координації роботи різних видів МПТ у пересадочних вузлах, яка, на відміну від існуючих, враховує фазовий стан транспортної системи під час вибору керуючих впливів для різних типів міжвидової взаємодії транспорту, що забезпечує вирівнювання інтервалів прибуття транспортних засобів у пересадочний вузол.

**Практичне значення результатів дослідження** полягає у розробленні програмного інструментарію для органів управління транспортом і диспетчерських служб, що забезпечує впровадження інтегрованої адаптивної системи координації різних видів МПТ у пересадочних вузлах. Ключовим прикладним результатом дослідження є алгоритм підтримки прийняття рішень диспетчером щодо вибору керуючих впливів під час оперативної координації роботи різних видів МПТ у пересадочних вузлах, який дозволяє виявляти порушення узгодженості прибуття транспортних засобів, запобігати їх скупченню та коригувати параметри роботи МПТ. На відміну від традиційних підходів до диспетчерського управління, запропонований інструментарій дозволяє враховувати фазовий стан транспортної системи, тип міжвидової взаємодії та різний рівень керованості перевізників. Розроблена ІАСК може бути використана органами місцевого самоврядування для обґрунтування рішень щодо збалансування транспортної пропозиції, зменшення рівня дублювання маршрутів і посилення ролі міського електротранспорту; алгоритм підтримки прийняття рішень диспетчером може бути використаний

диспетчерськими службами для оперативного коригування параметрів роботи МПТ у пересадочних вузлах для запобігання їх скупченню; запропонований механізм компенсації – для формування прозорих договірних умов участі перевізників в ІАСК з урахуванням фактично виконаної транспортної роботи, рівня якості наданих послуг та відповідності рухомого складу встановленим екологічним стандартам. Практичні рекомендації можуть бути використані органами управління транспортом для впровадження ІАСК у практику міських пасажирських перевезень.

Результати дослідження рекомендовано до впровадження в практичну діяльність диспетчерської служби Управління наземної інфраструктури КП «Харківський метрополітен» м. Харків, що здійснює оперативний контроль та диспетчерське управління роботою МПТ; та використовуються у навчальному процесі Харківського національного автомобільно-дорожнього університету під час викладання дисципліни «Пасажирські перевезення», що підтверджується актами впровадження.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові результати, представлені в дисертаційній роботі, отримані автором самостійно або за його безпосередньої участю під керівництвом наукового керівника та наведені у роботах [1-17]. За матеріалами дисертації у співавторстві опубліковано **4 статті у фахових виданнях та 1 стаття у рецензованому виданні, що індексується у наукометричній базі Scopus.** Особистий внесок здобувача полягає в наступному: проведено аналіз аспектів планування сталої міської мобільності в контексті євроінтеграційних реформ та обґрунтовано перспективи імплементації політик сталого транспорту в Україні [1, 10, 13-14]; проаналізовано теоретичні підходи до підвищення якості транспортного обслуговування населення міст [7]; розроблено структурну модель процесу транспортного обслуговування пасажирів, що визначає його параметри, компоненти та взаємозв'язки; обґрунтовано доцільність використання сценарного підходу до оцінювання якості транспортного обслуговування у рамках якого виокремлено «зразкову послугу» як цільовий стан системи [2]; сформульовано принципи формування інтегрованих технологічних процесів функціонування

пасажирського електротранспорту, обґрунтовано напрями впровадження та методологію моделювання інтегрованих технологій на МПТ [6-8, 11, 15, 16]; розроблено мережево-динамічну модель координації різних видів МПТ у пересадочних вузлах на основі адаптованої моделі Курамото, проведено формалізацію процесу координації МПТ [5, 11]; адаптовано європейський досвід механізмів компенсації операторам громадського транспорту до умов функціонування МПТ в Україні [1, 13], розроблено відповідний методичний підхід [3]; розроблено архітектуру адаптивного управління міськими інтермодальним хабом як пересадочним вузлом МПТ, що є концептуальною основою для побудови цифрового двійника пересадочного вузла, в якому взаємодіють різні види транспорту за сценарним підходом [4, 12, 13].

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

- 3-а Міжнародна науково-технічна конференція «Інтелектуальні транспортні технології» (УкрДУЗТ, м. Харків, 2022);
- 79-а Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету (НГУ, м. Київ, 2023);
- Дев'ятнадцята науково-практична міжнародна конференція «Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика» (УкрДУЗТ, м. Харків, 2023);
- 86-а науково-технічна та науково-методична конференція університету (ХНАДУ). Секція транспортних технологій (ХНАДУ, м. Харків, 2023);
- 4-а Міжнародна науково-технічна конференція «Інтелектуальні транспортні технології» (УкрДУЗТ, м. Харків, 2023);
- 86-а Міжнародна наукова конференція студентів (ХНАДУ). Секція транспортних технологій (ХНАДУ, м. Харків, 2024);
- XVIII International Conference «Strategy of Quality in Industry and Education» (Varna, Bulgaria, 2024);

– IV міжнародна науково-практична конференція «Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури (ДП “ДержавтотрансНДІпроект” ДП «НІРІ» НТУ, м. Київ, 2024);

– 89-а науково-технічна та науково-методична конференція ХНАДУ. Секція транспортних технологій (ХНАДУ, м. Харків, 2025);

– Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету (НТУ, м. Київ, 2025);

– Двадцять перша науково-практична міжнародна конференція «Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика» (УкрДУЗТ, м. Харків, 2025);

– 21st Scientific and Technical Conference Transport Systems Theory and Practice (Katowice, 2025);

– VI Міжнародна науково-практична конференція «Інновації у системах управління безпекою та дорожнім рухом» (ХНАДУ, м. Харків, 2025).

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

**Публікації.** По матеріалам дисертаційної роботи опубліковано 18 наукових праць, із них: 4 статті у періодичних фахових виданнях, що входять до переліку МОН України; 1 стаття у виданні, що включено до наукометричної бази SCOPUS; 13 тез доповідей у збірках праць за матеріалами наукових конференцій.

**Структура дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, бібліографії з 116 найменувань і 5 додатків. Загальний обсяг роботи становить 186 сторінок, обсяг основного тексту – 132 сторінки, 30 рисунків, 6 таблиць.

## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ ОРГАНІЗАЦІЇ ОБСЛУГОВУВАННЯ НАСЕЛЕННЯ МІСЬКИМ ПАСАЖИРСЬКИМ ТРАНСПОРТОМ

#### 1.1 Аналіз теоретичних підходів підвищення якості транспортного обслуговування населення міст міським пасажирським транспортом

Якість транспортного обслуговування населення є одним із ключових критеріїв ефективності функціонування МПТ, оскільки безпосередньо впливає на витрати часу пасажирів, комфортність поїздки, безпеку, екологічність перевезень та рівень соціальної задоволеності населення [19]. Відповідно до положень законодавства України у сфері транспорту, – зокрема Закони України «Про транспорт», «Про автомобільний транспорт», «Про міський електротранспорт» [20-22], основним завданням транспорту є забезпечення своєчасного, якісного й повного задоволення потреб населення у перевезеннях за умови раціонального та ефективного використання рухомого складу. Особлива роль у виконанні цього завдання належить транспорту загального користування, який забезпечує щоденну мобільність населення та функціонування міського середовища. Міський пасажирський транспорт (МПТ) задовільняє потреби населення у пересуванні та, безпосередньо, впливає на доступність місць праці, закладів освіти, соціально-побутового обслуговування, культурного розвитку та дозвілля. Від рівня його організації, регулярності та якості роботи значною мірою залежить не лише ефективність функціонування міста, а й рівень життя населення, оскільки незадовільний стан транспортного обслуговування може спричиняти зростання соціальної напруги в суспільстві.

У Національній транспортній стратегії України на період до 2030 року [23] (НТС) громадський пасажирський транспорт розглядається як один із ключових елементів забезпечення сталої, безпечної, доступної та екологічно орієнтованої мобільності населення. В основному стратегічному документі зазначається

необхідність підвищення ролі електричного транспорту в містах, розвитку інтегрованих послуг пасажирських перевезень, удосконалення якості транспортного обслуговування та наближення національної транспортної політики до підходів Європейського Союзу. Однією з проблем, визначених у НТС, є недостатній рівень використання міського електричного транспорту. Це пов'язується із застарілістю рухомого складу та інфраструктури, а також із впливом зовнішніх чинників, зокрема пошкодженнями енергетичної системи України. У НТС зазначено, що станом на кінець 2023 року значна частина тролейбусного парку вже експлуатувалася понад нормативно бажаний строк, а довжина тролейбусних ліній загального користування в Україні становила понад 3,2 тис. км без урахування тимчасово окупованих територій. Це свідчить про наявність одночасно двох тенденцій: з одного боку, міський електротранспорт має розвинену інфраструктурну основу, а з іншого – потребує оновлення, модернізації та більш ефективного використання в системі міських пасажирських перевезень.

Серед проблем, які потребують розв'язання для підвищення рівня мобільності та якості транспортних послуг для пасажирів у НТС зазначається «відсутність законодавчо закріплених критеріїв якості послуг громадського пасажирського транспорту», узгоджених із європейськими підходами. Така ситуація ускладнює об'єктивне оцінювання якості перевезень, порівняння результатів функціонування різних транспортних систем (ТС) і формування дієвих механізмів підвищення рівня транспортного обслуговування. У документі також використовується поняття інтегрованих громадських послуг пасажирських перевезень, під якими розуміються взаємопов'язані транспортні послуги в межах певної території, що мають спільне інформаційне забезпечення, систему продажу квитків і розклад. Для міських ТС це означає необхідність переходу від ізольованої роботи окремих маршрутів і перевізників до узгодженої системи, у якій різні види транспорту взаємодіють як елементи єдиного транспортного сервісу.

Окремим напрямом НТС є підвищення якості послуг МПТ шляхом упровадження механізмів управління якістю пасажирських перевезень, зокрема через координацію роботи різних видів транспорту у пересадочних вузлах. Такий

підхід спрямований на формування доступної, якісної та безпечної мобільності для пасажирів, а також на підвищення стійкості транспортного сполучення і захист пасажирів від наслідків збоїв у роботі ТС відповідно до вимог законодавства ЄС.

Розвиток міського електротранспорту у НТС пов'язується з європейським курсом на декарбонізацію транспорту, підвищення енергоефективності та формування «зеленої» мобільності відповідно до Європейського зеленого курсу (ЄЗК). Для України як держави-кандидата на членство в Європейському Союзі це передбачає підтримку розвитку електротранспорту (електробусів, тролейбусів, трамваїв) та інших екологічно чистіших видів транспорту. У цьому аспекті міський електротранспорт доцільно розглядати не лише як окремий вид перевезень, а як опорний елемент міської ТС, режим руху якого може задавати базові часові орієнтири для координації інших видів транспорту в пересадочних вузлах.

Таким чином, положення НТС підтверджують актуальність дослідження, спрямованого на підвищення якості транспортного обслуговування населення шляхом розроблення та впровадження інтегрованих технологій на МПТ.

Підвищення рівня якості транспортного обслуговування населення в секторі МПТ з позицій сучасних концепцій зумовлене суспільним інтересом і забезпечується розробкою інноваційних рішень для вирішення найважливіших проблем урбанізації в різних країнах. Сучасні міські ТС мають складну структуру, що вимагає комплексного підходу до управління та організації для забезпечення сталого розвитку міст і підвищення якості життя населення [24, 25]. На міжнародних ринках транспортних послуг ефективний та інтегрований громадський транспорт (ГТ) набуває стратегічного значення для забезпечення сталого розвитку міст. Він є ключовим інструментом для зменшення залежності від приватного автотранспорту, оптимізації міського простору, зниження рівня забруднення повітря та підвищення мобільності населення. Однак, у великих містах України результати опитувань свідчать про зменшення частки користувачів послуг МПТ у 2024 році [26]. Проте, з початку військових дій зросла частка населення, що здійснює переміщення власним автомобілем, і зросла частка

населення з наявністю посвідчення водія категорій «А» та «В», що також може свідчити про зниження привабливості послуг МПТ.

Провідна роль МПТ у забезпеченні нормальної життєдіяльності міст та підвищенні його значимості у формуванні соціально-економічного розвитку міського середовища потребує постійного обліку ефективності процесу транспортного обслуговування населення та розробки заходів з її підвищення. Обов'язковим елементом системи МПТ є облік зворотного зв'язку, що представляється у вигляді інформації про фактичний рівень якості обслуговування. Процедура визначення рівня якості, з метою розробки заходів з підвищення рівня якості транспортного обслуговування, що забезпечується в результаті впровадження управлінських заходів на елементах системи, потребує виділення принципів, формалізації моделей та алгоритму дій, які являють собою оцінювання її відповідності вимогам пасажирів.

Процеси ідентифікації якості неможливо описати повно і об'єктивно лише аналітичними моделями розрахунку технологічних показників роботи МПТ, що обумовлено істотною складністю цих процесів та значною роллю психофізіологічних аспектів її сприйняття населенням.

У дослідженні Давідіч Н. В. [19] якість транспортного обслуговування розглядається як один із базових критеріїв формування параметрів процесу перевезення пасажирів МПТ. Авторка зазначає, що незадовільний рівень якості перевезень проявляється у збільшенні витрат часу пасажирів на пересування, зниженні комфортності, безпеки, культури обслуговування та екологічності транспортних засобів. Водночас підкреслюється, що планування управління якістю має бути спрямоване на встановлення вимог до параметрів технологічного процесу перевезень, а наявні методи оцінювання якості не повною мірою враховують сприйняття пасажирами умов обслуговування. Це дає підстави розглядати якість транспортного обслуговування як комплексну характеристику, що формується не лише параметрами окремого маршруту, а й узгодженістю функціонування маршрутної мережі, регулярністю руху та ефективністю взаємодії різних видів МПТ.

Структурна обмеженість більшості існуючих підходів підвищення якості проявляється в тому, що при ідентифікації рівня якості не враховується міжрівневий вплив інтеграційної взаємодії елементів системи при формуванні інтегрального критерію ефективності: технічне середовище (транспортне підприємство) – технологічне середовище (транспортна інфраструктура) – споживче середовище (пасажери). А принципова невідповідність проявляється в вимогах до встановлення меж рівнів сприйняття якості для різних маршрутних мереж та їх відокремлених елементів в системі МПТ. Також серед актуальних завдань підвищення рівня якості є адаптація в межах такої процедури системного підходу, як основоположного інструментарію її дослідження. Кінцевою метою застосування такого підходу є системо-технологічне проектування контуру багаторівневого управління МПТ, спрямованого на забезпечення його функціонування з заданою ефективністю та якістю. Для вирішення такого завдання необхідно мати у своєму розпорядженні інформацію про те, як різні рівні структурно-функціональної організації МПТ впливають на оціночні параметри сприйняття споживчою підсистемою наданої інтегрованої транспортної послуги.

У дослідженні Вдовиченка В. О. [27] МПТ розглядається як складна багаторівнева система, ефективність якої залежить від взаємодії об'єктів інфраструктури, маршрутної мережі, міської ТС та міського середовища (рис. 1.1). Автором сформовано концепцію функціональної сталості об'єктів інфраструктури МПТ, яка ґрунтується на оцінюванні сервісно-ресурсного стану суб'єктів взаємодії та спрямована на забезпечення відповідності технічної пропозиції потребам споживчої підсистеми. У межах соціально-маркетингового підходу оцінювання сервісної якості транспортного обслуговування ґрунтується на визначенні розривів між потребами пасажирів і фактичними можливостями обслуговуючої підсистеми. Дефіцит провізних можливостей призводить до незадоволення попиту та зниження якості перевезень.

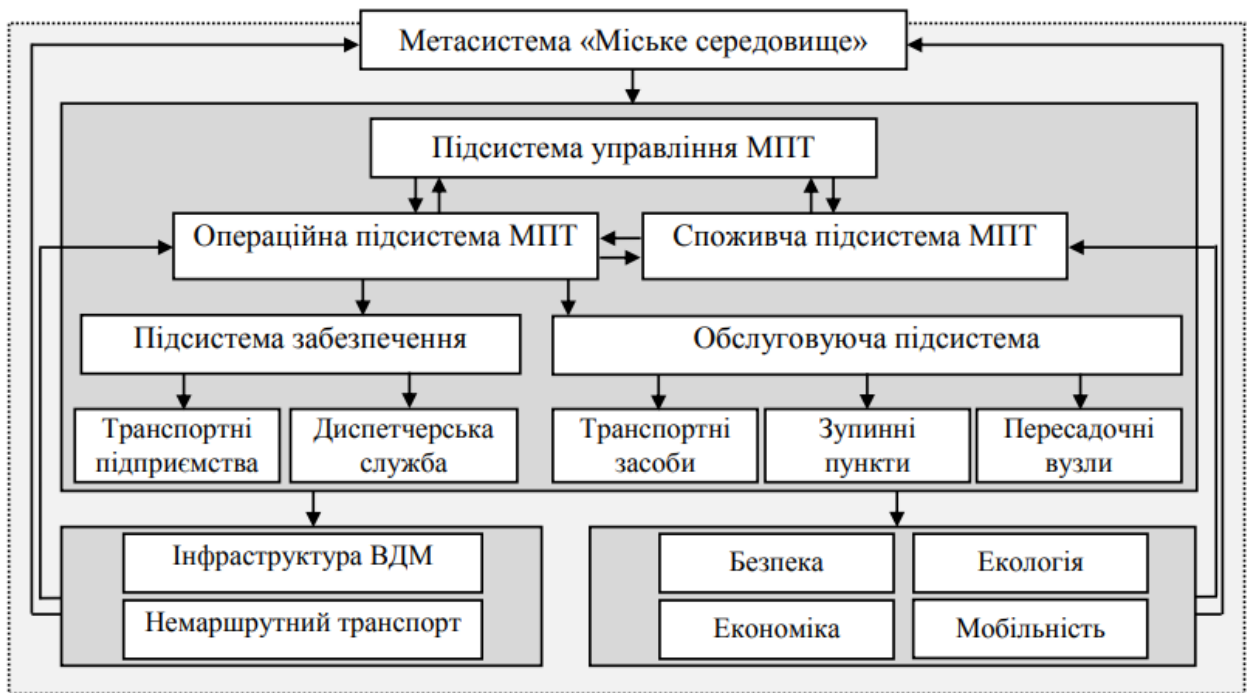


Рисунок 1.1 – Структурно-організаційна модель підсистем МПТ [27]

Технологічний розрив характеризує невідповідність фактичного використання рухомого складу реальним умовам перевезень і маркетинговим вимогам пасажирів. Його виникнення може бути зумовлене зниженням експлуатаційної швидкості, непродуктивними простоями транспортних засобів, неузгодженістю часових параметрів взаємодії між споживчою та обслуговуючою підсистемами тощо. Автор в роботі підтверджує гіпотезу, що підвищення якості транспортного обслуговування пасажирів можливо забезпечувати через удосконалення взаємодії суб'єктів маршрутного потоку в транспортно-пересадочних вузлах (ТПВ), раціоналізацію тривалості сервісного простою транспортних засобів, розподіл ресурсних можливостей зупиночних пунктів (ЗП) і слот-координацію розкладу руху [27]. Запропонований підхід є фундаментальним внеском у розвиток теорії функціонування ТПВ, і формує уявлення про нього як про активний елемент системи МПТ, у якій відбувається просторово-часове узгодження транспортної пропозиції та пасажирського попиту. Принциповим теоретичним результатом дослідження є введення поняття додаткового сервісного часу простою транспортних засобів у ЗП як інструменту часткової компенсації флуктуацій прибуття та розширення діапазону синхронізації перебування

транспортних засобів різних маршрутів у вузлі. Експериментально показано, що такий підхід забезпечує скорочення середнього часу перебування пасажирів у ТПВ на 15,4–23,6 % за інтенсивності транзитних маршрутів до 40 авт./год. Водночас автор переважно зосереджується на раціональному використанні ресурсних можливостей ТПВ під час взаємодії суб'єктів маршрутного потоку в межах ТПВ. Недостатньо розкритими залишаються питання динамічної координації роботи різних видів МПТ на спільних ділянках маршрутної мережі до входу в пересадочний вузол, і не враховано експлуатаційні обмеження міського електротранспорту. Крім того, слот-координація розкладу руху здебільшого орієнтована на впорядкування часових параметрів обслуговування, тоді як у реальних умовах функціонування міської маршрутної мережі необхідним є адаптивне реагування на збурення, що виникають унаслідок змін пасажиропотоку, дорожніх умов, відхилень від графіка та різного рівня керованості перевізників в централізованій диспетчерській системі.

Ідентифікація показників якості є складною задачею, пов'язаною з різноманітними наявними концепціями і підходами. Питання підвищення якості має значний практичний інтерес і висвітлене в багатьох наукових працях. Науково-методичне забезпечення підвищення якості можливо розділити на сукупність напрямків, що мають самостійне практичне та теоретичне значення, та дозволяють проводити дослідження незалежно один від одного:

- обґрунтування концепції та основ управління якістю;
- верифікація спектру показників оцінки якості;
- формування методик кваліметричної оцінки сукупності показників якості;
- нормування показників оцінки якості;
- розробка методик економічної оцінки ефективності заходів із підвищення якості.

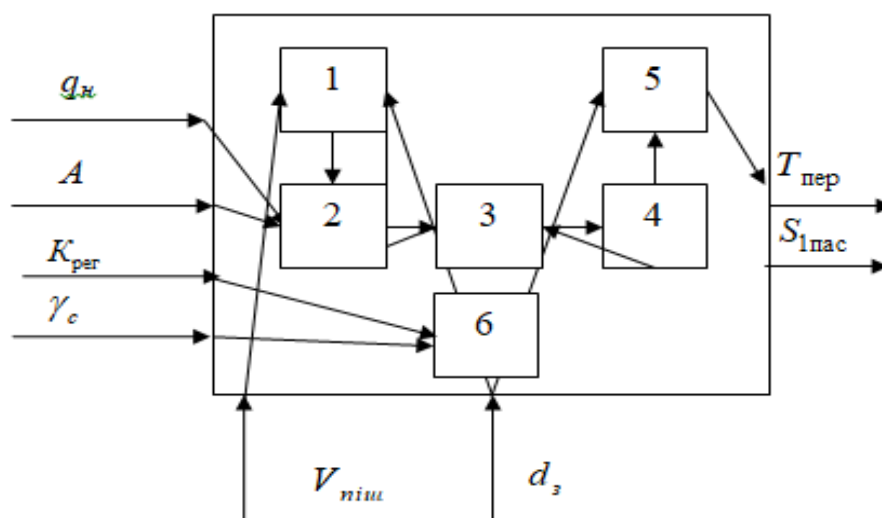
Аналіз сучасних наукових робіт дозволяє виділити основні напрямки дослідження, які ґрунтуються на концепціях «сталого розвитку» [28-32], «Smart City» [33-35], швидкісного транзитного автобусу [36], доступності ГТ для різних груп населення [37]. Реалізація принципів інноваційних концепцій має на меті

розробку стратегій сталого розвитку міського середовища шляхом створення ідеальних умов функціонування МПТ.

Серед запропонованих науковцями різноманітних підходів оцінки ефективності функціонування МПТ можна виділити наступні роботи, присвячені інтелектуалізації ГТ [33], визначенню карти пріоритетів та рівня задоволеності користувачів МПТ [38-41]; визначення потреб, запитів, уявлення та переваг пасажирів [37, 42-44]; дослідження наміру лояльності пасажирів [29]. Кількісна оцінка сприйняття споживачами послуг рівня якості обслуговування та вимір впливу уявлень на лояльність пасажирів ускладнюються наявністю багатьох «прихованих» ознак різних станів системи. Основним недоліком існуючих підходів є суб'єктивність диференціації факторів та обмежень, що впливають на рівень ефективності транспортного обслуговування, зокрема суперечливість інтересів різних груп користувачів.

Ефективність транспортного процесу та функціонування МПТ визначається сукупністю факторів, які можна систематизувати у вигляді ключових напрямів підвищення ефективності транспортного обслуговування, щодо підвищення рівня комфортабельності перевезень, зниження витрат часу пасажирів на пересування по маршруту, підвищення рівня безпеки руху автобусів по маршруту, оптимізація маршрутної мережі, синхронізація розкладів руху транспортних засобів різних видів транспорту, організація пріоритетного руху тощо. Модель процесу перевезень пасажирів на маршруті МПТ можна представити у вигляді структурної схеми (рис. 1.2). Вхідні фактори моделі характеризують ресурсне й організаційне забезпечення маршруту, і їх можна представити у вигляді наступних параметрів: номінальна пасажиромісткість автобуса ( $q_n$ , пас.), кількість автобусів на маршруті ( $A$ , од.), коефіцієнт регулярності руху  $K_{рег}$ , статичний коефіцієнт використання пасажиромісткості  $\gamma_c$ . До параметрів зовнішнього впливу можна віднести швидкість пішохода ( $V_{пш}$ , км/год.) і відстань між ЗП ( $d_3$ , км), які визначають умови доступу до них пасажирів. В якості вихідного параметру моделі обрано комплексний показник – сукупність показників, що враховують інтереси і пасажирів, і перевізника – це: витрати часу пасажира на пересування по маршруту

( $T_{\text{пер}}$ , год.) та витрати підприємства-перевізника на перевезення одного пасажирів ( $S_{1\text{пас}}$ , грн/пас.).



1 – підхід до зупинки транспорту, 2- посадка в рухомий транспорт,  
3- поїздка у транспортному засобі, 4- вихід з транспортного засобу,  
5- рух пішки до пункту призначення, 6- подача рухомого складу

Рисунок 1.2 – Структурна модель процесу перевезень пасажирів на маршруті МПТ

Важливо підкреслити, що послуги з перевезення пасажирів мають переважно соціальну спрямованість. Тому під час розробки заходів щодо підвищення ефективності організації перевезень пасажирів на маршрутах необхідно враховувати оцінку рівня транспортного обслуговування з боку безпосередніх споживачів – пасажирів.

Методи організації руху на маршрутах передбачають застосування комбінованих режимів роботи транспорту та оптимізацію випуску транспортних засобів, що сприяє підвищенню пропускної здатності маршрутів, забезпеченню відповідності транспортних послуг реальним потребам населення з урахуванням його фінансових можливостей, зниженню витрат транспортних підприємств і покращенню якості перевезень [45]. Запровадження логістичних принципів у діяльність МПТ дозволяє усунути суперечності, які можуть виникати між

муніципальною владою та транспортними підприємствами, а також між перевізниками та суспільством, що сприяє загальній оптимізації перевізного процесу. В роботі [46] автор зазначає, що основні логістичні принципи, які можна використовувати для розвитку та управління маршрутною системою МПТ, включають: принцип забезпечення якості; принцип мінімізації загальних витрат; принцип стабільності та адаптивності системи.

У великих та середніх містах автомобільний транспорт є невід'ємною частиною загальної ТС, функціонуючи спільно з електротранспортом. У менших населених пунктах він часто виступає єдиним видом МПТ, що забезпечує потреби населення в пересуванні. Його наявність гарантує регулярне транспортне сполучення на всій території міста та сприяє формуванню єдиного інтегрованого міського простору [47].

Рівень конкурентоспроможності транспортної послуги та її підвищення залежать від розробки та впровадження комплексу заходів, спрямованих на задоволення потреб пасажирів щодо рівня якості послуги та її вартості. З точки зору пасажирів, ефективність роботи МПТ визначається низкою ключових показників, серед яких: зменшення часу, необхідного для здійснення поїздки, покращення комфорту та доступності пересування, забезпечення стабільності та надійності транспортного обслуговування, підвищення рівня безпеки руху, а також зменшення тарифу на проїзд по маршруту [47-51].

Одним із ключових напрямків зменшення часу пасажирів на пересування по маршруту є зменшення часу на очікування транспортного засобу на ЗП. Зменшення цього показника дозволяє суттєво підвищити ефективність і якість обслуговування пасажирів на міських маршрутах. Відомі наукові методи аналізу та скорочення часу очікування пасажирів на ЗП [45-47, 51-54] враховують принципи планового керування, що не дозволяє врахувати всі умови експлуатації рухомого складу на маршрутах.

Основною якісною ознакою транспортної послуги є надійність, що характеризується своєчасністю перевезення пасажирів; координацією руху та синхронізацією розкладів руху з іншими видами МПТ [46, 54-57]; регулярністю

руху та графічністю розкладу руху [45]. Для забезпечення безперебійного обслуговування важливо, щоб робота різних видів МПТ на маршрутах була синхронізована [55, 56]. Це дозволяє пасажиром здійснювати пересадки без значних затримок, що є важливим для підвищення рівня доступності послуг та привабливості МПТ.

Пасажири очікують від маршрутної системи надання таких послуг, які повністю задовільняють їхні індивідуальні потреби. Це передбачає можливість заздалегідь спланувати поїздку, обравши оптимальний маршрут, вид транспорту, враховуючи при цьому вартість проїзду, комфорт та загальний час у дорозі. Забезпечення цих потреб є одним з основних завдань у розвитку МПТ.

Класична модель SERVQUAL передбачає оцінювання якості послуги через розрив між очікуваннями споживача та фактичним сприйняттям отриманої послуги. У сфері міського пасажирського транспорту цей підхід потребує адаптації, оскільки якість перевезень значною мірою визначається регулярністю руху, часом очікування, доступністю маршрутів і умовами пересадки. Адаптовані версії моделі SERVQUAL із використанням аналізу дослідницького фактору дозволяють на підставі результатів опитування задоволеності споживачів ідентифікувати основні фактори, що визначають якість послуг, та їх вагомість [27, 36, 57]. Недоліком використання такої моделі є сумнівна достовірність результатів зважування визначених критеріїв оцінки якості, що залежить від репрезентативності проведених досліджень.

Більшість досліджень питання якості базується на використанні методів анкетування фокус-груп для збору даних з метою опису атрибутів при виборі пасажиром способу перевезення та кількісної оцінки якості та рівня задоволеності користувачів послуг МПТ [56, 57]. Застосування концептуальних рамок для аналізу якісного сприйняття та уявлень пасажирів дозволяє виявити через неоднакове сприйняття транспортного середовища різними користувачами послуг МПТ ознаки, які не враховуються у кількісних дослідженнях за різними профілями.

Попередня оцінка транспортної послуги на етапі формування потенційного попиту на пересування залежить від величини тарифу на проїзд, вартісної оцінки

часу пересування та рівня комфортабельності поїздки, від яких залежить рівень транспортної втомлюваності пасажирів під час пересування МПТ. Для проведення аналізу стану організації процесу перевезення пасажирів на маршрутах, виявлення основних недоліків їх функціонування та обґрунтування заходів щодо підвищення привабливості транспортної послуги під час теоретичних досліджень було застосовано методика оцінювання конкурентоздатності транспортних послуг, запропоновану авторами [58]. Зазначена методика передбачає застосування графоаналітичного підходу, зокрема побудову багатокутника конкурентоздатності (рис. 1.3), а також кількісне оцінювання за узагальнюючим показником – коефіцієнтом конкурентоздатності послуг. При цьому, конкурентоздатність транспортної послуги розглядається як інтегральна характеристика привабливості маршруту для пасажирів, що визначає їхню готовність обирати цей маршрут серед інших доступних альтернатив у межах конкретного ринку міських пасажирських перевезень («зразкова послуга»).



Рисунок 1.3 – Багатокутник конкурентоздатності транспортної послуги

Розглянутий підхід дозволяє оцінити технологію перевезень на рівні окремого маршруту з урахуванням інтересів пасажирів та перевізника. Однак у реальних умовах функціонування міської маршрутної мережі якість транспортного обслуговування формується не лише параметрами одного маршруту, а й характером його взаємодії з суб'єктами маршрутного потоку [27] на спільних ділянках і в пересадочних вузлах.

Тому подальший розвиток методичних підходів до оцінювання та підвищення якості перевезень має бути спрямований на врахування міжмаршрутного узгодження інтервалів руху, регулярності прибуття транспортних засобів на ЗП або пересадочні вузли, а також міжвидової координації роботи МПТ.

Оцінка ієрархічно-компонентної моделі [31, 43] дає змогу виявити важливі критерії якості на різних структурних рівнях. Автори [31] зазначають, що звичайний процес аналітичної ієрархії (АНР) призводить до недостатньої узгодженості параметрів під час оцінювання складних проблем, тому використовують гібридний процес АНР у поєднанні з методом BestWorst (BWM) з метою удосконалення процесу оцінювання для тих, хто приймає рішення. До того ж цей інструмент економить час на обстеження та забезпечує більшу послідовність порівняно з парними порівняннями. Водночас, такі підходи мають низку обмежень. Вони значною мірою залежать від експертних суджень, що зумовлює суб'єктивність формування ваг критеріїв і чутливість результатів до складу експертної групи та обраної шкали оцінювання. Крім того, ієрархічно-компонентні моделі переважно орієнтовані на статичне ранжування критеріїв або альтернатив і не забезпечують безпосереднього механізму оперативного впливу на параметри транспортного процесу. У сучасних умовах українських міст практичне застосування таких методів є ресурсо- та капіталоємним, оскільки потребує значних витрат часу, залучення експертів, проведення регулярних обстежень пасажирів і перевізників, а також наявності достовірної інформаційної бази. Такі моделі недостатньо враховують динамічні збурення в роботі МПТ, зокрема нерівномірність інтервалів руху, скупчення транспортних засобів у пересадочних вузлах, дублювання маршрутів та неузгодженість роботи перевізників. Тому їх

доцільно використовувати для визначення пріоритетних критеріїв якості, однак для підвищення якості транспортного обслуговування в реальних умовах функціонування маршрутної мережі необхідним є доповнення таких підходів динамічними моделями адаптивної координації роботи різних видів МПТ.

Згідно із запропонованою методологією оперативного планування роботи МПТ [44], час, який пасажир витрачає на очікування, є важливим елементом для оцінки якості обслуговування пасажирів. Модель планування транспортних засобів для роботи на маршрутах враховує інтереси пасажирів та операторів шляхом оптимізації синхронізації розкладу та з урахуванням вартості очікування пасажирів.

Метод розгортання функції якості (QFD) для визначення потреб та запитів користувачів МПТ і підвищення якості на підставі результатів проведених інтерв'ю-опитувань [42] ґрунтується на аналізі характеристик послуг. Множиною функцій та підфункцій описується велика кількість аспектів, що ускладнює процес ідентифікації якості.

Використання байєсівських мереж [59] дозволяє раціонально прогнозувати вірогідності різноманітних доходів від різних маршрутних послуг з точки зору як задоволення попиту пасажирів, так й зниження вартості експлуатації автобусів. Однією з переваг такої моделі є можливість врахувати під час дослідження якості приховані змінні та гіпотези.

Метод експоненціального прогнозування дозволяє визначити навантаження на критичних ЗП маршруту на основі кількісної оцінки пасажиропотоку на маршруті [44]. При цьому, автор не враховує якісні показники транспортного сервісу та інтереси споживачів послуг.

Основною метою запропонованої методології в роботі [54], на підставі міжнародних стандартів визначення якості обслуговування, є визначення необхідного соціального ефекту МПТ. Автори зазначають, що рівень транспортних тарифів різних перевізників є ключовою складовою якості обслуговування пасажирів. Таким чином, враховуються інтереси всіх учасників ринку пасажирських транспортних послуг.

Результати аналізу існуючих досліджень свідчать про різноманітний характер структури показників оцінки якості, до яких відносяться:

- показник співвідношення комфорту та швидкості [39];
- рівень задоволеності пасажирів та поведінкові наміри через приховані змінні – безпека та комфорт, зручність, гнучкість та економічність [28, 36, 38, 41, 51];
- час очікування пасажира, вартість очікування пасажира [44];
- надійність обслуговування, регулярність, комфортність перевезень сталість функціонування системи [27, 42];
- величина соціального ефекту від функціонування МПТ, яка визначається через рівень якості обслуговування пасажирів з урахуванням рівня транспортних тарифів різних перевізників [22, 27, 52];
- час та вартість поїздки, енергоспоживання [22, 27, 50, 52, 56, 58].

Незважаючи на наявність численних наукових досліджень, спрямованих на ідентифікацію якості та підвищення її рівня, більшість з них мають основний недолік – ретроспективна спрямованість, що проявляється у неможливості їх повномасштабного застосування при оцінці проектних рішень в сфері удосконалення техніко–технологічних аспектів транспортного обслуговування населення в реальному часі. Більшість запропонованих підходів зосереджена або на статичних моделях оцінювання часу очікування пасажирів на ЗП і в пересадочних вузлах, або на динамічних моделях узгодження роботи маршрутів одного виду транспорту. Відповідно, відсутність універсального підходу на основі обліку великої кількості негативних внутрішніх та зовнішніх факторів в реальному часі, які системно впливають на рівень якості обслуговування та забезпечення сталості транспорту, обумовлює необхідність розробки принципово нового методологічного апарату ідентифікації якості з урахуванням інтересів учасників процесу на засадах сталої мобільності відповідно до пріоритетів НТС.

## 1.2 Аспекти планування сталої міської мобільності в контексті євроінтеграційних реформ в Україні

МПТ є складною динамічною системою, функціонування якої визначається взаємодією транспортної інфраструктури, рухомого складу, сукупністю технологічних процесів і поведінки пасажирів. Функціонування такої системи спрямоване не лише на переміщення пасажирів між пунктами відправлення і призначення, а й на забезпечення доступності міських територій, зв'язності елементів міського простору, соціальної інклюзії, екологічної стійкості та економічної ефективності транспортного обслуговування. У цьому контексті МПТ доцільно розглядати як базовий елемент системи сталої міської мобільності, що забезпечує масове, регулярне, соціально доступне та екологічно прийнятне перевезення населення.

Розвиток сталої міської мобільності є одним із важливих напрямів трансформації ТС України в умовах євроінтеграційних реформ. Концепція управління міською мобільністю охоплює різноманітні послуги, організаційні та консультативні заходи, які дозволяють користувачам змінювати свій вибір способу пересування. Перехід до європейських підходів у сфері міського транспорту передбачає не лише оновлення рухомого складу чи модернізацію інфраструктури, а й зміну самої логіки транспортного планування: від орієнтації на пропускну спроможність вулично-дорожньої мережі (ВДМ) до забезпечення доступності, безпеки, екологічності, інклюзивності та якості транспортного обслуговування населення. У цьому контексті планування сталої міської мобільності виступає інструментом формування інтегрованої транспортної політики міста, спрямованої на узгодження роботи ГТ, пішохідної та велосипедної інфраструктури, індивідуальної мобільності, політики паркування, цифрових сервісів і просторового розвитку міських територій [60].

У контексті євроінтеграційних реформ особливого значення набуває інтеграція українських міст у європейську транспортну політику, де пріоритетами є декарбонізація транспорту, розвиток ГТ, підвищення безпеки руху, цифровізація

транспортних процесів і створення мультимодальних ТС. Відповідно до Стратегії сталої та розумної мобільності ЄС [61], безперервна мультимодальність, підтримана цифровими рішеннями, є важливою умовою розвитку міських і приміських територій. Європейська політика також наголошує на необхідності використання ІТС, підключених і автоматизованих рішень, а також інтеграції різних видів транспорту у функціональну мультимодальну систему. Для України це означає необхідність поступового переходу від фрагментарного управління окремими маршрутами до інтегрованого управління міською мобільністю.

У роботі О. М. Паливоди [62] зазначено, що ефективна організація міської мобільності сприяє формуванню ТС, стійкої до внутрішніх і зовнішніх викликів, а розвиток «розумної мобільності» є одним із напрямів забезпечення сталого розвитку міських територій. Це положення є важливим для обґрунтування необхідності впровадження інтегрованих транспортних технологій на МПТ, оскільки вони передбачають не лише фізичну взаємодію різних видів транспорту, а й інформаційне, цифрове та управлінське узгодження транспортного обслуговування населення у межах єдиної системи міської мобільності.

Європейський підхід до планування сталої міської мобільності базується на концепції Sustainable Urban Mobility Plan (SUMP), який розглядається як стратегічний план, спрямований на задоволення потреб у мобільності людей і бізнесу в містах та їхніх функціональних зонах з метою підвищення якості життя [63]. На відміну від традиційного транспортного планування, SUMP орієнтований не лише на транспортну інфраструктуру, а й на потреби користувачів, інтеграцію різних видів транспорту, участь зацікавлених сторін, оцінювання результатів і довгострокову сталість ТС. Це відповідає сучасним вимогам до розвитку МПТ, оскільки якість перевезень визначається не лише наявністю маршрутів, а й зручністю пересадок, регулярністю руху, доступністю транспортних послуг, інформаційним забезпеченням і наявністю «безшовних» сполучень для переміщення містом.

Розробка та впровадження планів сталої міської мобільності (ПСММ) сприяють формуванню комфортного, екологічно безпечного та ефективного

транспортного середовища, яке відповідає сучасним викликам урбанізації та зростаючим потребам населення. Це обумовлює необхідність запровадження комплексного підходу до транспортного планування, що передбачає інтеграцію міських ТС, підвищення доступності ГТ, зменшення екологічного навантаження, удосконалення законодавчої бази, реформування тарифної політики та пошук альтернативних джерел фінансування.

Європейські міста мають значний практичний досвід розроблення та реалізації заходів, орієнтованих на сталий розвиток міських територій і трансформацію транспортної політики [64]. В Україні досвід впровадження ПСММ досліджувався на прикладі Житомира, Івано-Франківська, Львова, Миколаєва, Харкова та Полтави. Оскільки транспорт є одним із вагомих джерел викидів парникових газів у містах, особливого значення набуває узгодження ПСММ із кліматичними планами та місцевими стратегіями екологічного розвитку. У цьому контексті «Місцеві зелені курси» передбачають застосування багаторівневого управління, спрямованого на прискорення переходу міст до комплексної моделі сталого розвитку. Аналіз запроваджених ПСММ європейських та вітчизняних міст дозволив виявити спільні характеристики [63-65]. До них належать наявність стратегічного бачення, орієнтованого на покращення якості життя населення та зменшення негативного впливу транспорту на довкілля; комплексний аналіз вихідних умов функціонування ТС; формування системи індикаторів для моніторингу досягнення цілей; залучення органів влади, бізнесу, громадськості та інших зацікавлених сторін до процесу планування; а також регулярне оцінювання ефективності реалізації заходів ПСММ.

У період повоєнної відбудови України відновлення деокупованих територій і модернізація міської інфраструктури вимагатимуть від органів місцевого самоврядування чітких підходів до оновлення ТС. За таких умов міська мобільність може розглядатися не лише як сфера забезпечення транспортних потреб населення, а й як один із потенційних напрямів економічного розвитку країни [66]. Тому актуальним є формування практичних рекомендацій щодо вдосконалення планування та впровадження заходів сталої міської мобільності, зокрема через

оновлення нормативно-правової бази, розроблення та впровадження ефективних транспортних технологій, фінансових інструментів, розвиток партнерств між органами влади, бізнесом і громадськими організаціями. З метою формування практичних рекомендацій було проведено SWOT-аналіз викликів і можливостей розвитку міської мобільності в містах України (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – SWOT-аналіз викликів та можливостей розвитку міської мобільності в містах України

Проведений SWOT-аналіз показав, що розвиток сталої міської мобільності в Україні має значний потенціал, пов'язаний із наявністю інфраструктурної бази міського електротранспорту, можливістю залучення міжнародної підтримки, активізацією громадського сектору та зростанням інтересу до екологічних і альтернативних видів пересування. Особливо важливим є те, що в багатьох містах уже сформовано основу для розвитку електротранспорту, зокрема трамвайних колій, тролейбусних ліній і відповідної експлуатаційної інфраструктури.

Основними стримувальними факторами розвитку міської мобільності в Україні є недостатня інтеграція різних видів транспорту, нерівномірність транспортної пропозиції, низький рівень координації перевізників та недостатнє використання цифрових інструментів управління. Виявлені слабкі сторони та виклики безпосередньо впливають на якість транспортного обслуговування населення у пересадочних вузлах і обґрунтовують необхідність розроблення інтегрованих технологій у МПТ.

Планування сталої міської мобільності безпосередньо пов'язане з підвищенням ролі ГТ як базового елемента міської ТС. Саме ГТ здатний забезпечити масові перевезення населення з меншими витратами на міський простір, нижчим рівнем екологічного навантаження та вищою соціальною доступністю порівняно з індивідуальним автомобільним транспортом. Однак, на практиці функціонування українських міст розвиток ГТ часто ускладнюється недостатньою інтеграцією різних видів транспорту, неузгодженістю маршрутної мережі, слабкою координацією перевізників різних форм власності, обмеженим використанням цифрових даних та відсутністю єдиних механізмів оперативного управління транспортною пропозицією.

Одним із найбільш помітних проявів такої неузгодженості є високий рівень дублювання суміжних маршрутів на окремих ділянках маршрутної мережі, особливо в напрямках із високим пасажиропотоком і в зонах концентрації пересадок. За таких умов декілька маршрутів різних видів транспорту або різних перевізників обслуговують одні й ті самі напрямки, тоді як периферійні або менш прибуткові зони можуть залишатися недостатньо забезпеченими транспортною пропозицією. Це призводить до скупчення рухомого складу, нерівномірності інтервалів руху, зниження регулярності прибуття транспортних засобів, неефективного використання ресурсів перевізниками та погіршення якості транспортного обслуговування пасажирів. Для систематизації причин, що перешкоджають реалізації принципів сталої міської мобільності в системі МПТ та знижують рівень якості транспортного обслуговування, побудовано причинно-наслідкову діаграму Ісікави (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Причинно-наслідкова діаграма Ісікави факторів зниження якості транспортного обслуговування населення МПТ

У рамках цього аналізу зниження якості транспортного обслуговування пасажирів розглядається як результат сукупної дії наступних груп факторів: організаційно-управлінських, технологічних, експлуатаційно-технічних, соціально-економічних, інформаційно-аналітичних факторів та факторів зовнішнього середовища.

Серед факторів зниження якості транспортного обслуговування населення МПТ, наведених на діаграмі Ісікави, високий рівень дублювання маршрутів визначено як одну з ключових проблем подальшого дослідження, оскільки воно відображає сукупний вплив організаційно-управлінської, технологічної та інформаційно-аналітичної неузгодженості функціонування МПТ. Формування такої проблеми пов'язане з відсутністю комплексного управління маршрутною мережею, недостатньою координацією операторів перевезень, неузгодженістю графіків руху, нерівномірним розподілом транспортної роботи та обмеженим використанням актуальних даних про пасажиропотоки. У результаті на окремих ділянках маршрутної мережі виникає надлишкова транспортна пропозиція, що спричиняє скупчення транспортних засобів, нерівномірність інтервалів руху, зниження регулярності перевезень, збільшення часу очікування пасажирів і погіршення якості транспортного обслуговування. У цьому контексті високий рівень дублювання маршрутів доцільно розглядати як прояв низького рівня інтеграції міської ТС, подолання якого потребує не лише коригування окремих маршрутів або розкладів, а й впровадження інтегрованих транспортних технологій.

Досвід європейських країн, зокрема Чехії, який представляє інтерес та може бути корисним для побудови індивідуальної траєкторії розвитку сучасної України на шляху євроінтеграції у вирішенні проблем міської мобільності [67], базується на шести напрямках, рисунок 1.6.

Слід зазначити, що спосіб пересування людей з одного місця до іншого поступово й докорінно змінюється. Необхідність у розробці інструментів підтримки прийняття рішень з підвищення якості транспортного обслуговування МПТ на основі інтеграційної взаємодії елементів системи з позиції

інтелектуалізації транспорту обумовлено темпами зростання потреб у вирішенні зазначених проблем та появою нових технологій та радикальних бізнес-моделей.

Інструменти, що базуються на принципах розумної мобільності, забезпечують прийняття рішень щодо створення цінних послуг по всій транспортній мережі, що дозволить зменшити завантаженість ВДМ міст, вирішити проблеми у забезпеченні додаткової транспортної інфраструктури, та передбачають створення інтегрованої адаптивної системи на заміну негнучким та регульованим підходам управління МПТ.

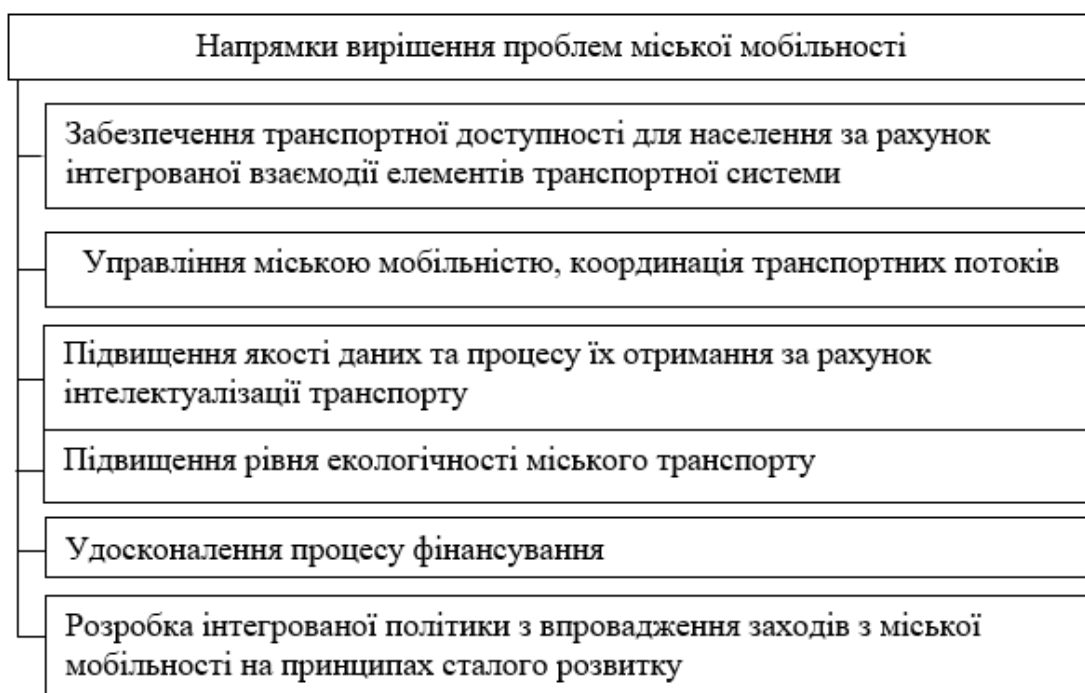


Рисунок 1.6 – Напрямки вирішення проблем розвитку міської мобільності

Застосування цифрових рішень, GPS-моніторингу, інтелектуальних ТС і моделей оперативного планування створює передумови для адаптивного управління міським пасажирським транспортом у реальному часі [67, 68].

Отже, планування сталої міської мобільності формує методологічну основу для розвитку інтегрованих технологій на МПТ, спрямованих на підвищення якості транспортного обслуговування, зменшення екологічного навантаження та посилення ролі ГТ. Це обґрунтовує необхідність розробки інтегрованих технологій

координації роботи різних видів МПТ на спільних ділянках маршрутної мережі та в пересадочних вузлах.

### 1.3 Принципи формування інтегрованих технологічних процесів функціонування міського пасажирського транспорту

Інтегровані транспортні технології у сфері МПТ слід розглядати як сукупність організаційних, інформаційних, технологічних, управлінських та економічних рішень, спрямованих на узгоджену роботу різних видів транспорту. В рамках підходів SUMP та Стратегії сталої і розумної мобільності ЄС інтегровані транспортні технології мають забезпечувати функціональну сталість МПТ, прогнозованість моментів прибуття транспортних засобів на ЗП, цифровізацію управління, інформаційну підтримку пасажирів, диспетчерське регулювання, тарифну інтеграцію та координацію дій перевізників [60, 61].

Загальносвітова тенденція переходу на екологічно чистий транспорт формується через запровадження владами країн Євросоюзу програм розвитку великих міст. У системах МПТ одним із перспективних напрямів є розвиток електробусного та тролейбусного сполучення як екологічно орієнтованої основи ГТ, а також забезпечення гнучкості системи під час оперативного керування в умовах невизначеності. Аналізуючи досвід створення транспортних моделей агломерацій у великих європейських містах, в якості основи для інтелектуального управління транспортною системою міста, можна виділити основні ключові засади успішного впровадження інтегрованих технологій перевезень пасажирів МПТ [70]: створення єдиного органу управління; виділення електротранспорту, як основи МПТ наряду з осучасненням парку комунального транспорту; розвиток мультимодальності, як способу забезпечення функціонування ТС, в якій декілька видів міського транспорту створюють зрозумілу для пасажирів систему взаємопов'язаних маршрутів, здійснюють переміщення пасажирів за єдиним тарифом, дотримуючись певних умов перевезень та регулярних інтервалів між сполученням; розвиток систем інформування в режимі реального часу;

вдосконалення платіжних систем; запровадження концепції відмови від особистого транспорту – MaaS («Mobility as a Service» – мобільність як послуга). Водночас у багатьох містах поширюються сервіси спільної мобільності, зокрема каршеринг, велошеринг, спільні поїздки та різні форми мікромобільності. Їхній розвиток значною мірою пов'язаний із появою цифрових платформ-посередників, які забезпечують зручний доступ користувачів до таких послуг і сприяють зменшенню потреби у використанні індивідуального транспорту під час щоденних поїздок [61]. За висновками Міжнародного транспортного форуму, така модель потребує активної ролі органів управління ГТ, оскільки без належного регулювання інтеграція цифрових сервісів не завжди забезпечує сталий результат для міської мобільності [71].

Необхідність формування інтегрованих технологій транспортного обслуговування населення зумовлена низкою об'єктивних передумов, характерних для сучасних міст. До них належать зростання транспортної рухомості населення (кількість поїздок, що припадає на одного жителя за рік), територіальне розширення міст, нерівномірність розміщення місць проживання, праці, освіти та обслуговування, зростання автомобілізації, перевантаження ВДМ, погіршення екологічної ситуації, а також підвищення вимог пасажирів до якості транспортного сервісу.

Однією з ключових проблем міського громадського пасажирського транспорту є фрагментарність організації перевезень. Вона проявляється у відсутності належної координації між маршрутами, дублюванні трас руху, нерівномірності інтервалів, неузгодженості розкладів, недостатній якості пересадочних зв'язків, а також відсутності єдиної тарифної та інформаційної системи. У таких умовах пасажир сприймає ГТ не як єдину систему, а як набір окремих маршрутів, між якими необхідно самотійно шукати зв'язки. Це збільшує загальний час поїздки, підвищує невизначеність, знижує комфорт і стимулює перехід частини населення до користування індивідуальним автомобільним транспортом. Отже, інтегровані технології обслуговування населення мають

формуватися з урахуванням не лише транспортних, а й містобудівних, соціальних, екологічних та економічних чинників.

Особливої актуальності питання формування інтегрованих технологій набуває у містах, у яких одночасно функціонують різні види МПТ: автобуси, тролейбуси, трамваї, маршрутні таксі, метрополітен, міська залізниця, приміські автобусні та залізничні сполучення. Кожен із цих видів транспорту має власні експлуатаційні характеристики, пропускну спроможність, швидкість сполучення, рівень надійності, вартість перевезень, інфраструктурні обмеження та організаційно-правову модель функціонування [72]. Без інтегрованого підходу до управління така мультимодальна система перетворюється на конкурентне середовище між маршрутами за пасажирів, а не на узгоджену систему обслуговування населення.

При цьому цифрові технології мають особливе значення в задачах синхронізації руху різних видів транспорту. Дані про фактичний рух дають змогу виявляти порушення регулярності, оцінювати стабільність інтервалів, визначати вузли з високим ризиком втрати пересадки та формувати адаптивні керуючі впливи. Наприклад, за наявності інформації про запізнення одного маршруту система може прийняти рішення щодо короткочасного утримання іншого транспортного засобу в пересадочному вузлі, якщо обсяг пересадок є достатньо значним. Водночас цифровізація потребує належної організаційної бази. Якщо дані збираються різними перевізниками у несумісних форматах, не передаються до єдиного диспетчерського центру або не використовуються для прийняття рішень, їхня цінність суттєво знижується. Тому інтегрована технологія має передбачати стандартизацію даних, єдині правила інформаційного обміну, захист персональних даних, відкритість для пасажирських сервісів і відповідальність за достовірність інформації.

Теоретичне обґрунтування інтегрованих технологій обслуговування населення МПТ має спиратися на систему принципів, які визначають цільову спрямованість, структуру та механізми функціонування такої системи. До основних принципів доцільно віднести системність, орієнтованість на потреби

пасажирів, ієрархічність, мультимодальність, часову узгодженість, доступність, сталість, адаптивність та керованість.

Принцип системності передбачає розгляд МПТ як єдиної системи, у якій окремі маршрути, види транспорту, пересадочні вузли, ЗП, розклади, тарифи та інформаційні сервіси взаємодіють між собою. З позицій системного підходу ефективність транспортного обслуговування не може бути визначена лише показниками окремого маршруту, оскільки зміна параметрів одного маршруту впливає на роботу суміжних маршрутів і загальну якість пересування пасажирів.

Принцип орієнтованості на потреби пасажирів означає, що критерієм ефективності інтегрованої технології має бути не лише продуктивність ТС, а й якість поїздки з погляду пасажирів. Для пасажирів важливими є загальний час пересування, регулярність руху, надійність прибуття, тривалість очікування, зручність пересадки, фізична та інформаційна доступність, комфорт, безпека і вартість поїздки. Тому інтегрована технологія має бути спрямована на мінімізацію не лише експлуатаційних витрат перевізника, а й узагальнених витрат пасажирів.

Принцип ієрархічності передбачає формування структури маршрутної мережі, у якій різні види транспорту виконують різні функції. Високопродуктивні та більш стабільні види транспорту можуть виконувати роль опорних елементів системи, тоді як інші маршрути забезпечують підвезення, розподіл пасажиропотоків і локальне обслуговування територій. Для міст із розвиненим електротранспортом особливого значення набуває визначення ролі трамвайних і тролейбусних маршрутів як опорних елементів міської ТС, оскільки вони мають чітко визначену інфраструктурну прив'язку, вищий рівень керованості та важливе значення для сталої мобільності.

Принцип мультимодальності полягає у забезпеченні можливості здійснення поїздки з використанням кількох видів транспорту в межах єдиного транспортного сервісу, при цьому всі складові частини мультимодальної ТС характеризуються станом у просторі і часі. Мультимодальність передбачає не просто фізичну наявність різних видів транспорту, а їхню функціональну взаємодію через пересадочні вузли, узгоджені розклади, єдину інформаційну систему та тарифну

інтеграцію. У роботі [73] запропоновано формалізацію функціонування мультимодальної ТС як динамічного процесу, що характеризується параметрами управління ( $Y_t$ ) та сукупністю параметрів і характеристик ( $I_t$ ), що характеризують внутрішні властивості МТС у момент часу  $t$ , і змінюється у часі під впливом керованих управлінських рішень ( $K_t$ ) і некерованих факторів зовнішнього середовища ( $Z_t$ ). Вихід  $W$  є множиною показників, через які МТС впливає на середовище, рисунок 1.7.

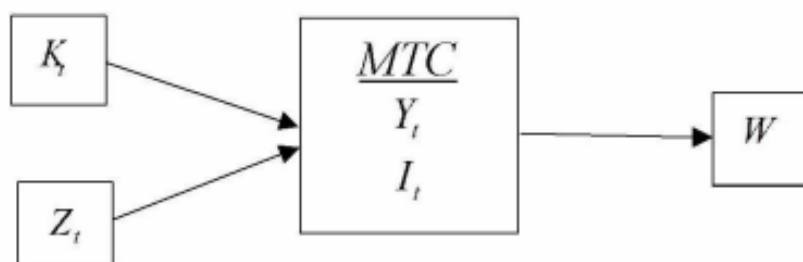


Рисунок 1.7 – Вплив зовнішнього середовища на МТС [74]

Такий підхід дозволяє розглядати МПТ не як статичну маршрутну мережу, а як динамічну систему, що потребує оперативного узгодження параметрів руху під впливом змін пасажиропотоків, дорожніх умов, затримок і управлінських рішень

Принцип часової узгодженості є одним із ключових для інтегрованих технологій. Він передбачає координацію інтервалів, розкладів і моментів прибуття транспортних засобів у спільні точки маршрутної мережі. Часова узгодженість особливо важлива у пересадочних вузлах, де неузгодженість руху призводить до збільшення часу очікування, втрати пересадочних зв'язків і зниження привабливості ГТ.

Принцип доступності охоплює територіальну, часову, фізичну, інформаційну та фінансову доступність транспортного обслуговування. Інтегрована технологія має забезпечувати можливість користування ГТ для різних соціальних груп, зокрема осіб з інвалідністю, людей похилого віку, дітей, студентів, маломобільних груп населення та мешканців периферійних територій. Маршрутна мережа

визначає просторову структуру транспортного обслуговування, доступність районів міста, кількість пересадок, ступінь дублювання маршрутів, навантаження на ЗП та пересадочні вузли. Раціональна маршрутна мережа має забезпечувати баланс між прямими сполученнями та пересадочною моделлю обслуговування. Надмірна кількість прямих маршрутів може призводити до дублювання трас, нерівномірного завантаження, конкуренції між видами транспорту та порушення регулярності руху. Натомість надмірна пересадочність без належної синхронізації розкладів руху та координації роботи транспорту погіршує якість поїздки для пасажирів, оскільки збільшує час очікування та знижує надійність пересадочних зв'язків [74, 75]. Тому задача синхронізації має мережевий характер і потребує врахування топології маршрутної мережі, інтенсивності пасажиропотоків, ієрархії видів транспорту, експлуатаційних обмежень і рівня керованості маршрутів.

Окремої уваги потребує питання порушення регулярності руху транспортних засобів на маршрутах, оскільки це є однією з ключових проблем функціонування МПТ. У зарубіжних дослідженнях ця проблема часто розглядається через явище *bus bunching*, тобто скупчення транспортних засобів на маршруті внаслідок нерівномірності інтервалів руху (рис. 1.8). Механізм виникнення такого явища пов'язаний із формуванням позитивного зворотного зв'язку: затримка одного транспортного засобу призводить до накопичення пасажирів на наступних ЗП, збільшення часу посадки та висадки, подальшого зростання затримки і зближення з наступним транспортним засобом. У результаті порушується рівномірність інтервалів руху, зростає час очікування пасажирів і знижується стабільність роботи маршруту [76].

У науковій літературі серед причин скупчення транспортних засобів виділяють варіативність початкових інтервалів руху, нерівномірність пасажирського попиту, дорожні умови, затримки на світлофорних об'єктах, поведінку водіїв, недоліки розкладу та варіативність часу перебування транспортного засобу на ЗП [45, 46, 52-55, 74-78].

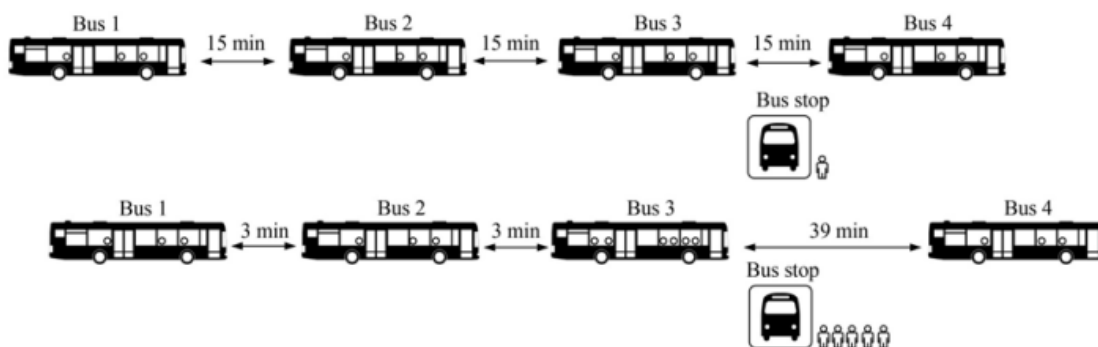


Рисунок 1.8 – Схематичне зображення скупчення транспортних засобів на маршруті [76]

Запропоновані підходи до вирішення цієї проблеми полягають в удосконаленні операційних стратегій, динамічному коригуванні розкладів, утриманні транспортних засобів на контрольних пунктах, управлінні дорожнім рухом, регламентації дій водіїв та використанні резервного рухомого складу [45-46, 76]. Водночас більшість таких рішень орієнтована переважно на окремий маршрут або один вид транспорту. У реальних умовах міської маршрутної мережі порушення регулярності руху часто формується внаслідок взаємодії кількох маршрутів і різних видів МПТ на спільних ділянках мережі та в пересадочних вузлах. У таких зонах одночасно функціонують автобусні, тролейбусні, трамвайні маршрути або маршрутні таксі, що можуть обслуговуватися різними операторами. За відсутності належної координації це призводить до дублювання транспортної пропозиції, нерівномірного розподілу транспортної роботи, скупчення рухомого складу та збільшення часу очікування пасажирів під час пересадки.

У сучасних дослідженнях координація пересадок розглядається як засіб скорочення часу очікування пасажирів і підвищення зв'язності мережі ГТ. Саме тому пересадочні вузли, у яких концентруються пересадочні зв'язки, виступають критичними точками інтегрованої ТС [77]. Якість їхньої роботи визначається не лише кількістю маршрутів, а й узгодженістю прибуття транспортних засобів, зручністю пішохідних переміщень, доступністю інформації, безпекою, комфортом очікування та мінімізацією бар'єрів для пересадки [78].

Принцип сталості передбачає орієнтацію ТС на зменшення негативного впливу на довкілля, підвищення енергоефективності, скорочення викидів, раціональне використання міського простору та підтримку видів транспорту з нижчим екологічним навантаженням. Європейська політика міської мобільності прямо пов'язує підвищення ролі ГТ та активної мобільності з досягненням кліматичних цілей і покращенням якості життя у містах (рис. 1.9) [79].



Рисунок 1.9 – Рамки міської мобільності [79]

Принцип адаптивності означає здатність інтегрованої технології реагувати на зміну пасажиропотоків, дорожніх умов, рівня завантаження маршрутів, затримок, аварійних ситуацій, сезонних і добових коливань попиту. Адаптивність потребує використання даних моніторингу, систем автоматизованого диспетчерського управління, прогнозних моделей і механізмів оперативного коригування руху.

Необхідність саме адаптивного, а не лише статичного узгодження параметрів руху підтверджується дослідженнями динамічної природи міських транспортних процесів. Так, у роботі авторів [80] запропоновано оцінювання сталості міського транспортного потоку з урахуванням часових змін щільності руху та швидкості транспортних засобів у періоди пікового навантаження. Це свідчить про те, що параметри ТС змінюються в часі та мають враховуватися під час оперативного управління. Результати досліджень [81] свідчать про те, що транспортна мобільність населення може істотно змінюватися під впливом зовнішніх соціально-економічних умов. Отже, координація МПТ має базуватися не лише на планових

розкладах, а й з урахуванням поточного стану транспортного потоку, пасажирського попиту та відхилень у роботі маршрутної мережі.

Принцип керованості передбачає наявність організаційних і технологічних механізмів впливу на параметри роботи маршрутів. Якщо маршрути різних перевізників діють автономно, без єдиного диспетчерського контролю та узгоджених правил, рівень керованості системи знижується. Тому інтегрована технологія має включати не лише технічні рішення, а й інституційні умови координації перевізників, органів місцевого самоврядування, операторів інфраструктури та користувачів транспортних послуг. Методологічним підґрунтям для формування такої координації є положення про багаторівневу структуру систем управління транспортними процесами. Ефективне управління МПТ потребує поєднання стратегічного рівня, на якому визначаються цілі розвитку маршрутної мережі; тактичного рівня, пов'язаного з узгодженням розкладів, інтервалів руху та транспортної пропозиції; а також оперативного рівня, на якому здійснюється диспетчерське регулювання руху з урахуванням фактичного стану ТС [82], рисунок 1.10. Такий підхід дозволяє перехід від ізольованого управління окремими маршрутами до системної координації різних видів МПТ на спільних ділянках маршрутної мережі та в пересадочних вузлах, при цьому, кінцевий ефект можливо досягти лише за умови їх узгодженої взаємодії.

Важливим напрямом інтеграції МПТ є тарифна інтеграція. У дослідженнях, присвячених інтегрованим системам оплати проїзду, зазначається, що єдина або узгоджена тарифна система підвищує привабливість ГТ, оскільки зменшує бар'єри для пересадок і формує у пасажира сприйняття ТС як єдиного сервісу [83]. Тарифна інтеграція особливо важлива в умовах, коли поїздка пасажира складається з кількох етапів і передбачає використання різних видів транспорту. У такому випадку якість транспортного обслуговування визначається не лише параметрами окремого маршруту, а й зручністю всієї поїздки.

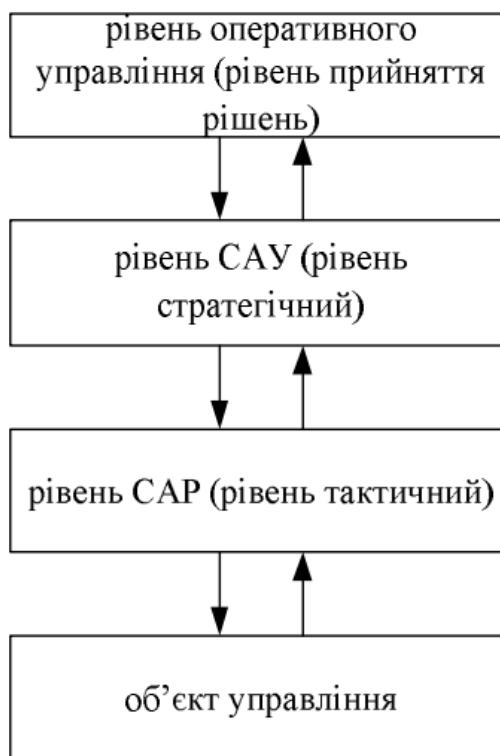


Рисунок 1.10 – Рівні управління в системах управління [82]

Інформаційна інтеграція передбачає надання пасажиром узгодженої інформації про маршрути, розклади, інтервали руху, пересадки, затримки та альтернативні варіанти поїздки. У межах сучасної міської мобільності інформаційні технології забезпечують можливість планування поїздки, прогнозування часу прибуття транспортних засобів, електронної оплати та оперативного інформування пасажирів [84, 85]. Це дозволяє підвищити передбачуваність транспортного обслуговування та зменшити невизначеність для пасажирів, особливо в пересадочних вузлах.

Окреме місце в дослідженнях займають інтелектуальні ТС та цифрові технології управління. До них належать автоматизовані системи диспетчерського управління, GPS-моніторинг, мобільні застосунки, системи електронної оплати, засоби прогнозування попиту та алгоритми підтримки прийняття рішень [84]. Потреба у комплексному використанні цифрових інструментів підтверджується у роботі [86], де зазначено, що ізольоване застосування окремих інтелектуальних методів управління транспортними потоками має обмежений ефект (рис. 1.11).



Рисунок 1.11 – Складники комплексної системи управління транспортними потоками [86]

Натомість поєднання GPS-даних, прогнозування, адаптивного управління та централізованої інформаційної взаємодії створює передумови для ефективного управління транспортною мережею. У цьому контексті інтегровані транспортні технології слід розглядати не лише як інфраструктурне або тарифне об'єднання різних видів транспорту, а й як систему динамічного управління параметрами їх функціонування.

У дослідженнях, присвячених інтеграції ГТ та транспортним альянсам, також підкреслюється значення інституційної інтеграції, що передбачає узгодження функцій органів місцевого самоврядування, транспортних операторів, перевізників, диспетчерських служб та інших учасників транспортного процесу. Ефективна інтеграція ГТ потребує не лише технічних рішень, а й єдиної організаційної моделі управління, узгодженого фінансування, розподілу відповідальності та механізмів координації операторів [87]. У цьому контексті особливого значення набуває формування компенсаційного механізму, який має забезпечувати економічну зацікавленість перевізників (операторів) різних форм власності у дотриманні узгоджених параметрів руху, участі в єдиній системі диспетчерського управління та виконанні вимог щодо якості транспортного обслуговування. Такий механізм дозволяє поєднати інтереси замовника транспортних послуг, перевізників і пасажирів, а також створює організаційно-

економічні передумови для практичної реалізації інтегрованої координації роботи різних видів МПТ. Слід зазначити, що моделі договорів про надання транспортних послуг суттєво відрізняються між собою – як за структурою компенсацій, так і за розподілом ризиків та ступенем залучення перевізника. Проте наявність такого нормативного документа, як Регламент (ЄС) № 1370/2007, формує єдиний стратегічний вектор розвитку взаємовідносин між органами влади та операторами у сфері ГТ. Цей підхід передбачає прозорість, чіткість обов'язків, вимірюваність результатів та орієнтацію на якість.

У працях щодо інтеграції ГТ та сервісів спільної мобільності (shared mobility) зазначається, що ТС, здатна конкурувати з приватним автомобілем, має забезпечувати зручну взаємодію між ГТ, пішохідною доступністю, велосипедною інфраструктурою, спільною мобільністю та пересадочними вузлами [88, 89]. Це розширює розуміння інтегрованих транспортних технологій: вони не обмежуються лише взаємодією автобусних, тролейбусних і трамвайних маршрутів, а охоплюють широку систему міської мобільності, у якій ГТ виконує роль базового елемента.

Таким чином, аналіз літератури свідчить, що інтегровані транспортні технології на МПТ формуються на перетині кількох напрямів: сталої міської мобільності, мультимодальної інфраструктури, тарифної та інформаційної інтеграції, інтелектуальних ТС, адаптивного управління рухом і координації роботи перевізників. Водночас у більшості досліджень переважає розгляд окремих складових інтеграції: тарифної, інформаційної, інфраструктурної або диспетчерської. Недостатньо розробленими залишаються питання інтегрованої координації на рівні маршрутів різних видів МПТ на спільних ділянках маршрутної мережі та в пересадочних вузлах, особливо в умовах високого рівня дублювання маршрутів, нерівномірності інтервалів руху та наявності перевізників різних форм власності. Існуючі підходи до координації МПТ у пересадочних вузлах, як правило, зводяться до статичного узгодження розкладів руху й не враховують динамічного характеру транспортного процесу в умовах високого рівня дублювання маршрутів та реальних відхилень від розкладу. Це зумовлює необхідність розробки адаптивної системи координації роботи МПТ, яка поєднує динамічне узгодження параметрів

руху, інформаційне забезпечення, диспетчерське управління та організаційно-економічні механізми взаємодії перевізників.

Результати огляду літературних джерел [45-46, 52-59, 72, 74-78, 80, 88] свідчать про те, що задачі координації розкладів і пересадок часто розв'язуються методами математичного програмування, евристичних алгоритмів, генетичних алгоритмів, імітаційного моделювання та комбінованих підходів. Проте в умовах складної міської мережі та неоднорідної керованості маршрутів оптимізаційна модель може стати надмірно складною, чутливою до вхідних параметрів і недостатньо прозорою для інтерпретації. Натомість, адаптивний підхід орієнтований не лише на пошук одного оптимального рішення, а й на підтримку бажаного режиму функціонування системи за змінних умов. Він передбачає моніторинг фактичного стану системи, оцінювання відхилень, формування керуючих впливів і коригування параметрів роботи маршрутів. Для МПТ це особливо важливо, оскільки фактичні умови руху постійно змінюються під впливом багатьох факторів.

Інтегровані технології на МПТ мають формуватися комплексно та поєднувати обидва підходи. На стратегічному і тактичному рівнях доцільно використовувати оптимізаційні методи для формування маршрутної мережі, розкладів, інтервалів і структури пересадочних вузлів. На оперативному рівні необхідно застосовувати адаптивні методи диспетчерського управління, здатні підтримувати регулярність і синхронізацію розкладів в реальному часі. Ефективність такої інтеграції залежить від сукупності організаційних, технологічних, інформаційних, економічних та інституційних умов, що визначають можливість узгодженої роботи різних видів транспорту. Тому для обґрунтування напрямів удосконалення координації МПТ доцільно систематизувати зазначені умови та розглянути класифікацію факторів, що впливають на ефективність інтеграції систем МПТ.

У роботі [90] за результатами критичного аналізу наукових джерел щодо інтеграції та моделювання систем ГТ виокремлено ключові параметри, змінні та математичний інструментарій, що використовуються для оцінювання ефективності

інтеграційних процесів. Систематизацію параметрів інтеграції систем МПТ та відповідних методів їх моделювання наведено в таблиці 1.1.

Аналіз наведеної систематизації показує, що інтегровані технології МПТ мають багаторівневий характер і потребують поєднання різних методів моделювання, оптимізації та оцінювання. Для стратегічного й організаційного рівня найбільш доцільними є багатокритеріальні методи, структурно-інтерпретаційне моделювання, ГІС-інструменти та макромоделювання транспортного попиту, які дозволяють оцінювати тарифну, мережеву, фізичну та інформаційну інтеграцію. На техніко-технологічному й економічному рівні перевагу мають моделі математичного програмування, евристичні алгоритми, PTV Visum та ГІС-моделювання, оскільки вони дають змогу визначати параметри маршрутної мережі, доступності, пропускної здатності, завантаження рухомого складу й інфраструктурного забезпечення.

Таблиця 1.1 – Класифікація факторів впливу на ефективність інтеграції систем МПТ\*

Інтегровані технології та параметри оцінки	Зміст та характеристики	Методи та інструменти моделювання / оптимізації
1	2	3
Стратегічний та організаційний рівень		
Тарифна та мережева інтеграція	Вибір тарифної політики, визначення вартості проїзду та інтеграція тарифних планів	Багатокритеріальний аналіз та прийняття рішень (підхід MCDM/A): нечіткий метод Дельфі (Fuzzy Delphi Method)
Інформаційна інтеграція	Моделювання інформаційних потоків та їх вплив на поведінку пасажирів в реальному часі	Багатоагентні динамічні моделі синхронізації та імітаційного моделювання
Мережева та операційна інтеграція	Оптимізація маршрутних мереж (зокрема, визначення ступеня дублювання/перекриття маршрутів автобусного транспорту та метрополітену)	Евристичні та генетичні алгоритми; інструменти макромоделювання ТС у ПК PTV Visum
Фізична інтеграція	Просторовий аналіз доступності та організація ТПВ та моделювання пішохідних потоків в зонах пересадки	ГІС-орієнтовані моделі оптимізації; агентно-орієнтоване моделювання

Продовження таблиці 1.1

1	2	3
Інтегроване транспортне планування	Спільне проектування взаємодії різних видів транспорту як єдиної системи	Структурно-інтерпретаційне моделювання; матриця перехресного впливу; матричне множення; орієнтований граф; чотириступенева модель транспортного попиту у ПК PTV Visum (Four Step Model)
<b>Техніко-технологічний та економічний рівень</b>		
Параметри доступності та мобільності	Щільність транспортної мережі, доступність послуг та наявність підвізних маршрутів до швидкісного транспорту	Інструменти макромодельовання ТС у ПК PTV Visum; чотириступенева модель транспортного попиту
Техніко-експлуатаційні показники системи та пропускна здатність	Оптимізація коефіцієнтів наповнення рухомого складу в пікові періоди, максимізація пропускної здатності інфраструктури та доходу на один авт.-км	Моделі змішано-цілочисельного лінійного програмування; та цілочисельного лінійного програмування; евристичні алгоритми
Інфраструктурні елементи мультимодальності	Розвиток мережі перехоплюючих паркувальних майданчиків та супутніх об'єктів сервісу	ГІС-орієнтоване моделювання оптимізації; евристичні методи проєктування сценаріїв розвитку
Фінансові показники	Оптимізація капіталовкладень на розбудову інфраструктури та оцінка компромісу між вартістю проїзду та якістю послуг	Багатокритеріальний аналіз та прийняття рішень (підхід MCDM/A); моделі математичного програмування
<b>Суб'єктивний рівень (рівень якості послуг)</b>		
Витрати часу пасажирів	Загальний час поїздки із розподілом на час переміщення всередині транспортного засобу та поза ним	Інструменти макромодельовання ТС у ПК PTV Visum; чотириступенева модель транспортного попиту
Параметри пересадочного процесу	Мінімізація часу очікування на ЗП, тривалості пересадки, узгодження типів пересадочних сполучень	Багатоагентні динамічні моделі синхронізації
Параметри просторової доступності транспортних вузлів	Визначення меж зон впливу ТПВ, відстаней до входів/виходів терміналів, часу безпосереднього підходу та відходу від транспортного об'єкта	ГІС-орієнтоване моделювання

Продовження таблиці 1.1

1	2	3
Показники надійності та комфорту	Оцінка регулярності та підвищення надійності обслуговування, рівня комфорту, безпеки руху	Нечіткий метод Дельфі (Fuzzy Delphi Method); Структурно-інтерпретаційне моделювання; матриця перехресного впливу; матричне множення
Екологічні фактори	Зменшення рівня техногенного впливу ТС на навколишнє середовище	Макромодельовання у ПК PTV Visum; багатокритеріальний аналіз сценаріїв

*\*Джерело: розроблено автором на основі [90]*

Водночас параметри, безпосередньо пов'язані з оцінкою якості транспортного обслуговування пасажирів, зокрема час очікування, тривалість пересадки, регулярність руху, надійність і комфорт, потребують не лише статичного оцінювання, а й використання динамічних, багатоагентних, синхронізаційних та адаптивних моделей. Це пояснюється тим, що фактичні умови функціонування МПТ змінюються в часі під впливом нерівномірності пасажиропотоків, зміни дорожніх умов, відхилень від розкладу руху, експлуатаційних обмежень та керуючих впливів. Отже, жоден із наведених методів та інструментів сам по собі не забезпечує всебічного охоплення аспектів інтеграції МПТ, що обґрунтовує необхідність розробки комплексного підходу, у межах якого стратегічне планування маршрутної мережі поєднується з оперативною адаптивною координацією роботи різних видів МПТ в пересадочних вузлах.

Для формалізації розглядаємого типу координації доцільним є використання підходів теорії синхронізації зв'язаних осциляторів, яка дозволяє описати узгодження роботи різних видів МПТ як динамічну взаємодію елементів транспортної мережі. У такій постановці маршрути або транспортні засоби можуть розглядатися як взаємодіючі динамічні елементи ТС, а моменти їх прибуття до спільних ділянок маршрутної мережі чи пересадочних вузлів – як фазові характеристики. Класична модель Курамото Й., представлена у 1975 році [90], узагальнює поведінку колективних систем взаємодіючих елементів через параметр

порядку синхронізації. Подальший розвиток цієї моделі для мережевих топологій наведено в роботах Дерфлера Ф. та Булло Ф. [91], де встановлено зв'язок між умовами синхронізації та спектральними характеристиками графа взаємодій. Це створює методологічну основу для кількісного оцінювання рівня узгодженості руху різних видів МПТ та обґрунтування адаптивних керуючих впливів у пересадочних вузлах. Застосування підходу мережевої синхронізації може розглядатися як один із науково-методичних інструментів формування інтегрованих технологій на МПТ, що створює теоретичну основу для розробки мережево-динамічної моделі інтегрованої координації руху різних видів транспорту у пересадочних вузлах.

### Висновки по першому розділу

1. Аналіз теоретичних підходів до підвищення якості транспортного обслуговування населення міст показав, що існуючі методи переважно орієнтовані на оцінювання окремих параметрів перевезень або координацію маршрутів одного виду транспорту. Водночас в умовах дублювання маршрутів, нерівномірності транспортної пропозиції та функціонування перевізників різних форм власності недостатньо дослідженими залишаються питання динамічної координації різних видів МПТ у пересадочних вузлах.

2. Аналіз принципів сталої міської мобільності засвідчив, що ГТ є базовим елементом формування доступної, безпечної та екологічної ТС, а міський електротранспорт – її опорним компонентом. Встановлено, що високий рівень дублювання маршрутів є наслідком недостатньої інтеграції ТС, що обумовлює необхідність розвитку інтегрованих технологій адаптивного управління координацією роботи різних видів МПТ.

3. Визначено, що інтегровані технології функціонування МПТ мають охоплювати маршрутно-мережеву, часову, інформаційну, управлінську та інституційну складові. Їх реалізація забезпечує перехід від фрагментарного функціонування окремих маршрутів до узгодженої системи міської мобільності, а

перспективним напрямом є застосування підходів мережевої синхронізації для координації різних видів транспорту у пересадочних вузлах.

Основні результати проведених досліджень в рамках цього розділу опубліковані в роботах [1, 2, 6–14].

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ НАСЕЛЕННЯ ЗА РАХУНОК ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА МІСЬКОМУ ПАСАЖИРСЬКОМУ ТРАНСПОРТІ

Згідно із положеннями, обґрунтованими в розділі 1, якість транспортного обслуговування населення міста визначається здатністю ТС забезпечувати узгоджену, регулярну та доступну роботу різних видів міського МПТ в умовах змінного попиту й обмежених ресурсів. У цьому контексті технологічна взаємодія різних видів МПТ у пересадочних вузлах виступає одним із ключових чинників підвищення рівня якості транспортного обслуговування, оскільки забезпечує узгодження параметрів роботи рухомого складу: інтервалів обслуговування та моментів прибуття рухомого складу до пересадочних вузлів [27]. Тому, подальший виклад у розділі спрямований на формалізацію моделі координації, у якій маршрути різних видів транспорту розглядаються як взаємодіючі елементи ТС. Це створює основу для подальшого оцінювання ефективності диспетчерських керуючих впливів, аналізу режимів узгодженості руху та визначення умов, за яких у пересадочному вузлі може бути забезпечено прийнятний для пасажирів рівень координації транспортного обслуговування.

#### 2.1 Інформаційно-технологічне забезпечення координації роботи різних видів МПТ у пересадочних вузлах

Реалізація ефективної координації різних видів МПТ у пересадочних вузлах потребує відповідного інформаційно-технологічного забезпечення, яке утворює технічну основу для збору, передачі та обробки даних про поточний стан ТС в режимі реального часу. Аналіз сучасного стану розвитку автоматизованих систем управління транспортом свідчить про те, що найбільш ефективною є ієрархічна структура управління з елементами децентралізації, яка передбачає розподіл

керуючих функцій між рівнями відповідно до характеру управлінських завдань [45, 46, 80, 82, 92-94].

Відповідно до положень, обґрунтованих у роботах Абрамової Л. С. та Нагорного Є. В. [82, 92], виокремлюють три рівні управління транспортною системою. Стратегічний рівень охоплює визначення загальної ефективності функціонування транспортної мережі міста і формування цілей управління на основі агрегованих показників транспортного процесу. Тактичний рівень забезпечує адаптивне управління транспортними потоками з урахуванням нерівномірності та стохастичності параметрів руху, а також формування керуючих впливів на основі математичних моделей. Рівень локального управління забезпечує оперативне регулювання параметрів руху конкретних транспортних засобів на перегонах і ЗП маршрутів.

Сучасний стан розвитку інформаційних технологій у сфері МПТ характеризується широким впровадженням систем автоматичного збору та обробки даних, що забезпечують диспетчерський персонал оперативною інформацією про місцезнаходження, швидкість і розклад руху транспортних засобів. Основу інформаційно-технологічної інфраструктури сучасних ТС становлять автоматизовані системи управління, що інтегрують технології супутникової навігації, бездротового зв'язку та цифрової обробки даних [45, 80, 82, 92-94]. Зазначена ієрархія є загальною методологічною основою для побудови автоматизованих систем управління транспортом, зокрема АСУДР, АСДУ, ITS, GPS/AVL-систем моніторингу, СППР диспетчера та інтегрованої системи координації різних видів МПТ у пересадочних вузлах.

Ключовим елементом інформаційного забезпечення координації МПТ є системи автоматичного визначення місцезнаходження транспортних засобів (AVL – Automatic Vehicle Location), що базуються на технологіях GPS/GNSS. Системи AVL забезпечують безперервний моніторинг місцезнаходження рухомого складу з інтервалом оновлення даних 15–60 секунд і передачу координат до диспетчерського центру через канали стільникового зв'язку (3G/4G/5G) [93]. Точність визначення координат сучасних GPS-приймачів становить 2–5 метрів, що

є достатньою для ідентифікації факту прибуття транспортного засобу на ЗП і визначення відхилення від розкладу руху.

Важливою складовою інформаційно-технологічного забезпечення є системи автоматичного підрахунку пасажирів (APC – Automatic Passenger Counting), що дозволяють отримувати дані про пасажиропотік у реальному часі і є основою для актуалізації матриці маршрутних пересадок [94]. Досвід м. Лівова свідчить про успішну інтеграцію автоматизованої системи підрахунку як частину загальної АСОП (автоматизованої системи оплати проїзду) та е-квитка (ЛеоКарт). Інтеграція даних AVL і APC забезпечує збір комплексних даних про стан пересадочного вузла, як з точки зору розташування транспортних засобів, так і з точки зору попиту на транспортні послуги.

Розвиток концепції «розумного міста» (Smart City) зумовив появу відкритих платформ для агрегації та публікації транспортних даних у режимі реального часу. Серед таких платформ в Україні набула поширення система EasyWay, що надає відкритий API-інтерфейс для отримання GPS-координат транспортних засобів МПТ з інтервалом оновлення 30 секунд [95]. Використання відкритих API-платформ дозволяє суттєво знизити вартість впровадження систем моніторингу транспорту для органів місцевого самоврядування, оскільки не потребує розгортання власної телематичної інфраструктури.

Паралельно з системами моніторингу транспортних засобів розвиваються системи інформування пасажирів – електронні табло на ЗП, мобільні застосунки та веб-портали, що відображають очікуваний час прибуття транспортних засобів. Результати досліджень [96] свідчать про те, що впровадження систем інформування пасажирів у реальному часі підвищує рівень задоволеності пасажирів транспортним обслуговуванням МПТ на 15–25 % і сприяє більш рівномірному розподілу попиту у часі .

Для забезпечення координації роботи різних видів МПТ принципового значення набуває інтеграція інформаційних систем перевізників різних форм власності в єдину платформу обміну даними. Практика європейських міст свідчить, що ефективна координація МПТ потребує впровадження єдиного стандарту обміну

транспортними даними – зокрема стандартів GTFS (General Transit Feed Specification) і SIRI (Service Interface for Real Time Information), що забезпечують сумісність систем різних перевізників і видів транспорту [97, 99].

Важливим напрямом розвитку інформаційно-технологічного забезпечення координації МПТ є впровадження бортових терміналів водіїв, які відображають рекомендації диспетчерської системи щодо коригування швидкості руху. На відміну від традиційних систем радіозв'язку, бортові термінали забезпечують передачу структурованих цифрових рекомендацій у форматі рекомендованої швидкості руху на конкретному перегоні маршруту [55]. Використання бортових терміналів дозволяє підвищити виконання рекомендацій диспетчера з координації руху на 30–40 % порівняно з голосовими командами через канали зв'язку.

Транспортне моделювання є невід'ємним інструментом інформаційно-технологічного забезпечення координації МПТ. Програмний комплекс PTV Visum широко застосовується для побудови транспортних моделей міст і отримання матриць пасажирських кореспонденцій між ЗП і маршрутами [38]. Матриця пасажиропотоків, що формується за результатами транспортного моделювання, є вхідними даними для проведення моделювання під час розв'язання задач координації інтервалів руху та моментів прибуття транспортних засобів.

Таким чином інформаційно-технологічне забезпечення координації різних видів МПТ у пересадочних вузлах є багаторівневою системою що включає: підсистему збору даних (GPS/AVL-моніторинг, APC, відкриті API-платформи); підсистему обробки і моделювання (транспортні моделі, матриці пересадок, динамічну модель); підсистему передачі керуючих впливів (бортові термінали водіїв, системи інформування пасажирів); підсистему моніторингу ефективності за визначеними показниками ефективності (KPI). Інтеграція зазначених підсистем в єдину систему є технологічною основою для реалізації адаптивної координації різних видів МПТ в режимі реального часу.

## 2.2 Формування інтегрованої адаптивної системи координації роботи різних видів міського пасажирського транспорту

Результати аналізу, проведеного у розділі 1, показали, що підвищення якості транспортного обслуговування населення міст потребує переходу від фрагментарного управління окремими маршрутами до інтегрованої координації роботи різних видів МПТ. Особливої актуальності це набуває у пересадочних вузлах і на спільних ділянках маршрутної мережі, де одночасно взаємодіють різні види МПТ на маршрутах, що обслуговуються перевізниками різних форм власності. Координоване пересадочне сполучення доцільно розглядати як режим взаємодії, за якого пасажирів можуть здійснити пересадку між різними лініями ГТ в пересадочному вузлі з мінімальними витратами часу. Його забезпечення пов'язане з узгодженням моментів прибуття транспортних засобів різних маршрутів, тривалості їх перебування на ЗП та допустимого часу очікування пасажирів під час пересадки [45, 46; 27; 52–53]. Отже, задача координації різних видів МПТ має комплексний характер, оскільки передбачає одночасне врахування інтересів пасажирів, перевізників і замовника транспортних послуг. Її розв'язання потребує не лише узгодження розкладів, а й адаптивного коригування фактичних моментів прибуття транспортних засобів у пересадочні вузли з метою мінімізації часу очікування пасажирів, підвищення регулярності руху та раціонального використання рухомого складу.

У зв'язку з цим у роботі запропоновано розглядати інтегровану адаптивну систему координації роботи різних видів МПТ як сукупність взаємопов'язаних інформаційних, аналітичних, диспетчерських, організаційних та економічних рішень.

Структуру інтегрованої адаптивної системи координації різних видів МПТ у пересадочних вузлах (ІАСК) наведено на рисунку 2.1. Вона формується у вигляді ієрархічної структури, що включає п'ять взаємопов'язаних блоків: блок зовнішніх умов функціонування, підсистему моніторингу, аналітично-розрахунковий блок,

підсистему адаптивної координації, економічний та інституційний блок, а також блок результатів функціонування системи.

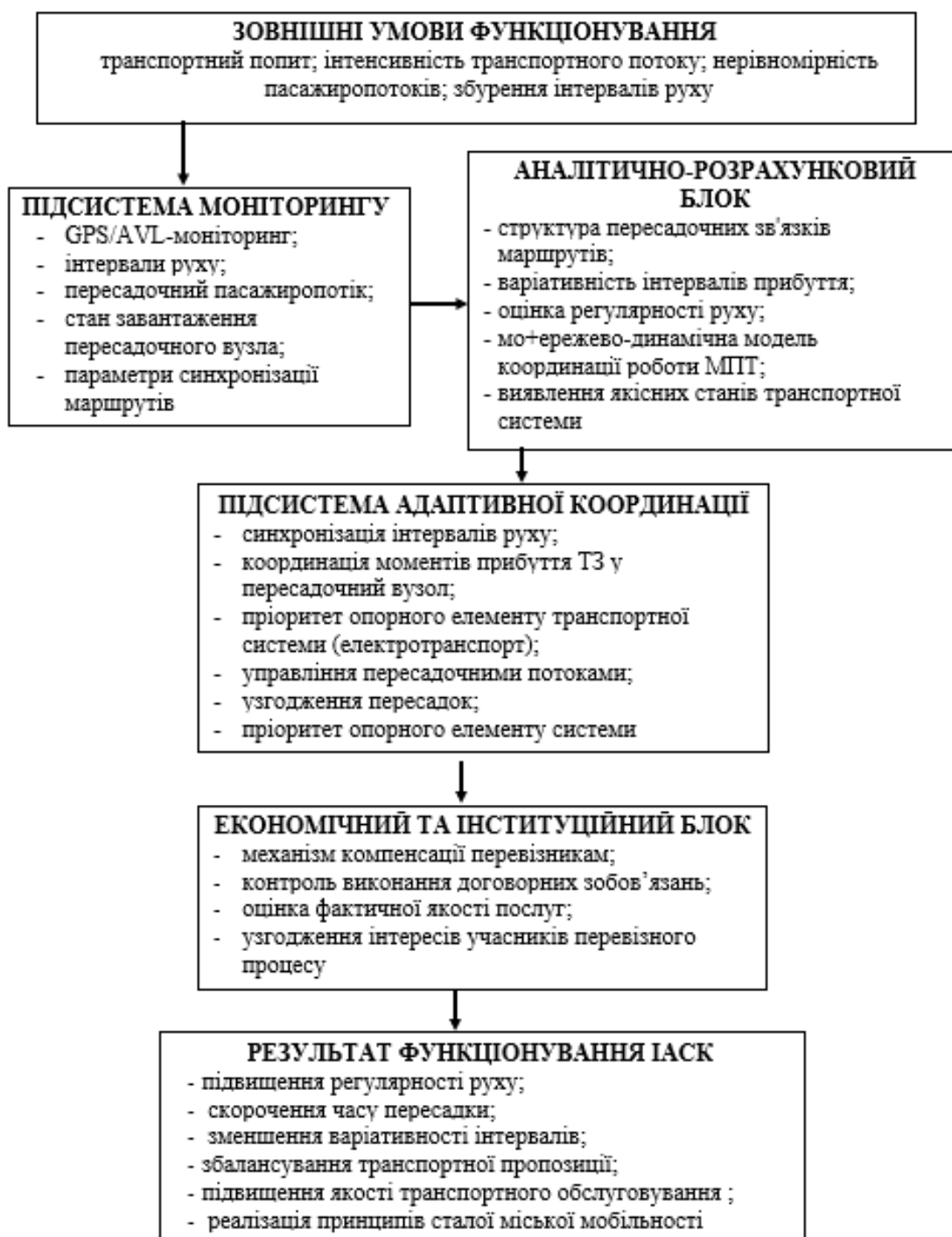


Рисунок 2.1 – Структура інтегрованої адаптивної системи координації різних видів МПТ у пересадочних вузлах

Зовнішні умови функціонування формують середовище, у якому працює система МПТ. До таких умов належать: транспортний попит, інтенсивність транспортного потоку, нерівномірність пасажиропотоків, варіювання інтервалів руху, завантаженість ВДМ, наявність відхилень моментів прибуттів транспортних засобів на пересадочний вузол, експлуатаційні обмеження електротранспорту та різний рівень керованості перевізників у централізованій диспетчерській системі. Стохастичний характер зовнішніх умов зумовлює необхідність адаптивного характеру системи координації, оскільки статичне узгодження розкладів не забезпечує належного рівня якості обслуговування за умов постійних відхилень фактичного транспортного процесу від планового.

Підсистема моніторингу забезпечує збір вхідних даних у режимі поточного або періодичного спостереження. До складу таких даних належать GPS/AVL-дані про місцезнаходження транспортних засобів, фактичні інтервали руху, моменти прибуття та відправлення, дані про пересадочний пасажиропотік, стан завантаження пересадочного вузла, відхилення від розкладу, а також параметри синхронізації маршрутів. Підсистема моніторингу є інформаційною основою інтегрованої координації і детально описана в п.п. 2.1.

Аналітично-розрахунковий блок призначений для обробки даних, отриманих підсистемою моніторингу, та формування кількісної оцінки поточного стану взаємодії різних видів МПТ. У цьому блоці враховуються структура пересадочних зв'язків, параметри прибуття транспортних засобів у вузол, варіативність інтервалів руху, рівень відхилень від розкладу та ознаки порушення регулярності. На цьому етапі система не лише фіксує факт відхилення, а й визначає його вплив на координацію роботи різних видів транспорту. Математичне ядро цього блоку деталізується у п.п. 2.3.

Підсистема адаптивної координації забезпечує формування керуючих впливів залежно від поточного стану ТС. До таких впливів належать коригування інтервалів руху, узгодження моментів прибуття транспортних засобів у пересадочний вузол, регулювання відправлень, короткочасне утримання транспортного засобу, пріоритет опорного елемента ТС та диспетчерське

коригування взаємодії маршрутів. У рамках дослідження міський електротранспорт розглядається як один з опорних елементів системи, оскільки його робота значною мірою визначається інфраструктурними й експлуатаційними обмеженнями, саме цей вид транспорту визначається пріоритетним відповідно до принципів сталої міської мобільності, а отже може бути зазначений як базовий орієнтир для координації інших видів МПТ.

Система підтримки прийняття рішень диспетчером має забезпечувати автоматизоване оцінювання поточного стану маршрутної мережі, виявлення відхилень, формування рекомендацій щодо оперативного управління та передачу керуючих впливів диспетчерським службам, водіям або бортовим системам. Практична реалізація такого підходу може передбачати API-інтеграцію з програмними комплексами оперативного управління та централізованими диспетчерськими системами. Це дозволяє використовувати поточні дані про рух транспортних засобів для формування рекомендацій у режимі, наближеному до реального часу.

Економічний та інституційний блок забезпечує організаційне й фінансове підґрунтя для функціонування системи. Його завданням є узгодження інтересів замовника транспортних послуг, перевізників різних форм власності та пасажирів. У межах цього блоку можуть бути передбачені механізми компенсації перевізникам за виконану транспортну роботу, контроль за виконанням договірних зобов'язань, оцінювання фактичної якості наданих послуг, а також урахування рівня участі перевізника в інтегрованій системі координації. Такий підхід дозволяє пов'язати оперативні результати диспетчерського управління з економічним стимулюванням перевізників дотримання узгоджених параметрів руху.

Результат функціонування запропонованої інтегрованої адаптивної системи координації полягає у підвищенні регулярності руху, скороченні часу пересадки, зменшенні варіативності інтервалів, збалансуванні транспортної пропозиції та підвищенні якості транспортного обслуговування населення. Крім того, функціонування такої системи створює передумови для реалізації принципів сталої міської мобільності, оскільки забезпечує більш раціональне використання

транспортних ресурсів, підвищення привабливості МПТ та зменшення негативних наслідків неузгодженої роботи маршрутів у пересадочних вузлах.

Для практичного впровадження інтегрованої адаптивної системи координації важливим є не лише визначення поточного стану маршрутної системи, а й забезпечення достатньої швидкодії управлінського циклу. Під швидкістю ІАСК у роботі пропонується розуміти час від моменту виявлення відхилення параметрів руху від узгодженого режиму до моменту формування та доведення диспетчерської рекомендації до виконавця. Такий показник є принциповим для пересадочних вузлів із невеликими інтервалами руху, оскільки керуючий вплив має бути реалізований до моменту виникнення наступного критичного відхилення або скупчення транспортних засобів.

Швидкість ІАСК може характеризуватися двома взаємопов'язаними складовими: технічним циклом оновлення інформації та динамічним часом відновлення координованого стану системи. Технічний цикл визначається періодичністю отримання GPS/AVL-даних, часом їх обробки, розрахунком поточного стану системи та формуванням диспетчерської рекомендації. Динамічна швидкість характеризує час, необхідний для відновлення узгодженого режиму руху після виникнення збурення, і залежить від рівня керуючого впливу та структурної зв'язності маршрутної системи.

## 2.3 Розробка мережево-динамічної моделі координації роботи різних видів міського пасажирського транспорту

### 2.3.1 Адаптація моделі Курамото до задачі координації

Формалізація процесів координації, особливо в задачах динамічного управління в умовах високого рівня дублювання маршрутів [100] та скупчення транспортних засобів у пересадочних вузлах [90, 101, 102], потребує специфічного математичного апарату, що дозволяє одночасно враховувати структурні характеристики маршрутної мережі та динаміку часових параметрів роботи

маршрутів. Розв'язанню цієї задачі відповідає математичний апарат теорії синхронізації зв'язаних осциляторів у складних мережах, адаптований у роботі [103] до специфіки взаємодії різних видів МПТ в пересадочних вузлах, що полягає у часових і просторових подіях одночасного або послідовного перебування транспортних засобів різних маршрутів у спільних точках маршрутної мережі. Для математичного опису адаптивної системи координації в роботі запропоновано інтегрувати динамічний підхід, заснований на моделі Курамото, зі спектральним аналізом [104].

На підставі проведеного аналізу публікацій параметри оцінки міжмаршрутної та міжвидової взаємодії можна згрупувати у три характерні групи:

- структурні параметри, що характеризують просторову конфігурацію взаємодії (кількість маршрутів, що проходять через пересадочний вузол, кількість пар маршрутів зі значущим обсягом маршрутних пересадок за розрахунковий період);

- параметри потоку, що характеризують інтенсивність взаємодії в період пікових навантажень (обсяг маршрутних пересадок за розрахунковий період між парами маршрутів);

- часові параметри, що характеризують динаміку взаємодії (інтервали між прибуттями транспортних засобів різних маршрутів, фактичні інтервали руху на маршрутах та їхні коефіцієнти варіації).

Структуру взаємодії різних видів транспорту в пересадочних вузлах можна формалізувати у вигляді зваженого неорієнтованого графа

$$G = (M, E, W), \quad (2.1)$$

де  $M$  – множина вершин (маршрути, що проходять через пересадочний вузол),  $M = \{1, 2, \dots, m\}$ ;

$E$  – множина ребер (пар маршрутів  $i-j$  зі значущим обсягом маршрутних пересадок за розрахунковий період,  $E = \{(i, j) : i, j \in M, i \neq j, p_{ij} > 0\}$ );

$W$  – функція ваг ребер, що визначається обсягом маршрутних пересадок за розрахунковий період між парами маршрутів,  $w(e) > 0$ .

На відміну від традиційного підходу, у якому вершинами графа є ЗП, а ребрами – маршрутні ділянки, у запропонованій моделі вершинами є значущі маршрути, а ребрами – пари маршрутів, що взаємодіють у пересадочному вузлі. Запропонована інтерпретація графа відповідає моделі Курамото [90, 102, 104], у якій взаємодія описується між маршрутами, а структура графа взаємодії визначає матрицю зв'язку моделі.

Граф міжмаршрутної взаємодії  $G$  доцільно представити алгебраїчно матрицею суміжності  $A = [a_{ij}]$ , розміру  $m \times m$ , елементи якої визначаються як нормована матриця сумарного обсягу маршрутних пересадок

$$A = [a_{ij}], a_{ij} = \frac{p_{ij} + p_{ji}}{p_{\max}}, a_{ii} = 0, \quad (2.2)$$

де  $p_{ij}, p_{ji}$  – кількість пересадок між парами маршрутів  $i-j$ , пас./год.;  $p_{\max}$  – максимальне значення сумарного обсягу маршрутних пересадок серед усіх пар маршрутів пересадочного вузла, пас./год.

Нормування матриці на максимальне значення сумарного обсягу маршрутних пересадок забезпечує діапазон  $a_{ij} \in [0;1]$ , що відповідає вимогам моделі Курамото зі стандартним коефіцієнтом зв'язку  $K$ . Необхідність приведення асиметричної матриці маршрутних пересадок до симетричного вигляду обґрунтована тим, що координаційний вплив між маршрутами реалізується незалежно від напрямку пересадок.

Для оцінювання структурних властивостей графа міжмаршрутної взаємодії необхідно використовувати матрицю Лапласа [104]

$$L = D - A, \quad (2.3)$$

де  $D$  – діагональна матриця степенів вершин графа,  $d_{ij} = \sum_j a_{ij}$ .

Власні значення матриці Лапласа впорядковуються за зростанням:  $0 = \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_n$ . Перше власне значення  $\lambda_1$  для зв'язного графа завжди дорівнює нулю та не несе інформації про рівень зв'язності мережі. Тому для аналізу структури графа використовується друге найменше власне значення  $\lambda_2$ , відоме як число Фідлера або показник алгебраїчної зв'язності графа. Друге найменше власне значення  $\lambda_2(L)$  (спектральний розрив або число Фідлера) характеризує алгебраїчну зв'язність графа взаємодії, визначає здатність системи до фазового захоплення [105] і є критерієм швидкості досягнення когерентності у випадках сильного зв'язку  $K \geq 1$ . Визначення алгебраїчної зв'язності  $\lambda_2$  для пересадочного вузла здійснюється шляхом чисельного обчислення спектра матриці Лапласа графа пересадочних зв'язків маршрутів із використанням стандартних бібліотек лінійної алгебри (таких як *NumPy* для *Python*, *MATLAB* або *R*). Згідно теорії синхронізації та в рамках застосування моделі типу Курамото більше значення  $\lambda_2$  свідчить про високу ступінь зв'язності системи та її більшу здатність досягати синхронного стану при фіксованому рівні шуму та розкіді власних частот; менші значення відповідають частково узгодженій або неузгодженій взаємодії.

Кожен  $i$ -ий маршрут ( $i=1,2,\dots,m$ ) моделюється як фазовий елемент транспортної системи із власною частотою  $\omega_i$ , рад./с, що визначається плановим інтервалом руху

$$\omega_i = \frac{2\pi}{h_i}, \quad (2.4)$$

де  $h_i$  – плановий інтервал руху на  $i$ -му маршруті, хв. (для узгодження одиниць вимірювання показників хвилини доцільно перевести їх у секунди).

Час, що минув з моменту останнього прибуття транспортного засобу  $i$ -го маршруту до пересадочного вузла, переводиться у фазовий кут у діапазоні

тригонометричного кола  $[0; 2\pi)$ . Відповідно, поточна фаза  $i$ -го маршруту визначається за формулою, рад./с

$$\theta_i(t) = \frac{2\pi(\Delta t_i)}{h_i \pmod{2\pi}}, \theta_i(t) \in (0; 2\pi], \quad (2.5)$$

де  $\Delta t_i$  – час, що минув з моменту останнього прибуття  $t_i^*$  транспортного засобу  $i$ -го маршруту до поточного моменту  $t$ , хв.

Фаза  $\theta_i(t)$  описує положення транспортного засобу  $i$ -го маршруту у поточному циклі обороту та автоматично оновлюється з частотою отримання GPS-даних поточних координат (частота 30 с у централізованій диспетчерській системі). Якщо для  $i$ -го маршруту GPS-дані у встановлений проміжок часу в системі не оновилися, його фаза екстраполюється на основі останньої зафіксованої позиції транспортного засобу на маршруті та середньої швидкості руху на перегоні від контрольної точки до пересадочного вузла.

Запропонована формалізація параметру поточної фази заснована на загальній ідеї представлення періодичних процесів через фазову змінну [102] та узгоджується з підходом [106], де моменти прибуття автобусів до ЗП використано для опису синхронізаційної динаміки маршрутів.

При розробці моделі запропоновано забезпечувати координацію взаємодії навколо маршруту електротранспорту із максимальним обсягом маршрутних пересадок за розрахунковий період як опорного з фіксованою фазою. З огляду на експлуатаційні обмеження маневреності рухомого складу тролейбусний маршрут приймається як опорна фаза синхронізації

$$\theta_i(t) = \omega_0 \cdot t + \tau_0 \theta(t) = \omega_0 \cdot t + \varphi_0, \quad (2.6)$$

де  $\theta(t)$  – фаза маршруту електротранспорту (тролейбусного маршруту), рад.;

$\omega_0$  – власна частота тролейбусного маршруту, рад./с;

$\tau_0$  – початкова фаза, рад./с.

Координаційний вплив реалізується через коригування фаз автобусних маршрутів відносно фази тролейбусу  $\theta(t)$ . Такий підхід повністю відповідає пріоритету екологічного електротранспорту в межах сучасної концепції сталої міської мобільності та інтегрованого розвитку міст.

Щодо моделі Курамото, зазначена ієрархія повністю відповідає ідеї синхронізації системи за наявності опорного маршрута. За такої конфігурації маршрути міського наземного електротранспорту виступають у ролі головних елементів ТС, які завдяки вищій пасажиромісткості та стабільності руху нав'язують цільовий динамічний ритм усьому пересадочному вузлу. Весь автобусний сегмент підлаштовується під графік руху електротранспорту: муніципальні автобуси великої місткості забезпечують синхронізовану підтримку магістральних коридорів, тоді як гнучкі фазові траєкторії автобусних маршрутів приватних операторів адаптуються за принципом підвізної мережі, що дозволить рівномірно розподілити ресурси, зменшити рівень скупчення транспортних засобів у пересадочному вузлі та мінімізувати час пересадки пасажирів.

Адаптація моделі полягає у виборі моменту прибуття саме до пересадочного вузла як точки відліку фази, що відображає координаційну задачу: фази маршрутів різних видів транспорту узгоджуються щодо їх перебування саме в пункті взаємодії транспортних засобів різних маршрутів, де відбуваються пересадки пасажирів.

Для опису динаміки взаємодії МПТ запропоновано використовувати розширену класичну модель Курамото [102-106], адаптовану до специфіки міжмаршрутної та міжвидової взаємодії в пересадочних вузлах з фазовим зсувом  $\delta$  у функції взаємодії

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \omega_i + \frac{K}{m} \cdot \sum_j a_{ij} \cdot \left[ \sin(\theta_j - \theta_i - \delta) \right] + \xi_i(t), \quad (2.7)$$

де  $K$  – коефіцієнт зв'язку (сила взаємного впливу маршрутів через керуючі впливи диспетчерської системи);

$\xi_i(t)$  – випадкові збурення, що моделюють варіації інтервалів руху та коливань пасажиропотоків, що дозволяє врахувати реальні умови функціонування МПТ;

$\delta$  – параметр часового (фазового) зсуву, що задає цільову різницю фаз між сусідніми маршрутами, представленими у моделі як фазові елементи транспортної системи, рад. Для пересадочного вузла з  $m$  маршрутами оптимальне значення фазового зсуву дорівнює

$$\delta = \frac{2\pi}{m}. \quad (2.8)$$

Значення фазового зсуву відповідає рівномірному розподілу фаз маршрутів по фазовому колу і забезпечує рівномірні часові інтервали між прибуттями ТЗ до пересадочного вузла.

Чисельне інтегрування здійснюється методом Ейлера з фіксованим кроком  $\Delta t = 30$  с, що відповідає частоті оновлення GPS-даних в системі.

Адаптація моделі Курамото полягає в тому, що, на відміну від класичного вигляду, у якому усі осцилятори зв'язані повним графом з рівними вагами, матрицю зв'язку  $a_{ij}$  в роботі запропоновано визначати інтенсивністю маршрутних пересадок між парами маршрутів. Це визначає мережево-динамічний тип моделі, за якого динаміка фаз обмежена структурою графа міжмаршрутної взаємодії, побудованого на основі емпіричних або змодельованих параметрів пересадочних пасажиропотоків.

Для графів з симетричною структурою та рівномірним розподілом частот критичне значення коефіцієнта зв'язку визначається на основі спектральних характеристик графа [104]

$$K \approx \frac{2 \cdot \Delta\omega}{\lambda_2}, \quad (2.9)$$

де  $\Delta\omega$  – ширина діапазону власних частот маршрутів, що визначається як різниця між максимальною ( $\omega_{\max}$ ) та мінімальною ( $\omega_{\min}$ ) частотами маршрутів пересадочного вузла.

Здатність системи досягти стану стійкої координації (фазового захоплення) визначається співвідношенням між коефіцієнтом зв'язку  $K$  та критичним значенням сили зв'язку  $K_c$ . Проте режим функціонування системи МПТ визначається не тільки відношенням сили зв'язку, а й структурою керованості маршрутної мережі, що обумовлено ситуацією, коли частка автобусних маршрутів приватних операторів, не інтегрована у централізовану диспетчерську систему. Зростання спектрального розриву  $\lambda_2$  зменшує необхідну силу зв'язку  $K_c$ . Таким чином, у сильно зв'язаних мережах синхронізація досягається за рахунок менших керуючих впливів диспетчера. Збільшення діапазону частот  $\Delta\omega$ , навпаки, підвищує необхідну силу зв'язку, оскільки різний ступінь керованості маршрутів за плановими інтервалами руху ускладнює їхню координацію.

На відміну від класичної моделі Курамото з повнозв'язною топологією, матриця  $a_{ij}$  у запропонованій адаптації моделі визначається структурою транспортної мережі: міжмаршрутна взаємодія відбувається лише на спільних ділянках і в пересадочних вузлах. Ступінь синхронізації маршрутів кількісно оцінюється через параметр порядку Курамото

$$R(t) = \frac{1}{M} \cdot \sum_j^m e_i^{j(t)}, \quad (2.10)$$

Параметр порядку  $R(t)$  інтегрує три усталені аспекти координаційної складової якості транспортного обслуговування (регулярність руху, час очікування пасажирів, відсутність скупчення транспортних засобів на ЗП) в єдиний кількісний показник з аналітично визначеним діапазоном значень  $R(t) \in [0;1]$ . Запропоновано

розглядати параметр порядку  $R(t)$  як індикатор координаційної складової якості транспортного обслуговування, що характеризує здатність системи формувати узгоджений режим функціонування у пересадочних вузлах та підтримувати стан функціональної сталості. На відміну від агрегованих критеріїв якості, побудованих на оцінці часових витрат пасажира, параметр  $R(t)$  безпосередньо описує внутрішню узгодженість роботи маршрутів і дозволяє виявляти порушення координації до того, як вони проявляться у вигляді часових витрат пасажирів при очікуванні у пересадочному вузлі.

На основі сформульованого індикатора координаційної складової якості транспортного обслуговування формалізуємо цільову функція контуру диспетчерського управління ІАСК різних видів МПТ, математичною задачею якої є мінімізація відхилення поточного стану когерентності (узгодженості) системи від оптимального значення  $R^*$  та стійке утримання траєкторії фаз всередині допустимої області стану фазового захоплення

$$\min_{v_i^*} \int_0^T (R_{\delta}(t) - R^*)^2 dt, \quad (2.11)$$

за умов обмеження простору станів системи та експлуатаційних обмежень

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{\min} \leq v_i^*(t) \leq v_{\max} \\ R_{\min} \leq R_{\delta}(t) \leq R_{\max} \\ C(t) \leq N_{\max} \\ I_{\Sigma}(t) = \sum_{k \in M_{et}} I_k(t) \leq I_{\max} \end{array} \right., \quad (2.12)$$

де  $v_{\min}, v_{\max}$  – гранично допустимі швидкості руху конкретних видів МПТ на перегоні маршруту від контрольної точки до пересадочного вузла, км/год.;

$T$  – загальний час моделювання (тривалість розрахункового періоду оцінки станів системи МПТ, с;

$C(t)$  – фактична кількість одночасно присутніх ТЗ на ЗП, од.;

$N_{\max}$  – кількість постів зупиночної кишені, од.;

$I_{\Sigma}(t)$  – сумарний струм навантаження на фідерній ділянці контактної мережі, А;

$I_k(t)$  – поточний струм, що споживається тролейбусом  $k$  у момент  $t$ , А;

$I_{\max}$  – максимально допустимий сумарний струм уставки захисту тягової підстанції, А;  $I_{\max} \approx 800 - 1200$  А при номінальній напрузі мережі 600 В.

На відміну від автобусних маршрутів, для тролейбусів можливість зміни режимів руху обмежується параметрами системи тягового електропостачання. Тому в моделі додатково враховано обмеження за допустимим сумарним навантаженням на контактну мережу, яке запобігає формуванню рекомендацій щодо одночасного прискорення декількох тролейбусних маршрутів у межах однієї зони живлення.

Слід зауважити, що під час розв'язання задачі координації МПТ прагнення класичного параметра порядку Курамото до одиниці ( $R \rightarrow 1$ ) є критично неприпустимою умовою. Це означає повну синхронізацію та повне «злиття» фаз ( $\delta = 0$ ), що призводить до скупчення транспортних засобів у пересадочному вузлі та на спільних ділянках маршрутів, відомого як ефект «пачкування» (bunching).

З метою недопущення «злиття» фаз та забезпечення стійкого тактового розведення рейсів цільовий режим адаптивного управління для системи з  $m$  маршрутів оцінюється через модифікований параметр порядку  $R_{\text{mod}}$ , адаптований до фіксованого кроку зсуву (2.8). На відміну від класичного параметра порядку Курамото, який використовується для оцінювання рівня синхронізації осциляторів, параметр ( $R_{\text{mod}}$ ) у роботі має транспортну інтерпретацію та характеризує ступінь узгодженості роботи різних видів МПТ у пересадочному вузлі. Зміна його значення відображає зміну умов здійснення пересадки пасажирями, оскільки безпосередньо пов'язана з рівнем нерівномірності інтервалів прибуття транспортних засобів, ймовірністю виникнення їх скупчення та передбачуваністю транспортного обслуговування.

Запропонована мережево-динамічна модель координації роботи різних видів транспорту МПТ має наступні обмеження:

1) модель не враховує позапланових закриттів ділянок маршрутів та дорожньо-транспортних пригод як випадкових зовнішніх збурень;

2) модель передбачено застосовувати для умов пікового навантаження та в одному напрямку маршруту; застосування її у міжпіковий період та за зустрічними напрямкам є предметом подальших досліджень;

3) у моделі прийнято припущення про можливість керування фазами автобусних маршрутів через диспетчерську систему за умов наявності каналу зв'язку «диспетчер – водій»; за відсутності такого каналу зв'язку (зокрема для приватних операторів, що неінтегровані у централізовану диспетчерську систему) відповідні маршрути моделюються як некеровані, що формує умови виникнення описаного в роботі стану химери.

Окрім зазначених обмежень, пов'язаних із допустимими фазовими зсувами, інтервалами руху та експлуатаційними характеристиками різних видів МПТ, у моделі необхідно врахувати часову керованість системи. Це обумовлено тим, що керуючий вплив диспетчера має бути сформований і реалізований до моменту виникнення наступного критичного відхилення або скупчення транспортних засобів у пересадочному вузлі. Тому, в якості оціночного показника відновлення координованого стану – швидкодію ІАСК – запропоновано визначати за показником часу відновлення координованого стану системи ( $t_{sync}$ ), який характеризує час переходу системи до узгодженого режиму після збурення, та за яких умов система здатна забезпечити стабілізацію параметрів руху в межах мінімального інтервалу прибуття транспортних засобів у пересадочний вузол.

Умову керованості пересадочного вузла доцільно представити у вигляді обмеження на сумарний час управлінського циклу

$$t_1 + t_2 + t_3 + t_{sync} \leq T_{\min}, \quad (2.13)$$

де  $t_1$  – час виявлення відхилення, хв.;

$t_2$  – час обробки даних і формування рекомендації, хв.;

$t_3$  – час доведення рекомендації до водія та початку її виконання, хв.;

$T_{\min}$  – мінімальний інтервал руху на досліджуваному пересадочному вузлі, хв.

Динамічну швидкодію ІАСК, що характеризує час відновлення координованого стану пересадочного вузла після збурення доцільно представити у відносним показником, при виконанні наведеної умови

$$t_{sync} = \frac{1}{K \cdot \lambda_2 - \Delta\omega}, \quad (2.14)$$

за умовою

$$K \cdot \lambda_2 > \Delta\omega. \quad (2.15)$$

Якщо умова (2.15) не виконується, система не здатна перейти до узгодженого режиму, а час синхронізації моментів прибуття транспортних засобів є недосяжним.

Отже, умова часової керованості дозволяє встановити, що для надійного функціонування інтегрованої адаптивної системи координації у пересадочному вузлі недостатньо лише формального обміну інформацією між перевізниками. Необхідне підвищення рівня керуючого зв'язку між маршрутами до значень, за яких система здатна відновити узгоджений режим руху в межах мінімального інтервалу прибуття транспортних засобів. Це обґрунтовує доцільність переходу від рекомендаційного до директивного або автоматизованого режиму координації в умовах пікового навантаження.

### 2.3.2 Класифікація фазових станів транспортної системи за рівнем фазової узгодженості

У рамках розробленої мережево-динамічної моделі координації роботи різних видів МПТ доцільно виокремити фазові стани функціонування ТС, що характеризують різний рівень узгодженості руху транспортних засобів у пересадочному вузлі. Адаптація класифікації фазових станів зв'язаних осциляторів з теорії синхронізації до задачі координації роботи різних видів МПТ дозволяє інтерпретувати транспортну систему як сукупність взаємодіючих маршрутів, фази яких визначають моменти прибуття транспортних засобів до пересадочних вузлів. Такий підхід дозволяє перейти від статичного опису параметрів руху до аналізу динамічної поведінки маршрутів у пересадочних вузлах, де узгодженість моментів прибуття транспортних засобів безпосередньо впливає на регулярність руху, час очікування пасажирів, час пересадки і якість транспортного обслуговування. Адаптацію класифікації фазових станів доцільно обґрунтовувати через два чинники: наявність відповідних станів у класичній теорії синхронізації та існування їх емпіричних аналогів у ТС.

Для вітчизняних міських ТС найбільш значущими є три фазові стани функціонування системи: неузгоджений режим функціонування, частково узгоджений режим функціонування та режим стійкої координації. Зазначені стани доцільно розглядати як послідовність переходу від поточного некоординованого режиму функціонування маршрутів до цільового режиму адаптивного управління, за якого забезпечується стійка узгодженість інтервалів прибуття транспортних засобів до пересадочного вузла (стан функціональної сталості системи).

Неузгоджений режим функціонування МПТ (стан фазового дрейфу) введено у фундаментальній роботі Курамото Й. [90] як режим функціонування системи зв'язаних осциляторів при виконанні умови  $K < K_c$  (здатність системи досягати цільового стану синхронізації). У цьому стані маршрути функціонують, переважно, відповідно до власних частот руху транспортних засобів, що визначаються інтервалами, затримками, дорожніми умовами, варіативністю пасажиропотоків та

експлуатаційними характеристиками окремих видів транспорту. Відповідно до ТС такий стан відповідає режиму функціонування маршрутної системи за відсутності достатнього рівня координації, без диспетчерського контролю, і систематично описаний у роботі [107]. Внаслідок різниці власних частот автобусних і тролейбусних маршрутів транспортні засоби не підтримують сталі фазові співвідношення. Так, один транспортний засіб може поступово наздоганяти інший, створювати скупчення у пересадочному вузлі, після чого знову віддалятися. Для пасажера це проявляється у нерівномірності прибуття транспортних засобів, нестабільності пересадочних зв'язків і зростанні часу очікування. Прямий математичний зв'язок між цим режимом і неузгодженим (некогерентним) станом моделі Курамото показано в роботі [108].

Частково узгоджений режим функціонування (стан химери) має особливе значення для забезпечення інтегрованого розвитку ТС українських міст. Такий стан, як співіснування синхронізованих і неузгоджених кластерів у системі взаємодіючих маршрутів, описано Курамото Й. та Баттогтохом Д. [102] і формалізовано Абрамсом Д. та Строгатцем С. [109] для систем зв'язаних фазових елементів. У проєкції на вітчизняні ТС аналогом є гетерогенна структура перевізників у містах, де частина маршрутів обслуговується муніципальними підприємствами з централізованим диспетчерським контролем, а частина – приватними перевізниками в режимі маршрутних таксі поза централізованої системи. Проблема гетерогенної структури перевізників системно опрацьована в дисертаційному дослідженні Вдовиченка В.О. [46], як одна з ключових проблем взаємодії МПТ. У запропонованій моделі такі маршрути формують підмножину некерованих, що вносять збурення ( $\xi_i(t)$ ) в координований режим роботи системи.

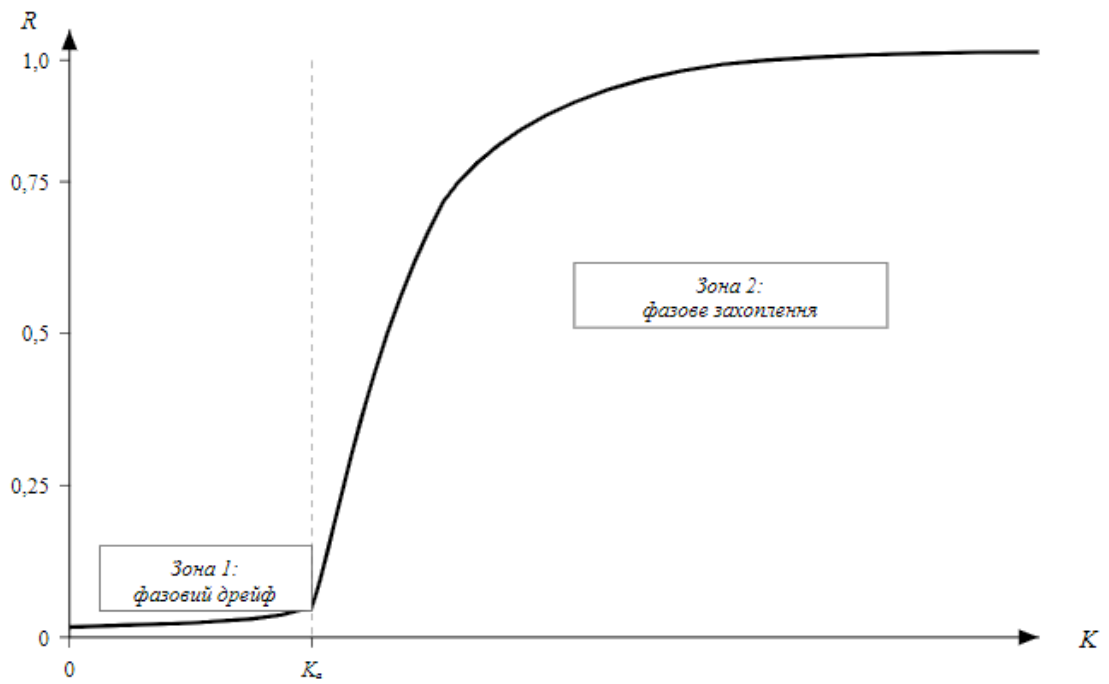
Для частково узгодженого режиму функціонування [109] характерно співвідношення  $K > K_c$  для підмножини керованих маршрутів ( $M_c \subset M$ ), до якої входять маршрути комунальних підприємств пасажирського транспорту (електротранспорт та автобуси великої місткості) та автобусні маршрути приватних операторів, що інтегровані з централізованою диспетчерською системою через систему GPS-моніторингу. Для підмножини некерованих

маршрутів приватних операторів ( $M_n \subset M$ ), що не інтегровані з централізованою системою, виконується умова  $K \approx 0$ .

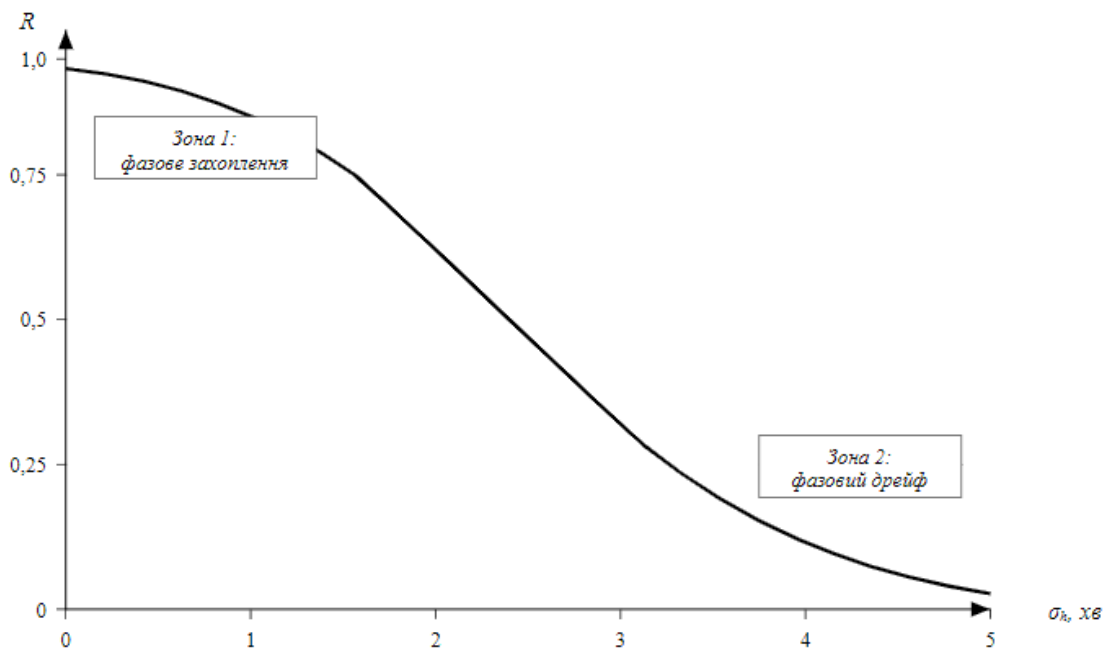
Режим стійкої координації (стан фазового захоплення) описано Курамото Й. в роботі [90] як режим функціонування системи за  $K > K_c$  зі спільною частотою та сталими часовими (фазовими) зсувами. Особливий випадок захоплення в системах з опорним маршрутом проаналізовано в роботі [110]. Транспортними аналогами є режим стабільних інтервалів руху, досягнутий шляхом застосування організаційних стратегій: кооперації різних видів транспорту, самоорганізації системи або синхронізації (anti-bunching synchronisation) [102]. Для режиму стійкої координації характерно, що вся сукупність із  $m$  маршрутів формує глобальну динамічну структуру з регулярними часовими (фазовими) зсувами між суміжними елементами. Для математичного опису цього режиму в модель вводиться параметр часового (фазового) зсуву  $\delta$ , який задає цільову різницю фаз між суміжними маршрутами-осциляторами у режимі стійкої координації – це цільовий стан адаптивного управління з різким зростанням параметра порядку  $R$  [104]. Тобто сила зв'язку визначає мінімальний рівень узгодженості (когерентності) та керуючого впливу диспетчерської системи, за якого можлива стійка стабілізація інтервалів руху за умови дотримання умови керованості системи ( $t_{sync}$ ) у разі виникнення збурень. Такий стан є бажаним з позиції інтегрованої координації МПТ, оскільки сприяє підвищенню регулярності руху, скороченню часу очікування пасажирів і забезпеченню функціональної сталості ТС. Слід зазначити, що повна синхронізація для МПТ небажана, оскільки може провокувати скупчення рухомого складу; цільовим станом є режим стійкої координації з керованими часовими зсувами між прибуттями (2.8).

Для інтерпретації переходів між фазовими станами ТС доцільно розглянути теоретичну залежність параметра порядку  $R$  від сили керуючого зв'язку  $K$  (а), від варіативності інтервалів прибуття  $\sigma_h$  (б), від частки інтегрованих перевізників  $\varphi$  (в), побудовані на основі властивостей моделі адаптованої моделі Курамото рисунок 2.2.

а) від сили керуючого зв'язку



б) від варіативності інтервалів прибуття



в) від частки інтегрованих перевізників

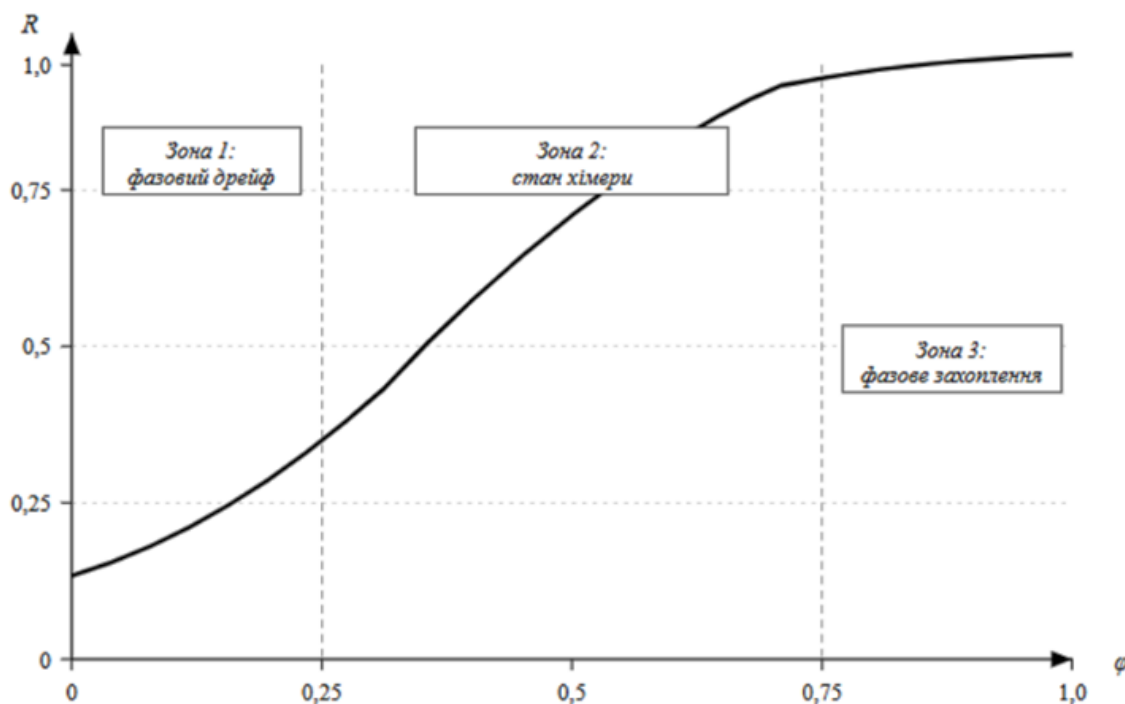


Рисунок 2.2 – Теоретичні залежності параметра порядку  $R$  від факторів впливу моделі координації роботи різних видів МПТ

Зростання сили керуючого зв'язку ( $K$ ) сприяє переходу системи від неузгодженого режиму функціонування до режиму стійкої координації, однак слід зазначити, що у системі МПТ цільовим станом є не повна синхронізація  $R \rightarrow 1$ , а стійка фазова узгодженість із допустимими часовими (фазовими) зсувами між інтервалами прибуття транспортних засобів по маршрутах (2.8). Збільшення варіативності інтервалів прибуття ( $\sigma_h$ ) знижує рівень фазової узгодженості та ускладнює координацію, водночас збільшення частки інтегрованих перевізників ( $\varphi$ ) підвищує значення цільової функції, оскільки розширення участі перевізників у єдиному диспетчерському контурі посилює міжмаршрутну та міжвидову взаємодію і створює умови для переходу системи до більш стійкого узгодженого режиму функціонування.

З практичної точки зору значення параметра порядку  $R$  та модифікованого параметра  $R_{\text{mod}}$  можуть використовуватися для транспортної інтерпретації рівня координації роботи різних видів МПТ у пересадочному вузлі. Низькі значення цих показників відповідають неузгодженому режиму функціонування системи, для

якого характерні значна нерівномірність інтервалів прибуття транспортних засобів, підвищена ймовірність їх скупчення та збільшення часу очікування пасажирів під час пересадки. Середні значення характеризують частково узгоджений режим, за якого координація забезпечується лише для окремих груп маршрутів. Високі значення відповідають режиму стійкої координації з прогнозованими інтервалами прибуття транспортних засобів, що створює передумови для підвищення надійності пересадок і якості транспортного обслуговування. Відповідно до поточного фазового стану системи параметри  $R$  та  $R_{mod}$  можуть використовуватися як інформаційна основа для вибору диспетчерських керуючих впливів, спрямованих на вирівнювання інтервалів руху та запобігання скупченню рухомого складу.

Таким чином, класифікація фазових станів ТС за рівнем узгодженості створює теоретичну основу для подальших експериментальних досліджень за сценарним підходом – ці стани можуть бути використані як сценарії функціонування системи значущих маршрутів.

#### 2.4 Формування організаційно-економічного механізму реалізації інтегрованих технологій на міському пасажирському транспорті

Розроблення інтегрованих технологій на МПТ потребує не лише формування інформаційно-технологічного та модельного забезпечення координації, а й створення відповідних організаційно-економічних умов для їх практичної реалізації. Це пов'язано з тим, що узгоджена робота різних видів МПТ у пересадочних вузлах залежить не тільки від наявності даних, керуючих впливів диспетчерського управління та математичної моделі координації, а й від зацікавленості перевізників у дотриманні узгоджених параметрів руху, регулярності перевезень і вимог до якості транспортного обслуговування пасажирів.

У сучасних умовах функціонування міських ТС взаємодія перевізників різних форм власності несе в собі певну складність. Комунальні підприємства

(муніципальні оператори), як правило, інтегровані в систему міського управління, мають вищий рівень диспетчерського контролю та можуть виконувати суспільно важливі транспортні послуги відповідно до рішень замовника транспортних послуг. Водночас, перевізники приватної форми власності часто орієнтовані переважно на економічну доцільність виконання рейсів, що може призводити до нерівномірного розподілу транспортної пропозиції, дублювання маршрутів на прибуткових напрямках, відхилень від узгоджених інтервалів руху та недостатньої участі в єдиній системі диспетчерського управління.

За таких умов організаційно-економічний механізм реалізації інтегрованих технологій має забезпечувати узгодження інтересів трьох основних груп учасників транспортного процесу: пасажирів, перевізників і замовника транспортних послуг. Інтерес пасажирів полягає в отриманні доступного, регулярного, передбачуваного та комфортного транспортного обслуговування. Інтерес перевізників пов'язаний із забезпеченням економічної доцільності виконання перевезень, компенсацією витрат і можливістю стабільного функціонування в межах визначених договірних умов. Інтерес замовника транспортних послуг полягає у раціональному використанні бюджетних ресурсів, забезпеченні соціальної доступності перевезень, підвищенні якості транспортного обслуговування та реалізації принципів сталої міської мобільності.

У контексті євроінтеграційних реформ актуальним є удосконалення механізмів державного регулювання тарифної політики, запровадження економічних стимулів для оновлення рухомого складу та адаптація європейських практик субсидування ГТ за механізмом Public Service Obligation (PSO). Модель PSO передбачає, що орган місцевого самоврядування або інший уповноважений орган виступає замовником суспільно важливих транспортних послуг, а перевізник – виконавцем таких послуг на підставі договору з чітко визначеними вимогами до обсягу транспортної роботи, якості перевезень, порядку фінансування та компенсації витрат.

У країнах ЄС механізм PSO у сфері громадського пасажирського транспорту функціонує відповідно до Регламенту 1370/2007/ЄС, який визначає принципи

взаємодії між компетентними органами та перевізниками, порядок компенсації витрат на надання публічних транспортних послуг, а також можливість застосування бонусів і санкцій залежно від досягнення встановлених показників якості [111]. Для України це питання є особливо актуальним і болючим, оскільки чинне законодавство у сфері ГТ залишається фрагментованим і регулює окремі види транспорту різними нормативними актами. Найбільш складними моментами при впровадженні моделі PSO в Україні є ті, що стосуються нарахування компенсації за надані транспортні послуги, а також механізмів нарахування штрафів і бонусів за забезпечення необхідного рівня якості послуг та визначення строків дії договору. Це ускладнює формування єдиного підходу до організації, фінансування та контролю якості перевезень різними видами МПТ.

Результати аналізу досвіду європейських міст свідчать про те, що універсальної моделі нарахування компенсацій не існує. Серед основних моделей, що застосовуються залежно від місцевих особливостей, можна виділити: net cost, gross cost, cap-and-share, gross cost з бонусами і штрафами. Дослідження, проведені авторами Шенг Д. та Менг К. [112], присвячені оцінці ефективності моделей договорів, які укладаються під час організації роботи міського ГТ між органами влади та перевізниками. В роботі наведено аналіз впливу різних типів договорів на якість перевезень, фінансову стабільність операторів і взаємодію між органами влади та перевізниками. Автори систематизували накопичений міжнародний досвід та визначили, які контрактні схеми (gross cost, net cost, performance-based contracts) забезпечують найкращий результат.

Аналіз існуючої практики нарахування компенсації в містах України показує, що для тролейбусних і автобусних маршрутів застосовуються різні підходи. Для міського електротранспорту компенсація, як правило, пов'язується з виконаними вагоно-кілометрами та різницею між економічно обґрунтованими витратами і доходами підприємства. Для автобусних перевезень компенсація переважно стосується перевезення пільгових категорій пасажирів, тоді як виручка від продажу квитків залишається у перевізника. Такий підхід створює нерівномірність умов між видами транспорту, знижує прозорість використання бюджетних коштів і не

забезпечує достатнього зв'язку між компенсацією, якістю послуг та участю перевізника в інтегрованій координації.

До основних недоліків існуючої практики можна віднести фрагментарність механізмів компенсації для різних видів транспорту, відсутність єдиної методики для перевізників різних форм власності, недостатню прив'язку фінансування до показників якості та регулярності руху, а також складність коригування компенсацій в умовах зміни цін на паливо, електроенергію, інфляційних процесів і зовнішніх збурень. Крім того, чинна практика здебільшого не враховує внесок перевізника в забезпечення координації маршрутів у пересадочних вузлах, хоча саме узгодженість руху безпосередньо впливає на час очікування пасажирів і якість транспортного обслуговування.

У рамках запропонованої ІАСК різних видів МПТ організаційно-економічний механізм має виконувати не лише розподільчу, а й стимулюючу функцію. Його завдання полягає як у відшкодуванні перевізникам витрат за виконану транспортну роботу, так і у формуванні економічної мотивації до дотримання узгоджених інтервалів руху, участі в диспетчерській координації, забезпечення регулярності перевезень, підвищення якості обслуговування пасажирів та використання екологічно прийняттого рухомого складу. Тому компенсаційний механізм доцільно пов'язувати не лише з кількісними показниками виконаної транспортної роботи, а й з якісними характеристиками функціонування перевізника в системі МПТ.

Тому при формуванні методики компенсації доцільно враховувати такі складові: обсяг фактично виконаної транспортної роботи; економічно обґрунтовану вартість перевезень; перевірені доходи перевізника; обґрунтований прибуток; показники якості транспортного обслуговування; екологічні характеристики рухомого складу; рівень участі перевізника в інтегрованій системі координації; а також бонусні або штрафні коригування за результатами виконання встановлених показників. Такий підхід відповідає логіці PSO та дозволяє адаптувати її до умов функціонування ТС в містах України та задач інтегрованої координації різних видів МПТ.

Базовий розрахунок суми компенсації перевізникам може бути представлений у вигляді різниці між обґрунтованими витратами на виконання транспортної роботи та підтвердженими доходами від надання послуг з урахуванням обґрунтованого прибутку, а також системи бонусів і штрафів у вигляді частки зменшення компенсації за результатами оцінювання якості транспортного обслуговування. У загальному вигляді такий підхід може бути формалізований таким чином

$$C = \left[ \delta_{bus} \cdot (P_{bus} \cdot KM_{bus}) + \delta_{trollebus} \cdot (P_{trollebus} \cdot KM_{trollebus}) + P_r + BON - PEN \right] - R^*, \quad (2.14)$$

де  $P_{bus}$ ,  $P_{trollebus}$  – тарифи за кілометр пробігу, відповідно для автобусів та тролейбусів, грн/км;

$KM_{bus}$ ,  $KM_{trollebus}$  – кількість виконаних кілометрів пробігу, відповідно для автобусів та тролейбусів, км;

$\delta_{bus}$ ,  $\delta_{trollebus}$  – булева змінна, що свідчить про участь перевізника в ІАСК,  $\delta_{bus} \in \{0;1\}$ ,  $\delta_{trollebus} \in \{0;1\}$ ;

$P_r$  – обґрунтований прибуток для перевізника, грн;

$R^*$  – загальний перевірений дохід, отриманий перевізником від надання послуг місцевого ГТ за місяць, за який надається компенсація, тобто сума доходу від продажу проїзних квитків, дохід від іншої діяльності, пов'язаної з наданням послуг місцевого ГТ, будь-які гранти або інші форми підтримки доходу, на які перевізник має право відповідно до цього договору, плюс всі інші доходи перевізника від діяльності, пов'язаної з наданням послуг ГТ, що є предметом договору, грн;

$BON$  – премія за результатами діяльності у разі досягнення або перевищення узгоджених порогових значень ключових показників ефективності, зокрема регулярності руху, дотримання інтервалів, рівня координації та якості транспортного обслуговування, грн;

$PEN$  – штраф, пов'язаний із результатами діяльності, який накладається на перевізника у разі зниження фактичних показників нижче встановлених мінімальних порогових значень, грн.

Основна ідея запропонованого варіанту моделі договорів з нарахуванням компенсації на підставі виконаної транспортної роботи полягає в централізації доходів від квитків (перерахунок отриманих доходів від перевізника місту) і виплачувати перевізнику компенсацію на підставі виконаних кілометрів з урахуванням економічно обґрунтованого прибутку. При цьому за цим варіантом пропонується використовувати єдину модель договорів із єдиним принципом нарахування компенсації для всіх видів транспорту.

Для вирішення задачі координації різних видів МПТ у пересадочних вузлах загальні показники  $BON$  і  $PEN$  потребують деталізації з урахуванням координаційної складової якості транспортного обслуговування. Тому в роботі запропоновано конкретизувати преміально-штрафний блок через індивідуальний коефіцієнт координації перевізника ( $K^{coord}$ ), системний бонус за досягнення загального рівня узгодженості руху ( $BON_{sys}$ ), штрафне коригування у разі порушення мінімально допустимого рівня координації ( $PEN_{ind}$ ) та коефіцієнт, що враховує екологічні характеристики рухомого складу ( $K_{eco}$ ) для стимулювання перевізників оновлювати парк рухомого складу транспортними засобами з високими екологічними стандартами.

З урахуванням зазначених доповнень отримуємо формулу суму компенсації перевізникам

$$C = \left[ ((\delta_{bus} \cdot (P_{bus} \cdot KM_{bus}) + \delta_{trollebus} \cdot (P_{trolleybus} \cdot KM_{trolleybus})) \times K_{eco} \cdot (K_i^{coord} + \beta \cdot R_{mod} \cdot \varphi - \alpha \cdot \max(0; K_{min} - K_i^{coord}) + P_r) \right] - R^*, \quad (2.15)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт системного бонусу за досягнення загального рівня узгодженості роботи пересадочного вузла та розширення участі перевізників в

ІАСК,  $0 \leq \beta \leq 0,2$ ; бонусна складова не перевищує приблизно 10–20 % від базового координаційного компонента компенсації;

$\varphi$  – частка перевізників, інтегрованих в ІАСК,  $\varphi \in [0;1]$ ;

$\alpha$  – коефіцієнт штрафного коригування,  $0 \leq \alpha \leq 0,3$ ; практично доцільне значення дорівнює 0,2, тобто при систематичному порушенні мінімального рівня координації компенсаційна складова зменшується на 20 %;

$K_{\min}$  – мінімально допустиме значення індивідуального коефіцієнта координації – визначає мінімально допустимий рівень координаційної дисципліни перевізника,  $K_{\min} = 0,7$ .

Для практичного застосування формулу можна представити наступним чином

$$C = \left[ ((\delta_{bus} \cdot (P_{bus} \cdot KM_{bus}) + \delta_{trolleybus} \cdot (P_{trolleybus} \cdot KM_{trolleybus})) \times \right. \\ \left. \times K_{eco} \cdot f(K_i^{coord}) + P_r \right] - R^*, \quad (2.16)$$

де  $f(K_i^{coord})$  – функція коригування індивідуального коефіцієнта координації

$$f(K_i^{coord}) = \begin{cases} K_i^{coord} + \beta \cdot R_{mod} \cdot \varphi, & \text{при } K_i^{coord} \geq 0,85, \\ K_i^{coord}, & \text{при } 0,7 \leq K_i^{coord} < 0,85, \\ K_i^{coord} \cdot (1 - \alpha), & \text{при } K_i^{coord} < 0,7. \end{cases} \quad (2.17)$$

Запропонований механізм компенсації безпосередньо пов'язаний із результатами координації МПТ на основі розробленої мережево-динамічній моделі. На відміну від традиційних підходів, розмір компенсації визначається не лише обсягом виконаної транспортної роботи, а й показниками якості транспортного обслуговування та функціонування перевізника в інтегрованій системі координації. При цьому індивідуальний коефіцієнт координації ( $K_i^{coord}$ )

характеризує рівень дотримання перевізником узгоджених параметрів роботи, а модифікований параметр порядку ( $R_{mod}$ ), отриманий у результаті моделювання, відображає загальний рівень координації ТС. Таким чином, підвищення узгодженості роботи МПТ та участь перевізника в ІАСК забезпечують збільшення коригувального коефіцієнта компенсації, тоді як погіршення координації або відхилення від встановлених параметрів функціонування призводять до його зменшення. Так, наприклад, за однакового обсягу виконаної транспортної роботи перевізник із  $K_i^{coord} = 0,9$ , який працює в умовах  $R_{mod}=0,8$ , отримає більшу компенсацію порівняно з перевізником із меншим значенням коефіцієнту координації, оскільки забезпечує вищий рівень узгодженості роботи маршрутів у пересадочному вузлі.

Запропонована методика забезпечує узгодження інтересів пасажирів, перевізників і замовника транспортних послуг шляхом поєднання компенсації за виконану транспортну роботу з оцінюванням фактичної якості перевезень, екологічних характеристик рухомого складу та участі перевізників в інтегрованій координації МПТ. Її застосування сприяє збалансуванню транспортної пропозиції, підвищенню якості транспортного обслуговування населення та практичній реалізації принципів сталої міської мобільності.

### Висновки по другому розділу

1. Визначено інформаційно-технологічні засади координації різних видів МПТ, що базуються на використанні даних про фактичний рух транспортних засобів, інтервали прибуття, відхилення від розкладу, пасажиропотоки та завантаження пересадочних вузлів, забезпечуючи перехід від статичного планування до оперативного управління.

2. Сформовано структуру інтегрованої адаптивної системи координації роботи різних видів МПТ як сукупності інформаційних, аналітичних, диспетчерських, організаційних та економічних рішень, функціонування якої

реалізується за замкненим циклом: моніторинг – діагностика – прийняття рішень – виконання керуючих впливів – оцінювання результатів – коригування.

Розроблено мережево-динамічну модель координації різних видів МПТ на основі адаптованої моделі Курамото, у якій маршрути представлені як фазові осцилятори, а пересадочні зв'язки визначають їх взаємодію. Модель забезпечує міжвидову координацію навколо електротранспорту як опорного елемента системи та дозволяє оцінювати рівень координації за параметром порядку Курамото. Адаптовано класифікацію фазових станів системи до задачі координації різних видів МПТ, що дозволяє ідентифікувати неузгоджений, частково узгоджений та узгоджений режими функціонування транспортної системи за рівнем узгодженості інтервалів прибуття транспортних засобів у пересадочний вузол. Це дозволить застосувати для проведення моделювання сценарний підхід.

Сформовано організаційно-економічний механізм реалізації інтегрованих технологій на МПТ, який передбачає адаптацію підходу PSO до умов України та розроблену методику до розрахунку компенсації перевізникам з урахуванням якості наданих послуг, що сприяє узгодженню інтересів пасажирів, перевізників і замовника транспортних послуг та збалансуванню транспортної пропозиції.

Основні результати проведених досліджень в рамках цього розділу опубліковані в роботах [1, 3–5, 11, 13, 16–18].

### РОЗДІЛ 3

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ НАСЕЛЕННЯ МІСЬКИМ ПАСАЖИРСЬКИМ ТРАНСПОРТОМ

Експериментальні дослідження спрямовані на верифікацію розробленої у розділі 2 мережево-динамічної моделі координації різних видів МПТ та визначення закономірностей зміни параметрів оцінки ефективності взаємодії транспортних засобів МПТ у пересадочних вузлах під впливом значущих факторів. Експериментальні дослідження в роботі запропоновано реалізувати на трьох взаємопов'язаних рівнях на прикладі ЗП «Філармонія» у м. Хмельницький:

- формування емпіричної бази дослідження на основі результатів проведення натурного обстеження пасажиропотоків, моделювання маршрутних пересадок за допомогою транспортної моделі м. Хмельницький, розробленої у ХНАДУ у програмному комплексі PTV Visum;

- розробка і верифікація імітаційної моделі процесу координації різних видів МПТ, що включає в себе програмну реалізацію адаптованої моделі Курамото мовою *Python* з використанням GPS-даних сервісу EasyWay у режимі реального часу, калібрування параметрів моделі за результатами проведеного натурного обстеження та статистичну верифікацію за критерієм Стюдента;

- проведення імітаційного моделювання та повнофакторного експерименту, що передбачає визначення фазових станів системи МПТ у пересадочному вузлі, а також оцінку впливу ключових факторів на критерій ефективності – параметр порядку  $R(t)$ .

Взаємозв'язок між рівнями експериментальних досліджень забезпечується єдиною інформаційною базою – матрицею маршрутних пересадок  $a_{ij}$ , що є вхідними даними для всіх рівнів дослідження і визначає структуру графа пересадочних зв'язків маршрутів, їх власні частоти та вагові коефіцієнти моделі Курамото. Результати кожного рівня є вхідними даними для наступного що забезпечує методологічну узгодженість і верифікованість отриманих висновків

### 3.1 Формування емпіричної бази дослідження

#### 3.1.1 Характеристика об'єкту проведення експериментальних досліджень

В якості об'єкту проведення експериментальних досліджень обрано ЗП «Філармонія» м. Хмельницький, що функціонує як пересадочний вузол із високим рівнем концентрації автобусних маршрутів та міського електротранспорту. ЗП «Філармонія» розташований у центральній частині м. Хмельницький і є одним із найбільш завантажених пересадочних вузлів маршрутної мережі міста. Вибір зазначеного вузла зумовлений високою концентрацією маршрутів різних видів МПТ. За даними інформаційних сервісів EasyWay [95], через ЗП «Філармонія» проходять 44 маршрути МПТ. Як зазначається на офіційному сайті ХКП «Електротранс», комунальні автобуси частково або повністю дублюють в місті тролейбусні лінії [113]. Це стратегічне рішення було запроваджено для забезпечення стабільного інтервалу на найбільш завантажених напрямках. Більшість дублюючих маршрутів проходять через центральну частину міста. На в'їзді до центральної частини розташований ЗП «Філармонія». Це підтверджує значення ЗП як одного з важливих пересадочних вузлів маршрутної мережі м. Хмельницького, у межах якого взаємодіють тролейбусні, автобусні маршрути та маршрути, що обслуговуються у форматі маршрутного таксі.

З метою дослідження закономірностей основних параметрів взаємодії МПТ на ЗП «Філармонія» було проведено натурне обстеження методом хронометражних спостережень протягом 5 робочих днів з 25.08.2025 по 29.08.2025 року у період ранкової години пік (07:30–09:00). За результатами обстеження зафіксовано 188 моментів прибуття транспортних засобів, що обслуговують дев'ять значущих маршрутів когерентного ядра мережево-динамічної моделі. Для кожного прибуття в картці хронометражних спостережень фіксувалася інформація: номер маршруту, вид транспорту, фактичний час прибуття, інтервал руху за розкладом, відхилення від розкладу  $\Delta t_i$  (хв.) та фактичний інтервал між послідовними прибуттями  $T_i$  (хв.).

Основні статистичні характеристики даних натурних спостережень моментів прибуття транспортних засобів на ЗП наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати статистичної обробки даних натурних спостережень

Показник	Значення показника
Кількість спостережень	188
Мінімальне значення відхилення від розкладу, хв	-25
Максимальне значення відхилення від розкладу, хв.	+28
Математичне сподівання відхилення від розкладу, хв.	4,96
Середньоквадратичне відхилення, хв.	8,388
Коефіцієнт варіації інтервалів прибуття ТЗ	1,69
Розрахункове значення критерію Пірсона, $\chi^2_{\text{емп}}$	119,714
Критичне значення критерію Пірсона, $\chi^2_{\text{кр}}$	11,07
Рієнь значущості	0,05

За результатами натурних спостережень на ЗП «Філармонія» сформовано вибірку з 188 фактичних спостережень відхилень моментів прибуття транспортних засобів від розкладу. Результати свідчать про значний діапазон коливань фактичних моментів прибуття транспортних засобів. В середньому спостерігається запізнення транспортних засобів відносно розкладу. Коефіцієнт варіації (1,69) вказує на високий рівень нестабільності інтервалів руху та значну нерівномірність транспортного обслуговування на ЗП «Філармонія». Отримані значення підтверджують наявність випадкових збурень у транспортному процесі, які ускладнюють узгодження роботи різних видів МПТ і створюють передумови для виникнення фазового дрейфу.

Для перевірки статистичної однорідності та характеру розподілу відхилень використано критерій Пірсона  $\chi^2$ , розрахункове значення якого значно перевищує критичне значення при рівні значущості 0,05. Це підтверджує складний, нерівномірний і нестійкий характер фактичного руху транспортних засобів у

пересадочному вузлі. Окремо для опису інтервалів прибуття транспортних засобів до ЗП «Філармонія» використано розподіл Вейбулла, який дозволяє оцінити зміну інтенсивності прибуття у часі. За визначеними параметрами розподілу побудовано функцію інтенсивності прибуття ( $h(t)$ , од./хв.), що характеризує умовну ймовірність прибуття транспортного засобу в наступний момент часу ( $T$ , хв.) за умови, що до цього прибуття ще не відбулося (рис. 3.1). Функція інтенсивності характеризує умовну ймовірність прибуття транспортного засобу в наступний момент часу за умови, що до цього прибуття ще не відбулося.

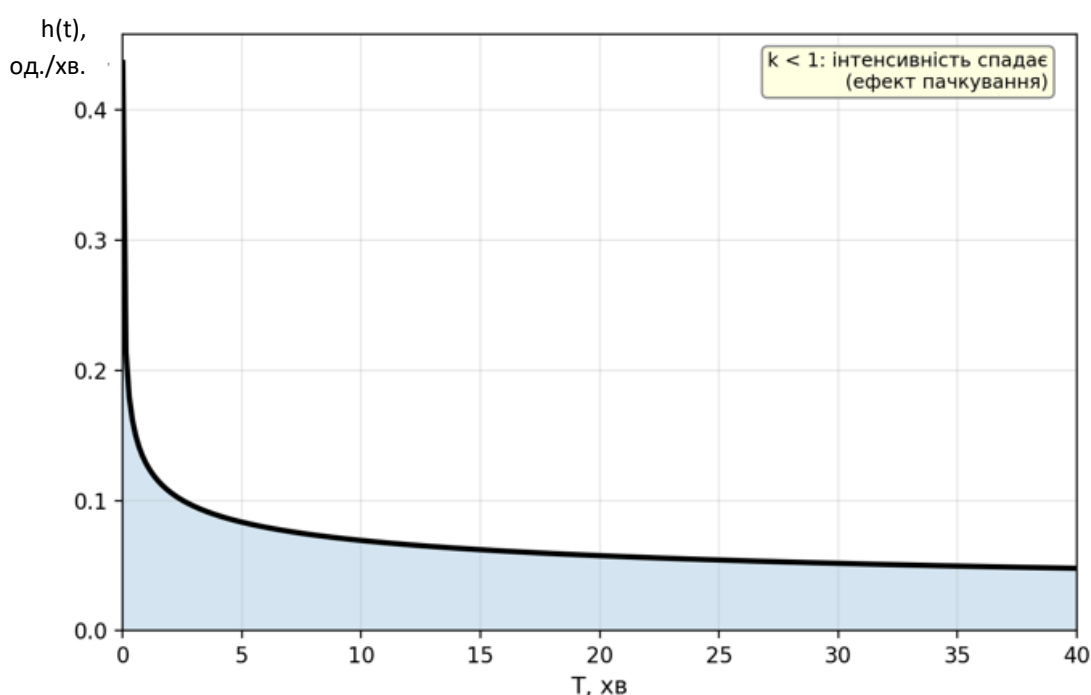


Рисунок 3.1 – Графік функції інтенсивності прибуття транспортних засобів на ЗП «Філармонія» за розподілом Вейбулла

Отриманий характер кривої свідчить про спадну інтенсивність прибуття у часі, що відповідає параметру форми  $k < 1$ . Це означає, що ймовірність прибуття транспортного засобу є вищою на початку інтервалу очікування, але з часом вона зменшується. Така форма залежності свідчить про нерівномірність руху та може бути інтерпретована як підтвердження наявності ефекту скупчення транспортних засобі, коли після прибуття одного транспортного засобу ймовірність появи

наступного протягом короткого проміжку часу залишається відносно високою, що може призводити до групового прибуття транспортних засобів. У разі відсутності прибуття інтенсивність зменшується, що призводить до збільшення тривалості очікування пасажирів.

Результати статистичної обробки натурних спостережень підтверджують високий рівень варіативності фактичних моментів прибуття транспортних засобів на ЗП «Філармонія», що обґрунтовує необхідність використання адаптивного підходу до координації руху різних видів МПТ, оскільки статичне узгодження розкладів не забезпечує стійкого дотримання інтервалів у реальних умовах функціонування пересадочного вузла.

### 3.1.2 Актуалізація та верифікація транспортної моделі

Для забезпечення репрезентативності вихідних даних дослідження використано транспортну модель м. Хмельницький, розроблену у програмному комплексі PTV VISUM кафедрою транспортних систем і логістики ХНАДУ в рамках виконання науково-дослідницької роботи за договором № 77-05-17 «Про надання послуг з проведення ринкових досліджень (комплексне обстеження пасажиропотоків на маршрутах МПТ загального користування в м. Хмельницькому)» у 2017 році [114]. Зазначену модель використано як базову основу для подальшого аналізу маршрутної мережі, і обсягу маршрутних пересадок. З метою приведення вихідних параметрів до більш актуального стану виконано коригування за даними натурних обстежень з урахуванням офіційних даних щодо чисельності населення м. Хмельницький станом на 1 січня 2022 року [115], а також актуалізовано склад маршрутів, що проходять через ЗП «Філармонія», за даними інформаційних сервісів EasyWay та Dozor, рисунок 3.2.

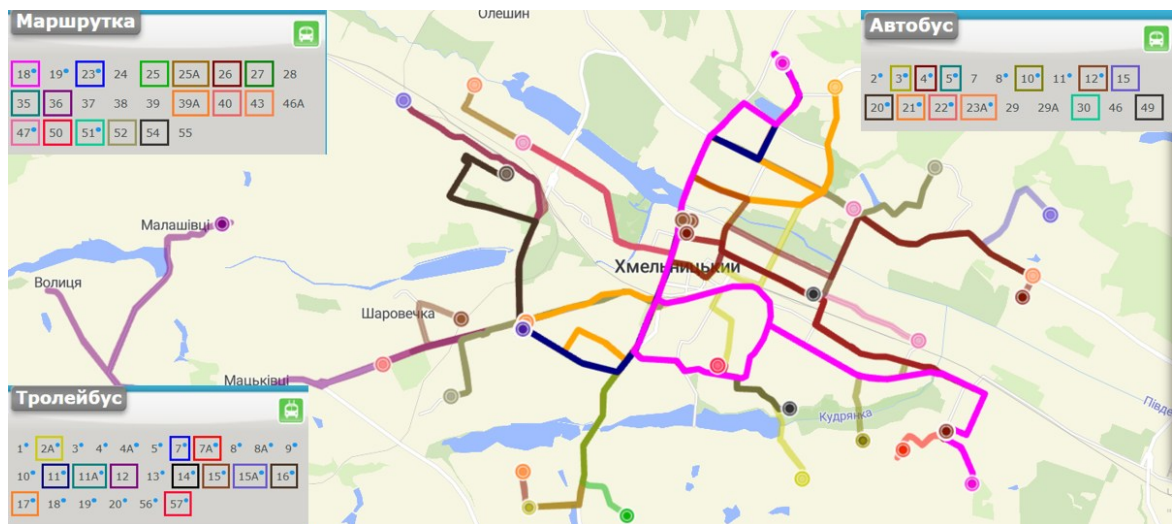


Рисунок 3.2 – Маршрути МПТ, які проходять через ЗП «Філармонія» у м. Хмельницький

Актуалізація транспортної моделі передбачала коригування матриці пасажирських кореспонденцій із використанням коефіцієнта зміни чисельності населення, уточнення транспортної пропозиції у зоні ЗП «Філармонія» та зіставлення модельних результатів із даними натурних і хронометражних спостережень. Такий підхід дозволяє використовувати транспортну модель як верифіковану доказову базу для формування вхідних параметрів мережево-динамічної моделі координації маршрутів і зменшує суб'єктивність під час визначення характеристик транспортного процесу.

Коефіцієнт зміни чисельності населення  $k_N$

$$k_N = \frac{N_{2022}}{N_{2017}}, \quad (3.1)$$

де  $N_{2017}, N_{2022}$  – чисельність населення м. Хмельницького відповідно у 2017 та 2022 роках; ( $N_{2017} = 268415$  ос.;  $N_{2022} = 274452$  ос.).

Коефіцієнт зміни чисельності населення дорівнює 1,022.

У результаті моделювання у PTV VISUM з об'єкта PuT Transfer Objects після виконання процедури PuT assignment отримано матрицю маршрутних пересадок  $q_{ij}$

між маршрутами для пікового періоду на ЗП «Філармонія». Для аналізу використовувалися результати пікового періоду доби (07:30–09:00), що відповідає максимальним пасажиропотокам у транспортній мережі. Дані було відфільтровано за сегментом попиту та експортовано в середовище Excel для побудови матриці пересадок між маршрутами. Верифікацію актуалізованої транспортної моделі виконано шляхом порівняння розрахункового і фактичного обсягу маршрутних пересадок та моментів прибуття транспортних засобів у межах досліджуваного ЗП «Філармонія» (рис. 3.3).

	A	B	C	D	E	F	K	L	O	P	Q
1	Number: 1.482	FromTimeProfileItemKeyString	FromLine	ToTimeProfileItemKeyString	ToLine	Transfer	PassTransDir(AP)	PassTransDir_DSeg(PU)	Time	WaitTime	WaitTime
4	3	Автобус N18 Автобус N18_вул.Верейського > 1 19	18	Тролейбус N12 Тролейбус N12_Катюк < 1 8	12	transfer	1	1	1min 23s	30s	53s
16	15	Автобус N20 Автобус N20_мн/Лезнев(Рославська-4) < 1 21:20	20	Тролейбус N7 Тролейбус N7_вул.Довженка < 1 22 7	7	transfer	2	2	3min 14s	30s	2min 44s
18	17	Автобус N20 Автобус N20_мн/Лезнев(Рославська-4) < 1 21:20	20	Тролейбус N11 Тролейбус N11_Озерна < 1 13	11	transfer	1	1	15min 15s	30s	14min 45s
25	24	Автобус N20 Автобус N20_мн/Лезнев(Рославська-4) < 1 21:20	20	Автобус N21 Автобус N21_Автостанція1 < 1 15	21	transfer	2	2	48s	30s	18s
30	29	Автобус N54 Автобус N54_Дачі Електронка > 1 11	54	Тролейбус N2A Тролейбус N2A_Катюк > 1 8	2A	transfer	1	1	4min 43s	30s	4min 13s
37	36	Автобус N54 Автобус N54_Дачі Електронка > 1 11	54	Тролейбус N7A Тролейбус N7A_завод Катюк < 1 9	7A	transfer	1	1	6min 13s	30s	5min 43s
39	68	Автобус N54 Автобус N54_Дачі Електронка > 1 11	54	Автобус N51 Автобус N51_катюк > 1 9	51	transfer	1	1	1min 14s	30s	44s
74	73	Автобус N54 Автобус N54_Лезнев-2 < 1 16	54	Тролейбус N7A Тролейбус N7A_вул.Довженка > 1 7A	7A	transfer	1	1	9min 38s	30s	9min 8s
76	75	Автобус N54 Автобус N54_Лезнев-2 < 1 16	54	Тролейбус N11 Тролейбус N11_Озерна < 1 13	11	transfer	5	5	3min 39s	30s	3min 9s
77	76	Автобус N54 Автобус N54_Лезнев-2 < 1 16	54	Тролейбус N11 Тролейбус N11_Озерна < 1 13	11	transfer	3	3	7min 39s	30s	7min 9s
83	82	Автобус N54 Автобус N54_Лезнев-2 < 1 16	54	Тролейбус N57 Тролейбус N57_Алмаз > 1 9	57	transfer	4	4	1min 20s	30s	50s
86	85	Автобус N54 Автобус N54_Лезнев-2 < 1 16	54	Автобус N4 Автобус N4_вул.Старонська < 1 5	4	transfer	1	1	10min 23s	30s	9min 53s
88	87	Автобус N54 Автобус N54_Лезнев-2 < 1 16	54	Автобус N30 Автобус N30_Озерна > 1 18	30	transfer	1	1	33s	30s	3s
00	99	Тролейбус N2A Тролейбус N2A_Озерна < 1 19	2A	Тролейбус N14 Тролейбус N14_Автовокзал N12 < 1 14	14	transfer	21	21	2min 21s	30s	1min 51s
02	101	Тролейбус N2A Тролейбус N2A_Озерна < 1 19	2A	Тролейбус N15 Тролейбус N15_вул.Старонська < 1 15	15	transfer	1	1	10min	30s	9min 30s
05	104	Тролейбус N2A Тролейбус N2A_Озерна < 1 19	2A	Тролейбус N16 Тролейбус N16_Алмаз > 1 9	16	transfer	3	3	1min 37s	30s	1min 7s
07	106	Тролейбус N2A Тролейбус N2A_Озерна < 1 19	2A	Автобус N50 Автобус N50_лицоконбіат < 1 14	50	transfer	2	2	3min	30s	2min 31s
11	110	Тролейбус N2A Тролейбус N2A_Озерна < 1 19	2A	Автобус N30 Автобус N30_Озерна > 1 18	30	transfer	1	1	1min 50s	30s	1min 20s
25	124	Автобус N23 Автобус N23_Катюк > 1 8	23	Автобус N3 Автобус N3_Кладовище < 1 21	3	transfer	1	1	5min 44s	30s	5min 14s
45	144	Тролейбус N7 Тролейбус N7_вул.Довженка < 1 22	7	Тролейбус N16 Тролейбус N16_Алмаз > 1 9	16	transfer	6	6	2min 12s	30s	1min 42s
47	146	Тролейбус N7 Тролейбус N7_вул.Довженка < 1 22	7	Автобус N30 Автобус N30_Озерна > 1 18	30	transfer	1	1	1min 25s	30s	55s
49	148	Тролейбус N7 Тролейбус N7_вул.Довженка < 1 22	7	Автобус N43 Автобус N43_мн/Лезнев < 1 22	43	transfer	1	1	3min 21s	30s	2min 51s
70	169	Тролейбус N7 Тролейбус N7_завод Катюк > 1 8	7	П_Автобус N10 П_Автобус N10_Малашів < 1 5	10	transfer	1	1	4min 46s	30s	4min 16s
79	178	Тролейбус N7A Тролейбус N7A_вул.Довженка > 1 22	7A	Тролейбус N14 Тролейбус N14_Автовокзал N12 < 1 14	14	transfer	5	5	1min 56s	30s	1min 26s
85	184	Тролейбус N7A Тролейбус N7A_вул.Довженка > 1 22	7A	Автобус N30 Автобус N30_Озерна > 1 18	30	transfer	2	2	3min 25s	30s	2min 55s
89	188	Тролейбус N7A Тролейбус N7A_вул.Довженка > 1 22	7A	Автобус N35 Автобус N35_мн/Озерна < 1 16	35	transfer	13	13	2min 13s	30s	1min 43s
93	192	Тролейбус N7A Тролейбус N7A_вул.Довженка > 1 22	7A	Автобус N39 Автобус N39_мн/Озерна < 1 16	39	transfer	1	1	7min 6s	30s	6min 36s
01	200	Тролейбус N7A Тролейбус N7A_вул.Довженка > 1 22	7A	Автобус N49 Автобус N49_Озерна < 1 15	49	transfer	17	17	6min 13s	30s	5min 43s
02	201	Тролейбус N7 Тролейбус N7_вул.Довженка < 1 22	7A	П_Автобус N15 П_Автобус N15_Автостанція N3 < 1 15	15	transfer	1	1	8min 38s	30s	8min 8s
09	208	Тролейбус N7A Тролейбус N7A_завод Катюк < 1 9	7A	Автобус N54 Автобус N54_Дачі Електронка > 1 11	54	transfer	3	3	47s	30s	17s
13	212	Тролейбус N7A Тролейбус N7A_завод Катюк < 1 9	7A	Автобус N3 Автобус N3_Кладовище < 1 21	3	transfer	5	5	59s	30s	29s
25	224	Тролейбус N11 Тролейбус N11_Катюк > 1 8	11	Тролейбус N14 Тролейбус N14_Катюк > 1 6	14	transfer	1	1	14min 50s	30s	14min 20s

Рисунок 3.3 – Результати моделювання матриці маршрутних пересадок на ЗП «Філармонія» у PTV Visum (фрагмент)

Відхилення обсягу маршрутних пересадок на ЗП «Філармонія» (фактичне 680 пас./год.) склало  $\delta = 2,8\%$ , що є незначним та свідчить про адекватність актуалізованої транспортної моделі для цілей дослідження.

На основі змодельованих даних кількості пасажирів, що здійснюють пересадку між маршрутами, та середнього часу пересадки сформовано матрицю взаємодії МТП на ЗП «Філармонія», яка використовується як матриця коефіцієнтів  $K_{ij}$  у розробленій мережево-динамічній моделі. Результати також будуть використані в подальшому для формування графа пересадочних зв'язків

маршрутів, де ваги ребер визначають кількість пересадок між парами маршрутами  $i-j$ .

### 3.1.3 Формування когерентного ядра маршрутної мережі за результатами транспортного моделювання

Для проведення моделювання необхідно було перейти від повної множини маршрутів (44 маршрути), що проходять через ЗП «Філармонія», до групи маршрутів, які формують основну частину пересадочних взаємодій. Виділення такої групи, що визначено в роботі як когерентне ядро маршрутної мережі, дає змогу зменшити розмірність моделі та зосередити аналіз на маршрутах, що найбільшою мірою впливають на узгодженість прибуття транспортних засобів і якість транспортного обслуговування пасажирів у пересадочних вузлах. Для визначення когерентного ядра необхідно було провести оцінку варіативності маршрутної взаємодії у пересадочному вузлі. Для цього використано показник ентропії Шеннона ( $H$ ), розрахований на основі нормалізованої матриці маршрутних пересадок

$$H = -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij} \cdot \ln p_{ij}, \quad (3.2)$$

де  $p_{ij}$  – частка маршрутних пересадок між  $i$ -м маршрутом та  $j$ -м маршрутом;  
 $n$  – кількість маршрутів, що проходять через пересадочний вузол.

На відміну від показників середнього значення або дисперсії, ентропія враховує розподіл усіх маршрутних кореспонденцій та дозволяє визначити ступінь концентрації пересадочних потоків. Низькі значення ентропії відповідають ситуації, коли більшість пересадок зосереджена між обмеженою кількістю маршрутів, тоді як високі значення свідчать про більш рівномірний розподіл пересадок між маршрутами. Для забезпечення порівнянності результатів використано нормалізовану ентропію Шеннона

$$H_{norm} = \frac{H}{\ln m} \quad (3.3)$$

де  $m$  – кількість ненульових значень маршрутних пересадок, тобто таких пар маршрутів, для яких  $q_{ij} > 0$ .

Отримане значення нормалізованої ентропії ( $H_{norm} = 0,6726$ ) свідчить про помірну нерівномірність розподілу обсягу маршрутних пересадок (за шкалою бажаності Харрінгтона), а саме – частина маршрутів формує основне пересадочне навантаження, тоді як інші мають значно менший внесок у взаємодію маршрутної системи.

Для кожного з 44 маршрутів, що проходять через ЗП «Філармонія», на основі матриці маршрутних пересадок визначено сумарну силу взаємодії  $S_i$ . До когерентного ядра мережі було включено маршрути, що формують основну частку маршрутних пересадок у досліджуваному вузлі. Для цього маршрути були впорядковані за спаданням значення  $S_i$ , після чого було застосовано принцип Парето. В результаті застосування принципу Парето було визначено дев'ять найбільш значущих (когерентних) маршрутів, частка яких становить близько 20 % від загальної кількості маршрутів, що проходять через пересадочний вузол, тоді як на них припадає близько 80 % маршрутних пересадок на ЗП «Філармонія». Когерентне ядро: тролейбусні маршрути № 12, № 15, № 16, автобусні маршрути № 22, № 29, № 30 і маршрутні таксі – маршрути № 18, № 26, № 36. Такий комбінований підхід, що поєднує оцінювання ентропії Шеннона, розрахунок сумарної сили взаємодії маршрутів і принцип Парето, дозволив виділити маршрути, які відіграють ключову роль у координації роботи різних видів МПТ та у підтриманні функціональної сталості ТС. Характеристики маршрутів когерентного ядра наведено у таблиці 3.2. Власні частоти маршрутів ( $\omega_i$ , рад/хв.) визначені на основі інтервалів руху згідно розкладу. У таблиці 3.3 наведено скорочену матрицю маршрутних кореспонденцій між маршрутами когерентного ядра, сформовану на основі повної матриці маршрутних пересадок, отриману в результаті моделювання у PTV VISUM.

Таблиця 3.2 – Характеристика маршрутів когерентного ядра, що проходять через ЗП «Філармонія»

№ маршруту	Вид сполучення	Найменування підприємства	Найменування маршруту	Години роботи, год.:хв.	Інтервал руху в робочі дні, хв.	Власна частота маршруту, рад/хв.
30	Автобус	ТОВ «Хмельницьке таксі»	м/н Озерна - Садове товариство «Золота Нива»	06:19-22:00	5	1,2566
15	Тролейбус	КП «Електротранс»	вул. Петра Болбочана - вул. Староміська	05:58-22:31	15,5	0,4054
26	Маршрутне таксі	ТОВ «Рембуд-транс»	Завод «Катіон» - м/н Гречани	05:25-22:00	6,5	0,9666
12	Тролейбус	КП «Електротранс»	м/н Озерна - Завод «Катіон»	05:07-21:51	24	0,2618
22	Автобус	ФОП «Мішин Олександр Володимирович»	м/н Озерна - Завод «Катіон»	06:10-21:51	9	0,6981
29 А	Автобус	ТОВ «Хмельницьке таксі»	вул. Кармелюка - Завод «Катіон»	05:30-23:25	10	0,6283
18	Маршрутне таксі	ТОВ «Рембуд-транс»	м/н Ружична - м/н Ракове	05:30-21:44	10	0,6283
16	Тролейбус	КП «Електротранс»	Виробниче об'єднання «Алмаз» - Завод «Катіон»	06:07-22:33	17,5	0,3590
36	Маршрутне таксі	ТОВ «Рембуд-транс»	Завод «Катіон» - м/н Книжківці	06:00-22:30	12	0,5236

Таблиця 3.3 – Матриця маршрутних пересадок когерентного ядра маршрутів, що проходять через ЗП «Філармонія», пас./год

Нормер маршруту	Значення маршрутних пересадок, пас/год.								
	12	15	18	22	26	29	30	16	36
12	0	10,32		1,2	0,341	0,013	4,531		0,194
15	0,283	0	0,242	4,985	0,056	0,32	16,197	0,574	0,728
18	0,752	0,084	0	12,215		0,085	0,107	5,105	
22		17,451	0,121	0			5,261	1,192	
26		6,224	0,046	7,942	0		20,617		0,069
29		5,533				0			
30	3,908	10,628		4,69	2,677	5,582	0	61,958	0,133
16				13,021			8,979	0	0,037
36	0,029	0,344		0,209			0,385		0

Згідно з методологією, представленою в розділі 2, побудуємо зважений граф пересадочних зв'язків когерентних маршрутів, що характеризує структуру взаємодії різних видів транспорту МПТ на ЗП «Філармонія» (рис. 3.4).

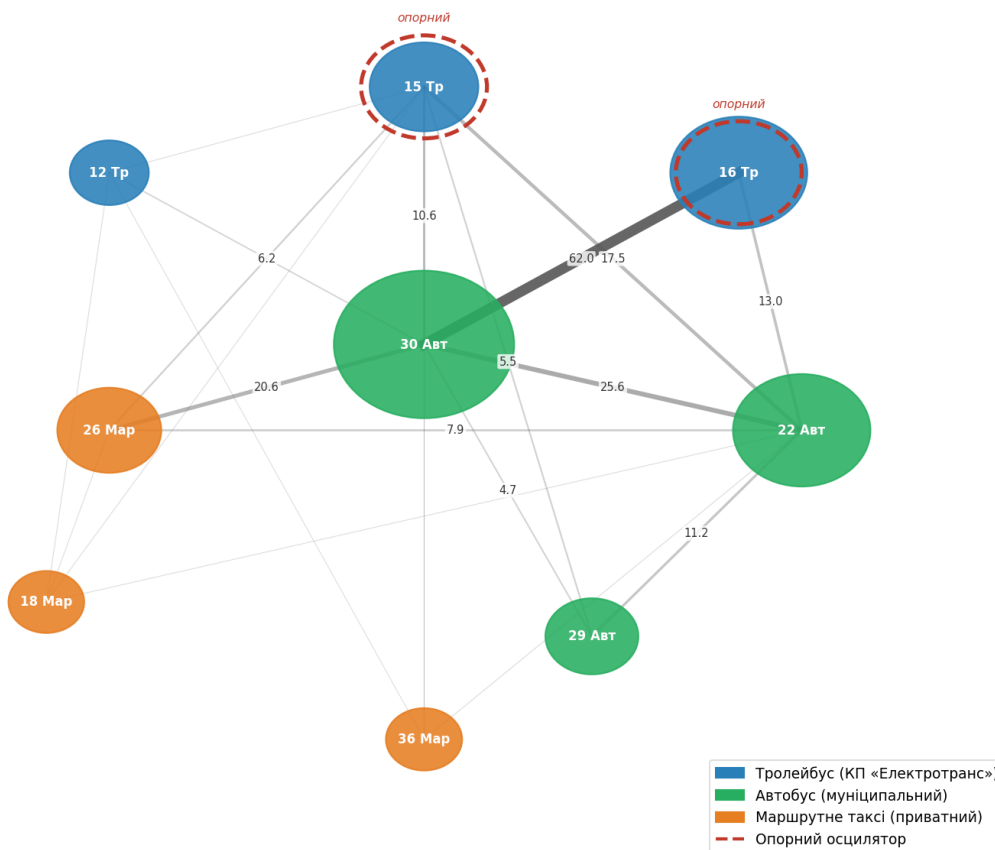


Рис. 3.4 – Зважений неорієнтований граф пересадочних зв'язків маршрутів-осциляторів на ЗП «Філармонія» м. Хмельницький

Вершинами зваженого неорієнтованого графа є маршрути МПТ, що формують основну частину обсягу маршрутних пересадок у досліджуваному вузлі, а ребрами – симетризовані маршрутні пересадки між ними. Вага ребра  $a_{ij}$  визначає сумарний обсяг маршрутних пересадок за розрахунковий період між маршрутами  $i$  та  $j$ , а розмір вершини характеризує сумарну силу взаємодії маршруту  $S_i$ . Товщина ребер на графі пропорційна значенню  $a_{ij}$ , що дозволяє візуально виокремити найбільш значущі пересадочні зв'язки у структурі когерентного ядра.

Тролейбусні маршрути № 15 «вул. Петра Болбочана – вул. Староміська» і № 16 «Виробниче об'єднання «Алмаз» – Завод «Катіон» визначені як опорні

осцилятори – маршрути з фіксованою фазою прибуття, що виступають базовими елементами, відносно яких відбуватиметься координація у пересадочному вузлі. Вибір тролейбусних маршрутів, як опорних, обумовлений їх регульованим рухом по виділеній смузі, статусом муніципального перевізника, що забезпечує виконання розкладу з мінімальними відхиленнями, та екологічністю, відповідно, до принципів сталої міської мобільності. Ці маршрути мають близькі власні частоти і утворюють ядро синхронізації.

Домінуючий вузол – це автобусний маршрут №30 «м/н Озерна - Садове товариство «Золота Нива»». Він має найбільший сумарний пересадочний зв'язок з усіма іншими маршрутами. Пересадочний зв'язок із тролейбусним маршрутом № 16 «Виробниче об'єднання «Алмаз» – Завод «Катіон»» – найсильніший. Значну сумарну силу взаємодії, також, мають автобусний маршрут № 22 «м/н Озерна - Завод «Катіон», і маршрутне таксі № 26 «Завод «Катіон» - м/н Гречани», що свідчить про їх значний внесок у формування матриці маршрутних пересадок. Ізольований маршрут – автобусний маршрут № 18 Мт «м/н Ружична - м/н Ракове», що працює в режимі маршрутного таксі, має найменшу вагу ребер і найменший розмір вершини, що свідчить про слабку інтеграцію його в мережу.

Для кількісного оцінювання структурної зв'язності побудованого графа необхідно було сформувати матрицю Лапласа  $L$ . Для подальшого спектрального аналізу направлену матрицю маршрутних пересадок  $q_{ij}$  було перетворено на симетризовану зважену матрицю суміжності  $a_{ij}$  між маршрутами когерентного ядра. Матриця Лапласа дозволяє перейти від візуального аналізу структури пересадочної мережі до кількісного оцінювання її здатності поширювати координуючі впливи між маршрутами.

Розрахунок матриці Лапласа графа пересадочних зв'язків та визначення її власних значень реалізовано мовою *Python* із використанням бібліотек *NumPy* та *NetworkX* (лістинг програмного коду наведено в Додатку Б). Отримане друге найменше власне значення  $\lambda_2$  використано як показник алгебраїчної зв'язності маршрутної мережі. Спектральний аналіз матриці Лапласа графа пересадочних

зв'язків маршрутів виявив число Фідлера  $\lambda_2 = 0,00790$ , що характеризує алгебраїчну зв'язність мережі (рис. 3.5).

Перше власне значення матриці Лапласа дорівнює нулю, що є типовою властивістю графа Лапласа. Друге найменше власне значення  $\lambda_2$ , відоме як число Фідлера, використовується для оцінювання алгебраїчної зв'язності мережі. Чим меншим є значення  $\lambda_2$ , тим слабкою є структурна зв'язність графа і тим складніше забезпечити швидке розповсюдження координуючих впливів між маршрутами.

Розпорошена структура пересадочної мережі може розглядатися як один із наслідків високого рівня дублювання маршрутів, що проявляється у слабкій концентрації пересадочних зв'язків між окремими маршрутами. Це зумовлює низьку алгебраїчну зв'язність (0,0079) та структурну заблокованість системи у стані фазового дрейфу, що ускладнює перехід системи до стану стійкої узгодженості.

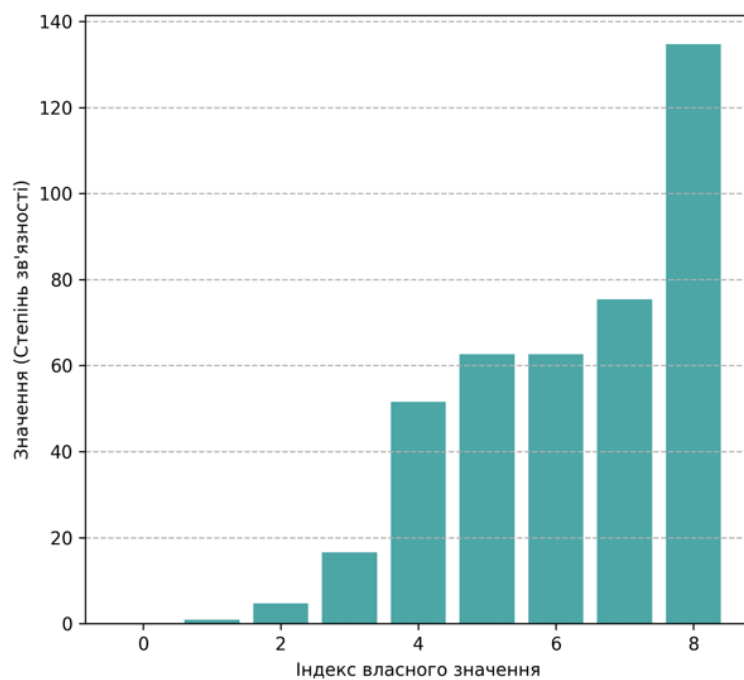


Рисунок 3.5 – Розподіл власних значень матриці Лапласа графа пересадочних зв'язків маршрутів

Отримане значення  $\lambda_2$  є важливим параметром для подальшого моделювання координаційної динаміки, оскільки алгебраїчна зв'язність графа впливає на умови досягнення фазової узгодженості маршрутів. За низького значення  $\lambda_2$  система

потребує більшого коефіцієнта взаємодії  $K$ , щоб перейти від фазового дрейфу до режиму фазового захоплення.

Таким чином, побудований граф пересадочних зв'язків маршрутів когерентного ядра є основою для формування мережевої структури адаптованої моделі Курамото. Його спектральні характеристики дозволяють оцінити структурну готовність пересадочного вузла до координації та визначити, який рівень керуючого зв'язку необхідний для переходу системи до узгодженого режиму функціонування.

### 3.1.4 Методика парсингу даних EasyWay для фіксації фактичних прибуттів транспортних засобів

Для отримання фактичних моментів прибуття транспортних засобів на ЗП «Філармонія» використано дані інформаційного сервісу EasyWay. Оскільки для оцінювання рівня координації маршрутів необхідні не лише планові, а й фактичні часові параметри руху, у роботі розроблено програмний модуль збору та обробки даних про прогнозовані й фактичні прибуття транспортних засобів. Програмний модуль реалізовано мовою *Python*, який здійснює автоматизоване опитування відкритого API сервісу EasyWay. У роботі використано бібліотеки: *requests* (зовнішня, встановлюється командою `pip install requests`) забезпечує виконання HTTP GET-запитів до API, обробку таймаутів та управління сесією з'єднання; *csv* (стандартна бібліотека *Python*); запис зібраних даних у файли формату CSV; *datetime* (стандартна бібліотека *Python*); фіксація поточного часу прибуття та розрахунок відхилення від розкладу; *time* (стандартна бібліотека *Python*); організація циклічного опитування API з інтервалом 30 секунд; *os* (стандартна бібліотека *Python*); перевірка існування файлів та формування шляхів збереження даних.

Вхідними даними для програмного модуля є ідентифікатор маршруту, ідентифікатор ЗП, напрямок руху, інтервал оновлення запитів і часовий період спостереження. Скрипт реалізує алгоритм відстеження транспортних засобів за

унікальним ідентифікатором (`vehicle_id`): момент зникнення одиниці рухомого складу зі списку GPS-прогнозів фіксується як фактичний час прибуття на ЗП. Результати фіксувалися у два файли формату CSV: `ARRIVALS.csv` – фактичні прибуття з відхиленнями від розкладу, та `SCHEDULE.csv` – планові інтервали руху згідно розкладу. Парсинг GPS-даних здійснювався у період ранкового пікового навантаження з 7:30 до 9:00 у напрямку центру з інтервалом оновлення 30 с. На кожній ітерації виконувалися формування запиту до сервісу EasyWay, обробка отриманої відповіді, фіксація фактичних або прогнозованих моментів прибуття транспортних засобів до контрольного ЗП та збереження результатів у вихідні файли. Алгоритм роботи програмного модуля парсингу даних EasyWay для фіксації фактичних моментів прибуття транспортних засобів наведений на рисунку 3.6. Блок-схема алгоритму парсингу даних EasyWay наведено на рисунку 3.7. Повний лістинг програмного коду модуля парсингу даних EasyWay наведено в Додатку В.

```

C:\WINDOWS\system32\cmd. x + v
[08:11:55] ВІДСТЕЖУЮ Тролейбус #14 [Т-018] очік. 08:21 (9 хв)
[08:11:55] ✓ ПРИБУВ Тролейбус #17 [Т-085] за розкладом 07:59 відхилення +12 хв інтервал 22.8 хв
[08:11:55] ✓ ПРИБУВ Автобус #21 [ВХ 6350 Н0] за розкладом 07:59 відхилення +12 хв інтервал -
[08:12:17] ВІДСТЕЖУЮ Тролейбус #17 [Т-085] очік. 08:11 (0 хв)
[08:12:17] ВІДСТЕЖУЮ Тролейбус #17 [Т-080] очік. 08:24 (12 хв)
[08:12:39] ✓ ПРИБУВ Тролейбус #17 [Т-085] за розкладом 08:11 відхилення +1 хв інтервал 0.7 хв
[08:13:02] ВІДСТЕЖУЮ Маршрутка #35 [ВХ 6209 ІВ] очік. 08:30 (17 хв)
[08:13:02] ✓ ПРИБУВ Маршрутка #35 [НХ 2329 АВ] за розкладом 08:04 відхилення +9 хв інтервал 20.1 хв
[08:13:24] відстежується 21 машин(и) | нових прибуттів немає
[08:13:46] ВІДСТЕЖУЮ Маршрутка #18 [ВХ 4547 АК] очік. 08:40 (26 хв)
[08:14:07] ✓ ПРИБУВ Автобус #20 [А-6015] за розкладом 07:59 відхилення +15 хв інтервал -
[08:14:29] відстежується 21 машин(и) | нових прибуттів немає
[08:14:52] відстежується 21 машин(и) | нових прибуттів немає
[08:15:14] ВІДСТЕЖУЮ Маршрутка #27 [ВХ 9126 АК] очік. 08:23 (8 хв)
[08:15:14] ВІДСТЕЖУЮ Маршрутка #40 [ВХ 7280 АК] очік. 08:26 (11 хв)
[08:15:37] відстежується 23 машин(и) | нових прибуттів немає
[08:15:59] відстежується 23 машин(и) | нових прибуттів немає
[08:16:21] відстежується 23 машин(и) | нових прибуттів немає
[08:16:44] ВІДСТЕЖУЮ Тролейбус #11А [Т-072] очік. 08:31 (15 хв)
[08:17:06] відстежується 24 машин(и) | нових прибуттів немає
[08:17:30] відстежується 24 машин(и) | нових прибуттів немає
[08:17:53] ✓ ПРИБУВ Автобус #21 [ВХ 0856 ІА] за розкладом 08:07 відхилення +11 хв інтервал 6.0 хв
[08:18:15] відстежується 23 машин(и) | нових прибуттів немає
[08:18:37] відстежується 23 машин(и) | нових прибуттів немає
[08:19:00] відстежується 23 машин(и) | нових прибуттів немає
[08:19:22] відстежується 23 машин(и) | нових прибуттів немає
[08:19:44] ВІДСТЕЖУЮ Автобус #3 [ВХ 4673 ІН] очік. 08:33 (13 хв)
[08:20:07] ВІДСТЕЖУЮ Маршрутка #26 [ВХ 8976 АМ] очік. 08:36 (16 хв)
[08:20:07] ✓ ПРИБУВ Тролейбус #7 [Т-087] за розкладом 08:06 відхилення +14 хв інтервал 28.3 хв
[08:20:31] ✓ ПРИБУВ Тролейбус #15А [Т-075] за розкладом 08:12 відхилення +8 хв інтервал -

```

Рисунок 3.6 – Фрагмент роботи програмного модуля парсингу даних EasyWay для фіксації фактичних прибуттів транспортних засобів

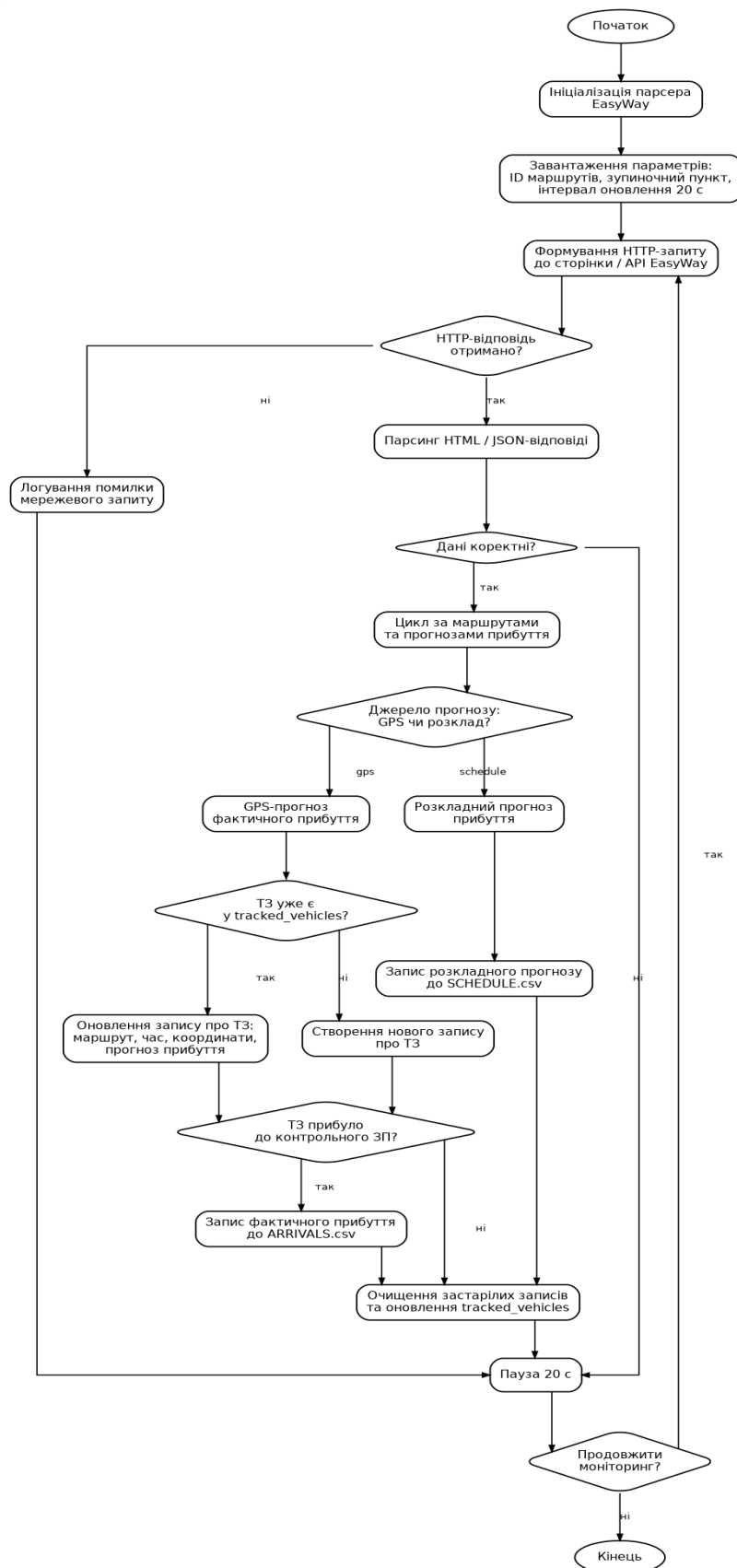


Рисунок 3.7 – Блок-схема алгоритму парсингу даних EasyWay щодо прибуття транспортних засобів на ЗП «Філармонія» м. Хмельницький

Програмний модуль забезпечує збір і підготовку даних про фактичні моменти прибуття транспортних засобів, які надалі використано для статистичної обробки відхилень від планових моментів прибуття, визначених розкладом руху. Це дозволило кількісно оцінити варіативність інтервалів прибуття, наявність затримок і ступінь нестабільності транспортного процесу на ЗП. Для перевірки працездатності програмного модуля виконано тестовий запуск на ЗП «Філармонія» з подальшим аналізом сформованих файлів. Перевірено коректність формування HTTP-запитів, отримання відповіді від сервісу EasyWay, вилучення даних про прогнозовані прибуття, фіксацію фактичного прибуття транспортного засобу до контрольного ЗП та відсутність дублювання записів у межах одного циклу моніторингу.

На відміну від разових хронометражних спостережень, запропонований підхід збору даних дозволяє формувати динамічну базу даних у режимі, наближеному до реального часу, що є необхідною умовою для подальшого використання цих даних в імітаційній моделі та в контурі інтегрованої адаптивної системи координації МПТ. Отримані дані можуть використовуватися для уточнення фактичних інтервалів руху, визначення моментів прибуття транспортних засобів, оцінювання рівня узгодженості маршрутів і формування керуючих впливів диспетчером.

Надалі результати автоматизованого збору даних розглядаються як інформаційна основа для імітаційного моделювання фазового процесу координації різних видів МПТ в пересадочному вузлі.

### 3.2 Розробка імітаційної моделі процесу координації різних видів міського пасажирського транспорту у пересадочних вузлах

Метою імітаційного моделювання є порівняння динаміки прибуття транспортних засобів у пересадочний вузол за різних режимів функціонування маршрутної системи та оцінка впливу рівня координації на регулярність руху. Для цього змодельовано два базові сценарії: фазовий дрейф, що характеризує випадкове

прибуття транспортних засобів без стійкої координації, та фазове захоплення, що відповідає узгодженому режиму руху з більш рівномірними інтервалами прибуття.

Імітаційна модель реалізована у вигляді програмного комплексу мовою *Python* (Додаток Г), який інтегрує чисельне розв'язання мережево-динамічної моделі координації МПТ із отриманням даних у реальному часі через API-сервіс EasyWay.

Вхідними даними моделі є перелік маршрутів когерентного ядра, планові та фактичні інтервали руху, власні частоти маршрутів-осциляторів, коефіцієнт зв'язку між маршрутами, експлуатаційні обмеження в моделі (2.12), а також випадкові збурення, що моделюють варіативність інтервалів руху та вплив реальних умов функціонування МПТ, симетризована матриця суміжності  $a_{ij}$ , побудована на основі реальних значень обсягу маршрутних пересадок між 9 маршрутами, відібраних до когерентного ядра ЗП «Філармонія». Чисельне інтегрування рівнянь моделі Курамото з фазовим зсувом (2.7) здійснюється методом Ейлера з кроком  $\Delta t$  (30 с.), що відповідає частоті оновлення GPS-даних централізованої диспетчерської системи. Для імітаційного моделювання опорним маршрутом прийнято тролейбусний маршрут № 15 «вул. Петра Болбочана – вул. Староміська» із мінімальним плановим інтервалом руху відповідно до виразу (2.6). Поточні фази маршрутів коригуються з вагою 0,25 на основі фактичних GPS-прогнозів прибуття, що отримуються з API кожні 30 секунд; решта 0,75 ваги забезпечує плавність модельної траєкторії.

У ході імітаційного моделювання обчислюються: параметр порядку Курамото  $R(t)$  (2.9), критичний коефіцієнт зв'язку  $K_c$  (2.8) та число Фідлера  $\lambda_2$  матриці Лапласа (2.3). За значенням  $\lambda_2$  (0,0125) та розкидом власних частот  $\Delta\omega$  отримано  $K_c$  (0,497), що за заданого  $K = 1,2$  відповідає умові  $K > K_c$  і свідчить про здатність системи досягти фазового захоплення.

Аналіз координаційного стану системи проводиться окремо для трьох типів міжмаршрутних зв'язків: «тролейбус–тролейбус» (Тр–Тр), «тролейбус–автобус» (Тр–Авт) та «тролейбус–маршрутка» (Тр–Марш). Для кожного типу зв'язку обчислюється середнє абсолютне фазове відхилення між парами маршрутів, де

ваговим коефіцієнтом є обсяг маршрутних пересадок за розрахунковий період  $a_{ij}$ . Пари маршрутів із фазовим розривом інтервалів прибуття понад  $60^\circ$  формують рекомендації щодо коригування режиму руху; пари з розривом менше  $30^\circ$  за близьких власних частот ідентифікуються як потенційне скупчення транспортних засобів із прогнозом часу його настання.

Результати моделювання відображаються в інтерфейсі диспетчера у реальному часі у вигляді п'яти інформаційних панелей (рис. 3.8):

- фазове коло з векторним індикатором когерентності  $R(t)$ ;
- часовий графік параметра порядку з порогоми  $R^*(0,75)$  та  $R_{crit}(0,5)$ ;
- індикатор поточного стану системи (фазове захоплення / стан химери / фазовий дрейф) у вигляді кольорової часової смуги;
- діаграма фазових розривів за типами зв'язків;
- структурована панель рекомендацій диспетчеру.

Рекомендації щодо прискорення руху формуються у вигляді рекомендованої швидкості, що визначається на перегоні між визначеною контрольною точкою та ЗП, і є операційно зрозумілим для водія форматом керуючого впливу. Контрольну точку фіксації проходження транспортних засобів визначено в межах транспортної розв'язки по вул. Кам'янецька, біля ЗП «Філармонія» у напрямку центральної частини міста; це обумовлено концентрацією маршрутів різних видів МПТ, наявністю пересадочних зв'язків і можливістю однозначної ідентифікації моменту проходження транспортного засобу через досліджуваний вузол. Оновлення рекомендацій відбувається лише за перетину встановлених порогів або за суттєвої зміни стану системи. Блок-схема алгоритму імітаційного моделювання процесу координації різних видів МПТ у пересадочних вузлах наведена на рисунку 3.9. Результати запуску імітаційної моделі автоматично зберігаються у вихідних файлах, що формують архів сценарного моделювання (`recommendations_log`). У цих файлах фіксуються часові ряди фаз маршрутів, значення параметра порядку  $R(t)$ , фазовий стан системи, інтервали прибуття, випадки скупчення транспортних засобів, час очікування пасажирів і показники ефективності керуючих впливів.

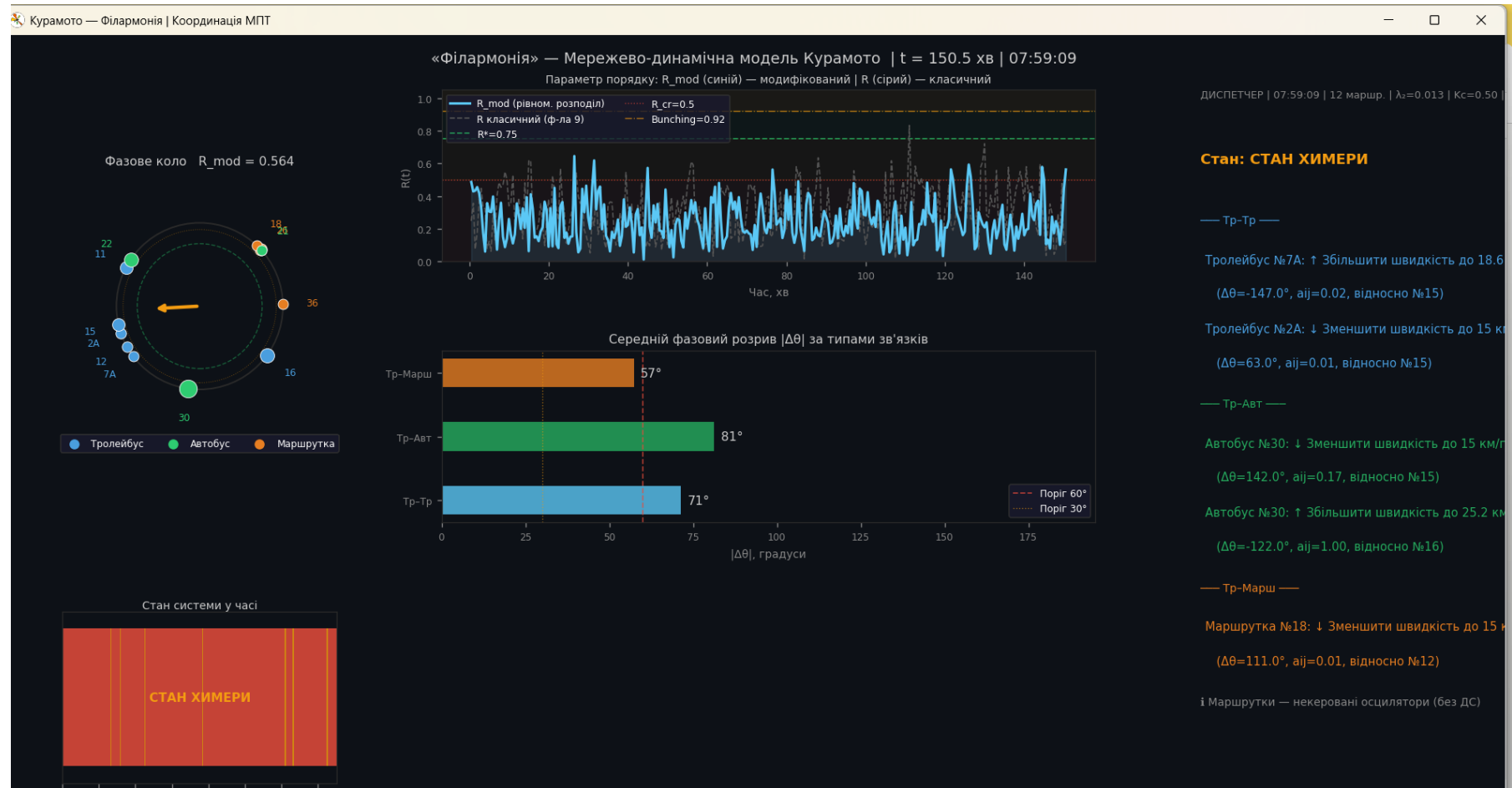


Рисунок 3.8 – Фрагмент роботи програмної реалізації імітаційної моделі процесу координації різних видів МПТ у пересадочних вузлах у середовищі *Python*

Архів результатів використовується для подальшого порівняння сценаріїв координації, оцінювання середньомісячних показників роботи перевізників і розрахунку компенсації в межах організаційно-економічного механізму ІАСК.

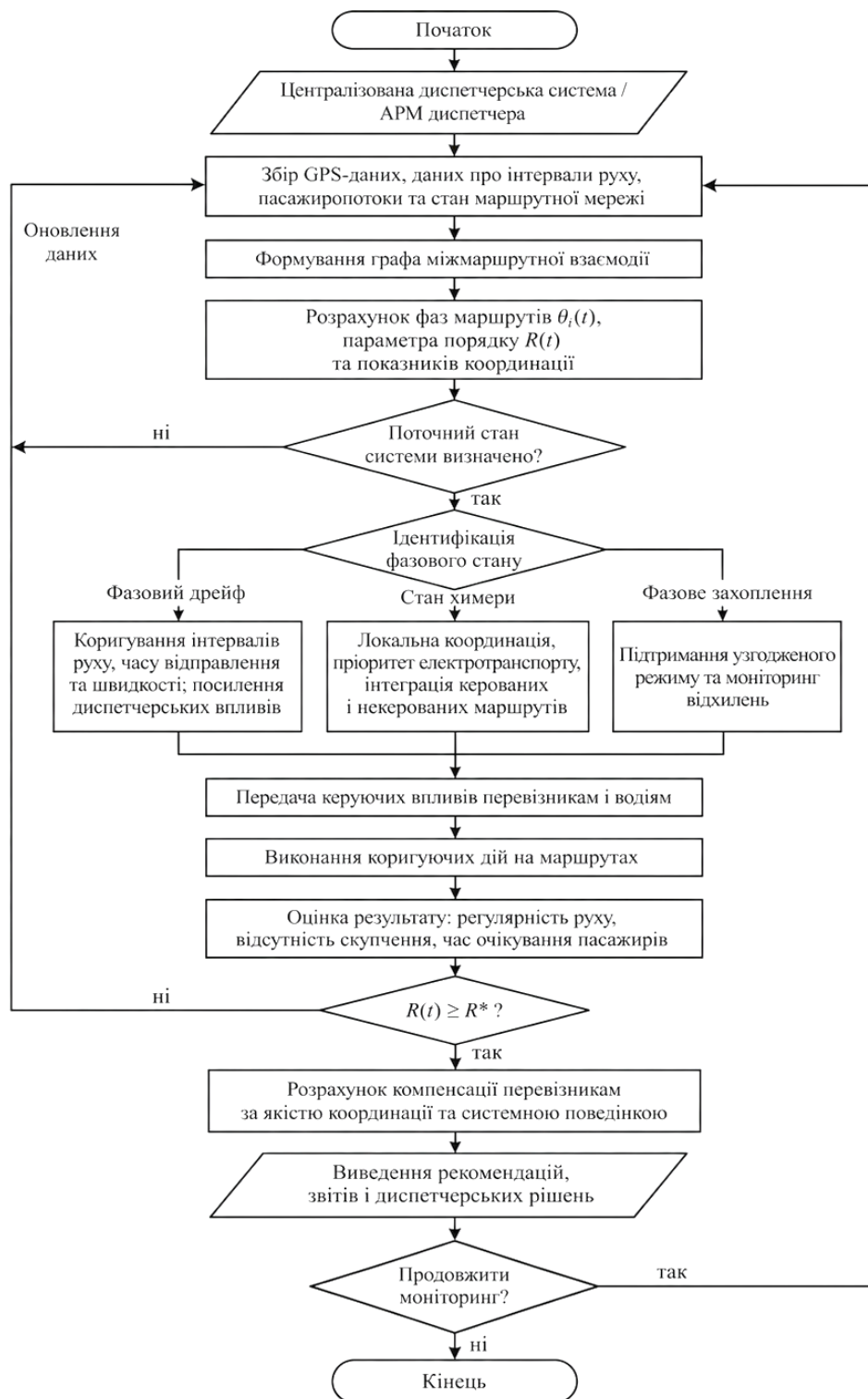


Рисунок 3.9 – Блок-схема алгоритму імітаційного моделювання процесу координації різних видів МПТ у пересадочних вузлах

### 3.3 Результати моделювання процесу координації різних видів міського пасажирського транспорту у пересадочних вузлах

Для оцінки ефективності координації маршрутів пересадочного вузла «Філармонія» в ході проведення експерименту за імітаційною моделлю проводився моніторинг середнього абсолютного фазового розриву  $|\Delta\theta|$  між маршрутами у розрізі трьох типів координаційних зв'язків: «тролейбус–тролейбус», «тролейбус–автобус» та «тролейбус–маршрутне таксі». Критичним порогом  $|\Delta\theta|$  вважалося значення  $60^\circ$ , перевищення якого свідчить про необхідність диспетчерського втручання; попереджувальний поріг було встановлено на рівні  $30^\circ$ .

В базовому режимі моделювання як опорний маршрут було обрано троллейбусний маршрут № 16 з найменшим плановим інтервалом серед троллейбусних маршрутів, що увійшли до числа значущих маршрутів із застосуванням принципу Парето. Моніторинг послідовних моментів спостереження в ранкову годину пік дозволив виявити, що усі три типи зв'язків систематично перевищували критичний поріг  $60^\circ$ , що відповідає стану неузгодженості системи. Найбільшу варіативність демонструє зв'язок «тролейбус – маршрутне таксі» з амплітудою коливань  $84^\circ$  (від  $42^\circ$  до  $126^\circ$ ), що може бути зумовлено хаотичною некерованою природою маршрутних таксі як приватних перевізників, не інтегрованих у централізовану диспетчерську систему, так і через низьку алгебраїчну зв'язність графа пересадочних зв'язків, рисунок 3.10. Зв'язок «тролейбус – автобус» характеризується найменшою варіативністю ( $\pm 13^\circ$ ) завдяки інтеграції муніципальних автобусів у систему координації, однак середній рівень розриву  $83^\circ$  залишається суттєво вищим за критичний поріг.

Паралельно з аналізом фазових зсувів здійснювався моніторинг параметра порядку  $R_{\text{mod}}(t)$ . У базовому режимі середнє значення  $R_{\text{mod}}$  становило значення менше за 0,30, максимальні піки досягали значень до 0,65 лише короткочасно, після чого система поверталася до неузгодженого стану внаслідок впливу шуму  $\sigma$  та некерованих маршрутів.

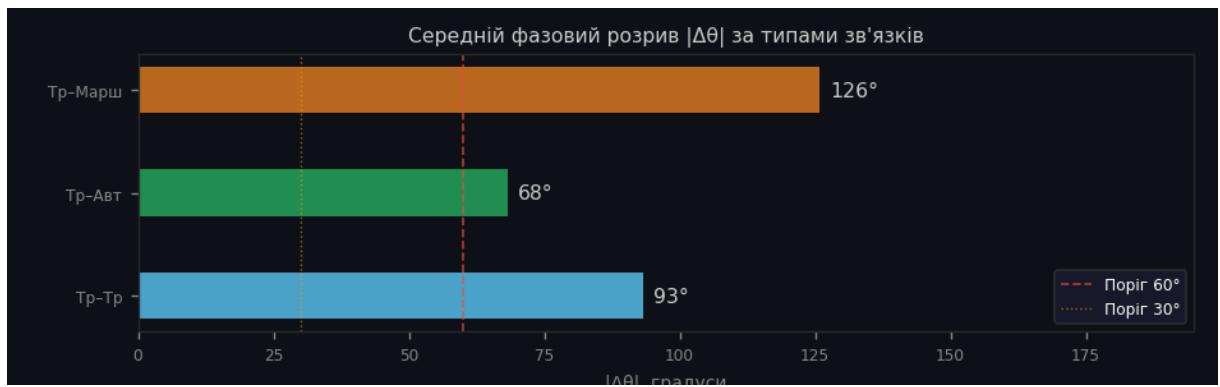


Рисунок 3.10 – Діаграма середнього фазового розриву  $|\Delta\theta|$  за типами зв'язків. Фрагмент роботи програмної реалізації імітаційної моделі

За результатами імітаційного моделювання поточного стану системи у період ранкової години пік (7:30–9:00), з обчислювальним періодом  $T = 5400$  с, отримано розподіл модифікованого параметра порядку Курамото  $R_{mod}$ , адаптований під фіксований крок зсуву (рисунок 3.11).

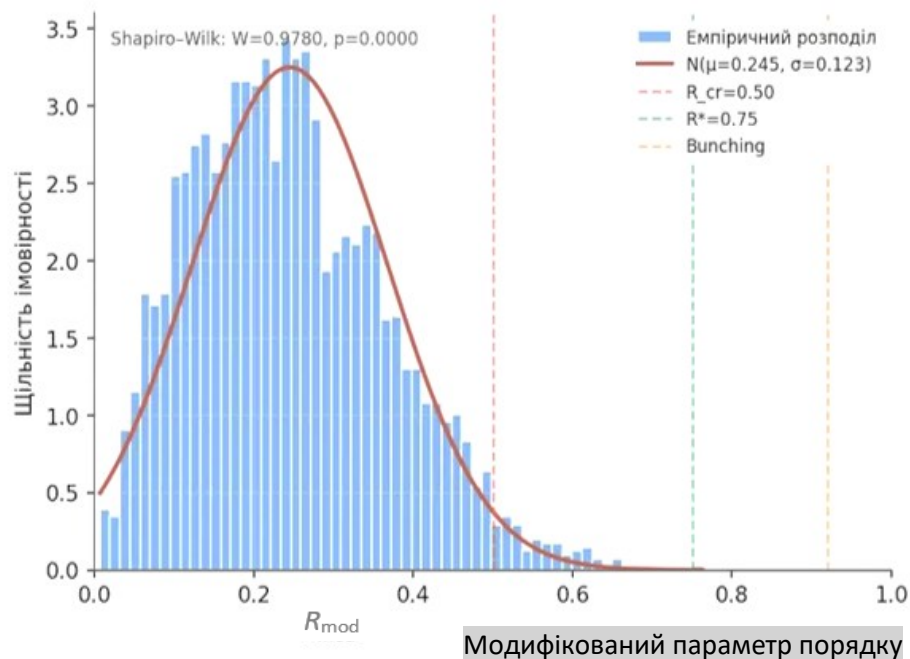


Рисунок 3.11 – Емпіричний розподіл модифікованого параметра порядку  $R_{mod}$  за результатами імітаційного моделювання поточного стану системи МПТ

Емпіричний розподіл  $R_{\text{mod}}$ , отриманий для поточного режиму функціонування ЗП «Філармонія», апроксимовано нормальним законом розподілу з параметрами  $N(\mu = 0,245, \sigma = 0,123)$ . Отримане значення математичного очікування (0,245) свідчить про низький рівень узгодженості руху маршрутів у поточному стані функціонування МПТ. Це значення нижче цільового порогу переходу до стану фазового захоплення  $R^*$  і, навіть, нижче критичного порогу (рис. 2.2). Стандартне відхилення (0,123) вказує на значну варіативність функції відгуку, що залежить від основних факторів математичної моделі: сили зв'язку та керуючих впливів, варіативності інтервалів, частки інтегрованих до централізованої диспетчерської системи перевізників та інтенсивності пересадок.

Значення статистики Шапіро–Вілка ( $W=0,9780$ ) є близьким до 1, що свідчить про певну наближеність емпіричного розподілу до нормального. Однак  $p < 0,05$ , вказує на статистично значущу відмінність від нормального закону, що пояснюється правостороннім відхиленням гістограми та характерним подовженим правим хвостом розподілу. Це є типовим для параметра порядку Курамото, значення якого обмежені інтервалом  $[0;1]$  і концентруються поблизу нуля за умов відсутності синхронізації.

Отже, результати імітаційного моделювання підтверджують, що поточний стан системи характеризується переважно неузгодженим режимом і не забезпечує стійкого переходу до режиму стійкої координації без застосування керуючих впливів.

В алгоритмі імітаційної моделі передбачено використання планових інтервалів руху, як базових власних частот маршрутів-осциляторів  $\omega_i$ . Реальні GPS-дані відображають фактичні інтервали, що відхиляються від розкладу руху – підтверджено натурним обстеженням ( $\Delta\bar{t}=+4,96$  хв.). Унаслідок цього реальний параметр порядку  $R_{\text{mod}}$  залишається нижчим за теоретичне значення за того самого значення сили зв'язку  $K$ . Ця розбіжність є кількісним підтвердженням практичної цінності моделі: вона діагностує поточний стан системи як фазовий дрейф, що відповідає результатам натурального обстеження, і обґрунтовує необхідність

активного диспетчерського впливу для наближення системи до стану фазового захоплення.

Перевірку адекватності імітаційної моделі проведено за статистичними критеріями за обсягу вибірки  $n = 2673$  спостереження та рівня значущості  $\alpha = 0,05$ . За критерієм Стьюдента встановлено, що середнє емпіричне значення модифікованого параметра порядку  $R_{\text{mod}} = 0,2995 \pm 0,0058$  статистично не відрізняється від прийнятого теоретичного значення  $(0,3)$ , оскільки  $t_{\text{емп}} = 0,152 < t_{\text{кр}} = 1,961$ ,  $p = 0,879$ . Гранична відносна похибка оцінки становить  $1,95\%$  за рівень достовірності  $0,95$ , що підтверджує прийнятну точність відтворення середнього рівня узгодженості маршрутів.

Водночас перевірка за критерієм Пірсона показала статистично значущу розбіжність між теоретичним та емпіричним розподілом фазових станів системи ( $\chi^2_{\text{емп}} = 130,9 > \chi^2_{\text{кр}} = 5,99$ ). Це свідчить про те, що імітаційна модель коректно відтворює середній рівень параметра  $R_{\text{mod}}$ , однак фактична структура переходів між фазовими станами має вищу варіативність, ніж передбачено теоретичним сценарієм. Отже, модель адекватно відтворює середній рівень узгодженості маршрутів, однак розподіл фазових станів у реальних умовах є більш нерівномірним через високу варіативність інтервалів, неоднаковий рівень керованості перевізниками та структурну заблокованість пересадочної мережі. Це підтверджує необхідність впровадження ІАСК, а в перспективі – можливість реструктуризації маршрутної мережі для зменшення високого рівня дублювання та підвищення алгебраїчної зв'язності пересадочних взаємодій.

За результатами імітаційного моделювання ( $n=2673$  спостережень) поточного стану системи МПТ на ЗП «Філармонія», при  $K=2,5$ , визначено емпіричні межі фазових станів функціонування системи за критерієм ефективності  $R_{\text{mod}}$ , (табл. 3.3). У поточному режимі функціонування пересадочного вузла система переважно перебуває у неузгодженому стані, частка часу цього стану становить  $88,5\%$ . Стан, що характеризує часткову узгодженість керованих маршрутів за наявності некоординованих елементів, спостерігається протягом  $11,1\%$  часу. Режим стійкої координації має епізодичний характер і становить лише  $0,4\%$  часу,

що свідчить про відсутність стійкої координації маршрутів у поточному режимі роботи вузла.

Таблиця 3.3 – Емпіричні межі фазових станів системи МПТ за критерієм  $R_{mod}$

Фазовий стан системи	Межі параметру порядку Курамото (модифікованого на час зсуву) $R_{mod}$	Середнє математичне сподівання $R_{mod}$	Частка часу тривалості стану, %
Неузгоджений режим	$R_{mod} < 0,5$	0,264	88,5
Частково узгоджений режим	$0,50 \leq R_{mod} < 0,75$	0,571	11,1
Режим стійкої координації	$R_{mod} \geq 0,75$	0,785	0,4

Отримані результати підтверджують доцільність прийнятих меж  $R_{cr}$  (0,50) та  $R^*$ (0,75), оскільки вони розділяють якісно різні режими функціонування системи: неузгоджений рух, часткову координацію та стійку фазову узгодженість. При цьому низька частка часу перебування системи у зоні фазового захоплення свідчить про те, що поточна структура взаємодії МПТ на ЗП «Філармонія» не забезпечує самостійного переходу до цільового режиму без керуючих впливів ІАСК.

Для наочного порівняння характеру динаміки моментів прибуття транспортних засобів у різних фазових станах виконано моделювання кумулятивного значення моментів прибуття транспортних засобів на ЗП «Філармонія» у станах системи: неузгодженого режиму (фазовий дрейф) та режимі стійкої координації для розрахункового періоду тривалістю 300 хв. (рис. 3.12). Такий часовий горизонт прийнято з метою виявлення накопичувального ефекту нерівномірності прибуття транспортних засобів, який не завжди достатньо проявляється на коротких інтервалах спостереження. Порівняння кумулятивних кривих дозволяє встановити відмінності між неузгодженим режимом функціонування системи та режимом фазового захоплення. Неузгоджений режим відображає, відповідно, некоординовану роботу різних видів МПТ на пересадочному вузлі за умов низького рівня фазової узгодженості, коли

інтервали прибуття мають нерівномірний характер. Режим стійкої координації змодельовано на основі адаптованої моделі Курамото з урахуванням узгоджених часових (фазових) зсувів між маршрутами.

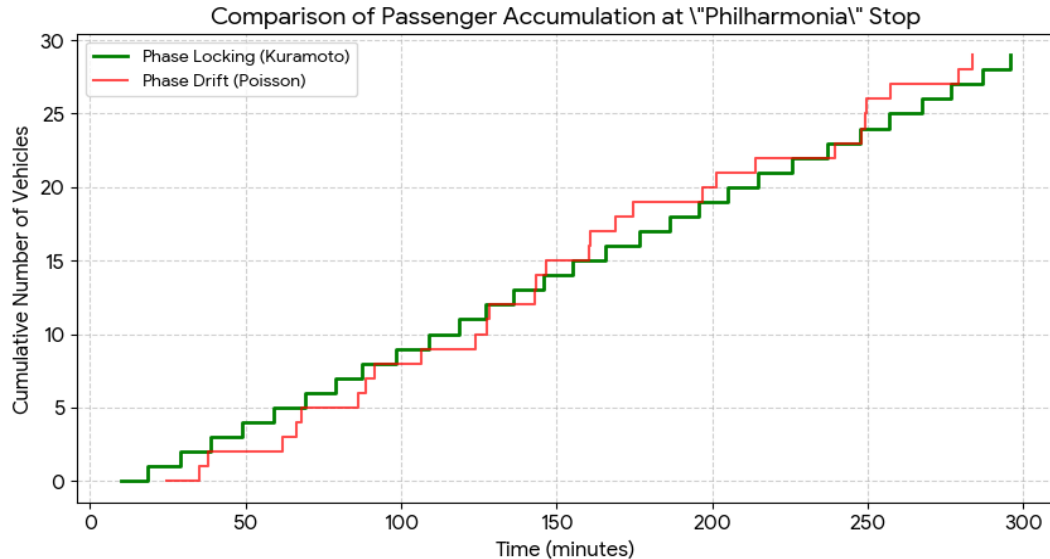


Рисунок 3.12 – Порівняння кумулятивних кривих прибуття транспортних засобів на ЗП «Філармонія» у станах системи: неузгоджений та режим стійкої координації

У неузгодженому режимі (фазовий дрейф) функціонування системи кумулятивна крива має більш нерівномірний характер, що свідчить про випадковість прибуття транспортних засобів і нестабільність інтервалів руху. У режимі стійкої координації (фазового захоплення) накопичення моментів прибуття відбувається більш рівномірно, що вказує на стабілізацію інтервалів прибуття та підвищення узгодженості роботи рухомого складу на маршрутах. Отже, перехід від неузгодженого режиму до режиму стійкої координації створює передумови для зменшення варіативності інтервалів, запобігання скупченню транспортних засобів і скорочення часу очікування пасажирів.

## Висновки по третьому розділу

1. Сформовано емпіричну базу дослідження на прикладі ЗП «Філармонія» у м. Хмельницькому, який характеризується високою концентрацією маршрутів, інтенсивними пересадками та нерівномірністю прибуття транспортних засобів у пікові періоди. Актуалізовано та верифіковано транспортну модель м. Хмельницького в середовищі PTV Visum. Це дозволило отримати змодельовану матрицю маршрутних пересадок і параметрів мережево-динамічної моделі. На основі матриці маршрутних пересадок визначено помірну нерівномірність їх розподілу між маршрутами за нормалізованою ентропією Шеннона (0,6726). За принципом Парето виділено когерентне ядро з дев'яти найбільш значущих маршрутів, які формують основну частину пересадочного навантаження.

2. Побудовано граф пересадочної взаємодії маршрутів когерентного ядра та виконано його спектральний аналіз. Значення числа Фідлера (0,0079) свідчить про низьку алгебраїчну зв'язність мережі та обмежену здатність системи до поширення координуючих впливів. Розроблено Python-модуль парсингу даних EasyWay для автоматизованої фіксації фактичних і прогнозованих моментів прибуття транспортних засобів до ЗП «Філармонія». Отримані дані використано для уточнення інтервалів руху та оцінювання рівня координації маршрутів.

3. Розроблено імітаційну модель координації різних видів МПТ у пересадочному вузлі на основі мережево-динамічної моделі, що дозволяє відтворювати різні фазові стани системи і застосовувати сценарний підхід. За результатами аналізу емпіричного розподілу модифікованого параметра порядку встановлено, що середнє значення  $R_{mod} = 0,245$  при стандартному відхиленні 0,123, що свідчить про низький рівень фазової узгодженості маршрутів у поточному режимі функціонування ЗП «Філармонія» і функціонування системи переважно в неузгодженому режимі.

4. За результатами імітаційного моделювання визначено емпіричні межі фазових станів функціонування системи МПТ за значенням  $R_{mod}$ : неузгоджений режим –  $R_{mod} < 0,5$ , частково узгоджений режим –  $0,50 \leq R_{mod} < 0,75$ , режим стійкої

координації –  $R_{\text{mod}} \geq 0,75$ . У поточному режимі функціонування система перебуває у неузгодженому стані протягом 88,5 % часу, що підтверджує відсутність стійкої координації маршрутів без застосування керуючих впливів.

5. Перевірка адекватності моделі за критерієм Стюдента підтвердила її придатність для оцінювання середнього рівня фазової узгодженості маршрутів. Отримані результати доводять, що наявна структура міжмаршрутної взаємодії не забезпечує самостійного переходу системи до режиму фазового захоплення та потребує застосування керуючих впливів.

## РОЗДІЛ 4

### АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ НАСЕЛЕННЯ МІСЬКИМ ПАСАЖИРСЬКИМ ТРАНСПОРТОМ

4.1 Визначення впливу параметрів транспортного процесу у пересадочних вузлах на критерій ефективності

Для оцінки ефективності інтегрованої системи координації роботи різних видів МПТ у пересадочному вузлі необхідно визначити умови, за яких система здатна переходити від неузгодженого режиму функціонування до стану часткової синхронізації або до стану функціональної сталості. Ключовими параметрами, що впливають на такий перехід визначено наступні показники:

- варіативність інтервалів руху, яка характеризує ступінь нерівномірності прибуття транспортних засобів у пересадочний вузол;
- сила керуючого зв'язку  $K_c$ , що визначає мінімально необхідний рівень міжмаршрутної та міжвидової взаємодії або керуючого впливу для переходу системи до узгодженого режиму функціонування,
- частка перевізників  $\varphi$ , інтегрованих у систему, та обсяг маршрутних пересадок за розрахунковий період.

В якості критерію ефективності в рамках дослідження розглядається параметр порядку Курамото  $R(t)$  – його модифікація з урахуванням часового зсуву  $R_{mod}$ , який характеризує рівень узгодженості інтервалів прибуття транспортних засобів у пересадочний вузол.

Для оцінки впливу ключових факторів на параметр порядку системи проведено повнофакторний експеримент  $2^4$  (16 серій дослідів). Межі варіювання вхідних факторів для повнофакторного експерименту встановлено на основі результатів попереднього аналізу фактичного функціонування ЗП «Філармонія», параметрів імітаційної моделі та умов переходу системи між фазовими станами.

Нижні рівні факторів відповідають поточному або близькому до поточного режиму роботи пересадочного вузла, який характеризується високою варіативністю інтервалів руху, обмеженою часткою інтегрованих перевізників і недостатньою силою керуючого зв'язку. Верхні рівні факторів відображають граничні значення, за яких у моделі створюються передумови для підвищення фазової узгодженості маршрутів та переходу системи від неузгодженого режиму до стану часткової або стійкої координації. Фактори та їх значення за рівнями варіювання наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Межі варіювання вхідних факторів

Вхідний фактор	Нижній рівень	Верхній рівень
Варіативність інтервалів руху - X1	0,03	0,12
Нормований показник інтенсивності маршрутних пересадок, частка від базового рівня – X2	0,5	1,5
Частка інтегрованих перевізників –X3	0,33	1
Сила керуючого зв'язку – X5	1,2	2,5

Слід зазначити, що показник варіативності інтервалів руху (X1) не відображає абсолютне відхилення інтервалу руху в хвиликах, а використовується як нормований безрозмірний показник – характеристика рівня нерівномірності прибуття транспортних засобів у рамках імітаційного моделювання. Нижній рівень відповідає більш стабільному режиму прибуття транспортних засобів, тоді як верхній рівень відображає підвищену варіативність інтервалів, встановлену за результатами аналізу фактичних відхилень руху, максимальне значення яких досягало 25 хв. Обсяг маршрутних пересадок, отриманий за результатами транспортного моделювання, використовувався як базова характеристика пересадочного навантаження у ЗП «Філармонія». Для проведення факторного експерименту цей показник використано у відносній формі через нормований

коефіцієнт інтенсивності маршрутних пересадок ( $X_2$ ), який характеризує зміну пересадочного навантаження відносно базового рівня, де: нижній рівень відповідає зменшенню інтенсивності маршрутних пересадок до 50 % від базового значення, а верхній рівень – збільшенню до 150 % від базового значення. Такий підхід дозволяє оцінити стійкість системи МПТ до зміни пересадочного навантаження без прив'язки факторного експерименту лише до конкретних фіксованих значень обсягу маршрутних пересадок.

Результати дисперсійного аналізу повнофакторного експерименту за критерієм Фішера, виконаного для оцінювання впливу основних вхідних факторів на параметр порядку  $R_{mod}$ , наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати дисперсійного аналізу повнофакторного експерименту

Вхідний фактор	Статистичні показники значущості фактора		
	Розрахункове значення критерію Фшера, $F_{емп}$	Критичне значення критерію Фшера, $F_{кр}$	Коефіцієнт детермінації, що характеризує частку впливу фактора, $\eta^2$
Варіативність інтервалів руху	12,117	4,6	0,464
Нормований показник інтенсивності маршрутних пересадок, частка від базового рівня	0,206	4,6	0,015
Частка інтегрованих перевізників, од.	1,467	4,6	0,058
Сила керуючого зв'язку	0,857	4,6	0,015

Отже, статистично значущим фактором є показник варіативності інтервалів руху, для якого виконується умова  $F_{емп} > F_{кр}$ . Це свідчить про те, що нерівномірність прибуття транспортних засобів є основним фактором, який визначає рівень фазової узгодженості маршрутів у пересадочному вузлі. Значення коефіцієнта  $\eta^2$  (0,464) свідчить, що цей фактор пояснює 46,4 % варіацій

результативного показника, тобто має найбільший вплив на зміну рівня координації та узгодженості в системі.

Інші фактори за результатами аналізу не досягають рівня статистичної значущості. Це означає, що в межах проведеного експерименту, за поточної конфігурації маршрутної мережі в рамках досліджуваного пересадочного вузла, їхній окремий вплив на параметр  $R_{\text{mod}}$  є менш вираженим порівняно з варіативністю інтервалів руху. Такий результат пояснюється структурною заблокованістю системи у зоні фазового дрейфу, що зумовлено низькою алгебраїчною зв'язністю графа пересадочних зв'язків (0,0079). Таким чином, за існуючої структури пересадочних зв'язків між маршрутами, що проходять через ЗП «Філармонія», збільшення сили керуючого впливу або частки інтегрованих перевізників саме по собі не гарантує переходу системи до стану стійкої координації. Це свідчить, що першочерговим завданням є не лише посилення диспетчерського регулювання, а насамперед зменшення варіативності інтервалів прибуття та підвищення структурної зв'язності маршрутної мережі.

На досягнення рівня  $R_{\text{mod}}$ , що характеризує стан функціональної сталості системи і відповідає фазовому стану стійкої координації, істотно впливає критичний коефіцієнт взаємодії  $K_c$ , що визначає мінімально необхідний рівень міжмаршрутної та міжвидової взаємодії або керуючого впливу для переходу системи до узгодженого режиму функціонування. Зростання  $K_c$  означає, що для забезпечення координації необхідні сильніші керуючі впливи, тобто вища інтенсивність диспетчерського регулювання, жорсткіше дотримання інтервалів або вищий рівень інтегрованості перевізників у систему управління.

На рисунку 4.1 наведено залежність критичного значення коефіцієнта взаємодії  $K_c$ , що інтерпретується як критичний поріг синхронізації системи, від варіативності інтервалів прибуття транспортних засобів у пересадочний вузол ( $\sigma_h$ ) для поточної та перспективної конфігурацій маршрутної мережі. Залежність відображає зростання необхідного рівня координаційного впливу зі збільшенням нерівномірності прибуття транспортних засобів. При реальному рівні варіативності  $\sigma$ , що дорівнює 0,6, критичний поріг для поточної конфігурації мережі сягає 4,05,

що значно перевищує технічно досяжний рівень диспетчерського впливу, визначений на рівні 2,5.

Для перспективної конфігурації мережі критичний поріг  $K_c$  за того самого значення варіативності інтервалів (0,6) зменшується до 2,18, однак все ще перевищує рівень керуючого впливу  $K$ , що дорівнює 1,8. Це обґрунтовує необхідність одночасного виконання двох умов для досягнення стану стікої координації: реструктуризації маршрутної мережі та стабілізації інтервалів руху. За умови одночасного виконання двох заходів, з варіативністю інтервалів прибуття на рівні 0,3 та менше, критичний поріг синхронізації стає нижчим або співставним із  $K=1,8$ , що відповідає режиму директивного диспетчерського управління через канали зв'язку або бортові термінали.

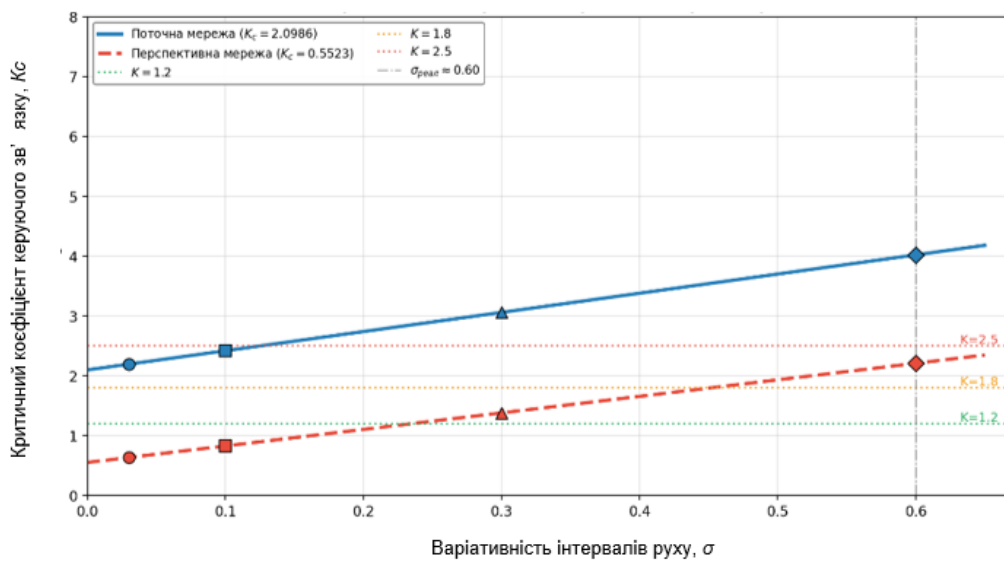


Рисунок 4.1 – Залежність критичного коефіцієнта  $K_c$  від варіативності інтервалів руху

Подальший аналіз критичного коефіцієнта взаємодії ( $K_c$ ) та часу синхронізації системи МПТ ( $t_{sync}$ ) показує, що підвищення інтенсивності маршрутних пересадок і покращення структури маршрутної взаємодії зменшують критичний поріг досягнення узгодженого режиму та скорочують час відновлення координації після збурення (рис. 4.2).

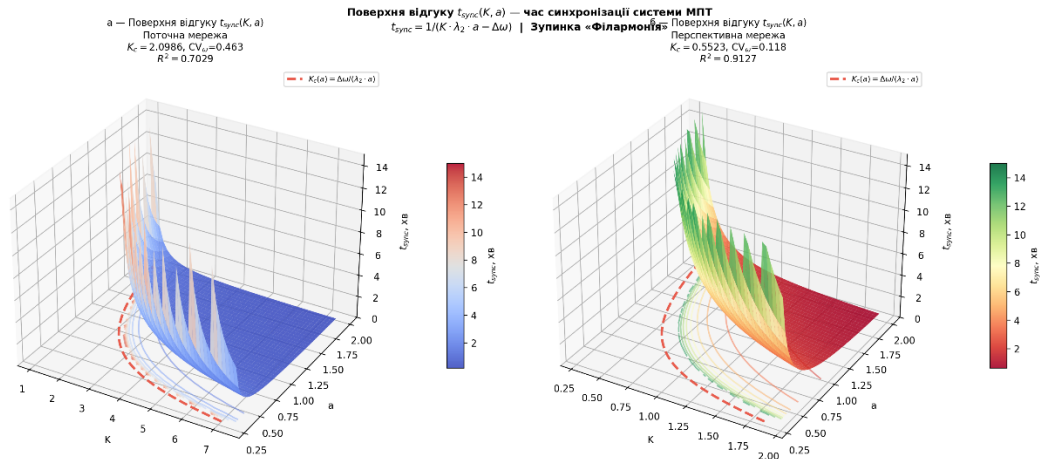


Рисунок 4.2 – Залежність часу синхронізації від коефіцієнта керуючого зв'язку та інтенсивності пересадочних зв'язків для поточної і перспективної маршрутної мережі

Для поточної структури пересадочної взаємодії маршрутів, сформованої на основі матриці маршрутних пересадок, область досяжної синхронізації є обмеженою, оскільки система залишається структурно заблокованою. Для перспективної структури маршрутної взаємодії, що характеризується нижчим значенням критичного коефіцієнту  $K_c$ , область стійкої синхронізації розширюється, а час відновлення координованого стану скорочується. Це свідчить, що зменшення варіативності інтервалів руху, підвищення рівня інтеграції перевізників та удосконалення структури пересадочної взаємодії маршрутів є передумовами підвищення керованості системи МПТ. Якість транспортного обслуговування в пересадочному вузлі доцільно розглядати через показники часу очікування транспортного засобу, часу пересадки та регулярності прибуття маршрутів. У неузгодженому режимі функціонування системи прибуття транспортних засобів має випадковий характер, унаслідок чого зростає варіативність часу очікування та підвищується час пересадки за рахунок збільшення часу очікування пасажирів. У режимі стійкої координації прибуття маршрутів є більш узгодженим, що створює передумови для скорочення часу очікування та підвищення прогнозованості пересадок.

Отримані результати обґрунтовують необхідність переходу до формування практичних рекомендацій, спрямованих на стабілізацію інтервалів руху, підвищення рівня інтеграції перевізників, посилення диспетчерського управління та можливу реструктуризацію маршрутної мережі для зменшення високого рівня дублювання маршрутів.

Для підвищення якості транспортного обслуговування необхідним є впровадження ІАСК, спрямованої на зменшення варіативності інтервалів руху, підвищення рівня інтеграції перевізників, посилення керуючого зв'язку між маршрутами та, у перспективі, можлива реструктуризація маршрутної мережі для зменшення високої концентрації та дублювання маршрутів, підвищення її координаційної здатності.

#### 4.2 Розробка практичних рекомендацій щодо впровадження інтегрованої адаптивної системи координації різних видів МПТ

Практична реалізація розробленої в дослідженні інтегрованої адаптивної системи координації різних видів МПТ розглядається як інструмент впровадження інтегрованих технологій та має передбачати комплекс організаційних, технологічних та управлінських заходів.

За результатами моделювання встановлено, що поточна конфігурація маршрутної мережі в межах ЗП «Філармонія» характеризується високою варіативністю інтервалів руху та низькою алгебраїчною зв'язністю пересадочних зв'язків. Це обмежує можливість переходу системи до режиму фазового захоплення лише за рахунок посилення диспетчерського впливу.

Першочерговим заходом є вирівнювання інтервалів руху маршрутів когерентного ядра до раціонального у досліджуваному вузлі діапазону. Це дозволяє зменшити різномірність власних частот значущих маршрутів і, відповідно, знизити критичний поріг синхронізації, за якого перехід до режиму стійкої координації стає досяжним за помірного рівня керуючого впливу.

Другим напрямом є переорієнтація маршрутів маршрутного таксі з дублюючих магістральних ділянок на підвізні напрямки до вузлових ЗП. Це сприятиме зменшенню концентрації та дублювання маршрутів, підвищенню інтенсивності пересадочних зв'язків та зростанню алгебраїчної зв'язності графа, що призведе до скорочення часу синхронізації системи.

Третім заходом є закріплення у маршрутних завданнях перевізників вимог до регулярності руху на контрольних ЗП. Доцільно встановити цільове допустиме відхилення від розкладу  $\Delta$  на рівні 2 хв., що дозволить забезпечити зниження варіативності інтервалів до рівня, за якого виконується умова керованості (2.13). При цьому зазначені заходи мають впроваджуватися диференційовано для різних типів перевізників. Для міського електротранспорту та комунальних автобусних маршрутів контроль допустимого відхилення може забезпечуватися через централізоване диспетчерське управління та GPS-моніторинг. Для приватних перевізників і маршрутних таксі доцільним є поетапне впровадження вимог до регулярності через умови договорів на перевезення, контроль фактичних прибуттів на ключових ЗП та систему стимулів або відповідальності за недотримання узгодженого режиму руху. Для практичної реалізації зазначених заходів запропоновано впровадження алгоритму підтримки прийняття рішень диспетчером. Таким чином, запропоновані практичні заходи узгоджуються з результатами моделювання, оскільки спрямовані на зменшення варіативності інтервалів руху, підвищення зв'язності маршрутної взаємодії та зниження критичного порогу синхронізації системи МПТ у пересадочному вузлі. Практичний вплив цих заходів на якість транспортного обслуговування проявляється через підвищення регулярності прибуття транспортних засобів, скорочення варіативності часу очікування пасажирів, підвищення прогнозованості пересадок та стабілізацію пересадочного процесу.

Практична реалізація запропонованих заходів потребує розподілу відповідальності між основними учасниками процесу організації міських пасажирських перевезень. Орган управління транспортом має забезпечувати нормативне та організаційне закріплення вимог до регулярності руху, визначення

контрольних ЗП, встановлення допустимих меж відхилення від розкладу та затвердження критеріїв оцінювання якості роботи перевізників. Диспетчерська служба відповідає за поточний моніторинг фактичного руху транспортних засобів, виявлення відхилень від узгодженого режиму, формування керуючих впливів і контроль їх виконання. Перевізники, своєю чергою, мають забезпечувати дотримання встановлених інтервалів руху, надання актуальних GPS-даних, виконання маршрутних завдань та оперативне реагування на диспетчерські рекомендації.

Для міського електротранспорту запропоновані заходи є найбільш реалістичними, оскільки його робота, як правило, регламентується централізованим управлінням, сталими трасами руху та експлуатаційними обмеженнями інфраструктури. Саме тому електротранспорт у межах дослідження розглядається як опорний елемент координації, відносно якого доцільно узгоджувати роботу автобусних маршрутів і маршрутних таксі. Для автобусних маршрутів комунального або інтегрованого перевізника досягнення узгодженого режиму можливе за умови наявності диспетчерського контролю, резерву рухомого складу та технічної можливості оперативного коригування інтервалів руху. Для приватних перевізників і маршрутних таксі впровадження таких вимог має відбуватися поступово, оскільки ця група маршрутів характеризується нижчим рівнем керованості, вищою залежністю від комерційної мотивації та меншою інтеграцією до єдиної системи диспетчерського управління.

Основними ризиками впровадження інтегрованої адаптивної системи координації є нерівномірність пасажиропотоків у пікові періоди, дорожні затримки, обмежена пропускна здатність зупинкових пунктів, недостатній резерв рухомого складу, технічна несумісність інформаційних систем перевізників та можливий опір приватних перевізників зміні режиму роботи. Крім того, для забезпечення ефективності ІАСК необхідною умовою є достовірність даних про фактичний рух транспортних засобів, оскільки саме вони формують основу для оцінювання регулярності, визначення відхилень від розкладу, розрахунку параметра узгодженості та подальшого прийняття диспетчерських рішень.

З метою зменшення зазначених ризиків доцільно передбачити поетапне впровадження ІАСК. На першому етапі рекомендовано здійснювати моніторинг маршрутів когерентного ядра, які формують основну частину пересадочного навантаження у ЗП «Філармонія». На другому етапі доцільно запроваджувати контроль допустимих відхилень від розкладу на контрольних ЗП та формувати диспетчерські рекомендації щодо вирівнювання інтервалів руху. На третьому етапі можливим є розширення системи на інші маршрути пересадочного вузла та закріплення вимог до участі перевізників в інтегрованій координації в умовах договорів на перевезення.

Важливим елементом практичної реалізації запропонованих заходів є використання результатів моніторингу для формування компенсаційного механізму. У цьому випадку ІАСК виконує не лише функцію диспетчерського управління, а й формує доказову базу для оцінювання фактичної роботи перевізників. Дані про виконані рейси, регулярність руху, відхилення від розкладу, участь у координованому режимі та рівень узгодженості маршрутів можуть використовуватися для розрахунку компенсації за виконану транспортну роботу з урахуванням якості наданих послуг. Такий підхід створює економічні стимули для перевізників дотримуватися узгодженого режиму руху, зменшувати варіативність інтервалів і брати участь в інтегрованій координації.

Отже, практичне впровадження ІАСК має базуватися не лише на технічному моніторингу руху транспортних засобів, а й на організаційному закріпленні відповідальності учасників, поетапному залученні перевізників різних форм власності та використанні економічних стимулів. Саме поєднання диспетчерського управління, структурної координації маршрутів і компенсаційного механізму дозволяє перейти від формального контролю виконання рейсів до управління якістю транспортного обслуговування пасажирів у пересадочних вузлах.

Реалізація запропонованих практичних заходів потребує інструментальної підтримки з боку диспетчерської служби. У зв'язку з цим у роботі розроблено алгоритм СППР диспетчера, який не є самостійною практичною рекомендацією, а

розглядається як засіб оперативного впровадження заходів з адаптивної координації різних видів МПТ у пересадочному вузлі.

Інформаційна складова передбачає формування єдиної бази даних про фактичний рух транспортних засобів, пасажиропотоки на маршрутах, інтервали прибуття, відхилення від розкладу, завантаженість пересадочних вузлів, рівень скупчення рухомого складу та час очікування пасажирів під час пересадки.

Диспетчерська складова забезпечується впровадженням алгоритму системи підтримки прийняття рішень (СППР) диспетчером із можливістю АРІ-інтеграції з програмними комплексами оперативного управління централізованої диспетчерської системи (АСДУ), що дозволить автоматизувати оцінку рівня узгодженості параметрів роботи різних видів МПТ на маршрутах та формувати стратегії управління у вигляді рекомендацій та керуючих впливів.

Організаційна складова передбачає забезпечення взаємодії між замовником транспортних послуг, диспетчерськими службами та перевізниками різних форм власності шляхом закріплення правил участі в інтегрованій системі координації в рамках договірних зобов'язань. Економічна складова має забезпечувати використання результатів моніторингу та оцінювання рівня якості транспортного обслуговування для формування компенсаційного механізму для перевізників за виконану транспортну роботу.

На рисунку 4.3 наведено алгоритм СППР диспетчера як інструментальну основу реалізації інтегрованої адаптивної системи координації різних видів МПТ у пересадочних вузлах. Алгоритм функціонує як замкнений контур диспетчерського управління: поточні дані про рух транспортних засобів використовуються для оцінювання фазового стану системи, вибору стратегії управління, формування керуючих впливів і подальшого контролю їх результативності.

Алгоритм СППР диспетчера для адаптивної координації роботи різних видів МПТ у пересадочних вузлах реалізується як замкнений цикл управління: моніторинг – діагностика – прийняття рішень – виконання керуючих впливів – оцінювання результату – коригування.

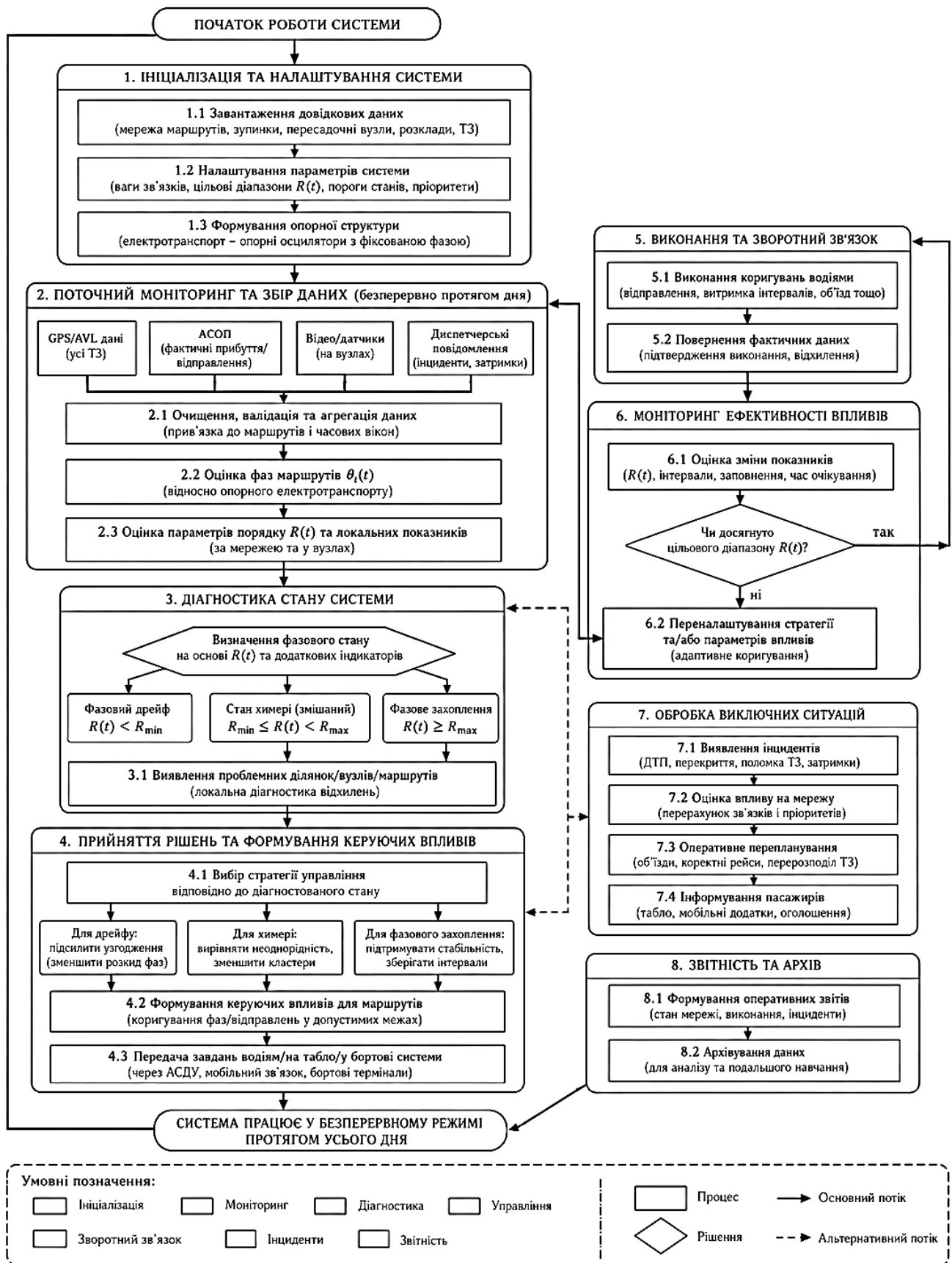


Рисунок 4.3– Алгоритм СППР диспетчера для адаптивної координації роботи різних видів МПТ

Ініціалізація системи здійснюється з завантаження даних про маршруту мережу, ЗП, пересадочні вузли, розклади руху, рухомий склад і параметри моделі. Окремо формується опорна структура системи, у межах якої міський електротранспорт розглядається як група пріоритетних маршрутів із фіксованою або керованою фазою.

По результатах поточного моніторингу роботи маршрутів на основі GPS/AVL-даних, фактичних моментів прибуття та відправлення, диспетчерських повідомлень і даних про стан пересадочних вузлів, отримана інформація проходить обробку, валідацію та прив'язку до маршрутів і часових інтервалів. На її основі визначаються фази маршрутів параметр порядку Курамото ( $R$ ) та локальні показники стану системи. На етапі діагностики за значенням ( $R$ ) і додатковими індикаторами визначається поточний фазовий стан системи і, одночасно, виявляються проблемні маршрути, ділянки або пересадочні вузли, де спостерігаються значні відхилення, скупчення транспортних засобів чи втрата пересадочної узгодженості. Після діагностики ІАСК переходить до формування керуючих впливів. До можливих керуючих впливів належать коригування часу відправлення, інтервалів руху, пріоритетів проходження маршруту або короткочасне утримання транспортного засобу на ЗП. Блок зворотного зв'язку забезпечує контроль виконання прийнятих рішень та оцінювання їх результативності за зміною параметра ( $R$ ), інтервалів руху, рівня заповнення рухомого складу і часу очікування пасажирів. Якщо цільового рівня узгодженості досягнуто, система продовжує роботу в режимі моніторингу; якщо ні – виконується коригування стратегії управління. У разі виникнення виключних ситуацій, зокрема ДТП, перекриття ділянки мережі, поломки транспортного засобу або значних затримок, алгоритм передбачає оперативну оцінку впливу події на роботу пересадочного вузла та формування рекомендацій щодо коригування параметрів руху. Завершальним етапом є архівування даних про стан системи, виконані керуючі впливи, відхилення та інциденти, що створює інформаційну основу для подальшого аналізу, уточнення параметрів моделі, оцінювання роботи перевізників і формування компенсаційного механізму.

Накопичені в ІАСК дані формують інформаційну основу для розрахунку компенсації перевізникам за фактично виконану транспортну роботу з урахуванням якості транспортного обслуговування та рівня участі перевізника в інтегрованій координації маршрутів. На відміну від існуючої системи нарахування компенсацій, за якої компенсація для перевізників, що обслуговують автобусні маршрути, визначається лише за обсягом перевезень пільгового контингенту, запропонована методика передбачає врахування регулярності руху, дотримання узгоджених інтервалів, участі перевізника в ІАСК (дисципліна перевізника), рівня координації та екологічних характеристик рухомого складу.

Таким чином, ІАСК виступає не лише інструментом оперативного диспетчерського управління, а й засобом об'єктивного моніторингу виконання перевізниками договірних зобов'язань. Накопичені дані про фактичні прибуття транспортних засобів, відхилення від розкладу, інтервали руху, обсяг виконаної транспортної роботи, рівень регулярності через координаційну складову якості транспортного обслуговування пасажирів дозволяють перейти від адміністративного контролю до розрахункового організаційно-економічного механізму стимулювання перевізників. Запровадження компенсаційного механізму на основі даних ІАСК створює економічні стимули для перевізників дотримуватися узгодженого режиму руху, надавати фактичні дані про роботу рухомого складу, зменшувати варіативність інтервалів та підтримувати належний рівень регулярності. Це забезпечує перехід від компенсації лише за виконану транспортну роботу до компенсації за результат транспортного обслуговування, який оцінюється через поєднання обсягу перевезень, якості руху та участі перевізника в інтегрованій системі управління.

За розробленою в розділі 2 методикою та за результатами експериментальних досліджень побудуємо графіки залежності суми компенсації перевізникам від значень параметру порядку  $R$  (рис. 4.4) та від коефіцієнту координації перевізника (рис. 4.5) за трьома рівнями інтеграції перевізників до ІАСК: низький рівень ( $\varphi=0,4$ ), середній рівень ( $\varphi=0,75$ ) та повна інтеграція ( $\varphi=1$ ).

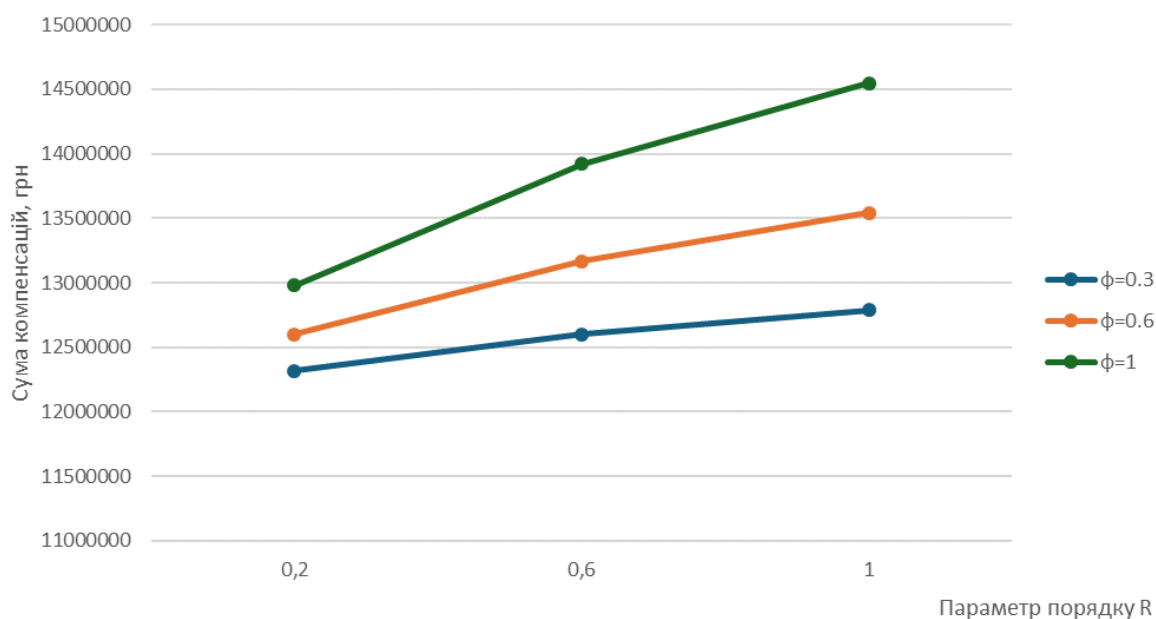


Рисунок 4.4 – Залежність суми компенсації перевізникам від параметру порядку R за рівнями інтеграції перевізників до ІАСК

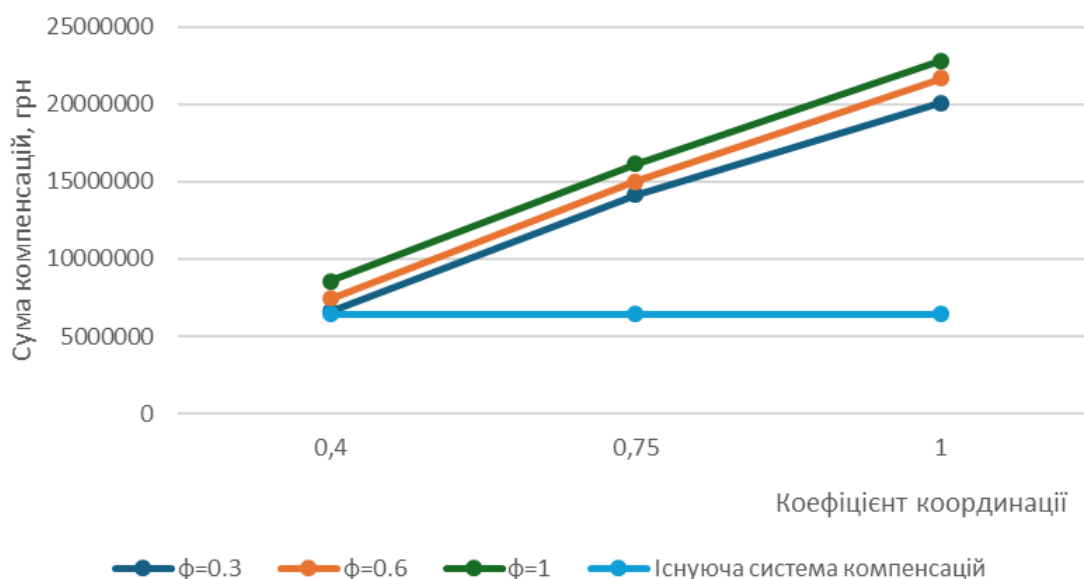


Рисунок 4.5 – Залежність суми компенсації перевізникам від коефіцієнту координації маршруту за рівнями інтеграції перевізників до ІАСК

Отримані результати свідчать про те, що зі зростанням цільової функції – параметра порядку Курамото  $R$ , що відображає ступінь узгодження інтервалів прибуття транспортних засобів на пересадочний вузол, сума компенсації

змінюється залежно від ступеня інтеграції перевізника в систему координації. Для перевізників із вищим рівнем інтеграції компенсаційний механізм має більш виражений стимулюючий характер, оскільки їхня участь у єдиному диспетчерському контурі створює більші можливості для підтримки регулярності руху та скорочення часу очікування пасажирів. Для перевізників із низьким рівнем інтеграції вплив параметра  $R$  на обсяг компенсації є обмеженим, що відображає нижчий рівень керованості та меншу участь у реалізації інтегрованої координації МПТ.

До того ж, запропонована система забезпечує пряму залежність фінансової винагороди перевізникам від якості виконання координаційних рекомендацій ІАСК. При досягненні перевізником середнього значення за місяць коефіцієнту координації ( $\bar{K}_{i\text{coord}}=1$ ) за маршрутом/сукупністю маршрутів за умови повної інтеграції перевізників ( $\varphi=1,0$ ) сума компенсації у 3,5 рази перевищує поточний рівень фінансування за перевезення пільгового контингенту. На відміну від існуючої системи, де розмір компенсації не залежить від якості транспортного обслуговування, запропонований механізм забезпечує умови економічного стимулювання для перевізників щодо дотримання координаційних рекомендацій диспетчера і добровільного розширення кола учасників ІАСК. Запропонований механізм компенсації реалізує принцип синергетичного ефекту інтеграції перевізників у ІАСК, кожен новий учасник системи підвищує частку інтегрованих перевізників  $\varphi$ , що через зростання параметра порядку  $R$  збільшує системний бонус тим самим підвищує рівень компенсації усіх існуючих учасників. Таким чином, індивідуальна раціональність кожного перевізника збігається з колективною раціональністю системи (максимізація  $R$  через  $\varphi \rightarrow 1,0$ ), що є ознакою синергії координації економічних інтересів учасників транспортного процесу.

Таким чином, запропонований фінансовий механізм компенсації перевізникам за фактично виконану транспортну роботу дозволяє враховувати не лише обсяг наданих транспортних послуг, а й фактичну якість їх виконання, рівень участі перевізника в інтегрованій системі координації та екологічні характеристики рухомого складу в межах договірних зобов'язань. Запропонована методика до

розрахунку компенсації перевізникам переводить результати функціонування ІАСК у кількісний економічний показник, який може бути використаний організатором перевезень при формуванні договірних умов із перевізниками. Такий підхід забезпечує узгодження інтересів пасажирів, перевізників і замовника транспортних послуг, сприяє збалансуванню транспортної пропозиції, підвищенню якості транспортного обслуговування та реалізації принципів сталої міської мобільності.

### Висновки по четвертому розділу

1. За результатами факторного аналізу встановлено, що ключовим параметром, який обмежує досягнення стійкої фазової узгодженості маршрутів у ЗП «Філармонія», є варіативність інтервалів руху. Дисперсійний аналіз підтвердив статистично значущий вплив цього фактора на координаційну складову якості транспортного обслуговування пасажирів. За існуючої структури пересадочних зв'язків у межах ЗП «Філармонія» система залишається структурно заблокованою у неузгодженому стані, що зумовлено низькою алгебраїчною зв'язністю графа пересадочних зв'язків та обмеженою здатністю мережі до поширення координуючих впливів.

2. Сформовано практичні рекомендації щодо впровадження інтегрованої адаптивної системи координації різних видів МПТ. До першочергових заходів віднесено вирівнювання інтервалів руху маршрутів когерентного ядра до для досліджуваного вузла діапазону, переорієнтацію маршрутів маршрутного таксі з дублюючих магістральних ділянок на підвізні напрямки до вузлових ЗП, а також закріплення у маршрутних завданнях перевізників вимог до регулярності руху з допустимим відхиленням від розкладу 2 хв. на контрольних ЗП.

3. Запропоновано організаційно-технологічну схему впровадження ІАСК, яка забезпечує інформаційну, диспетчерську, організаційну та економічну підтримку інтегрованої координації перевізників.

Результати даних досліджень були опубліковані в роботах [4, 5, 17-18].

## ВИСНОВКИ

1. Аналіз теоретичних підходів показав, що існуючі методи підвищення якості транспортного обслуговування переважно спрямовані на оцінювання окремих параметрів перевезень або координацію маршрутів одного виду транспорту. В умовах дублювання маршрутів, нерівномірності транспортної пропозиції та різного рівня керованості перевізників якість обслуговування формується через взаємодію різних видів МПТ у пересадочних вузлах. Це обумовлює необхідність розвитку інтегрованих технологій, орієнтованих на адаптивну координацію маршрутів відповідно до принципів сталої міської мобільності. Як науково-методичну основу такого підходу визначено мережеву синхронізацію, що дозволяє формалізувати динамічну взаємодію маршрутів і розробити мережево-динамічну модель інтегрованої координації МПТ.

2. Сформовано теоретико-методичні засади інтегрованої адаптивної координації різних видів МПТ у пересадочних вузлах. Обґрунтовано структуру ІАСК як сукупності інформаційних, аналітичних, диспетчерських, організаційних та економічних рішень, що базуються на використанні даних про фактичний рух транспортних засобів, інтервали прибуття, відхилення від розкладу, пасажиропотоки та завантаження пересадочних вузлів. Функціонування системи запропоновано реалізовувати за замкненим циклом: моніторинг – діагностика – прийняття рішень – виконання керуючих впливів – оцінювання результатів – коригування.

Розроблено мережево-динамічну модель координації МПТ на основі адаптованої моделі Курамото, у якій маршрути представлені як фазові осцилятори, пересадочні зв'язки визначають їх взаємодію, а міський електротранспорт розглядається як опорний елемент системи. Адаптовано класифікацію фазових станів системи до задачі координації різних видів МПТ, що дозволяє ідентифікувати неузгоджений, частково узгоджений та узгоджений режими функціонування транспортної системи за рівнем узгодженості інтервалів прибуття транспортних засобів у пересадочний вузол. Сформовано організаційно-

економічний механізм реалізації інтегрованих технологій на МПТ, що передбачає адаптацію підходу PSO до умов України та методику розрахунку компенсації перевізникам з урахуванням якості наданих послуг.

3. Сформовано емпіричну базу експериментальних досліджень на прикладі ЗП «Філармонія» у м. Хмельницькому, що функціонує як перевантажений пересадочний вузол із високою концентрацією маршрутів, інтенсивними пересадками та нерівномірністю прибуття транспортних засобів у пікові періоди. Актуалізовано та верифіковано транспортну модель м. Хмельницького в середовищі PTV Visum, що дозволило сформувати матрицю маршрутних пересадок і визначити параметри мережево-динамічної моделі. За нормалізованою ентропією Шеннона (0,6726) встановлено помірну нерівномірність розподілу пересадок між маршрутами, що обґрунтувало виділення когерентного ядра з дев'яти найбільш значущих маршрутів, які формують основну частину пересадочного навантаження у вузлі. На основі матриці маршрутних пересадок побудовано зважений граф пересадочної взаємодії маршрутів когерентного ядра. Значення числа Фідлера (0,0079) свідчить про низьку алгебраїчну зв'язність графа та обмежену здатність мережі до поширення координуючих впливів.

Розроблено модуль парсингу даних EasyWay для автоматизованої фіксації фактичних і прогнозованих моментів прибуття транспортних засобів та імітаційну модель координації різних видів МПТ у пересадочному вузлі мовою Python. За результатами моделювання встановлено низький рівень фазової узгодженості маршрутів у поточному режимі функціонування ЗП «Філармонія»: середнє значення  $R_{\text{mod}}$  (0,245) при стандартному відхиленні (0,123), а система перебуває у неузгодженому стані 88,5 % часу. Це підтверджує відсутність стійкої координації маршрутів без застосування керуючих впливів.

4. За результатами факторного аналізу встановлено, що ключовим параметром, який обмежує досягнення стійкої фазової узгодженості маршрутів у ЗП «Філармонія», є варіативність інтервалів руху. Дисперсійний аналіз повнофакторного експерименту підтвердив статистично значущий вплив цього фактора на координаційну складову якості транспортного обслуговування,

прийнятого в роботі модифікованого параметру порядку ( $R_{\text{mod}}$ ) з урахуванням часових зсувів для недопущення повної синхронізації інтервалів руху та скупченню транспортних засобів на ЗП або пересадочному вузлі. За існуючої структури пересадочних зв'язків система залишається схильною до неузгодженого фазового стану, що зумовлено низькою алгебраїчною зв'язністю графа маршрутної взаємодії та обмеженою здатністю мережі до поширення координуючих впливів.

На основі отриманих результатів сформовано практичні рекомендації щодо впровадження ІАСК роботи різних видів МПТ, які передбачають вирівнювання інтервалів руху маршрутів когерентного ядра до раціонального для досліджуваного вузла діапазону, переорієнтацію дублюючих маршрутів маршрутного таксі на підвізні напрямки до вузлових ЗП, закріплення вимог до регулярності руху на контрольних ЗП, використання СППР диспетчера та результатів моніторингу для розрахунку компенсації перевізникам з урахуванням якості обслуговування. Запропонований підхід спрямований на узгодження інтересів пасажирів, перевізників і замовника транспортних послуг, підвищення регулярності руху, прогнозованості пересадок та якості транспортного обслуговування відповідно до принципів сталої міської мобільності.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Потаман Н. В., Орда О. О., Орда О. М. Аналіз аспектів планування сталої міської мобільності в контексті євроінтеграційних реформ в Україні // *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки* 2024. 10(41), Ч II. С. 189–195. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.188-195](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.188-195)
2. Орда О. О., Орда О. М. Методика формування раціональної технології перевезень пасажирів міським пасажирським транспортом // *Комунальне господарство міст*. 2025, Т. 3, Вип. 191, С. 650-656 DOI: 10.33042/2522-1809-2025-3-191-650-656
3. Potaman N., Hamed A., Orda O. Adaptation of European experience in compensation mechanisms for public transport operators in urban public transport in Ukraine // *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2026, 13(44), 451–461, DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13\(44\).451-461](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13(44).451-461)
4. Yashchuk, Y., Orda, O., Orda, O., Butko, T. Adaptive Management of Urban Intermodal Hubs Under Risk: A Crowdsourced Demand Forecasting Approach. / In: Sierpiński, G., Naumann, S., Macioszek, E. (eds) // *Transport Systems Development – Methods and Solutions. TSTP 2025. Lecture Notes in Networks and Systems*, 2026, Vol. 1789. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-032-14826-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-032-14826-1_7)
5. Orda O.M., Pavlenko O.V. The formalization of the process of coordinating the operation of different modes of urban passenger transport based on a network-dynamic model // *Automobile Transport*. 2026. (58). 94–103. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2026.58.0.11>
6. Нагорний Є. В., Орда О. О., Орда О. М. Аналіз стану та розвитку інтегрованих технологій перевезень пасажирів міським електротранспортом. // *Інтелектуальні транспортні технології: зб. матеріалів 3-ї Міжнар. наук.-техн. конф., Харків, 22–23 листопада 2022 р.* Харків: УкрДУЗТ, 2022. С. 81-83.
7. Нагорний Є. В., Орда О. М. Щодо питання впровадження інтегрованих технологій на міському пасажирському транспорті. // *79-а Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників*

- відокремлених структурних підрозділів університету: зб. тез доп., м. Київ, 17–19 трав. 2023 р. Київ: НТУ, 2023. Вип. 79. С. 112.*
8. Nahorniye Ye., Orda O. Using of logistics approach in the organisation of transport services by public passenger transport // *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика: матеріали 19-ї міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 1–2 черв. 2023 р. Харків: УкрДУЗТ, 2023. С. 166.*
  9. Нагорний Є. В., Орда О. М. Аналіз теоретичних підходів підвищення якості транспортного обслуговування населення міст міським пасажирським транспортом // *Збірник тез доповідей 86-ї науково-технічної та науково-методичної конференції університету. Секція транспортних технологій, Харків, 10–11 трав. 2023 р. Харків: ХНАДУ, 2023. С. 3–5.*
  10. Нагорний Є. В., Орда О. М. Роль інтелектуальних транспортних систем у вирішенні проблем міської мобільності // *Інтелектуальні транспортні технології : тези доп. 4-ї Міжнар. наук.-техн. конф, Харків, 27–28 листоп. 2023 р. Харків: УкрДУЗТ, 2023. С. 147.*
  11. Орда О. М. Принципи формування інтегрованих технологічних процесів функціонування пасажирського електротранспорту // *Збірник матеріалів доповідей 86-ї Міжнародної наукової конференції студентів. Секція транспортних технологій. Харків, 08–12 квіт. 2024 р., Харків: ХНАДУ, 2024. С. 164–166.*
  12. Орда О. О., Орда О. М. Основні напрями підвищення якості транспортного обслуговування населення міст за рахунок впровадження інтегрованих технологій на пасажирському транспорті // *Стратегія якості в промисловості і освіті: матеріали XVIII міжнар. конф. Варна, Болгарія, 03–06 черв. 2024 р., Технічний університет – ТУ Варна, 2024. С. 373–376.*
  13. Потаман Н. В. , Орда О. О., Орда О. М. Аспекти планування сталої міської мобільності в контексті євроінтеграційних реформ в Україні // *Автошляховик України. 2023. Окремий випуск 277'2023 : зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф.*

- «Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури», Київ, 5–7 груд. 2023 р. С. 52–55. DOI: 10.33868/0365-8392-2023-277
14. Орда О. О., Орда О. М. Аналіз практик імплементації політик сталого транспорту на прикладі Чехії та їх перспектив в Україні // *Збірник матеріалів 89-ї науково-технічна та науково-методична конференція ХНАДУ. Секція транспортних технологій*. Харків, 07–11 квіт. 2025 р. Харків: ХНАДУ, 2025. С. 177–180.
15. Орда О. М. Обґрунтування методології моделювання інтегрованих технологій на міському пасажирському транспорті // *Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету* : зб. тез доп. 13–15 трав. 2025 р., Київ: НТУ, 2025. Вип. 81. С. 378–379.
16. Павленко О. В., Орда О. М. Модель інтегрованої системи обслуговування населення міським громадським пасажирським транспортом // *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустриальні центри та корпоративна логістика* : матеріали 21-ї міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 5–6 черв. 2025 р. Харків: УкрДУЗТ, 2023. С. 171–174.
17. Yashchuk, Y., Orda, O., Orda, O., Butko, T. Adaptive Management of Urban Intermodal Hubs Under Risk: A Crowdsourced Demand Forecasting Approach // *Transport Systems Development – Methods and Solutions. TSTP 2025: Book of Abstracts of the 21st Scientific and Technical Conference Transport Systems Theory and Practice*, September 9-10, 2025, Katowice. P. 59.
18. Ящук Ю. І., Орда О. М. Архітектура адаптивного управління міськими інтермодальними хабами в умовах ризику // *Інновації у системах управління безпекою та дорожнім рухом*: зб. тез доп. VI міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 18–19 листоп. 2025 р., Харків: ХНАДУ, 2025. С. 81–83.
19. Давідіч Н. В. Моделі та методи планування управління якістю в проектах міського пасажирського транспорту : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.22. Харків, 2018. 252 с.

20. Про транспорт : Закон України від 10.11.1994 № 232/94-ВР : станом на 01.01.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/232/94-вр/ed20240101#Text> (дата звернення: 15.10.2025).
21. Про автомобільний транспорт : Закон України від 05.04.2001 № 2344-III. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2344-14#Text> (дата звернення: 15.10.2025).
22. Про міський електричний транспорт : Закон України від 29.06.2004 № 1914-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1914-15#Text> (дата звернення: 15.10.2025).
23. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025–2027 роках : Постанова Кабінету Міністрів України; Стратегія, План, Заходи, Перелік від 27.12.2024 № 1550 : чинна, поточна редакція від 09.01.2026 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1550-2024-п> (дата звернення: 26.05.2025).
24. Маркетингове забезпечення сталого розвитку міського громадського транспорту: монографія / ред. Т. М. Борисова, Г. Л. Монастирський. Тернопіль: Економічна думка, 2019. 220 с.
25. Розумна система міського пасажирського транспорту як складова Smart City: монографія // Башинська І. О., Філіппов В. Ю. Харків: Вид-во «Діса плюс», 2018. 220 с.
26. Сайт «ПроМобільність» URL: <https://pro-mobility.org> (дата звернення 20.05.2025)
27. Вдовиченко В. О. Розвиток науково-технологічних основ взаємодії міського пасажирського транспорту в транспортно-пересадочних вузлах : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.01. Харків, 2019. 472 с.
28. Han Y., Li W., Wei S., Zhang T. Research on Passenger's Travel Mode Choice Behavior Waiting at Bus Station Based on SEM-Logit Integration Model. *Sustainability*. 2018. Vol. 10, No. 1996. DOI: 10.3390/su10061996.

29. Tao S., Corcoran J., Mateo-Babiano I. Modelling loyalty and behavioural change intentions of busway passengers: A case study of Brisbane, Australia // *IATSS Research*. 2017. Vol. 41. P. 113–122. DOI: 10.1016/j.iatssr.2017.03.001.
30. Pencheva V., Asenov A., Georgiev I. Multiobjective modelling in choice of route and vehicle for public city transportation for minimum travel time, low cost and energy consumption // *7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE)*. Ruse, 2020. Article 9279062. DOI: 10.1109/EEAE49144.2020.9279062.
31. Moslem S., Alkharabsheh A., Ismael K., Duleba S. An integrated decision support model for evaluating public transport quality // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, No. 4158. P. 1–19. DOI: 10.3390/app10124158.
32. Khudhair H. A., Alsadik S. M., Jameel A. K. Estimation of transportation service quality for selected groups of users using customer satisfaction index // *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2021. Vol. 9. P. 325–332. DOI: 10.21533/pen.v9i2.1852.
33. Rosca C.-M., Stancu A., Neculau C.-F., Gortoescu I.-A. Designing and Implementing a Public Urban Transport Scheduling System Based on Artificial Intelligence for Smart Cities // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, Issue 19. Article 8861. DOI: 10.3390/app14198861.
34. Tundys B., Wiśniewski T. Smart Mobility for Smart Cities: Electromobility Solution Analysis and Development Directions // *Energies*. 2023. Vol. 16, Issue 4. Article 1958. DOI: 10.3390/en16041958.
35. Лобашов О. О., Ольхова М. В., Галкін А. С. та ін. Розумний транспорт і логістика для міст : навч. посіб. Житомир, 2021. 612 с.
36. Nguyen M. H. Evaluating the Service Quality of the First Bus Rapid Transit Corridor in Hanoi City and Policy Implications // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Vol. 108. P. 98–123. DOI: 10.1007/978-3-030-60269-7\_6.
37. Tiznado-Aitken I., Lucas K., Muñoz J. C., Hurtubia R. Understanding accessibility through public transport users' experiences: A mixed methods approach // *Journal of*

- Transport Geography*. 2020. Vol. 88. Article 102857. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2020.102857.
38. Cats O., Abenoza R. F., Liu C., Susilo Y. O. Evolution of satisfaction with public transport and its determinants in Sweden: Identifying priority areas // *Transportation Research Record*. 2015. Vol. 2538. P. 86–96. DOI: 10.3141/2538-10.
  39. Callejas-Cuervo M., Valero-Bustos H. A., Alarcón-Aldana A. C., Mikušova M. Measurement of Service Quality of a Public Transport System Through Agent-Based Simulation Software // *Studies in Computational Intelligence*. 2020. Vol. 830. P. 335–347. DOI: 10.1007/978-3-030-14132-5\_27.
  40. De Oña J., De Oña R. Quality of service in public transport based on customer satisfaction surveys: A review and assessment of methodological approaches // *Transportation Science*. 2015. Vol. 49. P. 605–622. DOI: 10.1287/trsc.2014.0544.
  41. Jen W., Tu R., Lu T. Managing passenger behavioral intention: An integrated framework for service quality, satisfaction, perceived value, and switching barriers // *Transportation*. 2011. Vol. 38. P. 321–342. DOI: 10.1007/s11116-010-9306-9.
  42. Bajčetić S., Tica S., Živanović P., Milovanović B., Đorojević A. Analysis of public transport users' satisfaction using quality function deployment: Belgrade case study // *Transport*. 2018. Vol. 33. P. 609–618. DOI: 10.3846/16484142.2017.1306870.
  43. Cyril A., Mulangi R. H., George V. Performance Optimization of Public Transport Using Integrated AHP–GP Methodology // *Urban Rail Transit*. 2019. Vol. 5. P. 133–144. DOI: 10.1007/s40864-019-0103-2.
  44. Shang H., Liu Y., Huang H., Guo R. Vehicle Scheduling Optimization Considering the Passenger Waiting Cost // *Journal of Advanced Transportation*. 2019. Vol. 2019. Article 4212631. DOI: 10.1155/2019/4212631.
  45. Давідич Ю. О. Розробка розкладу руху транспортних засобів при організації пасажирських перевезень : навч. посіб. Харків : ХНАМГ, 2010. 345 с.
  46. Вдовиченко В. О. Методологічні основи формування системної ефективності громадського пасажирського транспорту в умовах сталого розвитку : монографія. Харків, 2017. 212 с.

47. Воліков В. В., Вдовиченко В. О. Транспортна інфраструктура Харкова: аналіз та основні тенденції // *Бізнес Інформ*. 2017. № 12(479). С. 292–299.
48. Wu P., Li Y., Li C. Invulnerability of the Urban Agglomeration Integrated Passenger Transport Network under Emergency Events // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023. Vol. 20. Article 450. DOI: 10.3390/ijerph20010450.
49. Chan H.-Y., Xu Y., Chen A., Zhou J. Choice and equity: A critical analysis of multi-modal public transport services // *Transport Policy*. 2023. Vol. 140. P. 114–127. DOI: 10.1016/j.tranpol.2023.06.003.
50. Rabay L., Andrade N. P. D. The use of different fare values as a demand transfer strategy in urban public transportation systems. *Urbe // Revista Brasileira de Gestão Urbana*. 2019. Vol. 11. Article e20180024. DOI: 10.1590/2175-3369.011.e20180024.
51. Григорова Т. М., Давідіч Ю. О., Доля В. К. Визначення факторів, які впливають на вибір пасажирями виду приміського транспорту // *Вісник Національного технічного університету “ХПІ”*. Серія: *Механіко-технологічні системи та комплекси*. 2015. № 21(1130). С. 29–37.
52. Горбачов П. Ф., Макарічев О. В., Россолов О. В., Любий Є. В., Чижик В. М. Аналітична оцінка мінімальних та максимальних витрат часу пасажирів на зупинці міського маршруту // *Автомобільний транспорт*. 2013. Вип. 32. С. 67–71.
53. 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.
54. 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). P. 47–53. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.103333.
55. Синхронізація розкладів руху міського громадського транспорту у пересадочному вузлі з використанням генетичних алгоритмів / Ю. І. Мельнікова, В. С. Наумов, І. О. Таран, Д. П. Бовін // *Сучасні технології в*

машинобудуванні та транспорті. 2024. № 2 (23). С. 180–187.  
<https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1540> .

56. 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. Vol. 124. P. 310–333. DOI: 10.1016/j.tra.2019.04.002.
57. Chen M.-C., Hsu C.-L., Huang C.-H. Applying the Kano model to investigate the quality of transportation services at mega events // *Journal of Retailing and Consumer Services*. 2021. Vol. 60. 102442. DOI: 10.1016/j.jretconser.2021.102442.
58. Вакуленко К. Є., Доля К. В. Управління міським пасажирським транспортом : навч. посіб. Харків. 2015. 257 с.
59. Liu Y., Jia Y., Feng X., Wu J. Bus Route Design with a Bayesian Network Analysis of Bus Service Revenues // *Mathematical Problems in Engineering*. 2018. Vol. 2018. 5176920. DOI: 10.1155/2018/5176920.
60. Sustainable urban mobility planning and monitoring / European Commission. URL: [https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/urban-transport/sustainable-urban-mobility-planning-and-monitoring\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/urban-transport/sustainable-urban-mobility-planning-and-monitoring_en) (дата звернення: 26.02.2026).
61. Sustainable and Smart Mobility Strategy: putting European transport on track for the future / European Commission. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2020: веб-сайт. URL: [https://transport.ec.europa.eu/document/download/be22d311-4a07-4c29-8b72-d6d255846069\\_en](https://transport.ec.europa.eu/document/download/be22d311-4a07-4c29-8b72-d6d255846069_en) (дата звернення: 26.02.2026).
62. Паливода О. М. Management of Sustainable and Smart Mobility in European Cities in the Context of Sustainable Development of Urban Areas // *Problems of Modern Transformations. Series: Economics and Management*. 2023. № 10. <https://doi.org/10.54929/2786-5738-2023-10-03-04>
63. Інтегрування планів сталої міської мобільності (ПСММ/SUMP) з планами дій сталого енергетичного розвитку та клімату (ПДСЕРК/SECAP). 2023. Вип. №. : веб-сайт. URL: <https://enefcities.org.ua/upload/files/Publications/Urban%20Mobility/casestudy.pdf> (дата звернення: 26.02.2026).

64. Порадник «Місцеві зелені курси. План дій». DiXi Group: веб-сайт. URL: <https://dixigroup.org/analytic/poradnyk-miscevi-zeleni-kursy-plan-dij/> (дата звернення: 26.02.2026).
65. План сталої міської мобільності. Сучасні політики у сфері міської мобільності. City Trans UA: веб-сайт. URL: <https://citytransua.com/wp-content/uploads/Гроп-Могила-План-сталлої-міської-мобільності.pdf> (дата звернення: 26.02.2026).
66. Трансформація сталої мобільності. TUMI. 2023 : веб-сайт. URL: <https://transformative-mobility.org/трансформація-сталлої-мобільності/> (дата звернення: 26.02.2026).
67. Sustainable transport // United Nations Sustainable Development : веб-сайт. URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/topics/sustainabletransport> (дата звернення: 01.03.2026).
68. Porru S., Misso F. E., Pani F. E., Repetto C. Smart mobility and public transport: Opportunities and challenges in rural and urban areas // *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2020. Vol. 7 (1). 88–97. DOI: 10.1016/j.jtte.2019.10.002.
69. Rosca C.-M., Stancu A., Neculau C.-F., Gortoescu I.-A. Designing and Implementing a Public Urban Transport Scheduling System Based on Artificial Intelligence for Smart Cities // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14 (19). 8861. DOI: 10.3390/app14198861.
70. Транспортна модель агломерацій. Децентралізація. URL: <https://decentralization.gov.ua/news/15211> (дата звернення: 01.03.2026).
71. ITF. Integrating Public Transport into Mobility as a Service: Summary and Conclusions. ITF Roundtable Reports, No. 184. OECD Publishing, Paris, 2021. DOI: 10.1787/94052f32-en.
72. Ломотько Д. В., Красноштан О. М., Кава О. С. Шляхи відновлення логістики приміських пасажирських залізничних перевезень на неелектрифікованих ділянках залізниці // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2022. Т. 27 № 4. С. 41–47. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v27i4.271466>

73. Ломотько Д. В., Примаченко Г. О. Методологічний підхід до формалізації процесу функціонування динамічних мультимодальних транспортних систем // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2021. Т. 26, № 1. DOI: 10.18664/iksz.v26i1.229070.
74. Liu T., Ceder A., Chowdhury S. Integrated public transport timetable synchronization with vehicle scheduling. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2017. DOI: 10.1080/23249935.2017.1353555.
75. Fonseca J. P., van der Hurk E., Roberti R., Larsen A. A matheuristic for transfer synchronization through integrated timetabling and vehicle scheduling. *Transportation Research Part B*, 2018. DOI: 10.1016/j.trb.2018.01.012.
76. Yang Y., Cheng J., Liu Y. An overview of solutions to the bus bunching problem in urban bus systems. *Frontiers of Engineering Management*. 2024. DOI: 10.1007/s42524-024-0297-1.
77. Hernández S. Urban transport interchanges: A methodology for evaluating perceived quality // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2016. Vol. 84. P. 31–43. DOI: 10.1016/j.tra.2015.08.008.
78. Jin H. Dynamic Evaluation for Subway–Bus Transfer Quality Referring to Benefits, Convenience, and Reliability // *Sustainability*. 2025. Vol. 17, № 15. Article 6684. DOI: 10.3390/su17156684.
79. Sustainable urban mobility / European Commission : веб-сайт. URL: [https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/urban-transport/sustainable-urban-mobility\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/urban-transport/sustainable-urban-mobility_en) (дата звернення: 10.03.2026)
80. Voitov, A., Karnaukh, M., Berezhna, N., Kryvenko, L., Muzylyov, D. Urban Traffic Flow Sustainability Assessment Due to Dynamic Changes in Influential Factors. In: Slavinska, O., Danchuk, V., Kunytska, O., Hulchak, O. (eds) *Intelligent Transport Systems: Ecology, Safety, Quality, Comfort*. ITSESQC 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 1336. 2025. *Springer, Cham*. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-87379-9\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-031-87379-9_10)

81. Koli O., Liubyi Ye. Research of changes in transport mobility of the population during the pandemic // *Municipal Economy of Cities*. 2022. 4(171). С. 185–190 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-4-171-185-190>
82. Нагорний Є. В., Абрамова Л. С. Концептуальний підхід до проектування систем управління дорожнім рухом // *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2017. № 12. С. 99–105.
83. Dydkowski G., Urbanek A. The impact of an integrated fare system on the public transport market // *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*. 2023. № 74(146). DOI: 10.17402/560
84. Bıyık C., Allam Z., Pieri G., Moroni D., O’Fraifer M., O’Connell E., Olariu S., Khalid M. Smart mobility adoption: A review of the literature // *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. 2021. Vol. 7, Issue 2. 146. DOI: 10.3390/joitmc7020146.
85. The optimal ways of complementing public transport with shared and on-demand mobility / European Commission. 2024. URL: [https://transport.ec.europa.eu/document/download/2476beda-4ffd-4608-89f3-973013c47f60\\_en](https://transport.ec.europa.eu/document/download/2476beda-4ffd-4608-89f3-973013c47f60_en) (дата звернення: 10.03.2026).
86. Кашканов А. А., Пальчевський О. В. Роль комплексного підходу в побудові ефективної системи інтелектуального управління транспортною мережею // *Автошляховик України*. 2024. № 2(279). С. 2–11. DOI: 10.33868/0365-8392-2024-2-279-2-11
87. Public Transport Integration and Transit Alliances / Sustainable Urban Transport Project ; TUMI ; GIZ. 2024. URL: <https://sutp.org/publications/sutp-module-3f-public-transport-integration-and-transit-alliances/> (дата звернення: 10.03.2026).
88. Shulika, O., Kucharski, R. Can we start sharing our rides again? The post-pandemic ride-pooling market // *Transport and Telecommunication*, 2025, Vol. 26, no. 2, 194–207. DOI 10.2478/ttj-2025-0016
89. Horjus J. S., Gkiotsalitis K., Nijënstein S., Geurs K. T. Integration of shared transport at a public transport stop: mode choice intentions of different user segments at a

- mobility hub // *Journal of Urban Mobility*. 2022. Vol. 2. 100026. DOI: 10.1016/j.urbmob.2022.100026.
90. Kuramoto Y., Araki H. (Ed.) *Lecture Notes in Physics, International Symposium on Mathematical Problems in Theoretical Physics*. Vol. 39. *New York: Springer-Verlag*, 1975. 420 p.
91. Dörfler F., Bullo F. Synchronization in complex networks of phase oscillators: A survey. *Automatica*. 2014. Vol. 50(6). P. 1539–1564. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2014.04.012>
92. Абрамова Л. С. Теоретичні основи формування розподілених систем управління дорожнім рухом у містах : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.01. Харків, 2020. 375 с.
93. Predic B., Rancic D., Stojanovic D., Milosavljevic A., Automatic Vehicle Location in Public Bus Transportation System // *Proc. 11th WSEAS International Conference on COMPUTERS*, WSEAS, 2007, P. 675–680.
94. Hakimi Ibrahim A. N., Borhan M. N., Mat Yazid M. R. Automatic Vehicle Location (AVL): Evaluation on the Punctuality Index of City Public Bus Service // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023. Vol. 507. P. 73–84. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-8703-8\\_7](https://doi.org/10.1007/978-981-19-8703-8_7)
95. EasyWay : сервіс GPS-моніторингу транспорту. URL: <https://gps.easyway.info/api> (дата звернення: 10.10.2025).
96. Influence of public transport quality attributes on user satisfaction of different age cohorts / V. B. Tavares, S. T. Lucchesi, A. M. Larranaga, H. B. B. Cybis // *Case Studies on Transport Policy*. 2021. Vol. 9, iss. 3. P. 1042–1050. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2021.04.018>
97. General Transit Feed Specification (GTFS) : офіційна документація. URL: <https://gtfs.org/documentation/overview> (дата звернення: 15.11.2025).
98. Abenoza R. F. Determinants of traveler satisfaction: Evidence for non-linear and asymmetric effects / R. F. Abenoza, O. Cats, Y. O. Susilo // *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2019. Vol. 64. P. 339–356. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2019.09.009>

99. Shulika O. Spatiotemporal variability of ride-pooling potential – Half a year New York City experiment / O. Shulika, M. Bujak, F. Ghasemi, R. Kucharski // *Journal of Transport Geography*. 2024. Vol. 114. 103767. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2023.103767>
100. Markevych A., Vdovychenko V., Ivanov I. Influence of bus service downtime in the transport interchange on the duration of inter-route transfer of passengers // *Technology Audit and Production Reserves*. 2021. 3(2(59)). P. 41–45. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.231465>
101. Rezazada, M., Nassir, N., Tanin, E., & Ceder, A. Bus bunching: a comprehensive review from demand, supply, and decision-making perspectives // *Transport Reviews*, 2024. 44(4), 766–790. <https://doi.org/10.1080/01441647.2024.2313969>.
102. Kuramoto Y., Battogtokh D. Coexistence of coherence and incoherence in non-locally coupled phase oscillators // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. 2002. 5(4). P. 380–385.
103. Acebrón J. A., Bonilla L. L., Pérez Vicente C. J., Ritort F., Spigler R. The Kuramoto model: a simple paradigm for synchronization phenomena // *Reviews of Modern Physics*. 2005. 77(1). P. 137–185. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.77.137>
104. Kyman A. Devising of a method for analysing the propagation speed of car flows in a train formation plan based on synchronisation theory in complex networks / A. Kyman, A. Prokhorchenko, A. Panchenko, S. Zolotarov, M. Kravchenko, H. Prokhorchenko, O. O. Orda // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 5, № 3 (137). P. 56–67. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.341559>
105. Bell M. G. H., Kurauchi F., Perera S., & Wong W. Investigating transport network vulnerability by capacity weighted spectral analysis // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2017. 99. P. 251–266. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.03.002>
106. Saw V. L. Bus bunching as a synchronisation phenomenon / V. L. Saw, N. N. Chung, W. L. Quek, Y. E. I. Pang, L. Y. Chew // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. Article 6887. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43310-7>

107. Daganzo C. F. A headway-based approach to eliminate bus bunching: systematic analysis and comparisons // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2009. Vol. 43, No. 10. P. 913–921. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2009.04.002>.
108. Stojić G., Mladenović D., Prentkovskis O., & Vesković S. A novel model for determining public service compensation in integrated public transport systems // *Sustainability*. 2018. 10( 9). 2969. DOI: 10.3390/su10092969.
109. Abrams D. M., Strogatz S. H. Chimera states for coupled oscillators // *Physical Review Letters*. 2004. Vol. 93, No. 17. 174102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.174102>.
110. Wang Y., Doyle F. J. III. Exponential synchronization rate of Kuramoto oscillators in the presence of a pacemaker // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2013. Vol. 58, No. 4. P. 989–994. <https://doi.org/10.1109/TAC.2012.2215772>
111. Регламент Європейського Парламенту і Ради (ЄС) № 1370/2007 від 23 жовтня 2007 року про громадські пасажирські перевезення залізничним і автомобільним транспортом та скасування регламентів Ради (ЄЕС) № 1191/69 і № 1107/70. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_008-07#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_008-07#Text) (дата звернення: 20.11.2024)
112. Sheng, D., & Meng, Q. Public bus service contracting: A critical review and future research opportunities. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.102853>.
113. Хмельницьке комунальне підприємство «Електротранс» : офіційний вебсайт. URL: <https://hkpeltrans.com.ua/> (дата звернення: 28.11.2025)
114. Заключний звіт про наук.-дослід. роботу за договором № 77-05-17 «Про надання послуг з проведення ринкових досліджень (комплексне обстеження пасажиропотоків на маршрутах міського пасажирського транспорту загального користування в м. Хмельницькому)» / Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т, Кафедра транспортних систем і логістики. Харків: ХНАДУ, 2017. 389 с.
115. Чисельність наявного населення України на 1 січня 2022 року : статистичний збірник / Державна служба статистики України. Київ, 2022. URL:

[http://db.ukrcensus.gov.ua/PXWEB2007/ukr/publ\\_new1/2022/zb\\_%D0%A1huselni\\_st.pdf](http://db.ukrcensus.gov.ua/PXWEB2007/ukr/publ_new1/2022/zb_%D0%A1huselni_st.pdf) (дата звернення: 25.08.2025).

116. Офіційний вебсайт Головного управління статистики у Хмельницькій області. URL: <https://www.km.ukrstat.gov.ua> (дата звернення: 28.08.2025).

Додаток А

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
 Перший проректор  
 Анжеліка БАТРАКОВА  
 2026 р.

проф. \_\_\_\_\_



### АКТ

про впровадження в навчальний процес матеріалів  
 дисертаційної роботи здобувача наукового ступеня доктора філософії за  
 спеціальністю 275 – транспортні технології  
 (на автомобільному транспорті)  
**«Підвищення якості транспортного обслуговування населення міст за  
 рахунок впровадження інтегрованих технологій на міському  
 пасажирському транспорті»**  
 Орди Олександра Миколайовича

Комісією в складі завідувача кафедри транспортних технологій к.т.н., доц. Павленка О.В., доцентки кафедри транспортних технологій к.т.н., доц. Потаман Н.В., доцента кафедри транспортних технологій к.т.н., доц. Музильова Д.О. складено акт в тому, що результати дисертації Орди Олександри Миколайовича у вигляді методики координації роботи різних видів міського пасажирського транспорту у пересадочних вузлах на основі мережево-динамічної моделі та алгоритм оперативного управління та оцінки стану транспортної системи, впроваджено у навчальний процес кафедри транспортних технологій при викладанні дисципліни «Пасажирські перевезення» у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 275 «Транспортні технології (автомобільний транспорт)».

Завідувач кафедрою транспортних технологій,  
 к.т.н., доцент

к.т.н., доцент



Олексій ПАВЛЕНКО

Наталя ПОТАМАН

«ЗАТВЕРДЖУЮ»:

Начальник Управління обслуговування  
інфраструктури наземного транспорту  
КП «Харківський метрополітен»

  
(підпис) \_\_\_\_\_  
«\_\_» \_\_\_\_\_ р.



### АКТ

про впровадження результатів матеріалів  
дисертаційної роботи здобувача наукового ступеня доктора філософії за  
спеціальністю 275 – транспортні технології  
(на автомобільному транспорті)

**«Підвищення якості транспортного обслуговування населення міст за  
рахунок впровадження інтегрованих технологій на міському  
пасажирському транспорті»**

Орди Олександра Миколайовича

#### **Найменування пропозиції, яка впроваджена:**

Методика оперативної оцінки та алгоритм автоматизованої системи підтримки прийняття рішень диспетчера (СППР) для адаптивного управління координацією роботи різних видів транспорту міського пасажирського транспорту у пересадочних вузлах на основі мережево-динамічної моделі.

#### **Ким запропоновано:**

Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ), кафедра транспортних технологій, автор – Орда Олександр Миколайович.

#### **Де, коли і ким впроваджено:**

Методику та алгоритм СППР прийнято до уваги та рекомендовано до впровадження у 2026 році в практичну діяльність КП «Харківський метрополітен» при організації роботи диспетчерської служби управління рухом міського пасажирського транспорту.

#### **Напрямки, результати, ефективність впровадження:**

Розроблена методика оперативної оцінки та алгоритм СППР з можливістю API-інтеграції з програмними комплексами оперативного управління дозволить диспетчеру проводити оцінку стану транспортної системи та рівня узгодженості інтервалів руху транспортних засобів по маршрутах, забезпечити безперервний контроль, оперативне регулювання та диференціювати керуючі впливи. Запропонований в дисертації підхід щодо міжвидової координації навколо електротранспорту, як опорного елемента транспортної системи, з урахуванням його експлуатаційних обмежень, дозволить розподілити транспортну роботу між різними видами транспорту, зокрема в умовах надмірного дублювання маршрутів.

#### **Висновки, зауваження, пропозиції**

Використання методики та алгоритму СППР в практичній діяльності підприємства забезпечує можливість належного оперативного управління роботою різних видів міського пасажирського транспорту на маршрутах та у пересадочних вузлах на перспективу.

Акт виданий без фінансових обов'язків підприємства перед автором.

## Додаток Б

ЛІСТИНГ ПРОГРАМНОГО КОДУ ВИЗНАЧЕННЯ СПЕКТРУ  
ВЛАСНИХ ЗНАЧЕНЬ (МАТРИЦЯ ЛАПЛАСА D)

```

import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

routes = ['11', '12', '15', '18', '21', '22', '26', '30', '16']
data = {
    '11': [0, 0, 15.4, 0, 0.5, 7.2, 0, 32.4, 0],
    '12': [0, 0, 10.3, 0, 7.2, 1.2, 0.3, 4.5, 0],
    '15': [1.7, 0.3, 0, 0.2, 11.7, 5.0, 0.05, 16.2, 0.6],
    '18': [0.2, 0.8, 0.1, 0, 11.6, 12.2, 0, 0.1, 5.1],
    '21': [0, 0, 0.7, 0.05, 0, 0, 0, 16.4, 2.8],
    '22': [0, 0, 17.5, 0.1, 0, 0, 0, 5.3, 1.2],
    '26': [0.6, 0, 6.2, 0.04, 6.9, 7.9, 0, 20.6, 0],
    '30': [43.0, 3.9, 10.6, 0, 25.6, 4.7, 2.7, 0, 61.9],
    '16': [3.5, 0, 0, 0, 0, 13.0, 0, 9.0, 0]
}
W = pd.DataFrame(data, index=routes).values

D_diag = np.diag(np.sum(W, axis=1))
L = D_diag - W
eigenvalues = np.sort(np.linalg.eigvals(L))

np.random.seed(42)
phases = np.random.uniform(-np.pi/1.2, np.pi/1.2, len(routes)) # Розпорошені фази
R_complex = np.mean(np.exp(1j * phases))
R_val = np.abs(R_complex)

fig = plt.figure(figsize=(12, 6))

ax1 = fig.add_subplot(121, projection='polar')
colors = plt.cm.jet(np.linspace(0, 1, len(routes)))

```

```

for i in range(len(routes)):
    ax1.annotate("", xy=(phases[i], 1), xytext=(0, 0),
                 arrowprops=dict(arrowstyle='->', color=colors[i], lw=2, label=routes[i]))
    ax1.text(phases[i], 1.1, routes[i], fontsize=10, fontweight='bold')

ax1.annotate("", xy=(np.angle(R_complex), R_val), xytext=(0, 0),
             arrowprops=dict(arrowstyle='fancy', color='black', lw=3, alpha=0.8))

ax1.set_title(f"Фазовий зсув маршрутів\n(Синхронізація R = {R_val:.2f})", va='bottom')

ax2 = fig.add_subplot(122)
ax2.bar(range(len(eigenvalues)), eigenvalues, color='teal', alpha=0.7)
ax2.set_title("Спектр матриці Лапласа (D)\Стойкість системи пересадок")
ax2.set_xlabel("Індекс власного значення")
ax2.set_ylabel("Значення (Степінь зв'язності)")
ax2.grid(axis='y', linestyle='--')

plt.tight_layout()
plt.savefig('system_analysis.png', dpi=300)
plt.show()

print(f"{'Маршрут':<10} | {'Фазовий зсув (рад)':<20}")
print("-" * 35)
for i in range(len(routes)):
    print(f"{'routes[i]:<10} | {'phases[i]:.4f}")

```

## Додаток В

ЛІСТИНГ ПРОГРАМНОГО МОДУЛЯ ЗБОРУ GPS-ДАНИХ  
ІНФОРМАЦІЙНОГО СЕРВІСУ EASYWAY МОВОЮ PYTHON

```
import requests
import time
import csv
import os
from datetime import datetime

URL = "https://gps.easyway.info/api/city/khmelnytskyi/lang/ua/stop/102"
INTERVAL_SEC = 30
MAX_WAIT_MIN = 90

HEADERS = {
    "User-Agent": "Mozilla/5.0 (Windows NT 10.0; Win64; x64) AppleWebKit/537.36",
    "Accept": "application/json",
    "Origin": "https://eway.in.ua",
    "Referer": "https://eway.in.ua/",
    "X-Requested-With": "XMLHttpRequest",
}

ARRIVALS_FILE = "ARRIVALS.csv"
SCHEDULE_FILE = "SCHEDULE.csv"

ARRIVALS_FIELDS = [
    "arrival_datetime",
    "route_name",
    "transport_type",
    "direction",
    "direction_id",
    "bort_number",
    "vehicle_id",
    "handicapped",
    "scheduled_time",
    "delay_minutes",
    "interval_actual_min",
    "interval_scheduled",
    "route_id",
]

SCHEDULE_FIELDS = [
    "poll_datetime",
    "route_name",
    "transport_type",
    "direction",
    "direction_id",
    "scheduled_arrival",
    "minutes_left",
    "interval_str",
    "route_id",
]
```

```

def init_files():
    if not os.path.exists(ARRIVALS_FILE):
        with open(ARRIVALS_FILE, "w", encoding="utf-8-sig", newline="") as f:
            csv.writer(f, delimiter=";").writerow(ARRIVALS_FIELDS)
    if not os.path.exists(SCHEDULE_FILE):
        with open(SCHEDULE_FILE, "w", encoding="utf-8-sig", newline="") as f:
            csv.writer(f, delimiter=";").writerow(SCHEDULE_FIELDS)
    print(f" Фактичні прибуття → {os.path.abspath(ARRIVALS_FILE)}")
    print(f" Розклад → {os.path.abspath(SCHEDULE_FILE)}")

def now_str() -> str:
    return datetime.now().strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S")

def minutes_until(arrival_unix: int) -> int:
    diff = arrival_unix - int(datetime.now().timestamp())
    return max(0, diff // 60)

def append_row(filepath: str, row: list):
    with open(filepath, "a", encoding="utf-8-sig", newline="") as f:
        csv.writer(f, delimiter=";").writerow(row)

def calc_delay(scheduled_unix: int, actual_dt: datetime) -> int:
    if not scheduled_unix:
        return ""
    diff = int(actual_dt.timestamp()) - scheduled_unix
    return round(diff / 60)

def poll():
    poll_dt = datetime.now()
    poll_time = poll_dt.strftime("%H:%M:%S")

    try:
        r = requests.get(URL, headers=HEADERS, timeout=10)
        r.raise_for_status()
    except requests.RequestException as e:
        print(f"[{poll_time}] Помилка: {e}")
        return

    routes = r.json().get("data", {}).get("routes", [])

    current_keys = set()

    schedule_rows = []
    new_tracked = 0

    for route in routes:
        if route.get("disabled"):
            continue

        route_id = route["route_id"]
        route_name = route["route_name"]
        transport = route["transport_name"]
        direction = route["direction_name"]

```

```

direction_id = route["direction"]
interval_str = route["interval_str"]
times      = route.get("times", [])

for t in times:
    source    = t.get("source")
    arrival_unix = t.get("arrival_time", 0)
    arrival_fmt = t.get("arrival_time_formatted", "")
    mins      = minutes_until(arrival_unix)

    if source == "schedule":
        if mins <= MAX_WAIT_MIN:
            schedule_rows.append([
                now_str(), route_name, transport,
                direction, direction_id,
                arrival_fmt, mins, interval_str, route_id,
            ])
            continue

    if source != "gps":
        continue

    vehicle_id = t.get("vehicle_id")
    bort       = t.get("bort_number", "")
    handicapped = t.get("handicapped", 0)
    key        = (route_id, vehicle_id)

    current_keys.add(key)

    if key not in tracked_vehicles:
        # Нова машина з'явилась у прогнозі
        tracked_vehicles[key] = {
            "route_name": route_name,
            "transport":  transport,
            "direction":  direction,
            "direction_id": direction_id,
            "bort":       bort,
            "vehicle_id": vehicle_id,
            "handicapped": handicapped,
            "interval_str": interval_str,
            "route_id":   route_id,
            "scheduled_unix": arrival_unix,
            "scheduled_fmt": arrival_fmt,
            "first_seen":  poll_dt,
        }
        new_tracked += 1
        print(f"[{poll_time}] ВІДСТЕЖУЮ {transport} #{route_name}"
              f" [{bort}] очік. {arrival_fmt} ({mins} хв)")

arrived_keys = set(tracked_vehicles.keys()) - current_keys

for key in arrived_keys:
    v      = tracked_vehicles.pop(key)
    arrival_dt = datetime.now()

```

```

arr_str = arrival_dt.strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S")

delay = calc_delay(v["scheduled_unix"], arrival_dt)

route_key = (v["route_id"], v["direction_id"])
last_dt = last_arrival.get(route_key)
interval_act = ""
if last_dt:
    interval_act = round((arrival_dt - last_dt).total_seconds() / 60, 1)
last_arrival[route_key] = arrival_dt

delay_label = f"+{delay} хв" if isinstance(delay, int) and delay > 0 \
    else (f"{delay} хв" if isinstance(delay, int) else "—")
int_label = f"{interval_act} хв" if interval_act != "" else "—"

print(f"[{poll_time}]  ПРИБУВ {v['transport']}#{v['route_name']} "
      f" [{v['bort']}] "
      f"за розкладом {v['scheduled_fmt']} відхилення {delay_label} "
      f"інтервал {int_label}")

append_row(ARRIVALS_FILE, [
    arr_str,
    v["route_name"], v["transport"],
    v["direction"], v["direction_id"],
    v["bort"], v["vehicle_id"], v["handicapped"],
    v["scheduled_fmt"], delay, interval_act,
    v["interval_str"], v["route_id"],
])

if schedule_rows:
    with open(SCHEDULE_FILE, "a", encoding="utf-8-sig", newline="") as f:
        csv.writer(f, delimiter=";").writerows(schedule_rows)

if not arrived_keys and new_tracked == 0:
    gps_count = sum(1 for k in current_keys)
    print(f"[{poll_time}] відстежується {gps_count} машин(и) | "
          f"нових прибуттів немає")

if __name__ == "__main__":
    init_files()

    print("=" * 65)
    print(" EasyWay parser — Філармонія (Хмельницький)")
    print(f" Опитування кожні {INTERVAL_SEC} с | Ctrl+C для зупинки")
    print("=" * 65)
    print()

    while True:
        poll()
        time.sleep(INTERVAL_SEC)

```

## Додаток Г

ЛІСТИНГ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ КООРДИНАЦІЇ  
 РІЗНИХ ВИДІВ МІСЬКОГО ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ У  
 ПЕРЕСАДОЧНИХ ВУЗЛАХ МОВОЮ PYTHON (ФРАГМЕНТ)

```

import requests
import numpy as np
import matplotlib
matplotlib.use("TkAgg")
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.gridspec as gridspec
import time
import csv
import os
from datetime import datetime
from collections import deque

ROUTE_META = {
    "12": {"key": "trol", "interval": 24.0, "length_km": 1.8},
    "15": {"key": "trol", "interval": 15.5, "length_km": 2.4},
    "16": {"key": "trol", "interval": 17.5, "length_km": 1.7},
    "30": {"key": "bus", "interval": 9.0, "length_km": 2.5},
    "21": {"key": "bus", "interval": 8.0, "length_km": 2.0},
    "22": {"key": "bus", "interval": 10.0, "length_km": 1.9},
    "29": {"key": "bus", "interval": 5.0, "length_km": 2.3},
    "26": {"key": "marshrutka", "interval": 6.5, "length_km": 1.6},
    "18": {"key": "marshrutka", "interval": 10.0, "length_km": 1.5},
    "36": {"key": "marshrutka", "interval": 12.0, "length_km": 1.4},
    "11": {"key": "trol", "interval": 100.0, "length_km": 2.1},
    "7A": {"key": "trol", "interval": 121.5, "length_km": 2.2},
    "2A": {"key": "trol", "interval": 68.0, "length_km": 2.0},
}

_SLOW_OSCILLATORS = ["11", "7A", "2A"]
_ROUTE_ORDER = ["12", "15", "18", "21", "22", "26", "29", "30", "16", "36"]

_Q_RAW = np.array([
    [ 0, 0.283, 0.752, 0, 0, 0, 0, 3.908, 0, 0.029 ], # 12
    [0.283, 0, 0.084, 0, 17.451, 6.224, 5.533, 10.628, 0, 0.344 ], # 15
    [0.752, 0.084, 0, 0, 0.121, 0.046, 0, 0, 0, 0 ], # 18
    [ 0, 0, 0, 0, 0.747, 0, 0, 0, 0, 0 ], # 21
    [ 0, 17.451, 0.121, 0.747, 0, 7.942, 11.199, 25.589, 13.021, 0.209 ], # 22
    [ 0, 6.224, 0.046, 0, 7.942, 0, 0, 20.617, 0, 0 ], # 26
    [ 0, 5.533, 0, 0, 11.199, 0, 0, 4.690, 0, 0 ], # 29
    [3.908, 10.628, 0, 0, 25.589, 20.617, 4.690, 0, 61.958, 0.385 ], # 30
    [ 0, 0, 0, 0, 13.021, 0, 0, 61.958, 0, 0 ], # 16
    [0.029, 0.344, 0, 0, 0.209, 0, 0, 0.385, 0, 0 ], # 36
], dtype=float)

_Q_SYM = (_Q_RAW + _Q_RAW.T) / 2

```

```

np.fill_diagonal(_Q_SYM, 0)
A_STATIC = _Q_SYM / _Q_SYM.max()

K          = 5
SIGMA      = 0.01
DT         = 0.5 # шаг Эйлера, хв
POLL_SEC   = 60
R_TARGET   = 0.75
R_CRIT     = 0.3
BUNCHING_THRESHOLD = 1

STATE_CHANGE_THRESHOLD = 0.08

COLORS_T = {"trol": "#4a9ede", "bus": "#2ecc71", "marshrutka": "#e67e22"}
TRANSP-UA = {"trol": "Тролейбус", "bus": "Автобус", "marshrutka": "Маршрутка"}
LINK_COLOR = {"TT": "#5bc8f5", "TA": "#27ae60", "TM": "#e67e22"}
LINK_LABEL = {"TT": "Тр-Тр", "TA": "Тр-Авт", "TM": "Тр-Марш"}

VEH_LENGTH = {"trol": 12.0, "bus": 12.0, "marshrutka": 7.5} # м
VEH_GAP     = 1.0
POCKET_LEN  = 33.0
POCKET_SLOTS = 4

SIMULTANEOUS_WINDOW_MIN = 2.0

FEEDER_VOLTAGE = 600
FEEDER_I_MAX   = 500
FEEDER_P_MAX   = FEEDER_VOLTAGE * FEEDER_I_MAX

TROL_I_START = 230
TROL_I_RUN   = 100
TROL_I_BRAKE = -60

FEEDER_WINDOW_SEC = 30

SIM_LOG_FILE = "simulation_log.csv"
REC_LOG_FILE = "recommendations_log.csv"
GPS_MAX_AGE_S = 90

API_URL = "https://gps.easyway.info/api/city/khmelnytskyi/lang/ua/stop/102"
HEADERS = {
    "User-Agent": "Mozilla/5.0 (Windows NT 10.0; Win64; x64) AppleWebKit/537.36",
    "Accept": "application/json",
    "Origin": "https://eway.in.ua",
    "Referer": "https://eway.in.ua/",
    "X-Requested-With": "XMLHttpRequest",
}

tracked: dict = {}
last_arrival: dict = {}

def fetch_routes() -> list:

    try:

```

```

r = requests.get(API_URL, headers=HEADERS, timeout=10)
r.raise_for_status()
all_routes = r.json().get("data", {}).get("routes", [])
active = [
    route for route in all_routes
    if route.get("works_now", 0) == 1
    and route.get("disabled", 0) == 0
]
return active
except Exception as e:
    print(f" [API] {e}")
    return []

def update_tracking(routes: list) -> list:
    current_keys = set()
    now = datetime.now()
    for route in routes:
        if route.get("disabled"):
            continue
        for t in route.get("times", []):
            if t.get("source") != "gps":
                continue
            key = (route["route_id"], t.get("vehicle_id"))
            current_keys.add(key)
            if key not in tracked:
                tracked[key] = {
                    "route_name": route["route_name"],
                    "transport_key": route.get("transport_key", "bus"),
                    "direction_id": route["direction"],
                    "interval": route.get("interval", 15),
                    "bort": t.get("bort_number", ""),
                    "sched_unix": t.get("arrival_time", 0),
                    "first_seen": now,
                }
    arrived = []
    for key in set(tracked.keys()) - current_keys:
        v = tracked.pop(key)
        rk = (key[0], v["direction_id"])
        int_act = ""
        if rk in last_arrival:
            int_act = round((now - last_arrival[rk]).total_seconds() / 60, 1)
        last_arrival[rk] = now
        arrived.append(**v, "interval_actual": int_act)
    return arrived

def laplacian_fiedler(A):
    D = np.diag(A.sum(axis=1))
    ev = np.sort(np.linalg.eigvalsh(D - A))
    return float(ev[1]) if len(ev) > 1 else 0.0

def natural_frequencies(route_names):
    intervals = np.array([ROUTE_META[r]["interval"] for r in route_names])
    return 2 * np.pi / (intervals * 60) # рад/с

```

```

def order_parameter(theta):
    return float(np.abs(np.mean(np.exp(1j * np.array(theta)))) if len(theta) else 0.0

def order_parameter_mod(theta):

    R_mod = |1/m * Σ exp(i*(θk - k*δ))|

    n = len(theta)
    if n == 0:
        return 0.0
    delta = 2 * np.pi / n
    shifted = np.array([theta[k] - k * delta for k in range(n)])
    return float(np.abs(np.mean(np.exp(1j * shifted))))

def critical_Kc(omega, lambda2):
    return (omega.max() - omega.min()) / lambda2 if lambda2 > 1e-9 else float("inf")

def kuramoto_step(theta, omega, A, K, delta, dt, sigma, ref_idx, anchor_indices=None):
    n = len(theta)
    dth = np.array([
        omega[i]
        + (K / max(n, 1)) * sum(
            A[i, j] * np.sin(theta[j] - theta[i] - delta)
            for j in range(n) if j != i and A[i, j] > 0
        )
        + sigma * np.random.randn()
        for i in range(n)
    ])
    th_new = (theta + dth * dt * 60) % (2 * np.pi)
    anchors = set(anchor_indices) if anchor_indices else (
        {ref_idx} if ref_idx >= 0 else set()
    )
    for idx in anchors:
        if 0 <= idx < len(th_new):
            th_new[idx] = (theta[idx] + omega[idx] * dt * 60) % (2 * np.pi)
    return th_new

def system_state(K, Kc, route_names, R=0.0):
    ctrl = [r for r in route_names if ROUTE_META[r]["key"] in ("trol", "bus")]
    f = len(ctrl) / max(len(route_names), 1)
    if K >= Kc and R >= R_TARGET:
        return "ФАЗОВЕ ЗАХОПЛЕННЯ", "#27ae60"
    elif K >= Kc * f and R >= R_CRIT:
        return "СТАН ХИМЕРИ", "#f39c12"
    else:
        return "ФАЗОВИЙ ДРЕЙФ", "#e74c3c"

def link_type(ri, rj):
    ki = ROUTE_META.get(ri, {}).get("key", "bus")
    kj = ROUTE_META.get(rj, {}).get("key", "bus")
    if ki == "trol" and kj == "trol": return "TT"
    if "trol" in (ki, kj) and "bus" in (ki, kj): return "TA"
    if "trol" in (ki, kj) and "marshrutka" in (ki, kj): return "TM"
    return "AA"

```

```

def analyze_link_types(theta, route_names):

    result = {"TT": [], "TA": [], "TM": []}
    n = len(route_names)
    for i in range(n):
        for j in range(i + 1, n):
            ri = route_names[i]
            rj = route_names[j]

            if ri not in _ROUTE_ORDER or rj not in _ROUTE_ORDER:
                continue
            si = _ROUTE_ORDER.index(ri)
            sj = _ROUTE_ORDER.index(rj)
            lt = link_type(ri, rj)
            if lt not in result or A_STATIC[si, sj] < 0.01:
                continue
            diff = (theta[i] - theta[j] + np.pi) % (2 * np.pi) - np.pi
            result[lt].append({
                "ri": ri, "rj": rj,
                "diff_rad": diff, "diff_deg": np.degrees(diff),
                "aij": A_STATIC[si, sj],
            })
    return result

```

## Додаток Д

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА  
ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Потаман Н. В., Орда О. О., Орда О. М. Аналіз аспектів планування сталої міської мобільності в контексті євроінтеграційних реформ в Україні. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки* 2024. 10(41), Ч II. С. 189–195. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.188-195](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.188-195)

2. Орда О. О., Орда О. М. Методика формування раціональної технології перевезень пасажирів міським пасажирським транспортом. *Комунальне господарство міст*. 2025, том 3, випуск 191, С. 650-656 DOI: 10.33042/2522-1809-2025-3-191-650-656

3. Potaman N., Hamed A., Orda O. Adaptation of European experience in compensation mechanisms for public transport operators in urban public transport in Ukraine. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2026, 13(44), 451–461, DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13\(44\).451-461](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13(44).451-461)

4. Yashchuk, Y., Orda, O., Orda, O., Butko, T. Adaptive Management of Urban Intermodal Hubs Under Risk: A Crowdsourced Demand Forecasting Approach. // In: Sierpiński, G., Naumann, S., Macioszek, E. (eds) *Transport Systems Development – Methods and Solutions. TSTP 2025. Lecture Notes in Networks and Systems*, 2026, vol 1789. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-032-14826-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-032-14826-1_7)

5. Orda O.M., Pavlenko O.V. The formalization of the process of coordinating the operation of different modes of urban passenger transport based on a network-dynamic model. *Automobile Transport*. 2026. (58). 94–103. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2026.58.0.11>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Нагорний Є. В., Орда О. О., Орда О. М. Аналіз стану та розвитку інтегрованих технологій перевезень пасажирів міським електротранспортом. // *Інтелектуальні транспортні технології: зб. матеріалів 3-ї Міжнар. наук.-техн.*

конф., Харків, 22–23 листопада 2022 р., м. Харків: УкрДУЗТ, 2022. С. 81-83.

7. Нагорний Є. В., Орда О. М. Щодо питання впровадження інтегрованих технологій на міському пасажирському транспорті. // *79-а Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету: зб. тез доп.*, м. Київ, 17–19 травня 2023 р. Київ: НТУ, 2023. Вип. 79. С. 112.

8. Nahornyi Ye., Orda O. Using of logistics approach in the organisation of transport services by public passenger transport // *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустриальні центри та корпоративна логістика: матеріали дев'ятнадцятої міжнар. наук.-практ. конф.*, м. Харків, 1–2 червня 2023 р. Харків: УкрДУЗТ, 2023. С. 166.

9. Нагорний Є. В., Орда О. М. Аналіз теоретичних підходів підвищення якості транспортного обслуговування населення міст міським пасажирським транспортом // *Збірник тез доповідей 86-ї науково-технічної та науково-методичної конференції університету. Секція транспортних технологій*, м. Харків, 10–11 травня 2023 р. Харків: ХНАДУ, 2023. С. 3–5.

10. Нагорний Є. В., Орда О. М. Роль інтелектуальних транспортних систем у вирішенні проблем міської мобільності. // *Інтелектуальні транспортні технології: тези доп. 4-ї Міжнар. наук.-техн. конф.*, м. Харків, 27–28 листопада 2023 р. Харків: УкрДУЗТ, 2023. С. 147.

11. Орда О. М. Принципи формування інтегрованих технологічних процесів функціонування пасажирського електротранспорту. // *Збірник матеріалів доповідей 86-ї Міжнародної наукової конференції студентів. Секція транспортних технологій*. Харків, 08–12 квітня 2024 р., Харків: ХНАДУ, 2024. С. 164–166.

12. Орда О. О., Орда О. М. Основні напрями підвищення якості транспортного обслуговування населення міст за рахунок впровадження інтегрованих технологій на пасажирському транспорті. // *Стратегія якості в промисловості і освіті: матеріали XVIII міжнар. конф.*. Варна, Болгарія, 03–06 червня 2024 р., Технічний університет – ТУ Варна, 2024. С. 373–376.

13. Потаман Н. В., Орда О. О., Орда О. М. Аспекти планування сталої міської мобільності в контексті євроінтеграційних реформ в Україні. *Автошляховик України*. 2023. Окремий випуск 277'2023: зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф. «Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури», м. Київ, 5–7 груд. 2023 р. С. 52–55. DOI: 10.33868/0365-8392-2023-277

14. Орда О. О., Орда О. М. Аналіз практик імплементації політик сталого транспорту на прикладі Чехії та їх перспектив в Україні. // *Збірник матеріалів 89-ї науково – технічна та науково – методична конференція ХНАДУ. Секція транспортних технологій*. Харків, 07–11 квітня 2025 р. Харків: ХНАДУ, 2025. С. 177–180.

15. Орда О. М. Обґрунтування методології моделювання інтегрованих технологій на міському пасажирському транспорті. // *Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету: зб. тез доп. 13–15 травня 2025 року*, Київ: НТУ, 2025. Вип. 81. С. 378–379.

16. Павленко О. В., Орда О. М. Модель інтегрованої системи обслуговування населення міським громадським пасажирським транспортом. // *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустриальні центри та корпоративна логістика: матеріали двадцять першої міжнар. наук.-практ. конф.*, м. Харків, 5–6 червня 2025 р. Харків: УкрДУЗТ, 2025. С. 171–174.

17. Yashchuk, Y., Orda, O., Orda, O., Butko, T. Adaptive Management of Urban Intermodal Hubs Under Risk: A Crowdsourced Demand Forecasting Approach. // *Transport Systems Development – Methods and Solutions. TSTP 2025: Book of Abstracts of the 21st Scientific and Technical Conference Transport Systems Theory and Practice, September 9-10, 2025, Katowice*. P. 59.

18. Ящук Ю. І., Орда О. М. Архітектура адаптивного управління міськими інтермодальними хабами в умовах ризику // *Інновації у системах управління безпекою та дорожнім рухом: зб. тез доп. VI міжнар. наук.-практ. конф.*, м. Харків, 18–19 листопада 2025 р., Харків: ХНАДУ, 2025. С. 81–83.