ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-304-6-53-66

УДК 004.9:656.13

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ МІСЬКИМИ АВТОБУСНИМИ ПЕРЕВЕЗЕННЯМИ НА ОСНОВІ ПРОГНОЗУВАННЯ ПАСАЖИРОПОТОКУ

Доля К.В.

INFORMATION TECHNOLOGY FOR ADAPTIVE MANAGEMENT OF URBAN BUS TRANSIT BASED ON PASSENGER FLOW FORECASTING

Dolia K.V.

У статті розглянуто інформаційну технологію адаптивного управління міськими автобусними перевезеннями, орієнтовану на використання короткострокового прогнозування пасажиропотоку для підвищення якості транспортного обслуговування та ефективності роботи перевізника. Обґрунтовано актуальність переходу від статичного планування руху автобусів до проактивної моделі диспетчерського керування, у якій рішення приймаються з урахуванням фактичного стану маршруту, історичних закономірностей попиту та прогнозних оцінок майбутнього завантаження. Показано, що традиційні розклади й фіксовані інтервали руху не завжди відповідають умовам динамічного міського середовища, оскільки пасажиропотік змінюється залежно від часу доби, дня тижня, дорожньої ситуації, сезонних факторів і локальних подій. Запропонована технологія передбачає збирання даних із GPS моніторингу, електронного квитка, автоматизованих систем обліку пасажирів, датчиків завантаження салону та диспетчерських платформ. Ці дані проходять попереднє оброблення, інтеграцію, виявлення аномалій, агрегацію за зупинками й часовими інтервалами, після чого використовуються для прогнозування попиту та оцінювання стану маршруту. У межах технології враховано потребу в узгодженні прогнозних результатів із ресурсними обмеженнями перевізника, наявністю автобусів різної місткості, графіками роботи водіїв, допустимими відхиленнями від розкладу та вимогами до безпеки й комфортності перевезень. Це дає змогу розглядати маршрут як керований динамічний об'єкт, стан якого змінюється під впливом попиту, дорожніх умов і диспетчерських рішень. Особливу увагу приділено формуванню керуючих дій: коригуванню інтервалів руху, утриманню автобусів на контрольних пунктах, зміні кількості транспортних засобів на лінії, оперативному перерозподілу рухомого складу та вибору типу автобуса відповідно до очікуваного пасажирського навантаження. Визначено основні функціональні модулі інформаційної технології, критерії оцінювання її ефективності та місце прогнозної моделі в контурі прийняття диспетчерських рішень. Практична цінність дослідження полягає в можливості використання запропонованого підходу для створення цифрових платформ підтримки управління громадським транспортом, зменшення часу очікування пасажирів, підвищення регулярності руху, запобігання переповненню салонів і раціональнішого використання ресурсів перевізника. Окреслено також перспективи подальшого розвитку технології, пов'язані з удосконаленням моделей машинного навчання, розширенням джерел даних, автоматизацією вибору сценаріїв реагування та впровадженням експериментальних програмних прототипів у диспетчерській практиці міських перевезень на типових міських маршрутах великого міста України.

Ключові слова: *інформаційна технологія, адаптивне управління, міські автобусні перевезення, прогнозування пасажиропотоку, диспетчерські рішення, громадський транспорт.*

Вступ. Сучасний розвиток міських пасажирських перевезень відбувається в умовах зростання вимог до якості транспортного обслуговування населення, підвищення мобільності мешканців міст, ускладнення дорожньої ситуації та необхідності раціонального використання ресурсів перевізників. Автобусні маршрути залишаються одним із найбільш гнучких і поширених елементів системи громадського транспорту, оскільки забезпечують зв'язок між житловими районами, місцями прикладання праці, закладами освіти, медичними установами та транспортнопересадковими вузлами. Водночас ефективність їх функціонування значною мірою залежить від здатності транспортної системи своєчасно реагувати на зміну пасажиропотоку,

дорожніх умов і фактичного стану рухомого складу на маршруті.

Традиційна організація роботи автобусних маршрутів переважно ґрунтується на заздалегідь установлених розкладах, фіксованих інтервалах руху та усереднених статистичних даних про попит. Такий підхід є прийнятним за відносно стабільних умов експлуатації, однак у реальних міських транспортних системах пасажиропотік має виражену просторово-часову нерівномірність. У ранкові та вечірні пікові періоди виникають перевантаження салонів, збільшується час очікування пасажирів, погіршується регулярність руху та зростає ймовірність злипання автобусів. У міжпікові години, навпаки, частина рухомого складу може використовуватися неефективно, що призводить до збільшення експлуатаційних витрат без відповідного поліпшення якості перевезень. Отже, статичне планування не повною мірою відповідає умовам динамічного міського середовища.

Актуальність дослідження посилюється активним упровадженням інформаційних систем і технологій у сферу громадського транспорту. GPS-моніторинг, автоматизовані системи обліку пасажирів, електронний квиток, мобільні додатки, датчики завантаження салону та диспетчерські платформи формують значні масиви даних про фактичну роботу маршрутів. Такі дані дають змогу відстежувати місцезнаходження автобусів, інтервали руху, час прибуття на зупинки, кількість пасажирів, рівень заповнення салону та відхилення від планового режиму роботи. Проте сама наявність цифрових даних не гарантує підвищення ефективності управління. Необхідною умовою є розроблення інформаційної технології, яка забезпечує їх системне збирання, попереднє оброблення, інтеграцію, аналіз, прогнозування та використання у процесі прийняття диспетчерських рішень.

Одним із ключових елементів такої інформаційної технології є прогнозування пасажиропотоку. Короткостроковий прогноз попиту дозволяє не лише оцінити поточний стан маршруту, а й передбачити можливі перевантаження, дефіцит або надлишок рухомого складу, порушення регулярності руху та зростання часу очікування пасажирів. На основі прогнозної інформації диспетчерська система може формувати адаптивні керуючі дії: коригувати інтервал руху, змінювати кількість автобусів на лінії, рекомендувати утримання транспортного засобу на контрольному пункті, оперативно перерозподіляти рухомий склад між маршрутами або змінювати тип автобуса залежно від очікуваного рівня завантаження. Таким чином, прогнозування пасажиропотоку стає не ізольованою аналітичною процедурою, а складовою контуру оперативного управління міськими автобусними перевезеннями.

Особливе значення має перехід від реактивного до проактивного управління. Реактивна модель передбачає реагування диспетчера вже після виникнення проблеми: переповнення автобусів, значного відхилення від розкладу або накопичення пасажирів на зупинках. Натомість проактивне адаптивне управління орієнтоване на завчасне виявлення ризиків і формування рішень до того, як відхилення набудуть критичного характеру. Для цього інформаційна технологія повинна поєднувати дані реального часу, історичні закономірності пасажиропотоку, прогнозні моделі, правила оцінювання стану маршруту та механізми підтримки прийняття рішень.

Отже, науково-практична проблема полягає у необхідності формалізації інформаційної технології адаптивного управління міськими автобусними перевезеннями, яка забезпечує використання прогнозу пасажиропотоку для підвищення якості транспортного обслуговування та ефективності роботи перевізника. Розв’язання цієї проблеми є важливим для розвитку інтелектуальних транспортних систем, цифрових платформ моніторингу громадського транспорту та інформаційно-аналітичних модулів підтримки диспетчерських рішень. Саме тому дослідження, спрямоване на поєднання методів прогнозування пасажиропотоку з адаптивним управлінням автобусними маршрутами, є актуальним як для напряму інформаційних систем і технологій, так і для практики організації міських пасажирських перевезень.

Метою роботи є Метою дослідження є розроблення інформаційної технології адаптивного управління міськими автобусними перевезеннями на основі прогнозування пасажиропотоку, що забезпечує підтримку оперативних диспетчерських рішень для підвищення регулярності руху, зменшення часу очікування пасажирів і раціонального використання рухомого складу.

Цільова спрямованість дослідження полягає у формуванні науково обґрунтованого підходу до переходу від реактивного управління автобусним маршрутом до проактивного адаптивного управління, за якого керуючі дії формуються не лише за фактичними відхиленнями, а й з урахуванням прогнозного стану пасажиропотоку та очікуваного навантаження на маршрут.

Об’єктом дослідження є процес управління міськими автобусними пасажирськими перевезеннями в умовах змінного просторово-часового попиту.

Предметом дослідження є моделі, методи та інформаційні процедури збору, оброблення, прогнозування й використання даних про пасажиропотік для підтримки адаптивних диспетчерських рішень у системі міських автобусних перевезень.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно розв’язати такі завдання:

1. сформувати структуру інформаційної технології адаптивного управління міським

автобусним маршрутом, яка поєднує дані GPS-моніторингу, обліку пасажирів, електронного квитка та диспетчерських систем;

2. обґрунтувати систему показників для оцінювання фактичного й прогнозного стану маршруту, зокрема пасажиропотоку, інтервалу руху, регулярності, заповнення салону, часу очікування пасажирів і потреби в рухомому складі;

3. розробити логіку вибору адаптивних керуючих дій на основі прогнозу пасажиропотоку, що передбачає коригування інтервалу руху, зміну кількості автобусів на лінії або перерозподіл рухомого складу з урахуванням ресурсних обмежень перевізника.

Розв'язання зазначених завдань дає змогу сформувати методичну основу інформаційної технології, яка може бути використана в цифрових платформах моніторингу громадського транспорту, інформаційно-аналітичних системах перевізників та модулях підтримки диспетчерських рішень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасні дослідження у сфері інформаційних технологій управління міськими автобусними перевезеннями формуються на перетині кількох наукових напрямів: оперативного диспетчерського керування, прогнозування пасажиропотоку, забезпечення регулярності руху, оптимізації використання рухомого складу, інтелектуальної обробки транспортних даних і побудови систем підтримки прийняття рішень. Для теми цієї статті особливо важливими є праці, у яких транспортний маршрут розглядається не як статична схема руху, а як динамічний об'єкт управління, параметри якого мають змінюватися відповідно до фактичного та прогнозного стану попиту.

Одним із базових напрямів є дослідження оперативного управління автобусним рухом у реальному часі. У роботі S. J. Berrebi, E. Hans, N. Chiabaut, J. A. Laval, L. Leclercq та K. E. Watkins [1] порівняно методи утримання автобусів на контрольних пунктах із використанням прогнозної інформації та без неї. Автори показали, що наявність прогнозу дає змогу приймати більш обґрунтовані диспетчерські рішення, оскільки керування виконується не тільки за поточним відхиленням, а й з урахуванням очікуваної зміни інтервалів руху. Це безпосередньо підтверджує доцільність інтеграції прогнозних моделей у структуру інформаційної технології адаптивного управління.

Проблему втручання в роботу маршруту за умов злипання автобусів розглянули A. Petit, Y. Ouyang та C. Tang [2]. У їхньому дослідженні запропоновано динамічну стратегію заміни автобусів як спосіб зменшення негативних наслідків порушення регулярності. Цінність цієї праці для даного дослідження полягає в тому, що вона демонструє: адаптивне управління не обмежується коригуванням інтервалів, а може включати зміну структури випуску та перерозподіл рухомого складу. Отже, інформаційна технологія має підтримувати не одну керуючу дію, а набір альтернативних сценаріїв реагування.

K. Gkiotsalitis та O. Cats [3] дослідили проблему визначення надійної частоти руху з урахуванням невизначеності транспортного обслуговування. Автори довели, що планові інтервали мають встановлюватися з урахуванням імовірнісної природи відхилень у роботі маршруту. Для інформаційної технології це означає необхідність поєднання планових параметрів із поточними та прогнозними даними. S. Zhang, H. K. Lo та Z. Gao [4] розвинули цей підхід у напрямі стійкого динамічного керування з урахуванням затримок і невизначеності пасажирського попиту. Їхні результати підтверджують, що ефективна система управління повинна одночасно враховувати транспортно-технологічні та попитові фактори.

У роботі E. van der Werff, O. Cats, S. Hoogendoorn та H. van Lint [5] розглянуто стійке регулювання частих автобусних сервісів на виділеній смузі. Автори акцентують увагу на необхідності підтримання стабільних інтервалів руху, оскільки саме регулярність є одним із головних чинників якості обслуговування пасажирів. C. A. Iliopoulou, K. Kepaptsoglou та E. Vlahogianni [6] дослідили просторово-часові закономірності злипання автобусів у міських мережах. Їхня праця є важливою для обґрунтування того, що інформаційна технологія повинна оперувати не лише агрегованими показниками маршруту, а й деталізованими даними за зупинками, ділянками та часовими інтервалами.

Окремий блок джерел присвячено плануванню та використанню транспортних ресурсів. V. Boyer, A. El Moudni та M. Mes [7] розглянули задачу планування транспортних засобів і екіпажів для гнучких автобусних систем. S. Carosi, G. Gallo та R. Montemanni [8] запропонували матевристичний підхід до інтегрованого планування розкладу та випуску транспортних засобів. Обидві праці демонструють, що диспетчерські рішення в реальному часі мають спиратися на заздалегідь визначений простір допустимих ресурсних сценаріїв. Інакше адаптивне управління може бути формально правильним з позиції попиту, але неприйнятним з позиції наявності автобусів, водіїв або часових обмежень.

Питання врахування невизначеного попиту у гнучких формах автобусного обслуговування розкрито в роботі Y. Dou, J. Zhou та M. Zhang [9], де досліджено проєктування customized bus service для умов нестабільного попиту на поїздки. J. Xiong, X. Qian, Y. Zhang та співавтори [10] розглянули оптимальне проєктування community shuttles із урахуванням demand response та вибору маршруту пасажирами. G. Andrade-Michel, A. Ceder та J. C. Mun˜oz [11] проаналізували планування транспортних засобів і водіїв для надійних автобусних систем. У сукупності ці праці показують, що сучасне управління пасажирськими

перевезеннями має враховувати не лише обсяг попиту, а й його структуру, напрям, час виникнення та поведінкові характеристики користувачів.

T. Sangveraphunsiri, M. J. Cassidy та C. F. Daganzo [12] запропонували концепцію Jitney-lite як гнучкого підвізного сервісу для приміських транспортних систем із підвищеним попитом. Хоча ця робота не обмежується класичними міськими автобусними маршрутами, вона є методично корисною, оскільки демонструє можливість адаптації схеми обслуговування до змінного пасажиропотоку. T. Zhou, W. Wu, L. Peng, X. Wu, C. Jiao та J. Sun [13] дослідили оцінювання надійності міського автобусного сервісу на змінних часових горизонтах із використанням гібридного методу глибокого навчання. Це важливо для розуміння того, що інформаційна технологія повинна мати різні горизонти прогнозування: короткий — для оперативних диспетчерських дій і довший — для коригування планових режимів роботи.

Найбільш безпосередньо з темою прогнозування пасажиропотоку пов’язані роботи J. Wood, Z. Yu та V. V. Gayah [14], Y. Pei, S. Ran, W. Wang та C. Dong [15], X. Zhai та Y. Shen [16], а також Z. Ghandeharioun, P. Zendehdel Nobari та W. Wu [17]. J. Wood, Z. Yu та V. V. Gayah [14] розробили й оцінили підходи до прогнозування заповнення автобусів у реальному часі, що є важливим для визначення ризику переповнення салону. Y. Pei, S. Ran, W. Wang та C. Dong [15] запропонували модель прогнозування пасажиропотоку на основі WPD, механізму уваги та Bi-LSTM. X. Zhai та Y. Shen [16] використали графову дифузійну згорткову рекурентну нейронну мережу для короткострокового прогнозування автобусного пасажиропотоку. Z. Ghandeharioun, P. Zendehdel Nobari та W. Wu [17] узагальнили можливості глибокого навчання для короткострокового прогнозування пасажирського попиту. Спільним для цих праць є акцент на точності прогнозу, однак менш повно розкритим залишається питання включення прогнозу до логіки прийняття конкретних диспетчерських рішень.

A. Drabicki, R. Kucharski та O. Cats [18] дослідили зменшення злипання автобусів із використанням інформації про заповнення салону в реальному часі. Ця робота є особливо важливою для теми статті, оскільки вона поєднує інформацію про пасажирське навантаження з оперативним управлінням рухом. D. Liu, M. Zhou, H. Wang та J. Li [19] запропонували підхід до утримання автобусів на основі глибокого підкріплювального навчання з урахуванням сприйняття пасажирами часу очікування. J. Wang та L. Sun [20] розробили багатоцільову багатоагентну модель глибокого підкріплювального навчання для зменшення злипання автобусів і часу очікування пасажирів. Ці дослідження підтверджують перспективність інтелектуальних методів управління, але водночас порушують питання пояснюваності рішень, обмежень даних і практичної інтеграції таких моделей у диспетчерські системи.

H. Ma, M. Yang та X. Li [21] дослідили інтегровану оптимізацію маршрутів і розкладів customized bus із урахуванням неоднорідності пасажирів. H. Shang, J. Xu, Y. Wang та співавтори [22] розглянули задачу планування транспортних засобів різних типів для маршрутів, що частково перекриваються. Ці праці є важливими для розширення інформаційної технології в напрямі вибору типу рухомого складу та перерозподілу автобусів між маршрутами. N. Rashvand, S. S. Hosseini, M. Azarbayjani та H. Tabkhi [23] запропонували прогнозування відправлення автобусів у реальному часі з використанням нейронних мереж для smart IoT public bus transit, що підкреслює значення IoT-інфраструктури як джерела оперативних даних.

Оглядовий характер має праця M. Rezazada, A. Tirachini та O. Cats [24], у якій систематизовано сучасні підходи до дослідження bus bunching і визначено перспективний порядок денний майбутніх досліджень. Автори наголошують, що проблема злипання автобусів залишається актуальною навіть за наявності сучасних систем моніторингу. X. Lin, J. Zhao та N. H. M. Wilson [25] дослідили можливості модульних автобусів щодо запобігання злипанню. H. Zheng, T. Liu та A. Chen [26] розглянули альтернативне проєктування сервісної мережі автобусних систем за умов змінних дорожніх порушень. W. Wu, C. Ma, R. Song та співавтори [27] запропонували динамічне планування гнучких автобусних сервісів із гібридними запитами та вимогами справедливості. Ці джерела розширюють проблему адаптивного управління від рівня окремого маршруту до рівня маршрутної мережі та взаємодії різних типів транспортного обслуговування.

Новітній напрям прогнозування пасажиропотоку представлено роботою Y.-Y. Wang, C. Zhang, W.-P. Qu та Z.-H. Jiang [28], у якій запропоновано прогнозування пасажиропотоку для міських автобусних зупинок на основі gated multi-graph convolutional network. Ця праця показує, що для якісного прогнозу необхідно враховувати не лише часову динаміку, а й графову структуру транспортної мережі, взаємозв’язки між зупинками та просторову залежність попиту. C. Lee та Y. Yoon [29] запропонували метод прогнозування часу прибуття автобусів на основі просторово-часового аналізу центральності потоків і глибокого навчання, що є важливим для інформаційної технології, оскільки прогноз пасажиропотоку має бути узгоджений із прогнозом прибуття транспортних засобів. X. Cheng, Y. Nie та J. Lin [30] розглянули автономний модульний громадський транспорт, що демонструє перспективу подальшої трансформації адаптивного управління в умовах появи нових типів рухомого складу та автоматизованих сервісів.

Проведений аналіз 30 джерел дає змогу зробити висновок, що сучасна наукова думка вже має значний

доробок у питаннях прогнозування пасажиропотоку, регулювання інтервалів руху, зменшення злипання автобусів, планування ресурсів і застосування методів глибокого навчання. Водночас значна частина досліджень зосереджена або на власне прогнозній задачі, або на окремому механізмі керування. Менш повно розкритою залишається проблема побудови цілісної інформаційної технології, яка поєднує дані реального часу, прогнозування попиту, оцінювання стану маршруту, вибір керуючої дії та перевірку її ресурсної доцільності.

Отже, актуальними для поглиблення подальших досліджень є такі питання: інтеграція прогнозних моделей пасажиропотоку в контур оперативного диспетчерського управління; формування системи показників для оцінювання поточного й прогнозного стану автобусного маршруту; розроблення правил вибору керуючих дій залежно від рівня попиту, регулярності руху та заповнення салону; урахування ресурсних обмежень перевізника під час адаптивного управління; забезпечення пояснюваності інтелектуальних рішень для диспетчера; узгодження прогнозу пасажиропотоку з прогнозом прибуття автобусів; використання графових моделей для врахування просторової структури маршрутної мережі; оцінювання економічної доцільності адаптивних управлінських впливів. Саме ці питання визначають наукову доцільність розроблення інформаційної технології адаптивного управління міськими автобусними перевезеннями на основі прогнозування пасажиропотоку. За результатами аналізу літературних джерел установлено, що сучасні дослідження достатньо повно розкривають окремі аспекти прогнозування пасажиропотоку, оцінювання регулярності руху, зменшення злипання автобусів та оптимізації використання рухомого складу. Водночас недостатньо опрацьованим залишається питання побудови цілісної інформаційної технології, яка поєднує дані реального часу, короткострокове прогнозування пасажиропотоку, оцінювання стану маршруту та вибір адаптивних диспетчерських рішень з урахуванням ресурсних обмежень перевізника. Саме ця обставина визначає логіку формулювання мети, об’єкта, предмета та завдань даного дослідження.

Виклад основного матеріалу дослідження. Відповідно до сформульованих завдань дослідження доцільно розглянути три групи методів: методи побудови структури інформаційної технології, методи формування системи показників стану автобусного маршруту та методи вибору адаптивних керуючих дій. Такий поділ узгоджується з науковими підходами до інтеграції прогнозування, оцінювання надійності та оперативного керування автобусними перевезеннями [1, 3, 13, 18]. Кожна з цих груп має власну логіку застосування, переваги та обмеження, тому вибір конкретного інструментарію повинен здійснюватися не ізольовано, а з урахуванням загальної мети статті — створення інформаційної технології підтримки диспетчерських рішень на основі прогнозування пасажиропотоку.

Перше завдання полягає у формуванні структури інформаційної технології адаптивного управління міським автобусним маршрутом, яка поєднує дані GPS-моніторингу, обліку пасажирів, електронного квитка та диспетчерських систем. Для його вирішення можуть бути використані такі методи.

Метод системного аналізу. Цей метод передбачає розгляд міського автобусного маршруту як складної відкритої системи, що складається з взаємопов’язаних елементів: транспортних засобів, зупинок, пасажиропотоків, дорожньої інфраструктури, диспетчерського центру, інформаційних потоків і ресурсів перевізника [3, 4, 24]. Його застосування дає змогу визначити межі системи, вхідні та вихідні дані, функціональні блоки, зв’язки між ними та роль прогнозування пасажиропотоку в загальному контурі управління. Перевагою методу є можливість цілісного опису об’єкта дослідження та уникнення фрагментарності, характерної для підходів, що аналізують лише окремі показники маршруту. Недоліком є відносна загальність: системний аналіз сам по собі не дає формальних алгоритмів оброблення даних або вибору керуючих дій, тому потребує доповнення іншими методами.

Метод функціонального моделювання. Функціональне моделювання дає змогу подати інформаційну технологію у вигляді послідовності функцій: збір даних, очищення, синхронізація, агрегація, прогнозування, оцінювання стану маршруту, формування керуючої дії та контроль результату [14, 17, 23]. У межах цього методу можуть бути використані блок-схеми, IDEF0-подібні моделі або узагальнені функціональні діаграми. Перевага методу полягає в наочності та придатності для опису логіки роботи майбутньої інформаційної системи. Він дозволяє чітко показати, які дані потрібні для кожного блоку і який результат формується на виході. Критичним обмеженням є те, що функціональна модель часто описує процес на концептуальному рівні й не завжди враховує часову динаміку, невизначеність і якість даних.

Метод інформаційного моделювання потоків даних. Цей метод орієнтований на опис джерел, форматів, маршрутів передавання та перетворення даних у системі [14, 23, 28, 29]. Для досліджуваної теми він є особливо важливим, оскільки інформаційна технологія повинна об’єднувати різнорідні дані: координати автобусів, час прибуття на зупинки, кількість пасажирів, транзакції електронного квитка, довідкову інформацію про маршрут і диспетчерські події. Перевагою методу є можливість виявити дублювання, розриви, затримки та несумісність даних. Недоліком є те, що він більше зосереджений на інформаційній інфраструктурі, ніж на управлінській сутності транспортного процесу;

тому без системного та функціонального підходів така модель може перетворитися лише на технічну схему обміну даними.

Метод архітектурного проєктування інформаційних систем. Він передбачає визначення рівнів інформаційної технології: рівня збору даних, рівня зберігання, аналітичного рівня, рівня прогнозування, рівня підтримки рішень і рівня взаємодії з диспетчером [18, 23, 30]. Цей метод дає змогу пов'язати наукову модель із практичною реалізацією у вигляді програмного комплексу або цифрової платформи. Його перевага полягає у прикладній спрямованості та можливості масштабування рішення. Критичне обмеження полягає в тому, що архітектурне проєктування може надмірно змістити акцент у бік програмної реалізації, тоді як у науковій статті першочерговим є обґрунтування методичної логіки технології.

Для першого завдання доцільно обрати поєднання системного аналізу, функціонального моделювання та інформаційного моделювання потоків даних. Системний аналіз забезпечує цілісне бачення маршруту як об'єкта управління, функціональне моделювання формує логіку роботи інформаційної технології, а моделювання потоків даних визначає інформаційну основу для прогнозування та підтримки рішень. Архітектурне проєктування доцільно використовувати як допоміжний метод для опису рівнів майбутньої системи.

Друге завдання полягає в обґрунтуванні системи показників для оцінювання фактичного й прогнозного стану маршруту. Для його вирішення можуть бути використані такі методи.

Метод індикаторного оцінювання. Він передбачає формування набору окремих показників, які характеризують роботу маршруту: фактичний пасажиропотік, прогнозний пасажиропотік, інтервал руху, відхилення від планового інтервалу, коефіцієнт заповнення салону, середній час очікування пасажирів, регулярність руху та потреба в автобусах. Перевагою методу є простота, зрозумілість і придатність для практичного використання диспетчером. Кожен показник має безпосередній транспортний зміст і може бути розрахований на основі даних моніторингу. Недоліком є те, що окремі показники можуть давати суперечливі сигнали: наприклад, зменшення інтервалу покращує час очікування, але збільшує витрати перевізника.

Метод інтегрального оцінювання. Цей метод передбачає об'єднання кількох часткових показників в один узагальнений індекс стану маршруту або рівня якості обслуговування. Такий індекс може враховувати регулярність руху, заповнення салону, час очікування, прогнозний попит і ресурсне навантаження. Перевагою методу є можливість швидко класифікувати стан маршруту як нормальний, напружений або критичний. Це зручно для інформаційної панелі диспетчера. Критичним недоліком є суб'єктивність вибору вагових коефіцієнтів і ризик втрати важливої інформації: високий інтегральний бал може приховувати критичне значення одного з часткових показників.

Метод порогового аналізу. Його сутність полягає у встановленні допустимих меж для основних показників: максимального коефіцієнта заповнення салону, допустимого відхилення інтервалу руху, граничного часу очікування, мінімального рівня регулярності та критичного прогнозного пасажиропотоку. Якщо показник перевищує поріг, система формує сигнал про необхідність керуючого впливу. Перевагою методу є простота реалізації та висока пояснюваність для диспетчера. Недоліком є жорсткість: пороги можуть бути різними для пікового та міжпікового періоду, для різних маршрутів, типів автобусів і днів тижня. Тому фіксовані пороги потребують адаптації.

Метод багатокритеріального аналізу. Цей метод дає змогу одночасно враховувати кілька критеріїв, які мають різну природу: якість обслуговування пасажирів, регулярність руху, рівень завантаження салону, витрати перевізника та ресурсну доступність. Він особливо корисний тоді, коли необхідно порівнювати альтернативні стани маршруту або альтернативні управлінські рішення. Перевагою є гнучкість і можливість урахування компромісів. Недоліком є складність практичного налаштування, потреба у вагових коефіцієнтах і більші вимоги до якості вхідних даних.

Для другого завдання доцільно обрати комбінацію індикаторного оцінювання, порогового аналізу та елементів багатокритеріального аналізу. Індикаторний підхід забезпечує прозорий набір показників, пороговий аналіз дає змогу своєчасно виявляти критичні стани, а багатокритеріальний аналіз потрібний для порівняння альтернативних керуючих дій. Інтегральний індекс доцільно використовувати обмежено — як допоміжний інформаційний показник, але не як єдину основу для прийняття рішення.

Третє завдання полягає у розробленні логіки вибору адаптивних керуючих дій на основі прогнозу пасажиропотоку. Для його вирішення можуть бути використані такі методи.

Правилово-логічний метод. Він передбачає формування набору правил типу "якщо — то". Наприклад, якщо прогнозний пасажиропотік перевищує допустиму місткість автобусів за поточним інтервалом, то система рекомендує скорочення інтервалу або випуск додаткового автобуса. Якщо регулярність руху порушена, але заповнення салону є помірним, може бути рекомендоване утримання автобуса на контрольному пункті. Перевагою методу є висока пояснюваність і простота впровадження в диспетчерську систему. Недоліком є обмежена гнучкість: за великої кількості ситуацій кількість правил швидко зростає, а їх узгодження стає складним.

Оптимізаційний метод. У цьому випадку вибір керуючої дії розглядається як задача мінімізації або

максимізації цільової функції. Наприклад, можна мінімізувати сумарний час очікування пасажирів, відхилення від регулярного інтервалу та додаткові експлуатаційні витрати. Перевага методу полягає у формальній строгості та можливості знаходити найкраще рішення за заданими критеріями. Недоліком є потреба в точних вхідних даних, складність урахування всіх обмежень і потенційно висока обчислювальна складність для роботи в реальному часі.

Метод сценарного аналізу. Він передбачає формування декількох можливих сценаріїв реагування: збереження поточного режиму, скорочення інтервалу, збільшення інтервалу, випуск додаткового автобуса, утримання автобуса, заміна типу рухомого складу або перерозподіл автобусів між маршрутами. Кожен сценарій оцінюється за системою показників, після чого обирається найбільш прийнятний. Перевагою методу є практична зрозумілість і можливість урахування досвіду диспетчера. Недоліком є те, що якість рішення залежить від повноти сформованих сценаріїв; якщо потрібний варіант не включено до набору, система не зможе його запропонувати.

Методи машинного навчання та підкріплювального навчання. Такі методи можуть використовуватися для прогнозування наслідків керуючих дій або автоматичного вибору дії на основі історичних даних. Підкріплювальне навчання особливо перспективне для задач динамічного керування автобусами, оскільки система може навчатися на винагороді, пов’язаній зі зменшенням часу очікування, покращенням регулярності та зниженням переповнення. Перевагою є здатність враховувати складні нелінійні залежності. Критичними недоліками є потреба у великих масивах якісних даних, складність пояснення отриманих рішень, ризик нестабільної поведінки моделі та проблеми практичного впровадження в реальні диспетчерські системи.

Для третього завдання доцільно обрати поєднання правилово-логічного методу, сценарного аналізу та елементів оптимізаційного підходу. Правилово-логічний метод забезпечує пояснюваність управлінських рекомендацій, сценарний аналіз дозволяє порівнювати кілька допустимих варіантів реагування, а оптимізаційний підхід використовується для вибору кращого сценарію за критеріями якості обслуговування й ресурсної доцільності. Методи машинного навчання доцільно застосовувати насамперед для прогнозування пасажиропотоку та оцінювання наслідків рішень, але не як єдиний механізм автоматичного керування, оскільки для практичного диспетчерського управління важливими є прозорість, контрольованість і пояснюваність рекомендацій.

Проведений огляд показує, що жоден окремий метод не забезпечує повного вирішення поставлених завдань. Для розроблення інформаційної технології адаптивного управління міськими автобусними перевезеннями необхідна комбінована методична основа. Для формування структури технології обрано системний аналіз, функціональне моделювання та моделювання інформаційних потоків, оскільки вони дозволяють одночасно описати транспортний маршрут як об’єкт управління, логіку роботи технології та джерела даних. Для оцінювання стану маршруту обрано індикаторний підхід, пороговий аналіз і багатокритеріальне порівняння, оскільки вони забезпечують зрозумілу інтерпретацію показників і можливість виявлення критичних ситуацій. Для вибору керуючих дій обрано правилово-логічний метод, сценарний аналіз та елементи оптимізації, оскільки така комбінація поєднує пояснюваність, практичну придатність і можливість урахування ресурсних обмежень перевізника.

Таким чином, у межах цієї статті базовим підходом до вирішення поставлених завдань є комбінована інформаційно-аналітична методика, у якій прогнозування пасажиропотоку використовується як вхід до системи оцінювання стану маршруту, а вибір диспетчерського рішення здійснюється шляхом порівняння допустимих сценаріїв за транспортними, сервісними та ресурсними критеріями. Саме такий вибір методів є доцільним, оскільки він відповідає умовам реального часу, зберігає можливість пояснення рекомендацій диспетчеру та дозволяє поступово інтегрувати більш складні моделі машинного навчання без втрати керованості всієї системи.

Виклад основного матеріалу дослідження. Моделювання інформаційної технології адаптивного управління міськими автобусними перевезеннями передбачає формалізацію послідовності етапів, у межах яких первинні дані про роботу маршруту перетворюються на прогнозну інформацію, оцінку стану транспортного процесу та диспетчерську рекомендацію. Запропонована технологія має циклічний характер, оскільки після реалізації керуючої дії система знову отримує оновлені дані про стан маршруту, порівнює очікуваний і фактичний результат та коригує параметри подальшого управління.

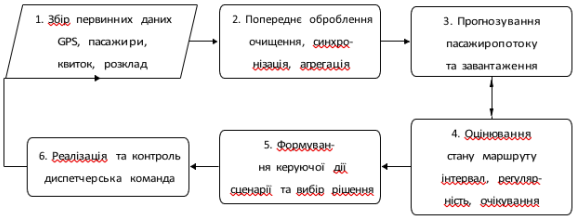


Рис. 1: Структурна схема інформаційної технології адаптивного управління міськими автобусними перевезеннями

Як показано на рис. 1, інформаційна технологія складається з шести взаємопов'язаних етапів. Кожен етап має власні вхідні дані, функції оброблення та вихідні результати, які передаються до наступного блоку. Завдяки цьому забезпечується послідовне перетворення розрізнених транспортних даних у практично придатну диспетчерську рекомендацію.

Етап 1. Збір первинних даних. На першому етапі формується інформаційна база про фактичну роботу автобусного маршруту. Вхідними даними є GPS-координати автобусів, часові мітки проходження зупинок, дані електронного квитка, результати автоматизованого підрахунку пасажирів, плановий розклад руху, довідкова інформація про місткість автобусів, схема маршруту, перелік зупинок, дані про дорожні затримки та диспетчерські повідомлення. Основною функцією цього етапу є безперервне отримання різнорідних даних із технічних і організаційних джерел. Вихідним результатом є набір первинних записів про положення автобусів, пасажирські операції, часові параметри руху та поточні події на маршруті. Цей етап є базовим, оскільки якість усіх наступних розрахунків залежить від повноти та своєчасності отриманих даних.

Етап 2. Попереднє оброблення та інтеграція даних. Вхідними даними для другого етапу є первинні записи, отримані на попередньому етапі. Вони можуть мати різні формати, часову дискретність, похибки, пропуски або дублювання. Функції цього блоку полягають в очищенні даних, вилученні некоректних значень, синхронізації часових міток, прив'язці GPSкоординат до зупинок і ділянок маршруту, агрегуванні пасажирських операцій за рейсами та часовими інтервалами, а також поєднанні фактичних даних із плановим розкладом. Вихідним результатом є узгоджений масив даних, придатний для аналітичної обробки: таблиці фактичного руху автобусів, інтервалів між транспортними засобами, кількості пасажирів за зупинками, рівня заповнення салону та відхилень від планового режиму роботи.

Етап 3. Прогнозування пасажиропотоку та завантаження маршруту. Вхідними даними цього етапу є очищені й агреговані дані про фактичний пасажиропотік, історичні закономірності попиту, поточний час, день тижня, напрям руху, характеристики зупинок, інтервали руху та поточне положення автобусів. Основною функцією є короткострокове прогнозування кількості пасажирів, які очікуватимуть посадки або перебуватимуть у салоні автобуса на найближчому часовому горизонті. Прогноз може формуватися за допомогою статистичних моделей, моделей часових рядів, машинного навчання або графових моделей, якщо враховується просторова структура маршрутної мережі. Вихідним результатом є прогнозний пасажиропотік за зупинками, ділянками маршруту та часовими інтервалами, а також очікуваний рівень заповнення автобусів.

Етап 4. Оцінювання фактичного й прогнозного стану маршруту. На цьому етапі вхідними даними є прогноз пасажиропотоку, фактичні інтервали руху, поточне положення автобусів, дані про заповнення салону, плановий розклад і ресурсні характеристики рухомого складу. Функції блоку полягають у розрахунку системи показників: фактичного та прогнозного пасажиропотоку, коефіцієнта заповнення салону, середнього часу очікування пасажирів, регулярності руху, відхилення від планового інтервалу, ризику злипання автобусів і потреби в додатковому транспортному ресурсі. Вихідним результатом є класифікація стану маршруту: нормальний, напружений або критичний. Додатково формується перелік проблемних зупинок, ділянок або часових інтервалів, де очікується перевантаження або погіршення регулярності.

Етап 5. Формування та вибір адаптивної керуючої дії. Вхідними даними цього етапу є оцінка стану маршруту, прогнозні показники, перелік допустимих ресурсів перевізника, кількість доступних автобусів, типи рухомого складу, обмеження щодо водіїв, допустимі інтервали руху та правила диспетчерського управління. Основні функції полягають у формуванні можливих сценаріїв реагування: збереження поточного режиму, скорочення або збільшення інтервалу, випуск додаткового автобуса, тимчасове утримання автобуса на контрольному пункті, заміна типу рухомого складу або перерозподіл автобусів між маршрутами. Кожен сценарій оцінюється за критеріями якості обслуговування, очікуваного часу очікування, регулярності, заповнення салону та ресурсної доцільності. Вихідним результатом є рекомендована керуюча дія або ранжований список альтернативних дій для диспетчера.

Етап 6. Реалізація рішення, моніторинг результату та зворотний зв'язок. Вхідними даними є обрана керуюча дія, диспетчерська команда, фактичні дані про подальший рух автобусів і оновлена інформація про пасажиропотік. Функції етапу полягають у передачі рішення до диспетчера або відповідного виконавчого модуля, контролі виконання команди, фіксації фактичного ефекту та порівнянні очікуваного результату з реальним. Вихідним результатом є оновлена оцінка стану маршруту, інформація про ефективність прийнятого рішення та дані для коригування параметрів прогнозування й правил вибору керуючих дій. Саме цей блок забезпечує замкнений контур адаптивного управління.

Зв'язки між блоками мають послідовний і зворотний характер. Послідовний зв'язок забезпечує рух інформації від збору даних до формування диспетчерського рішення: первинні дані очищуються, перетворюються на прогноз, прогноз використовується для оцінювання стану маршруту, а оцінка стану є основою для вибору керуючої дії. Зворотний зв'язок виникає після реалізації рішення: фактичні результати знову надходять до блоку збору

та оброблення даних, що дозволяє оновити прогноз і перевірити ефективність попередньої дії. Додатковий аналітичний зв'язок між блоками оцінювання та прогнозування дає змогу уточнювати прогнозні параметри, якщо система фіксує систематичні відхилення між очікуваним і фактичним пасажиропотоком.

Отже, запропонована модель інформаційної технології забезпечує перехід від простого моніторингу автобусного маршруту до адаптивного управління на основі прогнозної інформації. Її перевагою є поєднання даних реального часу, короткострокового прогнозування, системи показників стану маршруту та механізму вибору диспетчерських рішень. Така структура є придатною для подальшої формалізації у вигляді алгоритмів, інформаційних моделей і програмних модулів підтримки управління міськими автобусними перевезеннями.

У результаті проведеного дослідження сформовано концептуальну модель інформаційної технології адаптивного управління міськими автобусними перевезеннями на основі прогнозування пасажиропотоку. Отриманий результат полягає не лише в описі окремих методів моніторингу чи прогнозування, а у побудові цілісної послідовності перетворення транспортних даних у диспетчерське рішення. Запропонована технологія охоплює шість взаємопов'язаних етапів: збір первинних даних, попереднє оброблення та інтеграцію, прогнозування пасажиропотоку, оцінювання фактичного й прогнозного стану маршруту, формування адаптивної керуючої дії, реалізацію рішення та організацію зворотного зв'язку.

Наукова характеристика отриманого результату полягає в тому, що автобусний маршрут розглянуто як динамічний об'єкт інформаційного управління, стан якого визначається не тільки фактичними транспортними показниками, але й прогнозними параметрами пасажиропотоку. На відміну від підходів, у яких прогнозування попиту виступає самостійною аналітичною задачею, у цій роботі прогнозний блок включено до загального контуру прийняття диспетчерських рішень. Це дозволяє розглядати прогноз пасажиропотоку як підставу для вибору конкретної управлінської дії: зміни інтервалу руху, випуску додаткового автобуса, утримання транспортного засобу, перерозподілу рухомого складу або зміни типу автобуса.

Практична характеристика отриманого результату полягає у можливості використання запропонованої технології як методичної основи для створення інформаційно-аналітичного модуля підтримки диспетчерських рішень. Такий модуль може бути інтегрований у цифрові платформи моніторингу громадського транспорту, системи GPS-контролю, електронного квитка або автоматизованого обліку пасажирів. Практична цінність технології полягає в її орієнтації на реальні завдання перевізника: своєчасне виявлення ризику переповнення салонів, зменшення часу очікування пасажирів, підтримання регулярності руху, раціональне використання автобусів і підвищення обґрунтованості диспетчерських втручань.

Наукова новизна дослідження полягає у розвитку підходу до адаптивного управління міськими автобусними перевезеннями шляхом поєднання прогнозування пасажиропотоку, індикаторного оцінювання стану маршруту, порогового аналізу, сценарного вибору керуючих дій і зворотного зв'язку в межах єдиної інформаційної технології. На відміну від традиційних підходів, що орієнтуються переважно на фіксацію фактичних відхилень від розкладу, запропонована технологія передбачає використання прогнозної інформації для завчасного формування управлінських рішень. Це створює передумови для переходу від реактивного до проактивного управління автобусними маршрутами.

Важливим результатом є також формалізація зв'язків між блоками технології. Блок збору даних забезпечує первинну інформаційну основу; блок оброблення перетворює її на узгоджені аналітичні масиви; блок прогнозування формує очікувані значення пасажиропотоку та завантаження; блок оцінювання визначає рівень напруженості або критичності стану маршруту; блок вибору керуючої дії формує практичну рекомендацію; блок реалізації та контролю забезпечує замикання контуру управління. Саме наявність зворотного зв'язку відрізняє запропоновану технологію від лінійних інформаційних схем, у яких дані лише відображаються диспетчеру без системного аналізу наслідків прийнятого рішення.

Сильними сторонами дослідження є цілісність запропонованої структури, орієнтація на використання даних реального часу, поєднання прогнозування з управлінською логікою, пояснюваність рекомендованих рішень і можливість практичної реалізації в диспетчерських системах. До переваг також належить те, що технологія не прив'язана до одного конкретного алгоритму прогнозування. Це дозволяє використовувати як прості статистичні моделі, так і складніші методи машинного навчання або графові нейронні мережі залежно від доступності даних і технічних можливостей перевізника.

Водночас дослідження має низку обмежень. По-перше, запропонована модель має концептуальнометодичний характер і потребує подальшої апробації на фактичних даних конкретного міського маршруту. По-друге, якість роботи технології значною мірою залежить від повноти, точності та своєчасності вхідних даних. Якщо GPS-дані мають пропуски, електронний квиток не охо-

плює всі категорії пасажирів, а автоматизований підрахунок пасажирів відсутній або неточний, прогноз і подальші управлінські рекомендації можуть бути спотвореними. По-третє, у роботі не

виконано кількісного порівняння різних алгоритмів прогнозування, тому вибір конкретної прогнозної моделі залишається предметом подальшого дослідження.

Критичного аналізу потребує також питання практичної реалізації адаптивних керуючих дій. Навіть якщо інформаційна система рекомендує випуск додаткового автобуса або зміну типу рухомого складу, таке рішення може бути обмежене фактичною наявністю автобусів, водіїв, графіками роботи персоналу, технічним станом рухомого складу та економічними умовами перевізника. Тому інформаційна технологія не повинна розглядатися як повністю автономна система керування. Її доцільніше трактувати як систему підтримки рішень, у якій остаточне управлінське рішення залишається за диспетчером або відповідальною особою.

Наукові перспективи подальших досліджень полягають у математичній формалізації кожного блоку запропонованої технології, розробленні алгоритму короткострокового прогнозування пасажиропотоку, побудові інтегрального або багатокритеріального показника стану маршруту, а також у створенні моделі вибору керуючих дій з урахуванням транспортних, сервісних і ресурсних обмежень. Окремим перспективним напрямом є використання графових моделей, які дозволяють враховувати просторову структуру маршрутної мережі та взаємозв'язки між зупинками, маршрутами й пересадковими вузлами.

Практичні перспективи полягають у розробленні програмного прототипу інформаційної технології та його тестуванні на даних реального автобусного маршруту. Такий прототип може включати інформаційну панель диспетчера, модуль прогнозування пасажиропотоку, блок виявлення критичних ситуацій, модуль сценарного аналізу та журнал оцінювання ефективності прийнятих рішень. Упровадження подібного рішення може бути корисним для міських перевізників, органів місцевого самоврядування, операторів транспортних даних і розробників інтелектуальних транспортних систем.

Отже, отримані результати мають як наукове, так і практичне значення. Наукове значення полягає у формуванні методичної основи інформаційної технології адаптивного управління автобусними перевезеннями, що поєднує прогнозування, оцінювання стану маршруту та вибір керуючої дії. Практичне значення полягає у можливості використання запропонованої структури для створення цифрових інструментів підтримки диспетчерського управління. Основною умовою подальшого розвитку дослідження є перехід від концептуальної моделі до кількісної апробації на фактичних транспортних даних.

Для кількісного оцінювання ефекту від упровадження запропонованої інформаційної технології доцільно порівнювати два режими функціонування автобусного маршруту: базовий режим без адаптивного управління та проєктний режим після введення технології. Нехай індекс 0 відповідає базовому стану, а індекс 1 — стану після впровадження. Розрахунки виконуються для маршруту, групи маршрутів або всієї мережі за період спостереження T.

Початково визначається фактичний пасажиропотік на маршруті (1):

$$Q = \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{n} q_{it}, \quad (1)$$

де Q — загальний пасажиропотік за період T; q_{it} — кількість пасажирів на i-й зупинці або ділянці у часовому інтервалі t; n — кількість зупинок або контрольних ділянок. Формула показує сумарний попит, який повинна обслужити транспортна система.

Середній фактичний інтервал руху автобусів обчислюється як (2):

$$\bar{h} = \frac{1}{m-1} \sum_{j=2}^{m} (\tau_j - \tau_{j-1}), \quad (2)$$

де $\bar{h}$ — середній інтервал руху; τ_j — час прибуття j-го автобуса на контрольну зупинку; m — кількість зафіксованих прибуттів. Показник характеризує частоту обслуговування пасажирів.

Середній час очікування пасажира за припущення випадкового прибуття на зупинку визначається так (3):

$$\overline{W} = \frac{\bar{h}}{2}, \quad (3)$$

де $\overline{W}$ — середній час очікування; $\bar{h}$ — середній інтервал руху. Зменшення інтервалу безпосередньо скорочує очікування пасажирів.

Якщо інтервали нерівномірні, точніше оцінювання очікування виконується за формулою (4):

$$\overline{W_r} = \frac{\sum_{j=1}^{m} h_j^2}{2 \sum_{j=1}^{m} h_j}, \quad (4)$$

де $\overline{W}_r$ — середній час очікування з урахуванням нерегулярності; h_j — фактичний інтервал між сусідніми автобусами. Формула враховує, що великі розриви між автобусами непропорційно збільшують очікування.

Ефект від скорочення часу очікування одного пасажира визначається як (5):

$$\Delta W = \overline{W_0} - \overline{W_1}, \quad (5)$$

де ΔW — економія часу очікування; $\overline{W}_0$ і $\overline{W}_1$ — середній час очікування до та після впровадження технології. Додатне значення означає поліпшення сервісу. Загальна економія пасажирського часу становить (6):

$$E_{time} = Q \cdot \Delta W, \quad (6)$$

де E_{time} — сумарна економія часу пасажирів; Q — пасажиропотік; ΔW — скорочення очікування одного пасажира. Показник переводить локальне поліпшення сервісу в загальний часовий ефект.

Грошова оцінка економії часу пасажирів може бути розрахована так (7):

$$E_{money} = E_{time} \cdot c_{time}, \quad (7)$$

де E_{money} — вартісний ефект від економії часу; c_{time} — вартість однієї години пасажирського часу. Формула дозволяє порівнювати соціальний ефект із витратами на технологію. Коефіцієнт заповнення салону автобуса визначається формулою (8):

$$K_{load} = \frac{P}{C}, \quad (8)$$

де K_{load} — коефіцієнт заповнення; P — фактична кількість пасажирів у салоні; C — місткість автобуса. Значення більше одиниці свідчить про перевантаження.

Середній коефіцієнт заповнення за маршрутом обчислюється як (9):

$$\bar{K}_{load} = \frac{1}{Tn}\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{n}\frac{P_{it}}{C_{it}}, \quad (9)$$

де P_{it} — кількість пасажирів на ділянці i у момент t; C_{it} — місткість автобуса, що обслуговує цю ділянку. Показник дає узагальнену оцінку використання місткості рухомого складу.

Ефект від зниження перевантаження салону задається як (10):

$$\Delta K_{over} = \max\left(0, \bar{K}_{load,0} - 1\right) - \max\left(0, \bar{K}_{load,1} - 1\right), \quad (10)$$

де ΔK_{over} — зменшення надлишкового заповнення; $\bar{K}_{load,0}$ і $\bar{K}_{load,1}$ — середнє заповнення до та після впровадження. Формула показує, наскільки технологія зменшує переповнення понад нормативну місткість.

Регулярність руху можна оцінити через середнє абсолютне відхилення від планового інтервалу (11):

$$D_h = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\left|h_j - h^{plan}\right|, \quad (11)$$

де D_h — середнє відхилення інтервалу;
h_j — фактичний інтервал; h^{plan} — плановий інтервал.

Менше значення означає стабільніший рух.

Поліпшення регулярності руху визначається так (12):

$$E_{reg} = \frac{D_{h0} - D_{h1}}{D_{h0}} \cdot 100\%, \quad (12)$$

де E_{reg} — відносне поліпшення регулярності; D_{h0} і D_{h1} — відхилення інтервалів до та після впровадження. Формула показує, на скільки відсотків зменшилася нерегулярність.

Ризик злипання автобусів можна формалізувати як частку критично малих інтервалів (13):

$$R_{bunch} = \frac{N(h_j < h_{crit})}{m}, \quad (13)$$

де R_{bunch} — ризик злипання; $N(h_j < h_{crit})$ — кількість випадків, коли інтервал менший за критичний; h_{crit} — мінімально допустимий інтервал. Показник оцінює ймовірність появи групового руху автобусів.

Ефект від зменшення злипання визначається як (14):

$$E_{bunch} = \frac{R_{bunch,0} - R_{bunch,1}}{R_{bunch,0}} \cdot 100\%, \quad (14)$$

де E_{bunch} — відсоткове зниження ризику злипання; $R_{bunch,0}$ і $R_{bunch,1}$ — ризики до та після введення технології. Формула показує стабілізувальний ефект адаптивного управління.

Експлуатаційні витрати перевізника за період можна подати як (15):

$$C_{op} = L \cdot c_{km} + H \cdot c_{hour} + N_b \cdot c_{fix}, \quad (15)$$

де C_{op} — експлуатаційні витрати; L — сумарний пробіг автобусів; c_{km} — витрати на один кілометр; H — сумарні машино-години; c_{hour} — витрати на одну машино-годину; N_b — кількість автобусів; c_{fix} — умовно-постійні витрати на автобус. Формула враховує пробіг, час роботи та ресурсне навантаження.

Економія експлуатаційних витрат після впровадження технології дорівнює (16):

$$E_{op} = C_{op,0} - C_{op,1}, \quad (16)$$

де E_{op} — економія витрат перевізника; $C_{op,0}$ і $C_{op,1}$ — витрати до та після впровадження.

Додатне значення означає, що технологія зменшила операційні витрати.

Додатковий дохід від збереження або залучення пасажирів оцінюється формулою (17):

$$E_{rev} = (Q_1 - Q_0) \cdot f, \quad (17)$$

де E_{rev} — приріст доходу; Q_1 і Q_0 — пасажиропотік після та до впровадження; f — середній тариф або дохід з одного пасажира. Формула показує фінансовий ефект від підвищення привабливості маршруту.

Витрати на впровадження інформаційної технології визначаються як (18):

$$C_{it} = C_{soft} + C_{hard} + C_{data} + C_{train} + C_{maint}, \quad (18)$$

де C_{it} — повні витрати на технологію; C_{soft} — витрати на програмне забезпечення; C_{hard} — витрати на обладнання; C_{data} — витрати на дані та інтеграцію; C_{train} — навчання персоналу; C_{maint} — супровід і

технічна підтримка. Формула визначає інвестиційну базу для оцінки окупності.

Сумарний річний ефект від упровадження технології можна подати так (19):

$$E_{sum} = E_{money} + E_{op} + E_{rev}, \quad (19)$$

де E_{sum} — загальний ефект; E_{money} — вартісна оцінка економії часу пасажирів; E_{op} — економія експлуатаційних витрат; E_{rev} — додатковий дохід. Формула об'єднує соціальний і економічний результати.

Чистий ефект за розрахунковий період визначається як (20):

$$E_{net} = E_{sum} - C_{it}, \quad (20)$$

де E_{net} — чистий ефект; E_{sum} — сумарний ефект; C_{it} — витрати на впровадження. Якщо $E_{net} > 0$, упровадження є економічно доцільним.

Коефіцієнт економічної ефективності розраховується за формулою (21):

$$K_{eff} = \frac{E_{sum}}{C_{it}}, \quad (21)$$

де K_{eff} — коефіцієнт ефективності; E_{sum} — отриманий ефект; C_{it} — витрати на технологію.

Якщо $K_{eff} > 1$, ефект перевищує витрати.

Строк окупності впровадження становить (22):

$$T_{pay} = \frac{C_{it}}{E_{sum}}, \quad (22)$$

де T_{pay} — строк окупності; C_{it} — інвестиційні витрати; E_{sum} — середньорічний ефект. Формула показує, за скільки років або місяців технологія компенсує витрати на впровадження.

Інтегральний показник сервісного ефекту можна розрахувати як зважену суму нормованих поліпшень (23):

$$I_{serv} = w_1 \frac{\Delta W}{W_0} + w_2 \frac{\Delta K_{over}}{K_{over,0}} + w_3 \frac{D_{h0} - D_{h1}}{D_{h0}} + w_4 \frac{R_{bunch,0} - R_{bunch,1}}{R_{bunch,0}}, \quad (23)$$

де I_{serv} — інтегральний сервісний ефект; w_1, w_2, w_3, w_4 — вагові коефіцієнти критеріїв; складові формули відповідають скороченню очікування, зменшенню перевантаження, підвищенню регулярності та зниженню ризику злипання. Показник дозволяє порівнювати різні сценарії керування за єдиною шкалою.

Загальний висновок щодо ефективності впровадження можна сформувати за умовою (24):

$$\begin{cases} \text{технологія добра}, E_{net} > 0,\ K_{eff} > 1,\ I_{serv} > I_{min}, \\ \text{технологія потребує доопрацювання, інакше} \end{cases} \quad (24)$$

де I_{min} — мінімально допустимий сервісний ефект.

Формула (24) задає логічне правило, за яким технологія визнається ефективною лише за одночасного виконання трьох умов: наявності додатного чистого ефекту, перевищення отриманого ефекту над витратами та досягнення мінімального сервісного результату. Перша умова $E_{net} > 0$ показує, що після врахування витрат на впровадження система створює додаткову цінність. Друга умова $K_{eff} > 1$ підтверджує, що кожна вкладена у технологію грошова одиниця повертається у вигляді більшого сукупного ефекту. Третя умова $I_{serv} > I_{min}$ гарантує, що економічна вигода не досягається за рахунок погіршення якості перевезень, а супроводжується реальним поліпшенням очікування, регулярності, завантаження та стійкості руху.

Таким чином, наведений розрахунок ефективності дає змогу оцінити запропоновану інформаційну технологію не лише з технічної, а й з економічної та сервісної позицій. Його перевага полягає в тому, що він поєднує показники пасажирського часу, регулярності руху, заповнення салону, ризику злипання автобусів, експлуатаційних витрат і доходів перевізника. Такий підхід дозволяє уникнути однобічної оцінки, коли ефективність визначається тільки скороченням витрат або тільки підвищенням якості обслуговування. Запропоновані формули можуть бути використані як для попереднього обґрунтування доцільності впровадження, так і для подальшого моніторингу фактичних результатів роботи системи. У практичному застосуванні значення показників доцільно розраховувати окремо для пікових, міжпікових і вечірніх періодів, оскільки ефект адаптивного управління в ці часові інтервали може істотно відрізнятися. Особливу увагу слід приділяти порівнянню базового та проєктного режимів за однакових зовнішніх умов, щоб отриманий ефект був пов'язаний саме з дією інформаційної технології. Якщо за результатами розрахунків одночасно зменшуються час очікування, нерегулярність руху, перевантаження салону та експлуатаційні витрати, то впровадження технології можна вважати обґрунтованим. Отже, математичний апарат оцінювання ефективності завершує розділ 6 і створює основу для переходу від концептуального опису технології до її кількісної апробації на реальних даних міських автобусних перевезень.

Висновки. У роботі розглянуто проблему розроблення інформаційної технології адаптивного управління міськими автобусними перевезеннями на основі прогнозування пасажиропотоку. Встановлено, що традиційне управління автобусними маршрутами, яке спирається переважно на фіксовані розклади та усереднені значення попиту, не повною мірою відповідає умовам сучасного міського середовища. Нерівномірність пасажиропотоку, зміна дорожньої ситуації, порушення регулярності руху та обмеженість транспортних ресурсів зумовлюють потребу в переході до проактивного управління на основі даних реального часу.

За результатами аналізу літературних джерел визначено, що сучасні дослідження активно розвивають методи прогнозування пасажиропотоку, оцінювання заповнення салону, запобігання злипанню автобусів і оптимізації використання рухомого складу. Водночас недостатньо розкритим залишається питання інтеграції цих елементів у єдину інформаційну технологію, яка забезпечує повний цикл підтримки диспетчерських рішень: від збору даних до реалізації керуючої дії та оцінювання її результату.

У роботі сформовано структуру інформаційної технології, що включає шість етапів: збір первинних даних, попереднє оброблення та інтеграцію, прогнозування пасажиропотоку, оцінювання фактичного й прогнозного стану маршруту, формування адаптивної керуючої дії, реалізацію рішення та зворотний зв'язок. Для кожного етапу визначено функції, вхідні дані та вихідні результати. Запропонована структура дозволяє розглядати прогноз пасажиропотоку не як окрему аналітичну процедуру, а як складову контуру оперативного управління міським автобусним маршрутом.

Наукова новизна роботи полягає у розвитку підходу до адаптивного управління автобусними перевезеннями шляхом поєднання прогнозування пасажиропотоку, системи показників стану маршруту, сценарного вибору керуючих дій і механізму зворотного зв'язку в межах єдиної інформаційної технології. Практичне значення полягає в можливості використання отриманих результатів для створення інформаційно-аналітичного модуля підтримки диспетчерських рішень у системах громадського транспорту.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на кількісну апробацію запропонованої технології на фактичних даних міських автобусних маршрутів, розроблення алгоритму короткострокового прогнозування пасажиропотоку, створення програмного прототипу та оцінювання ефективності адаптивних керуючих дій за показниками регулярності руху, часу очікування пасажирів, завантаження салону й ресурсної доцільності для перевізника.

Література

1. Comparing bus holding methods with and without real-time predictions / S. J. Berrebi [et al.] // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2018. Vol. 87. P. 197–211. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.07.012.
2. Petit A., Ouyang Y., Tang C. Dynamic bus substitution strategy for bunching intervention // Transportation Research Part B: Methodological. 2018. Vol. 115. P. 1–16. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.06.007.
3. Gkiotsalitis K., Cats O. Reliable frequency determination: Incorporating information on service uncertainty when setting dispatching headways // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2019. Vol. 88. P. 187–207. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.11.026.
4. Zhang S., Lo H. K., Gao Z. Robust dynamic bus controls considering delay disturbances and passenger demand uncertainty // Transportation Research Part B: Methodological. 2019. Vol. 125. P. 277–308. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.03.019.
5. Robust control for regulating frequent bus service on a dedicated bus lane / E. van der Werff [et al.] // Transportation Research Record. 2019. Vol. 2673, no. 8. P. 139–149. DOI: https://doi.org/10.1177/0361198119845893.
6. Iliopoulou C. A., Kepaptsoglou K., Vlahogianni E. Identifying spatio-temporal patterns of bus bunching in urban networks // Journal of Intelligent Transportation Systems. 2020. Vol. 24, no. 4. P. 365–378. DOI: https://doi.org/10.1080/15472450.2020.1722949.
7. Boyer V., El Moudni A., Mes M. Vehicle and crew scheduling for flexible bus transportation systems // Transportation Research Part B: Methodological. 2018. Vol. 111. P. 99–118. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.04.008.
8. Carosi S., Gallo G., Montemanni R. A matheuristic for integrated timetabling and vehicle scheduling // Transportation Research Part B: Methodological. 2019. Vol. 127. P. 99–124. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.07.004.
9. Dou Y., Zhou J., Zhang Z. Customized bus service design for uncertain commuting travel demand // Transportmetrica A: Transport Science. 2021. Vol. 17, no. 3. P. 197–219. DOI: https://doi.org/10.1080/23249935.2020.1864509.
10. Optimal design of community shuttles considering demand response and route choice / J. Xiong [et al.] // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2021. Vol. 131. Article 103109. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103109.
11. Andrade-Michel G., Ceder A., Muñoz J. C. Vehicle and reliable driver scheduling for public bus transportation systems // Transportation Research Part B: Methodological. 2021. Vol. 150. P. 249–272. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.01.011.
12. Sangveraphunsiri T., Cassidy M. J., Daganzo C. F. Jitney-lite: A flexible-route feeder service for higher-ridership suburban transit systems // Transportation Research Part B: Methodological. 2022. Vol. 157. P. 245–269. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.12.015.
13. Evaluation of urban bus service reliability on variable time horizons using a hybrid deep learning method / T. Zhou [et al.] // Reliability Engineering & System Safety. 2022. Vol. 220. Article 108090. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108090.
14. Wood J., Yu Z., Gayah V. V. Development and evaluation of frameworks for realtime bus passenger occupancy prediction // International Journal of Transportation Science and Technology. 2023. Vol. 12, no. 2. P. 399–413. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2022.03.005.
15. Bus-passenger-flow prediction model based on WPD, attention mechanism, and Bi-LSTM / Y. Pei [et al.] // Sustainability. 2023. Vol. 15, no. 20. Article 14889. DOI: https://doi.org/10.3390/su152014889.
16. Zhai X., Shen Y. Short-term bus passenger flow prediction based on graph diffusion convolutional recurrent neural network // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, no. 8. Article 4910. DOI: https://doi.org/10.3390/app13084910.
17. Ghandeharioun Z., Nobari P. Z., Wu W. Exploring deep learning approaches for short-term passenger demand

prediction // Data Science for Transportation. 2023. Vol. 5. Article 19. DOI: https://doi.org/10.1007/s42421-023-00075-w.
18. Drabicki A., Kucharski R., Cats O. Mitigating bus bunching with real-time crowding information // Transportation. 2023. Vol. 50. P. 1901–1927. DOI: https://doi.org/10.1007/s11116-022-10270-3.
19. Deep reinforcement learning-based holding control for bus bunching considering passenger waiting perception / D. Liu [et al.] // Sustainability. 2023. Vol. 15, no. 14. Article 10947. DOI: https://doi.org/10.3390/su151410947.
20. Wang J., Sun L. Multi-objective multi-agent deep reinforcement learning to reduce bus bunching and passenger waiting time // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2023. Vol. 153. Article 104309. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104309.
21. Ma H., Yang M., Li X. Integrated optimization of customized bus routes and timetables considering commuter heterogeneity // Computers & Industrial Engineering. 2023. Vol. 175. Article 108886. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108886.
22. Multi-depot vehicle scheduling with multiple vehicle types on overlapped bus routes / H. Shang [et al.] // Expert Systems with Applications. 2023. Vol. 227. Article 120352. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120352.
23. Real-time bus departure prediction using neural networks for smart IoT public bus transit / N. Rashvand [et al.] // IoT. 2024. Vol. 5, no. 4. P. 650–665. DOI: https://doi.org/10.3390/iot5040029.
24. Rezazada M., Tirachini A., Cats O. Bus bunching: A comprehensive review and future research agenda // Transport Reviews. 2024. Vol. 44, no. 3. P. 421–451. DOI: https://doi.org/10.1080/01441647.2024.2313969.
25. Lin X., Zhao J., Wilson N. H. M. Bunching-proof capabilities of modular buses // Transportation Science. 2024. Vol. 58, no. 1. P. 150–170. DOI: https://doi.org/10.1287/trsc.2023.0224.
26. Zheng H., Liu T., Chen A. Alternative service network design for bus systems responding to time-varying road disruptions // Transportation Research Part B: Methodological. 2024. Vol. 181. Article 103042. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trb.2024.103042.
27. Dynamic scheduling of flexible bus services with hybrid requests and fairness concerns / W. Wu [et al.] // Transportation Research Part B: Methodological. 2024. Vol. 182. Article 103069. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trb.2024.103069.
28. Passenger flow prediction for citywide bus stops based on gated multi-graph convolutional network / Y.-Y. Wang [et al.] // Journal of Intelligent Transportation Systems. 2025. Advance online publication. DOI: https://doi.org/10.1080/15472450.2025.2543820.
29. Lee C., Yoon Y. A novel bus arrival time prediction method based on spatiotemporal flow centrality analysis and deep learning // Electronics. 2022. Vol. 11, no. 12. Article 1875. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics11121875.
30. Cheng X., Nie Y., Lin J. An autonomous modular public transit service // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2024. Vol. 160. Article 104746. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104746.

Dolia K.V. Information technology for adaptive management of urban bus transit based on passenger flow forecasting

The article examines an information technology for adaptive management of urban bus transportation based on short-term passenger flow forecasting. The proposed approach is aimed at improving the quality of public transport services and increasing the operational efficiency of carriers under conditions of variable demand, road congestion, irregular headways, and limited vehicle resources. The relevance of the study is determined by the need to move from static timetable-based planning to proactive dispatching, where control actions are formed before service disruptions become critical. It is shown that fixed schedules and averaged statistical demand values are insufficient for modern urban transport systems, because passenger flows vary significantly by time of day, day of week, season, route segment, transfer node, weather conditions, and local events. The information technology integrates data from GPS monitoring, automated passenger counting systems, electronic ticketing, vehicle occupancy sensors, mobile applications, and dispatching platforms. These heterogeneous data are collected, cleaned, synchronized, aggregated by stops and time intervals, checked for anomalies, and transformed into indicators suitable for forecasting and decision support. The forecasting module estimates expected passenger demand, vehicle occupancy, potential overloads, and deviations from regular service. On this basis, the adaptive management module generates alternative dispatching actions, including headway adjustment, bus holding at control points, changing the number of vehicles on a route, redistributing rolling stock between routes, and selecting an appropriate bus type according to the predicted load. The article defines the functional structure of the technology, the role of historical and real-time data, the relationship between forecasting and operational control, and the criteria for evaluating management effectiveness. These criteria include passenger waiting time, service regularity, vehicle occupancy, resource feasibility, and stability of route operation. The practical value of the study lies in the possibility of applying the proposed technology in intelligent transport systems, digital public transport monitoring platforms, and decision-support tools for dispatchers. Its implementation can reduce crowding, prevent bus bunching, improve reliability, and support more rational use of carrier resources.

Keywords: *information technology, adaptive management, urban bus transportation, passenger flow forecasting, dispatching decisions, public transport.*

Доля Костянтин Вікторович – д.т.н., проф., кафедра автомобілів та транспортної інфраструктури, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", Харків, Україна.
ORCID 0000–0002–4693–9158
k.v.dolia@gmail.com

Дата першого надходження статті 03.07.2026.
Дата прийняття статті до друку після рецензування 26.08.2026.
Дата публікації 30.09.2026.

Стаття з відкритим доступом, відповідно до умов ліцензії
Creative Commons (CC BY 4.0)