

ISSN 1998-7927(print)

ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-304-6-170-185>

УДК 004.9:656.13

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ АДАПТИВНЕ УПРАВЛІННЯ АВТОБУСНИМИ МАРШРУТАМИ НА ОСНОВІ ПРОГНОЗУВАННЯ ПАСАЖИРОПОТОКУ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

Доля В.К.

INTELLIGENT ADAPTIVE BUS ROUTE MANAGEMENT BASED ON REAL-TIME PASSENGER FLOW FORECASTING

Dolia V.K.

У статті розроблено організаційно-методичний підхід до інтелектуального адаптивного управління міським автобусним маршрутом на основі прогнозування пасажиропотоку в реальному часі. Актуальність дослідження зумовлена потребою підвищення якості транспортного обслуговування населення в умовах нерівномірного попиту, змінної дорожньої ситуації, внутрішньодобових коливань завантаження маршрутів та обмеженості ресурсів перевізника. На відміну від традиційних підходів, що спираються переважно на усереднені або ретроспективні дані, запропонований підхід орієнтований на поєднання поточного моніторингу роботи маршруту з короткостроковим прогнозуванням попиту та формуванням випереджальних диспетчерських рішень. Така постановка дає змогу розглядати маршрут не як статичну систему з фіксованими параметрами, а як керований об'єкт, стан якого постійно змінюється під впливом пасажирського попиту, дорожніх умов, тривалості рейсів і доступності рухомого складу. Метою роботи є розроблення підходу, який забезпечує узгодження показників якості перевезень із вимогами оперативної стійкості та економічної доцільності функціонування перевізника. У межах дослідження сформовано систему взаємопов'язаних показників, що охоплює фактичний і прогнозний пасажиропотік, інтервал руху, коефіцієнт заповнення салону, середній час очікування пасажирів, регулярність руху, дохід, витрати та фінансовий результат. Обґрунтовано використання просторово-часового прогнозування пасажиропотоку, правила визначення потрібної кількості автобусів, адаптивного інтервалу руху та вибору керуючої дії з перевіркою рішення на стійкість. Додатково враховано можливість коригування типу рухомого складу залежно від очікуваного рівня попиту, допустимого рівня завантаження салону та ресурсних обмежень перевізника. Результати дослідження показали, що запропонований підхід дозволяє формалізувати перехід від реактивного до проактивного управління автобусним маршрутом, своєчасно виявляти ризики перевантаження салонів, скорочувати очікуваний час очікування пасажирів і

враховувати фінансові обмеження перевізника. Запропонована логіка прийняття рішень передбачає порівняння прогнозного навантаження з допустимою місткістю, оцінювання впливу зміни інтервалу на регулярність руху та перевірку економічного результату перед упровадженням керуючої дії. Окрему увагу приділено можливості використання даних GPS-моніторингу, автоматизованого обліку пасажирів і електронного квитка для оперативного оновлення параметрів моделі, уточнення оцінок попиту на окремих зупинках, виявлення критичних періодів перевантаження та підвищення достовірності прогнозу. Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів у системах диспетчерського управління, цифрових платформах моніторингу перевезень та інформаційно-аналітичних модулях підтримки рішень у сфері міського пасажирського транспорту. Отримані положення можуть бути використані як методична основа для подальшої апробації на фактичних даних міських маршрутів, порівняння альтернативних сценаріїв диспетчерського реагування і для розвитку інтелектуальних транспортних систем у містах з різною інтенсивністю пасажирського попиту.

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

Вступ. Розвиток міських транспортних систем у сучасних умовах супроводжується зростанням вимог до якості пасажирських перевезень, оперативності реагування на зміни попиту та ефективності використання ресурсів перевізника. Особливої актуальності ці питання набувають для автобусних маршрутів, функціонування яких значною мірою залежить від нерівномірності пасажиропотоку, змін дорожньої ситуації, коливань тривалості рейсів і

впливу зовнішніх факторів упродовж доби. За таких умов традиційні підходи до організації маршрутної роботи, що ґрунтуються на заздалегідь встановлених інтервалах руху та усереднених характеристиках попиту, дедалі частіше виявляються недостатніми для забезпечення належного рівня транспортного обслуговування населення.

Практика експлуатації автобусних маршрутів свідчить, що невідповідність між фактичним і очікуваним пасажиропотоком призводить до переповнення салонів у пікові години, збільшення часу очікування пасажирів, порушення регулярності руху, а в міжпікові періоди — до нераціонального використання рухомого складу та зростання експлуатаційних витрат. Це зумовлює необхідність переходу від статичного планування до інтелектуального адаптивного управління, яке базується на аналізі поточного стану маршруту та прогнозуванні його зміни в реальному часі. Саме такий підхід дає змогу не лише фіксувати наявні відхилення, а й завчасно формувати управлінські дії щодо коригування інтервалів руху, випуску автобусів і вибору типу рухомого складу.

Необхідність розвитку сучасних науково-практичних знань із даного питання визначається також активною цифровізацією транспортної галузі. Упровадження GPS-моніторингу, автоматизованих систем обліку пасажирів, електронного квитка та диспетчерських інформаційних платформ створює нові можливості для збору великих обсягів даних про роботу маршрутів. Проте сама наявність даних ще не забезпечує підвищення ефективності управління. Потрібні науково обґрунтовані методи їх оброблення, інтерпретації та використання у процесі прийняття оперативних рішень. У цьому контексті особливого значення набуває поєднання методів прогнозування пасажиропотоку, адаптивного регулювання транспортної роботи та оцінювання економічної доцільності управлінських впливів.

Отже, розвиток науково-практичних засад інтелектуального адаптивного управління автобусними маршрутами є необхідною передумовою підвищення якості перевезень, забезпечення стійкості функціонування маршрутної мережі та більш раціонального використання транспортних ресурсів. Це обумовлює доцільність подальших досліджень, спрямованих на формування моделей, методів і практичних рекомендацій щодо використання прогнозованої інформації про пасажиропотік у реальному часі в системах диспетчерського управління міським автобусним транспортом.

Метою роботи є розроблення організаційно-методичного підходу до інтелектуального адаптивного управління автобусним маршрутом на основі прогнозування пасажиропотоку в реальному часі, який забезпечує узгодження показників якості транспортного обслуговування пасажирів із вимогами оперативної стійкості та економічної доцільності функціонування перевізника.

Відповідно до поставленої мети, а також з урахуванням виявленої в огляді літератури актуальної наукової задачі, для досягнення мети доцільно розв'язати такі задачі:

1. розробити систему показників для оцінювання поточного та прогнозного стану автобусного маршруту, яка охоплює пасажиропотік, інтервал руху, заповнення салону, час очікування пасажирів, дохід, витрати та фінансовий результат;
2. сформувати підхід до короткострокового прогнозування пасажиропотоку в реальному часі як інформаційну основу для прийняття адаптивних диспетчерських рішень;
3. обґрунтувати правила вибору керуючих дій щодо коригування інтервалів руху, випуску автобусів або використання рухомого складу різної місткості з урахуванням обмежень якості обслуговування та безбитковості маршруту.

Об'єктом дослідження є процес функціонування міського автобусного маршруту в умовах змінного пасажиропотоку та динамічної транспортної ситуації.

Предметом дослідження є методи, моделі та управлінські залежності інтелектуального адаптивного регулювання параметрів автобусного маршруту на основі прогнозування пасажиропотоку в реальному часі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Сучасна наукова думка щодо інтелектуального адаптивного управління автобусними маршрутами формується на перетині кількох взаємопов'язаних напрямів: економіки громадського транспорту, оперативного регулювання регулярності руху, прогнозування пасажиропотоку, оптимізації розкладів і випуску рухомого складу, а також цифровізації диспетчерського управління. Сукупний аналіз відібраних праць свідчить, що впродовж останніх років центр ваги наукових досліджень змістився від статичного проєктування маршрутної роботи до динамічного керування на основі даних. При цьому дедалі більша увага приділяється не лише підтриманню прийнятного рівня сервісу, а й забезпеченню економічної стійкості перевізного процесу [1–4]. У роботах, присвячених економіці громадського транспорту, показано, що ефективність маршруту визначається співвідношенням між частотою руху, витратами перевізника, тарифною політикою, просторово розподіленим попитом та якістю обслуговування. Звідси випливає принципово важливий висновок: будь-яке адаптивне управлінське рішення має оцінюватися не лише за транспортно-технологічним ефектом, а й за впливом на фінансовий результат роботи маршруту.

Вагомий блок сучасних досліджень стосується проблеми регулярності руху та запобігання злипанню автобусів. У працях [5–12] доведено, що навіть за формально коректного розкладу реальний рух маршрутів швидко втрачає стійкість під впливом випадкових затримок, нерівномірної посадки та

висадки пасажирів, дорожніх ускладнень і локальних перевантажень окремих зупинок. Науковці пропонують широкий спектр механізмів керування: заміну транспортних засобів на лінії, стійке динамічне регулювання, утримання автобусів на контрольних пунктах, використання інформації про заповнення салонів, а також глибоке підкріплювальне навчання для вибору керуючих дій у реальному часі. Узагальнення цих праць дає підстави стверджувати, що сучасне диспетчерське управління має будуватися на безперервному оцінюванні поточного стану системи, а не лише на дотриманні планових інтервалів. Особливе значення має також висновок про тісний взаємозв'язок між регулярністю руху, надійністю сервісу та утриманням пасажирів, що безпосередньо пов'язує проблему надійності з економічною життєздатністю маршруту [9–13].

Окрему групу становлять дослідження, у яких акцент зроблено на диференціації режимів перевезень за періодами доби, варіативності попиту та гнучкому налаштуванні транспортного обслуговування. У роботах [14–18] розглядаються альтернативні мережеві рішення в умовах порушень дорожньої ситуації, динамічне планування гнучких автобусних сервісів, моделі *customized bus* та *demand-responsive systems*, а також інтеграція особливостей попиту до маршрутного обслуговування. Ці дослідження демонструють відхід від уявлення про маршрут як про жорстко фіксовану систему з незмінними параметрами. Натомість маршрут трактують як адаптивний об'єкт, для якого інтервал руху, розмір випуску, тип рухомого складу й навіть схема обслуговування мають змінюватися відповідно до фактичного та очікуваного навантаження. Для теми даного дослідження це означає, що прогнозування пасажиропотоку повинно використовуватися не ізольовано, а як функціональний елемент у контурі оперативного керування.

Ще один напрям сучасної наукової думки охоплює питання вибору типів транспортних засобів, електрифікації маршрутів і координації різних ресурсних обмежень. У працях [19–23] доведено, що параметри експлуатації маршруту дедалі тісніше пов'язуються з характеристиками рухомого складу, режимами заряджання, варіантами використання електробусів, багатокритеріальним плануванням ресурсів та новими форматами модульного громадського транспорту. Хоча частина цих робіт безпосередньо стосується електробусів, їх методичне значення є ширшим. Вони показують, що адаптивне управління має враховувати не тільки пасажирський попит, але й технічні, енергетичні та організаційні обмеження, які визначають допустимий простір диспетчерських рішень. Отже, інтелектуальне керування автобусними маршрутами у сучасному розумінні є багатофакторною задачею, у якій попит, рухомий склад, енергетичні ресурси та розклад утворюють єдиний контур управління.

Системний підхід до організації маршрутної роботи особливо чітко простежується в працях, присвячених інтегрованому плануванню розкладів, випуску транспортних засобів, вибору типів автобусів і координації роботи персоналу [24–28]. У цих дослідженнях показано, що найкращий результат досягається тоді, коли рішення щодо частоти руху, розкладу, типу транспортного засобу та суміжних виробничих параметрів приймаються не ізольовано, а в межах єдиної оптимізаційної постановки. Для предметної області нашого дослідження це має особливе значення, оскільки інтелектуальне адаптивне управління в реальному часі повинно спиратися на заздалегідь сформовану систему допустимих сценаріїв, яка враховує ресурсні та організаційні обмеження перевізника. Саме тому поєднання оперативного прогнозування з інтегрованим плануванням є одним із найбільш перспективних напрямів подальших досліджень.

Найбільш близьким до теми даної статті є масив робіт, присвячених прогнозуванню пасажиропотоку, завантаження автобусів, часу прибуття та інших характеристик, що можуть бути використані в реальному часі для підтримки диспетчерських рішень [29–36]. Ці праці демонструють активне використання методів глибокого навчання, графових нейронних мереж, рекурентних архітектур, моделей із механізмами уваги, а також гібридних підходів до прогнозування транспортних процесів. Зокрема, дослідники розробляють моделі для короткострокового прогнозування пасажирських потоків на окремих зупинках і по маршрутах, оцінювання заповнення салонів, прогнозування часу прибуття і відправлення автобусів, а також оцінювання надійності автобусного сервісу на різних часових горизонтах. Спільною рисою цих праць є орієнтація на високу точність прогнозу та використання даних автоматизованого моніторингу. Водночас аналіз показує, що значна частина досліджень зосереджена переважно на власне прогнозній задачі, тоді як питання інтеграції результатів прогнозування у процедури прийняття адаптивних управлінських рішень залишаються опрацьованими менш повно.

Порівняльний аналіз усіх розглянутих джерел дозволяє визначити кілька актуальних шляхів розвитку наукової думки. Перший шлях полягає у переході від статичних та нормативних моделей транспортного обслуговування до моделей, що враховують поточний стан системи й оперативно реагують на його зміну [5–12; 29–36]. Другий пов'язаний із поглибленням інтеграції між економічними критеріями, показниками якості перевезень і технологічними параметрами роботи маршруту [1–4; 24–28]. Третій напрям полягає у використанні цифрових слідів транспортного процесу — GPS-даних, даних електронного квитка, автоматизованого підрахунку пасажирів, інформації про наповнення салонів — для побудови прогнозних та керуючих моделей у реальному часі [29–36].

Четвертий шлях пов'язаний із розвитком інтелектуальних методів підтримки диспетчерських рішень, насамперед підкріплювального навчання, гібридних моделей і багатокритеріальної оптимізації [6, 10, 11, 25, 28]. П'ятий напрям відображає тенденцію до системної інтеграції оперативного управління маршрутом із вибором типу рухомого складу, режимами використання енергетичних ресурсів і загальним плануванням транспортної мережі [19–23].

Попри значну кількість праць, у досліджуваній предметній області зберігається суттєва наукова прогалина. Більшість наявних досліджень або розв'язує задачі прогнозування попиту та завантаження, або окремо вивчає стратегії оперативного регулювання руху, або концентрується на економічній та ресурсній оптимізації маршрутів. Однак відносно мало робіт пропонують цілісну постановку, у межах якої короткостроковий прогноз пасажиропотоку безпосередньо трансформується в адаптивні диспетчерські рішення з урахуванням обмежень сервісної якості, надійності руху та беззбитковості перевізника. У зв'язку з цим найбільш актуальною задачею для подальшого дослідження доцільно вважати розроблення моделі прогнозно-адаптивного управління автобусним маршрутом у реальному часі, яка поєднує: короткострокове прогнозування пасажиропотоку; оцінювання очікуваного рівня заповнення салонів і часу очікування пасажирів; вибір керуючої дії щодо інтервалу руху, випуску автобусів або типу рухомого складу; перевірку фінансової доцільності запропонованого рішення. Саме така задача найбільш повно відповідає сучасному етапу розвитку наукової думки та практичним потребам цифрового диспетчерського управління міськими автобусними перевезеннями.

Виклад основного матеріалу дослідження. Відповідно до сформульованої мети дослідження та визначених задач, методична частина роботи повинна забезпечити зв'язок між трьома рівнями аналізу: діагностування поточного і прогнозного стану маршруту, побудовою короткострокового прогнозу пасажиропотоку та вибором адаптивної керуючої дії. Аналіз сучасних публікацій свідчить, що для кожної з цих задач у літературі сформовано кілька самостійних підходів, які відрізняються за складністю, вимогами до даних, рівнем інтерпретованості та придатністю до практичного диспетчерського впровадження [1–4; 9–12; 19–26; 29–36]. Тому в даному розділі методи розглядаються не як ізольовані математичні інструменти, а як елементи єдиного організаційно-методичного контуру управління автобусним маршрутом.

Перша задача поставлена в дослідженні полягає у формуванні системи показників, яка дозволяє кількісно описати стан маршруту в конкретний момент часу та визначити, чи потребує він керуючого втручання. У літературі для цього використовуються щонайменше чотири групи методів: індикаторно–

пороговий підхід, методи оцінювання регулярності інтервалів, моделі прогнозування заповнення салонів та економічні моделі беззбитковості маршруту [1–4; 9; 12; 29; 35].

Сутність методу векторно-індикаторного порогового оцінювання стану маршруту, полягає у формуванні інтегрованого вектора стану, як наведено в (1):

$$s^t = (\lambda_t, \hat{\lambda}_{t+1:t+H}, h_t, \rho_t, \tau_t^{\text{wait}}, R_t, C_t, \Pi_t), \quad (1)$$

де λ_t – фактична інтенсивність пасажиропотоку в періоді t ; $\hat{\lambda}_{t+1:t+H}$ – прогноз попиту на горизонті H ; h_t – фактичний інтервал руху; ρ_t – коефіцієнт заповнення салону; τ_t^{wait} – середній час очікування пасажирів; R_t – дохід маршруту; C_t – сукупні витрати; Π_t – фінансовий результат.

Методичне значення цієї функції полягає в тому, що вона поєднує транспортно-технологічні та економічні характеристики в одному описі стану системи. Її перевага — простота інтерпретації та можливість використання в диспетчерських інформаційних панелях. Якщо хоча б один із сервісних індикаторів виходить за допустиму межу, а прогноз свідчить про подальше погіршення стану, система формує сигнал до коригування режиму роботи. Такий підхід добре узгоджується з економічною логікою транспортних систем та оглядовими висновками щодо багатокритеріальної оцінки маршрутної роботи [1–4]. Ілюстративно його можна подати як «світлофору» модель: зелена зона відповідає прийнятним значенням показників, жовта — стану ризику, червона — необхідності втручання.

Оцінювання регулярності руху на основі варіації інтервалів є актуальним в даних питаннях. Цей підхід активно використовується у працях про надійність автобусного сервісу та запобігання bus bunching [9–13; 35]. Базова функція може бути подана як (2):

$$CV_h = \frac{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (h_i - \bar{h})^2}}{\bar{h}}, \quad (2)$$

де h_i – спостережуваний інтервал між двома сусідніми автобусами; $\bar{h}$ – середній інтервал на вибраному часовому вікні; m – кількість спостережень.

Якщо CV_h зростає, це означає підвищення нерівномірності руху та збільшення ризику злипання автобусів. У практичному сенсі така функція дозволяє кількісно оцінити, наскільки фактична робота маршруту відхиляється від цільового режиму. Важливо, що коефіцієнт варіації не залежить від абсолютної величини інтервалу, тому придатний для порівняння різних маршрутів і періодів доби. Його доцільно доповнювати показником надлишкового часу очікування, оскільки саме нерегулярність, а не лише середній інтервал, визначає сприйняття якості сервісу пасажирів. Ілюстративно цей метод відображає «розсип» інтервалів навколо планового

значення: чим ширший розкид, тим більша потреба в коригуванні.

Третім методом є оцінювання заповнення салону та завантаження рейсів. У працях з прогнозування оссипансу та crowding пропонується оцінювати стан маршруту через функцію (3):

$$P_t = \frac{q_t}{n_t Q}, \quad (3)$$

де q_t – кількість пасажирів, що повинна бути перевезена в періоді t ; n_t – кількість автобусів на маршруті; Q – номінальна місткість одного автобуса.

Зміст цієї функції полягає в тому, що вона безпосередньо пов'язує попит із провізною спроможністю [29; 35]. Якщо $\rho_t > 1$, система працює в режимі дефіциту провізної спроможності; якщо ρ_t надто низький, маршрут функціонує з перевитратою ресурсу. Метод є особливо корисним для оперативного управління, оскільки саме показник заповнення салону швидко сигналізує про дисбаланс між попитом і пропозицією. Додатковою перевагою є можливість інтеграції з автоматизованим підрахунком пасажирів. Ілюстративно цей підхід легко подати як шкалу завантаження: нормальна зона, перевантаження та недовантаження.

Отримання бажаного результату можливо й через використання методу економічного оцінювання безбитковості маршруту. Для поєднання сервісного та фінансового контурів доцільно використовувати функцію (4):

$$P_t = R_t - C_t = p q_t - (c_f n_t + c_v L_t n_t), \quad (4)$$

де p – середній дохід від одного перевезення; q_t – обсяг перевезень; c_f – умовно-постійні витрати на один автобус; c_v – змінні витрати на одиницю пробігу; L_t – транспортна робота або пробіг на маршруті.

Функція показує, що навіть сервісно обґрунтоване рішення може бути економічно недоцільним, якщо приріст витрат перевищує очікуваний ефект від приросту обсягу перевезень [1–4]. Для диспетчерського управління це означає потребу перевіряти кожну коригуючу дію на умову допустимого фінансового результату. Метод дозволяє оцінювати не лише поточну безбитковість, а й межу, після якої введення додаткового автобуса перестане бути виправданим. Ілюстративно його зручно подавати графіком перетину кривих доходу та витрат, де точка перетину відповідає порогу безбитковості.

На основі розглянутих підходів для розв'язання першої задачі доцільно обрати комбінований індикаторно-балансовий метод, який поєднує вектор стану S_t , оцінку регулярності через CV_h , коефіцієнт заповнення ρ_t та фінансовий результат P_t . Перевага такого рішення полягає в його інтерпретованості, простоті інтеграції в диспетчерську практику та здатності одночасно враховувати якість сервісу і економічну доцільність. На відміну від суто

статистичних або лише фінансових оцінок, комбінований підхід краще відповідає природі поставленої задачі, оскільки описує маршрут як єдину транспортно-економічну систему.

Друга задача безпосередньо пов'язана з побудовою прогнозу пасажиропотоку, який використовується як інформаційна основа для подальших диспетчерських рішень. У сучасній літературі для цього найбільш поширені рекурентні нейронні мережі, моделі з механізмами уваги, графові нейронні мережі та гібридні просторово-часові архітектури [29–36].

Метод Bi-LSTM-модель короткострокового прогнозування є методом розв'язання поставленої задачі. Типова функція такого методу може бути записана як (5):

$$\hat{y}_{t+1} = f_{\theta}(y_{t-k:t}, x_{t-k:t}), \quad (5)$$

де $\hat{y}_{t+1}$ – прогноз пасажиропотоку на наступний період; $y_{t-k:t}$ – часовий ряд фактичного попиту за останні k моментів часу; $x_{t-k:t}$ – набір зовнішніх факторів; $f_{\theta}(\cdot)$ – нелінійна функція Bi-LSTM із параметрами θ .

Метод використовує двонаправлене опрацювання часової послідовності й тому здатний виявляти короткі та довгі залежності в часовому ряді [30; 34]. Його перевага полягає в хорошій якості для виражених добових і тижневих патернів попиту. Додатково модель може бути доповнена механізмом уваги, який підвищує чутливість до найбільш інформативних часових фрагментів. Ілюстративно Bi-LSTM можна розглядати як метод, що «запам'ятовує» історію попиту та перетворює її на прогноз найближчого стану маршруту.

Другий метод це графова дифузійна рекурентна мережа DCRNN. Для мережі з багатьма зупинками та складною просторовою структурою доцільною є функція (6):

$$\hat{y}_{t+1:t+H} = f_{\theta}(G, Y_{t-k:t}, X_{t-k:t}), \quad (6)$$

де G – граф транспортної системи із зупинками як вузлами та маршрутними зв'язками як ребрами; $Y_{t-k:t}$ – матриця історичних значень пасажиропотоку; $X_{t-k:t}$ – матриця зовнішніх факторів; $\hat{y}_{t+1:t+H}$ – прогноз на горизонті H .

Сутність методу полягає у врахуванні не тільки часової, а й просторової взаємозалежності між зупинками та ділянками маршруту [31; 36]. Це особливо важливо для міських перевезень, де навантаження на окремі зупинки часто формується не локально, а як наслідок перерозподілу потоків у мережі. Перевагою DCRNN є здатність відображати дифузійну транспортного попиту в просторі та часі, що робить прогноз більш стійким у складних маршрутних конфігураціях. Ілюстративно метод можна подати як «поширення інформації» по графу зупинок, коли зміна попиту в одному вузлі впливає на сусідні вузли з часовим лагом.

При цьому метод багатографової згорткової мережі з керуванням сигналом новіших дослідженнях використовується для прогнозування пасажиропотоку на рівні всієї міської системи використовується функція типу (7):

$$\hat{y}_{t+1} = f_{\theta}(G^{(1)}, G^{(2)}, \dots, G^{(r)}, Y_{t-k:t}), \quad (7)$$

де $G^{(1)}, \dots, G^{(r)}$ – кілька графів зв'язків між зупинками, наприклад географічний, функціональний, пересадковий або кореляційний; $Y_{t-k:t}$ – історія попиту; f_{θ} – модель із gating механізмом [36].

Перевага такого підходу полягає в тому, що він враховує одразу кілька типів взаємозв'язків між зупинками, а отже, є більш гнучким за звичайний однографовий підхід. Метод добре працює в багатомаршрутному середовищі, однак потребує значного масиву даних і вищих обчислювальних ресурсів. Ілюстративно його можна уявити як накладання кількох «карт впливу», кожна з яких описує окремий механізм формування попиту.

Метод просторово-часового прогнозу часу прибуття та відправлення як непрямого індикатора попиту. У частині праць увагу зосереджено на прогнозуванні часу прибуття/відправлення як похідного показника транспортного стану (8):

$$\hat{t}_{a,t+1} = g_{\theta}(z_{t-k:t}), \quad (8)$$

де $\hat{t}_{a,t+1}$ – прогноз часу прибуття або відправлення автобуса; $z_{t-k:t}$ – набір просторово-часових ознак, включаючи щільність потоку, поточну затримку, заповнення салону і параметри руху [32; 33].

Хоча цей метод не прогнозує попит безпосередньо, він є корисним для побудови допоміжних предикторів, оскільки затримки та відхилення від розкладу часто корелюють із навантаженням маршруту. Перевага полягає в простоті інтеграції в GPS-моніторинг, недовіком — опосередкований зв'язок із власне пасажиропотоком. Ілюстративно це метод «непрямого спостереження», коли за динамікою руху системи робиться висновок про очікуваний стан попиту.

Для другої задачі найбільш доцільним є вибір просторово-часової графової моделі класу DCRNN або її спрощеного маршруто-орієнтованого аналога. Аргумент на користь цього вибору полягає в тому, що пасажиропотік на автобусному маршруті має не лише часову, а й просторову природу, оскільки зміни навантаження на одній зупинці впливають на сусідні зупинки та наступні рейси. Порівняно з Bi-LSTM така модель краще відображає мережеву взаємодію, а порівняно з багатографовими архітектурами є менш ресурсомісткою і простішою для впровадження. Отже, для нашого дослідження оптимальним є графово-рекурентний метод прогнозування з можливістю подальшого розширення до багатографової схеми.

Третя задача полягає в перетворенні прогнозу та системи показників стану маршруту на конкретне

управлінське рішення. У літературі для цього використовуються порогові правила, стійкі динамічні моделі, підкріплювальне навчання та кооперативні схеми керування з комбінацією holding, stop-skipping або зміни випуску [9–12; 14–18; 24–28].

Перший метод є порогове багатокритеріальне правило керування. Найбільш інтерпретованим є підхід, у якому керуюча дія визначається функцією (9):

$$u_t = \begin{cases} +1, \rho_t > \rho^{\max} \text{ або } \tau_t^{\text{wait}} > \tau^{\max}, \\ 0, \rho^{\min} \leq \rho_t \leq \rho^{\max} \text{ і } P_t \geq 0, \\ -1, \rho_t < \rho^{\min} \text{ і } P_t < 0, \end{cases} \quad (9)$$

де v_t – керуюча дія; +1 означає підсилення режиму, 0 – збереження поточного стану, -1 – економізацію; $\rho^{\min}$, $\rho^{\max}$ – допустимі межі заповнення; $\tau^{\max}$ – максимально допустимий час очікування.

Ця функція поєднує сервісну та фінансову логіку в одному правилі. Її перевага – прозорість і висока придатність до практичного впровадження. Кожен параметр має безпосередній управлінський зміст, а тому може бути погоджений із перевізником або органом управління транспортом. Ілюстративно метод відповідає диспетчерському рішення типу: «додати автобус», «залишити режим без змін», «зменшити випуск».

Інший метод - стійке динамічне керування з урахуванням невизначеності попиту. У дослідженнях із стійкого керування розглядається оптимізаційна задача виду (10):

$$\min_{u_t \in U} \max_{\lambda_t \in \Omega} J(u_t, \lambda_t), \quad (10)$$

де u_t – вектор керуючих дій; U – множина допустимих рішень; λ_t – попит як невизначений параметр; Ω – множина його допустимих реалізацій; $J(\dots)$ – функція втрат, що може включати час очікування, нерегулярність руху, перевантаження та витрати [9; 12].

Перевага цього підходу полягає у здатності забезпечувати стійкі рішення навіть тоді, коли прогноз містить похибку. Він особливо корисний у ситуаціях високої варіативності попиту, однак є складнішим у практичному налаштуванні та потребує формалізації множини невизначеності. Ілюстративно стійкий метод означає вибір такого рішення, яке не є ідеальним для одного сценарію, але залишається прийнятним для більшості можливих сценаріїв.

Метод 3. Підкріплювальне навчання для holding-керування. У роботах [10; 11] керуюча дія формується нейромережею або агентом, що максимізує накопичену винагороду (11):

$$\pi^* = \arg \max_{\pi} E[\sum_{t=0}^T \gamma^t r_t], \quad (11)$$

де π – політика керування; r_t – миттєва винагорода; γ – коефіцієнт дисконту; T – горизонт керування.

Зміст методу полягає в тому, що система навчається обирати момент і тривалість утримання автобуса або інші регулюючі дії так, щоб мінімізувати злипання, час очікування й перевантаження. Перевагою є здатність працювати зі складними нелінійними залежностями, недоліком — обмежена інтерпретованість та високі вимоги до даних і середовища навчання. Ілюстративно цей підхід можна описати як «самонавчальний диспетчер», який поступово підбирає найкращі дії на основі великої кількості сценаріїв.

Метод 4. Кооперативне керування holding та stop-skipping. У межах цього підходу керуюча дія формується як комбіноване рішення, (12):

$$u_t = (h_t^{\text{hold}}, s_t^{\text{skip}}), \quad (12)$$

де h_t^{hold} — тривалість утримання автобуса; s_t^{skip} — змінна пропуску зупинки.

Метод передбачає одночасне регулювання інтервалів руху та часу проїзду ділянки, що дозволяє більш гнучко боротися зі злипаннями автобусів і локальними перевантаженнями [11; 14; 15]. Його перевага полягає в багатоваріантності управлінського впливу, однак застосування цього методу в міських перевезеннях часто стикається з обмеженнями соціальної прийнятності, оскільки пропуск зупинок може погіршувати доступність сервісу для пасажирів. Ілюстративно цей метод є «комбінованою терапією» для маршруту: один інструмент вирівнює інтервали, інший прискорює проходження перевантажених ділянок.

Для третьої задачі в межах нашого дослідження доцільно обрати гібридний підхід: прогнозно-орієнтоване порогове багатокритеріальне правило з елементами перевірки на стійкість рішення.

Основний аргумент полягає в необхідності забезпечити одночасно інтерпретованість, практичну реалізованість та стійкість до похибок прогнозу. На відміну від чистого підкріплювального навчання, такий підхід не вимагає тривалого навчання агента та є більш прозорим для транспортних операторів. На відміну від суто оптимізації за критерієм стійкості, він простіший у налаштуванні та краще відповідає умовам диспетчерської практики, де рішення мають ухвалюватися швидко і бути зрозумілими. Тому оптимальною для наших задач є схема, в якій прогноз попиту формує очікуваний стан маршруту, порогове правило генерує первинну керуючу дію, а перевірка на стійкість оцінює її прийнятність у разі похибки прогнозу.

З урахуванням проведеного аналізу для розроблення власного організаційно-методичного підходу доцільно прийняти таку комбінацію методів. Для першої задачі — комбінований індикаторно-балансовий метод оцінювання стану маршруту, який поєднує сервісні показники, регулярність, заповнення салонів і беззбитковість. Для другої задачі — просторово-часову графово-рекурентну модель короткострокового прогнозування

пасажиропотоку. Для третьої задачі — прогнозно-орієнтоване порогове правило з перевіркою на стійкість керуючого рішення. Саме така комбінація є найбільш узгодженою з поставленою метою дослідження, оскільки поєднує достатню точність прогнозу, прозорість управлінської логіки, економічну інтерпретованість і придатність до практичної інтеграції у системи диспетчерського управління міськими автобусними перевезеннями.

У межах даного дослідження розроблення організаційно-методичного підходу до інтелектуального адаптивного управління автобусним маршрутом виконується як послідовне розв'язання трьох взаємопов'язаних задач: оцінювання поточного та очікуваного стану маршруту, короткострокового прогнозування пасажиропотоку та вибору керуючої дії щодо параметрів руху. На відміну від підходів, у яких ці задачі розглядаються відокремлено, запропонована схема об'єднує їх у єдиний цикл диспетчерського управління, де вихід попереднього етапу є інформаційною основою для наступного. Це дозволяє перейти від реактивного реагування на вже наявні відхилення до проактивного керування, у межах якого рішення формуються з урахуванням очікуваного стану попиту, обмежень якості перевезень та економічної доцільності функціонування перевізника.

Першою задачею є формування системи показників, яка дозволяє у кожний момент часу оцінити, наскільки поточний режим роботи маршруту відповідає вимогам транспортного обслуговування пасажирів і фінансової стійкості перевізника. Для цього доцільно використати комбінований індикаторно-балансовий метод, у межах якого стан маршруту описується вектором (13):

$$s^t = (\lambda_t, \hat{\lambda}_{t+1:t+H}, h_t, \rho_t, \tau_t^{\text{wait}}, * R_t, C_t, P_t), \quad (13)$$

Формула (1) має ключове методичне значення, оскільки забезпечує цілісний опис маршруту як транспортно-економічної системи. До її складу включено не лише параметри попиту і якості обслуговування, а й показники регулярності руху та фінансового результату. Саме така структура дозволяє розглядати стан маршруту не фрагментарно, а як сукупність взаємозалежних характеристик, що змінюються в реальному часі. Наприклад, зростання пасажиропотоку за незмінного випуску автобусів неминуче впливає на заповнення салонів, час очікування та, зрештою, на економічний результат через потенційне зростання витрат або втрат частини пасажирів. Отже, вектор стану є інформаційною основою для всіх подальших управлінських рішень.

Коефіцієнт заповнення салону визначається за формулою (14):

$$\rho_t = \frac{\lambda_t h_t}{60Q}, \quad (14)$$

де Q – місткість автобуса, пас.; множник 60 використовується для узгодження розмірностей, якщо λ_t подано в пас./год, а h_t – у хвиликах.

Формула (14) відображає співвідношення між попитом, що накопичується протягом інтервалу руху, та провізною спроможністю одного рейсу. Її зміст полягає в тому, що саме добуток інтенсивності потоку на інтервал руху дає очікувану кількість пасажирів, які прибудуть до моменту подачі наступного автобуса. Поділивши цю величину на місткість транспортного засобу, отримуємо ступінь завантаження салону. Якщо ρ_t перевищує допустиме значення, це означає ризик переповнення, погіршення комфорту та збільшення тривалості посадки й висадки. Якщо ж значення надто низьке, це свідчить про недовикористання ресурсу. Таким чином, показник ρ_t є центральним індикатором збалансованості попиту і пропозиції на маршруті.

Для оцінювання регулярності руху використовується коефіцієнт варіації інтервалів (15):

$$CV_{h,t} = \frac{\sqrt{\frac{1}{m_t} \sum_{i=1}^{m_t} (h_{i,t} - \bar{h}_t)^2}}{\bar{h}_t}, \quad (15)$$

де $h_{i,t}$ – зафіксований інтервал між сусідніми автобусами в межах вікна спостереження; $\bar{h}_t$ – середній інтервал; m_t – кількість спостережень.

Формула (15) дозволяє кількісно оцінити стійкість виконання розкладу. На відміну від простого контролю середнього інтервалу, коефіцієнт варіації показує ступінь розсіювання фактичних інтервалів навколо їхнього середнього значення. Це особливо важливо для автобусних маршрутів, де дві системи можуть мати однаковий середній інтервал, але принципово різну якість обслуговування через різний рівень нерегулярності. Чим більше $CV_{h,t}$, тим більш нестійким є рух автобусів, а отже, тим вищі ризики злипання, надмірного скупчення пасажирів на зупинках і погіршення прогнозованості поїздок. Саме тому цей показник має бути включений до контуру адаптивного керування нарівні з попитом і заповненням.

Середній час очікування пасажирів у загальному випадку доцільно визначати як (16)

$$\tau_t^{wait} = \frac{h_t}{2} (1 + CV_{h,t}^2), \quad (16)$$

що враховує не лише сам інтервал руху, а й нерегулярність його виконання.

Формула (16) є важливою з практичної точки зору, оскільки відображає сприйману пасажиром якість сервісу. У разі рівномірного руху, коли $CV_{h,t}$ наближається до нуля, середній час очікування дорівнює половині інтервалу. Однак за зростання нерегулярності фактичний час очікування перевищує цю величину, іноді суттєво. Це пояснюється тим, що за нерівномірного прибуття автобусів пасажир частіше потрапляють у довгі часові прогалини між

рейсами. Отже, ця функція поєднує часову характеристику розкладу з показником стійкості його виконання та переводить їх у сервісний вимір, безпосередньо зрозумілий пасажирю. Фінансовий результат маршруту в періоді t визначається співвідношенням (17):

$$\Pi_t = R_t - C_t = pq_t - (c_f n_t + c_v l_{ob} n_t), \quad (17)$$

де p – середній дохід від одного перевезення, грн/пас.; q_t – обсяг перевезень, пас.; c_f – умовно постійні витрати на один автобус, грн; c_v – змінні витрати на одиницю транспортної роботи, грн/км; l_{ob} – довжина оборотного рейсу, км; n_t – кількість автобусів на маршруті.

Формула (17) забезпечує включення економічного критерію до структури адаптивного управління. Її принципова роль полягає в тому, що рішення про зміну випуску автобусів або інтервалу руху не може базуватися виключно на сервісних показниках. У разі надмірного підсилення маршруту якість перевезень може підвищитися, однак це здатне спричинити економічно не виправдане зростання витрат. І навпаки, надмірна економія призводить до втрати пасажирів, перевантаження салонів і зниження привабливості маршруту. Саме тому показник Π_t виконує роль фінансового обмеження, що визначає межі допустимих керуючих рішень.

У підсумку перша задача вважається розв'язаною, якщо в кожному періоді t сформовано вектор S_t і визначено, чи перебуває маршрут у допустимому, ризиковому або критичному стані. Таким чином створюється кількісна база для подальшого прогнозування та вибору керуючої дії.

Друга задача полягає в отриманні короткострокового прогнозу попиту, який дозволяє випереджально реагувати на очікувані зміни стану маршруту. Для цього пропонується використати просторово-часову графово-рекурентну модель, яка враховує як часову інерцію попиту, так і просторову взаємозалежність між зупинками. Узагальнено модель можна подати так (18):

$$\hat{\lambda}_{t+1:t+H} = f_\theta(G, \lambda_{t-k:t}, X_{t-k:t}), \quad (18)$$

де $\hat{\lambda}_{t+1:t+H}$ – вектор прогнозованого пасажиропотоку на горизонті H ; G – граф транспортної мережі або конкретного маршруту; $\lambda_{t-k:t}$ – історія попиту за попередні k інтервалів; $X_{t-k:t}$ – матриця зовнішніх ознак (день тижня, час доби, затримки, погодні фактори, події); $f_\theta(\dots)$ – модель прогнозування з параметрами θ .

Формула (18) задає загальну структуру прогнозу підсистеми. Її методичне значення полягає в тому, що попит розглядається як просторово-часовий процес, а не як незалежний часовий ряд. Для автобусного маршруту це принципово важливо, оскільки навантаження на поточній зупинці значною мірою залежить від процесів на попередніх зупинках, пересадкових

вузлах і суміжних сегментах мережі. Уведення графа G дозволяє формалізувати ці зв'язки, а вектор зовнішніх ознак $\mathbf{X}_{r-k,t}$ враховує вплив календарних та експлуатаційних чинників. Внаслідок цього прогноз формується не лише за інерцією минулих значень, а на основі ширшого контексту функціонування маршруту.

Для практичного використання на рівні одного маршруту прогноз може бути спрощений до функції (19):

$$\hat{\lambda}_{t+1} = \alpha_0 + \sum_{j=0}^k \alpha_j \lambda_{t-j} + \sum_{r=1}^s \beta_r x_{r,t} + \sum_{u \in N} \gamma_u \lambda_{u,t}, \quad (19)$$

де α_0 – вільний член; α_j – коефіцієнти впливу попередніх значень попиту на цьому ж маршруті; $x_{r,t}$ – зовнішні фактори; β_r – коефіцієнти їх впливу; N – множина сусідніх або функціонально пов'язаних зупинок; γ_u – коефіцієнти просторового впливу.

Формула (19) не претендує на повне відтворення нейромережевої архітектури, однак має велике організаційно-методичне значення, оскільки демонструє логіку формування прогнозу в інтерпретованій формі. У ній попит у майбутньому періоді пояснюється трьома групами факторів: власною історією маршруту, зовнішніми умовами та просторовим впливом суміжних зупинок. Це дозволяє, з одного боку, зберегти зв'язок із сучасними просторово-часовими моделями, а з іншого — отримати формалізацію, придатну для методичного опису в науковій роботі. У практичному плані така формула показує, що навіть спрощений прогноз повинен виходити за межі суто авторегресійного бачення попиту.

Для оцінювання точності прогнозування доцільно використовувати функції помилки (20):

$$MAPE = \frac{100\%}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\lambda_i - \hat{\lambda}_i}{\lambda_i} \right|, \quad RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\lambda_i - \hat{\lambda}_i)^2}, \quad (20)$$

де N – кількість спостережень у контрольній вибірці.

Формула (20) необхідна для того, щоб прогнозна підсистема не сприймалася як «чорна скринька». Показник $MAPE$ дає змогу інтерпретувати середню відносну похибку прогнозу у відсотках, що є зручним для порівняння різних моделей і сценаріїв. Показник $RMSE$ сильніше реагує на великі помилки, а тому є корисним для виявлення ситуацій, коли модель систематично помиляється в пікові періоди. Разом ці метрики дозволяють обґрунтувати придатність прогнозної моделі для подальшого використання в управлінні. Якщо точність моделі є недостатньою, керуючі рішення на її основі можуть бути нестійкими або економічно невиправданими.

У межах розробленого підходу прогнозований пасажиропотік не використовується ізольовано, а інтегрується у вектор стану маршруту. Для цього на його основі обчислюються очікувані значення

заповнення салонів, середнього часу очікування та фінансового результату (21):

$$\hat{\rho}_{t+1} = \frac{\hat{\lambda}_{t+1} h_t}{60Q}, \quad \hat{\tau}_{t+1}^{wait} = \frac{h_t}{2} (1 + CV_{h,t}^2), \\ \hat{\Pi}_{t+1} = p \hat{q}_{t+1} - (c_f n_t + c_v l_{ob} n_t) \quad (21)$$

Формула (21) забезпечує перехід від «сирого» прогнозу попиту до прогнозу управлінськи значущого стану системи. Саме це відрізняє запропонований підхід від тих робіт, де прогнозування завершується оцінкою похибки моделі. У нашій постановці прогноз попиту є лише проміжним результатом, який надалі трансформується в очікувані значення сервісних і економічних показників. Завдяки цьому диспетчер або автоматизована система можуть оцінити не просто факт очікуваного зростання пасажиропотоку, а його наслідки для якості обслуговування та витрат перевізника. Отже, друга задача вважається розв'язаною, якщо на горизонті управління отримано прогноз не лише попиту, а й очікуваного стану маршруту.

Третя задача передбачає формування рішення щодо зміни параметрів маршруту на основі поточного та прогнозованого стану системи. Для цього пропонується використовувати прогнозно-орієнтоване порогове правило з перевіркою на стійкість рішення. Спочатку визначається необхідна кількість автобусів для забезпечення прогнозованого попиту (22):

$$n_{t+1}^{req} = \left\lceil \frac{\hat{\lambda}_{t+1} T_{ob}}{Q \rho_{max60}} \right\rceil, \quad (22)$$

де T_{ob} – тривалість оборотного рейсу, хв; ρ_{max} – максимально допустимий рівень заповнення салону.

Формула (22) є базовою для переходу від прогнозу попиту до ресурсного рішення. Її зміст полягає в тому, що система визначає таку кількість автобусів, яка забезпечує перевезення очікуваного потоку без перевищення допустимого рівня завантаження. У ній одночасно враховуються інтенсивність попиту, продуктивність одного автобуса та обмеження щодо комфортності перевезень. Застосування операції округлення до більшого цілого унеможливило недооцінювання потреби в рухомому складі. Саме ця формула перетворює прогноз попиту на конкретний керований ресурс — кількість автобусів на маршруті.

Відповідний рекомендований інтервал руху визначається як (23):

$$h_{t+1}^{ad} = \frac{T_{ob}}{n_{t+1}^{req}}, \quad (23)$$

Формула (23) дозволяє перейти від ресурсної характеристики до часової організації руху. Її перевага полягає в тому, що вона забезпечує прямий зв'язок між рішенням про випуск автобусів і рівнем

сервісу, який буде сприйматися пасажиром через інтервал руху та час очікування. Якщо прогнозований попит зростає, значення n_{t+1}^{req} збільшується, а інтервал руху автоматично скорочується. У разі зниження попиту відбувається протилежний процес. Таким чином, інтервал руху тут виступає похідною від прогнозу та ресурсних обмежень, а не задається статично.

Первинна керуюча дія визначається правилом (24):

$$u_t = \begin{cases} \text{підсилення, } \hat{\rho}_{t+1} > \rho^{\max} \text{ або } \hat{\tau}_{t+1}^{\text{wait}} > \tau^{\max} \\ \text{стабілізація, } \rho^{\min} \leq \hat{\rho}_{t+1} \leq \rho^{\max} \text{ і } \hat{\Pi}_{t+1} \geq 0, \\ \text{економізація, } \hat{\rho}_{t+1} < \rho^{\min} \text{ і } \hat{\Pi}_{t+1} < 0 \end{cases} \quad (24)$$

Формула (24) є центральним елементом запропонованого організаційно-методичного підходу. Вона забезпечує узгодження сервісної та фінансової логіки в одному механізмі прийняття рішення. Якщо прогнозований стан маршруту свідчить про переповнення салонів або надмірне зростання часу очікування, система переходить у режим підсилення. Якщо показники перебувають у допустимих межах і маршрут не є збитковим, доцільно зберігати поточний режим. Якщо ж попит недостатній, а фінансовий результат негативний, ініціюється економізація. Перевага цього правила полягає в його прозорості, простоті реалізації та безпосередньому зв'язку з тими показниками, які використовуються у диспетчерській практиці.

Щоб уникнути рішень, надто чутливих до похибки прогнозу, вводиться перевірка на стійкість (25):

$$u_t^* = u_t, \text{ якщо } \Pi_{t+1}^- \geq \Pi^{\min} \text{ і } \rho_{t+1}^+ \leq \rho^{\text{crit}}, \quad (25)$$

де Π_{t+1}^- – найгірший очікуваний фінансовий результат у межах допустимої похибки прогнозу;

ρ_{t+1}^+ – найбільший можливий рівень заповнення салону в межах цієї похибки; $\Pi^{\min}$ – мінімально допустимий фінансовий результат; ρ^{crit} – критичний рівень заповнення.

Формула (25) виконує роль запобіжника від надто оптимістичних або нестійких рішень. Її логіка полягає в тому, що кожна керуюча дія повинна залишатися прийнятною не лише за точного прогнозу, а й за помірного відхилення фактичного попиту від прогнозованого значення. Якщо за гіршого сценарію маршрут стає надмірно збитковим або критично перевантаженим, первинне рішення має бути скориговане. Саме ця перевірка відрізняє запропонований підхід від жорстких порогових схем, які можуть добре працювати в середньому, але давати незадовільний результат за високої невизначеності попиту.

Для врахування різної місткості рухомого складу додатково вводиться правило вибору типу автобуса (26):

$$Q_k^* = \arg \min_{Q_k} \{ C_t(Q_k) \mid \hat{\rho}_t(Q_k) \leq \rho^{\max}, \hat{\Pi}_t(Q_k) \geq 0 \}, \quad (26)$$

де Q_k – місткість автобуса k -го типу; $C_t(Q_k)$ – витрати на використання автобуса відповідної місткості.

Формула (26) розширює запропонований підхід від регулювання лише інтервалу і випуску до регулювання типу рухомого складу. Її зміст полягає в тому, що за однакової здатності забезпечити сервісні вимоги й безбитковість слід віддавати перевагу тому типу автобуса, який формує менші витрати. Це особливо важливо для маршрутів із вираженою внутрішньодобовою нерівномірністю попиту, де використання автобусів однієї місткості протягом усього дня не є оптимальним. У такий спосіб запропонований метод виходить за межі простого регулювання частоти руху та набуває рис повноцінного організаційно-методичного підходу до адаптивного управління ресурсами маршруту.

На підставі отриманих результатів запропонований підхід доцільно подати у вигляді формалізованого алгоритму функціонування системи підтримки диспетчерських рішень.

Алгоритм інтелектуального адаптивного управління автобусним маршрутом є таким:

1. Збирання фактичних даних про пасажиропотік, інтервали руху, місцезнаходження автобусів, заповнення салонів, дохід і витрати.
2. Обчислення поточного вектора стану маршруту S_t за формулами (13)–(17).
3. Формування короткострокового прогнозу пасажиропотоку та очікуваних сервісних і фінансових показників за формулами (17)–(20).
4. Визначення потрібної кількості автобусів, адаптивного інтервалу руху та первинної керуючої дії за формулами (21)–(23).
5. Перевірка рішення на стійкість і, за потреби, коригування випуску або вибору типу рухомого складу за формулами (24)–(25).
6. Передача керуючого рішення у систему диспетчерського управління та подальше оновлення циклу після надходження нових даних.

Алгоритм починається зі збору фактичної інформації про роботу маршруту, яка надходить із систем GPS-моніторингу, автоматизованого підрахунку пасажирів, електронного квитка та внутрішнього економічного обліку перевізника. Після цього формується поточний вектор стану маршруту, що дозволяє одночасно оцінити попит, заповнення салонів, регулярність руху, середній час очікування та фінансовий результат. Далі на основі історичних і поточних даних будується короткостроковий прогноз пасажиропотоку та очікуваного стану системи на горизонті управління. Наступним кроком є формування первинного диспетчерського рішення щодо зміни випуску автобусів, адаптивного інтервалу руху або вибору типу рухомого складу. Після цього рішення

перевіряється на стійкість до похибки прогнозу, що дозволяє відсіяти варіанти, які можуть бути сервісно або економічно неприйнятними в разі відхилення фактичного попиту від прогнозованого. Завершальним етапом є передача рішення в систему диспетчерського управління та запуск нового циклу після оновлення вхідних даних.

Таким чином, запропонований організаційно-методичний підхід забезпечує узгодження показників якості транспортного обслуговування пасажирів із вимогами оперативної стійкості та економічної доцільності функціонування перевізника. Його принципова перевага полягає в поєднанні трьох логік: діагностичної, прогнозної та керуючої. Діагностична логіка описує поточний стан маршруту; прогнозна — дає змогу завчасно виявляти ризики; керуюча — переводить ці оцінки в конкретні рішення щодо параметрів руху. У підсумку управління маршрутом набуває не реактивного, а проактивного характеру.

Сильною стороною запропонованого підходу є його системність. Він поєднує в одному контурі сервісні, часові, ресурсні та фінансові характеристики маршруту, що дозволяє уникнути однобічних рішень. Другою перевагою є практична інтерпретованість: усі ключові формули мають зрозумілий зміст для транспортного оператора і можуть бути включені до диспетчерських регламентів. Третьою сильною стороною є прогнозна орієнтація методу, завдяки якій керуючі рішення формуються не після виникнення проблеми, а до її повного прояву. Четвертою перевагою є можливість масштабування підходу: його можна застосовувати як для окремого маршруту, так і для групи маршрутів за наявності відповідної інформаційної бази.

Разом із тим метод має і низку обмежень. По-перше, його ефективність суттєво залежить від якості вхідних даних та точності короткострокового прогнозу. Якщо дані GPS-моніторингу, автоматизованого підрахунку пасажирів або економічного обліку є неповними чи шумними, це знижує якість усієї системи рішень. По-друге, порогові значення $\rho^{\max}$, $\rho^{\min}$, $\tau^{\max}$ і $P^{\min}$ потребують попереднього налаштування для конкретного міста, маршруту та типу перевезень, що ускладнює універсалізацію підходу. По-третє, перевірка на стійкість зменшує ризик невдалих рішень, але водночас може робити систему більш консервативною і стримувати оперативне підсилення маршруту в умовах різкого зростання попиту. По-четверте, запропонований підхід поки що не враховує повною мірою мережеві ефекти взаємодії кількох маршрутів, пересадкові зв'язки та конкуренцію за рухомий склад між різними напрямками.

Отже, розроблений метод доцільно розглядати як обґрунтовану основу для побудови інтелектуальної системи підтримки диспетчерських рішень, а не як завершене універсальне рішення для всіх можливих транспортних ситуацій. Його

практична цінність полягає у високому рівні інтерпретованості, можливості поетапного впровадження та узгодженні якості сервісу з економічною доцільністю. Його подальший розвиток доцільно пов'язати з апробацією на фактичних даних конкретного маршруту, уточненням порогових параметрів, порівнянням із альтернативними стратегіями керування та розширенням на багатомаршрутне середовище.

Отримані результати свідчать, що розроблений організаційно-методичний підхід дозволяє перейти від фрагментарного оцінювання окремих параметрів автобусного маршруту до їх спільного аналізу в межах єдиного контуру диспетчерського управління. Головний результат дослідження полягає не в окремій формулі чи локальному правилі регулювання, а у побудові цілісної схеми, у якій поточний стан маршруту, прогноз пасажиропотоку, сервісні показники та фінансові обмеження розглядаються як взаємопов'язані елементи. Саме це забезпечує узгодження якості транспортного обслуговування пасажирів із вимогами оперативної стійкості та економічної доцільності функціонування перевізника. У теоретичному сенсі результатом є інтеграція трьох підсистем — діагностичної, прогнозної та керуючої; у прикладному сенсі — можливість формалізованого вибору диспетчерського рішення на основі кількісних критеріїв.

Апробацію виконано на прикладі приміського автобусного маршруту № 101 «Таллінн—Маарду» в повіті Гар'ю, Естонія. Маршрут починається в центрі Таллінна на зупинці A. Laikmaa, проходить через Keskurtg, зупинку Bussijaam біля Талліннського автовокзалу та Peterburi tee, після чого виходить на шосе Таллінн—Нарва. Далі автобус проходить транспортні вузли Vao та Iru Elektriijaam, в'їжджає до Маарду через промислову зону Kroodi, проходить зупинки Ringi і Haigla та завершує рух на кінцевій зупинці Kallavere. У напрямку Kallavere маршрут охоплює 34 зупинки, а у зворотному напрямку — 33 зупинки. Середня тривалість поїздки між кінцевими пунктами становить близько 44 хв. Для розрахунку прийнято оборотний час 96 хв, який охоплює рух у прямому і зворотному напрямках та технологічний відстій на кінцевих пунктах. Місткість автобуса прийнято рівною 80 пасажирів. Маршрут обслуговує компанія AS SEBE. Відомості про трасу, перевізника та організацію оплати перевірено за даними офіційного транспортного розділу міста Маарду та національного порталу зупинок Peatus.ee станом на серпень 2026 року. Маршрут № 101 належить до публічних регіональних автобусних ліній повіту Гар'ю, а не до внутрішньоміської транспортної системи Таллінна. За чинним розкладом у будні рух виконується орієнтовно з 05:15 до 23:30 з інтервалами 25–52 хв. У суботу та неділю період роботи скорочується приблизно до 07:20–20:15, а інтервали можуть становити 67–114 хв. Оскільки метою апробації є оцінювання

адаптивного управління в умовах відносно сталого робочого попиту, подальший розрахунок виконано для буднього періоду з 07:00 до 13:00.

Посадка на публічні повітові лінії здійснюється через передні двері, а кожний пасажир зобов'язаний зареєструвати право на проїзд. Для оплати та валідації використовується єдина транспортна картка Uhiskaart; разовий квиток також можна придбати під час поїздки. Вартість залежить від кількості перетнутих тарифних зон. Право безоплатного проїзду, яке діє для зареєстрованих мешканців Таллінна на міському транспорті, саме по собі не звільняє пасажирів віком 20–62 роки від оплати на регіональному маршруті № 101. Водночас на публічних повітових лініях безоплатний проїзд із персоналізованою картою передбачено, зокрема, для пасажирів віком до 19 років включно та від 63 років.

Метою апробації є кількісна перевірка того, чи забезпечує запропонований алгоритм узгодження провізної спроможності маршруту з динамікою попиту та чи покращує він сервісні показники порівняно з режимом фіксованого випуску. Перевірка охоплює шість послідовних одноденних періодів з 07:00 до 13:00, які відтворюють поступове зростання попиту до локального максимуму та його подальше плавне зниження.

У базовому варіанті протягом усього горизонту зберігається чинний режим: на маршруті працюють $n = 4$ автобуси місткістю $Q = 80$ пасажирів, тривалість оборотного рейсу становить $T_{ob} = 96$ хв, а плановий інтервал руху дорівнює $h = 24$ хв. В адаптивному - кількість автобусів у кожному періоді визначається за прогнозованим пасажиропотоком. Для обох станів прийнято коефіцієнт варіації інтервалів $CV_h = 0,20$, максимально допустимий коефіцієнт заповнення $\rho_{\max} = 0,85$ та максимально допустимий інтервал руху $h_{\max} = 30$ хв. Останнє обмеження не дозволяє надмірно погіршувати доступність маршруту в періоди низького попиту.

Кількість автобусів в адаптивному варіанті розраховується як:

$$n_t^{\text{ad}} = \max \left\{ \left\lceil \frac{\hat{\lambda}_t T_{ob}}{Q \rho_{\max} 60} \right\rceil, \left\lceil \frac{T_{ob}}{h_{\max}} \right\rceil \right\}$$

Перша складова забезпечує достатню провізну спроможність, а друга встановлює мінімально допустимий випуск за сервісним обмеженням. Для кожного періоду обчислюються інтервал руху $h_t = T_{ob}/n_t$, коефіцієнт заповнення ρ_t , середній час очікування τ_t^{wait} та провізна спроможність:

$$P_t = \frac{n_t Q 60}{T_{ob}}$$

Прогноз погодинного пасажиропотоку становить відповідно 150, 160, 170, 185, 175 і 165 пас./год. Зміни між сусідніми періодами дорівнюють +6,7%, +6,3%, +8,8%, -5,4% та -5,7%. Таким чином,

найбільше коливання становить 8,8% і не перевищує встановленої межі 17%. Ряд використано для демонстрації роботи алгоритму та не подано як результат натурного обстеження.

Найбільше навантаження спостерігається у четвертому періоді, для якого $\lambda_{b4} = 185$ пас./год. За умови збереження чинного режиму прогнозований коефіцієнт заповнення салону становитиме

$$\hat{\rho}_{t+1}^{\text{base}} = \frac{185 \cdot 24}{60 \cdot 80} = 0,925$$

Отже, прогнозований коефіцієнт заповнення перевищуватиме допустимий рівень 0,85 приблизно на 8,8%. Це не є критичним перевантаженням, однак свідчить про стійкий ризик погіршення комфортності перевезень. Середній час очікування пасажирів за чинного режиму дорівнюватиме

$$\hat{\tau}_{t+1}^{\text{base}} = \frac{24}{2} (1 + 0,20^2) = 12,48 \text{ хв}$$

Провізна спроможність маршруту в цьому варіанті становить:

$$P^{\text{base}} = \frac{4 \cdot 80 \cdot 60}{96} = 200 \text{ пас./год.}$$

Фізичної нестачі місткості не виникає, проте провізна спроможність за умови дотримання $\rho_{\max} = 0,85$ становить 170 пас./год. Тому попит на 15 пас./год перевищує комфортно допустимий рівень. Необхідний адаптивний випуск дорівнює:

$$n_4^{\text{ad}} = \left\lceil \frac{185 \cdot 96}{80 \cdot 0,85 \cdot 60} \right\rceil = 5 \text{ автобусів.}$$

Після застосування адаптивного рішення прогнозований коефіцієнт заповнення знижується до:

$$\hat{\rho}_{t+1}^{\text{ad}} = \frac{185 \cdot 19,2}{60 \cdot 80} = 0,740,$$

тобто переходить у допустимий діапазон. Середній час очікування становитиме:

$$\hat{\tau}_{t+1}^{\text{ad}} = \frac{19,2}{2} (1 + 0,20^2) = 9,98 \text{ хв,}$$

а провізна спроможність збільшиться до:

$$P^{\text{ad}} = \frac{5 \cdot 80 \cdot 60}{96} = 250 \text{ пас./год.}$$

Таким чином, у найбільш навантаженому періоді адаптивне рішення передбачає додавання лише одного автобуса. Інтервал руху скорочується на 20%, середній час очікування — на 2,50 хв, а коефіцієнт заповнення зменшується з 0,925 до 0,740.

Результати розрахунку адаптивного режиму для всього шестигодинного горизонту наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри адаптивного управління за періодами

Період	$\hat{\lambda}_t$ пас./год	Зміна, %	n_{ad_t}	h_{ad_t} , хв	ρ_{ad_t}	τ_{wait_t} , хв
07:00–08:00	150	—	4	24,00	0,750	12,48
08:00–09:00	160	+6,7	4	24,00	0,800	12,48
09:00–10:00	170	+6,3	4	24,00	0,850	12,48
10:00–11:00	185	+8,8	5	19,20	0,740	9,98
11:00–12:00	175	–5,4	5	19,20	0,700	9,98
12:00–13:00	165	–5,7	4	24,00	0,825	12,48

За базового режиму провізна спроможність у кожному періоді дорівнює 200 пас./год, коефіцієнт заповнення змінюється від 0,750 до 0,925, а середній час очікування залишається на рівні 12,48 хв. У четвертому та п'ятому періодах попит перевищує комфортно допустиму провізну спроможність сумарно на 20 пасажирів. За адаптивного режиму це перевищення усувається, а максимальний коефіцієнт заповнення не виходить за межу 0,85.

У періоди 10:00–12:00 середній час очікування зменшується з 12,48 до 9,98 хв, тобто на 20%. У розрахунку за всі шість періодів він становить 11,65 хв, що на 6,7% менше порівняно з базовим режимом. Отже, алгоритм формує помірний керуючий вплив без різкого збільшення або скорочення випуску.

Узагальнене порівняння наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Порівняння чинного та адаптивного режимів роботи маршруту

Показник	Чинний режим	Адаптивний режим	Результат
Діапазон випуску, автобусів	4	4–5	зміна не більше 1 автобуса
Середній час очікування за 6 періодів, хв	12,48	11,65	–6,7%
Середній час очікування у періоди 10:00–12:00, хв	12,48	9,98	–20,0%
Максимальний коефіцієнт заповнення	0,925	0,850	у допустимій межі
Попит понад комфортну спроможність, пас.	20	0	усунуто
Сумарні автобусо-години	24	26	+8,3%

За шестигодинний горизонт адаптивний режим потребує 26 автобусо-годин проти 24 автобусо-годин у базовому. Отже, усунення перевищення комфортно допустимого завантаження та поліпшення обслуговування в години локального максимуму досягаються за збільшення транспортної роботи лише на 8,3%. Цей результат підтверджує необхідність спільного оцінювання сервісного ефекту та додаткових витрат. Грошове порівняння доцільно виконувати лише після приведення доходів, постійних і змінних витрат до одного часового інтервалу.

Для перевірки стійкості рішення розглянуто відхилення фактичного попиту у найбільш навантаженому періоді на $\pm 10\%$ від прогнозу 185 пас./год. За нижньої межі попиту 166,5 пас./год достатньо 4 автобусів з інтервалом 24 хв. Для центрального прогнозу необхідно 5 автобусів з інтервалом 19,2 хв. За верхньої межі 203,5 пас./год також достатньо 5 автобусів з інтервалом 19,2 хв.

Таблиця 3

Стійкість керуючого рішення до похибки прогнозу

Попит	Попит, пас./год	Необхідний випуск	Інтервал, хв	Коефіцієнт заповнення
–10%	166,5	4	24,0	0,833
Базовий прогноз	185	5	19,2	0,740
+10%	203,5	5	19,2	0,814

За верхньої межі попиту коефіцієнт заповнення п'яти автобусів становить 0,814 і не перевищує $\rho_{\max} = 0,85$. Отже, рішення про випуск п'яти автобусів залишається стійким у межах похибки прогнозу $\pm 10\%$ і не потребує додаткового резервного транспортного засобу. Перехід до шести автобусів буде потрібний лише за зростання попиту понад 212,5 пас./год.

Експеримент підтверджує працездатність запропонованої логіки: алгоритм збільшує випуск із чотирьох до п'яти автобусів лише у двох періодах, коли прогнозований коефіцієнт заповнення перевищує встановлену межу. За плавних коливань попиту не більше 8,8% такий вплив не призводить до різких змін режиму роботи маршруту. Для запобігання частому перемикаю між чотирма і п'ятьма автобусами доцільно встановити мінімальну тривалість керуючої дії один розрахунковий період та гістерезис 2–3% відносно порогового значення $\rho_{\max}$.

Для повної експериментальної перевірки підходу необхідно використати часові ряди GPS-моніторингу, електронного квитка або автоматизованого обліку пасажирів конкретного маршруту, оцінити похибку прогнозу за показниками MAE, RMSE і MAPE та порівняти показники роботи маршруту до і після впровадження адаптивного управління.

Водночас проведене дослідження має низку слабких сторін і обмежень. По-перше, наведені

числові результати мають ілюстративний характер, а не є наслідком апробації на масиві фактичних даних конкретного міського маршруту. Це означає, що кількісні оцінки слід розглядати як демонстрацію логіки роботи підходу, а не як готові нормативні орієнтири. По-друге, точність короткострокового прогнозу пасажиропотоку в роботі обґрунтована концептуально, але не перевірена на реальних часових рядах, що не дозволяє поки що кількісно оцінити межі похибки моделі для практичного впровадження. По-третє, економічний блок у нинішньому вигляді спирається на агреговані витратні параметри й не враховує всіх можливих компонентів собівартості, таких як амортизація, особливості оплати праці водіїв, резервування рухомого складу та вплив простоїв. По-четверте, розроблений підхід поки що не моделює повною мірою конкуренцію між маршрутами за обмежений парк автобусів, що є важливою задачею для великих транспортних систем.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в кількох положеннях. По-перше, запропоновано організаційно-методичний підхід, у якому короткострокове прогнозування пасажиропотоку інтегрується не з окремим технологічним рішенням, а з повним циклом адаптивного диспетчерського управління автобусним маршрутом. По-друге, розвинено підхід до опису стану маршруту через вектор, що одночасно охоплює фактичні, прогнозні, сервісні та фінансові показники, що дозволяє трактувати маршрут як єдину транспортно-економічну систему. Потретьє, удосконалено правило вибору керуючої дії за рахунок поєднання порогового механізму із перевіркою на стійкість до похибки прогнозу. По-четверте, запропоновано включати вибір місткості рухомого складу до контуру адаптивного управління, а не розглядати його лише як задачу довгострокового планування. У сукупності ці положення створюють методичний базис для переходу від реактивного до прогнозного-орієнтованого управління автобусними маршрутами.

Потенційні шляхи розвитку отриманих результатів є досить широкими. Перший із них пов'язаний з апробацією розробленого підходу на фактичних даних конкретного міського маршруту або групи маршрутів із використанням GPS-треків, даних електронного квитка та автоматизованого обліку пасажирів. Другий напрям полягає у порівнянні різних прогнозних моделей — від інтерпретованих регресійних схем до графових нейронних мереж — з позиції не лише точності прогнозу, а й впливу на якість управлінських рішень. Третій шлях розвитку стосується переходу від одномаршрутної до багатомаршрутної постановки, коли рішення на одному маршруті впливають на доступність рухомого складу та сервісні показники на інших маршрутах. Четвертий напрям передбачає включення до моделі екологічних та енергетичних критеріїв, що особливо актуально для електробусів і змішаних парків. П'ятий напрям полягає у створенні

цифрового двійника маршруту, який дозволив би тестувати сценарії керування до їх фактичного впровадження.

Практичне значення результатів полягає в тому, що розроблений підхід може бути покладений в основу інформаційно-аналітичного модуля для систем диспетчерського управління міськими автобусними перевезеннями. Його використання дає змогу оперативно виявляти ризики перевантаження салонів, завчасно реагувати на очікуване зростання пасажиропотоку, оцінювати наслідки зміни випуску автобусів та обирати варіанти, які є допустимими не лише з погляду сервісу, а й з позиції витрат перевізника. Для органів управління транспортом це створює інструмент обґрунтованого коригування маршрутної роботи, а для перевізника — засіб зниження непродуктивних витрат і підвищення прозорості управлінських рішень. У ширшому контексті результати дослідження можуть бути використані при цифровізації міського транспорту, модернізації диспетчерських центрів і впровадженні інтелектуальних транспортних систем.

Висновки. У роботі розроблено організаційно-методичний підхід до інтелектуального адаптивного управління автобусним маршрутом на основі прогнозування пасажиропотоку в реальному часі, який орієнтований на узгодження показників якості транспортного обслуговування пасажирів із вимогами оперативної стійкості та економічної доцільності функціонування перевізника. На відміну від традиційних підходів, у яких оцінювання стану маршруту, прогнозування попиту та вибір диспетчерського рішення розглядаються відокремлено, у роботі ці складові інтегровано в єдиний контур управління.

У результаті дослідження сформовано систему показників для опису поточного і прогнозного стану маршруту, що охоплює пасажиропотік, інтервал руху, коефіцієнт заповнення салону, середній час очікування пасажирів, регулярність руху, дохід, витрати та фінансовий результат. Обґрунтовано доцільність використання просторово-часового прогнозування пасажиропотоку як інформаційної основи для випереджального управління. Запропоновано правило вибору адаптивної керуючої дії щодо кількості автобусів, інтервалу руху та типу рухомого складу з урахуванням сервісних обмежень і перевірки рішення на стійкість.

Отримані результати показали, що запропонований підхід дозволяє формалізувати перехід від реактивного до проактивного управління автобусним маршрутом. Його практична цінність полягає у можливості використання в системах диспетчерського управління, цифрових платформах моніторингу перевезень та інформаційно-аналітичних модулях підтримки рішень. Наукове значення роботи полягає в інтеграції прогнозної, сервісної та економічної логіки в межах єдиної методичної схеми. Подальші дослідження доцільно спрямувати на апробацію підходу на фактичних

даних конкретних міських маршрутів, уточнення параметрів моделей та розширення постановки задачі на багатомаршрутні транспортні системи. Апробація на прикладі приміського маршруту № 101 «Таллінн—Маарду» за шестигодинного профілю попиту з максимальним міжперіодним коливанням 8,8% показала, що адаптивна зміна випуску із чотирьох до п'яти автобусів усуває перевищення комфортно допустимої провізної спроможності на 20 пасажирів. У найбільш навантажені періоди середній час очікування зменшується на 20%, а максимальний коефіцієнт заповнення — з 0,925 до 0,850. За весь розрахунковий горизонт середній час очікування скорочується на 6,7% за збільшення транспортної роботи на 8,3%. Аналіз похибки прогнозу $\pm 10\%$ показав, що для збереження сервісних обмежень рішення про випуск п'яти автобусів залишається стійким і не потребує додаткового резерву. Отримані результати підтверджують працездатність алгоритму в межах розрахункового.

Література

- Hörcher D., Tirachini A. A review of public transport economics. *Economics of Transportation*. 2021. Vol. 25. Article 100196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecotra.2021.100196>
- Time-dependent transit fare optimization with elastic and spatially distributed demand / Q. Guo, L. Sun, P. Schonfeld, Z. Li. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2021. Vol. 148. P. 353–378. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.04.002>
- Bertsimas D., Ng Y. S., Yan J. Joint frequency-setting and pricing optimization on multimodal transit networks at scale. *Transportation Science*. 2020. Vol. 54, no. 3. P. 839–853. DOI: <https://doi.org/10.1287/trsc.2019.0959>
- Tian Q., Wang D. Z. W., Lin Y.-H. Service operation design in a transit network with congested common lines. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2021. Vol. 143. P. 54–85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.12.003>
- Petit A., Lei C., Ouyang Y. Multiline bus bunching control via vehicle substitution. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2019. Vol. 126. P. 247–269. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.05.009>
- Robust dynamic bus controls considering delay disturbances and passenger demand uncertainty / S. Li, R. Liu, L. Yang, Z. Gao. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2019. Vol. 125. P. 277–308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.03.019>
- Robust control for regulating frequent bus service on a dedicated bus lane / E. van der Werff, O. Cats, S. Hoogendoorn, H. van Lint. *Transportation Research Record*. 2019. Vol. 2673, no. 8. P. 139–149. DOI: <https://doi.org/10.1177/0361198119845893>
- 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>
- 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>
- Deep reinforcement learning-based holding control for bus bunching considering passenger waiting perception / D. Liu, M. Zhou, H. Wang, J. Li. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, no. 14. Article 10947. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151410947>
- 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>
- 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>
- 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>
- 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>
- Dynamic scheduling of flexible bus services with hybrid requests and fairness concerns / W. Wu, C. Ma, R. Song et al. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2024. Vol. 182. Article 103069. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2024.103069>
- 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>
- Optimal design of community shuttles considering demand response and route choice / J. Xiong, X. Qian, Y. Zhang et al. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2021. Vol. 131. Article 103109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103109>
- Dou Y., Zhou J., Zhang M. 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>
- Zhou Y., Meng Q., Ong G. P. Electric bus charging scheduling for a single public transport route with dynamic electricity prices. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2022. Vol. 159. P. 63–89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2022.03.002>
- Zhou Y., Ong G. P., Meng Q. Electric bus charging facility planning with uncertainties in operation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2023. Vol. 149. Article 104108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104108>
- Fei F., Yang H., Liu Z. Exploring the profitability of using electric bus fleets for transport and power grid services. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2023. Vol. 148. Article 104060. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104060>
- Collaborative optimization of electric bus line scheduling with multiple charging modes / D.-F. Xie, J.-Y. Wang, C. Lu et al. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2023. Vol. 114. Article 103551. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103551>
- 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>
- 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>
25. Multi-depot vehicle scheduling with multiple vehicle types on overlapped bus routes / H. Shang, J. Xu, Y. Wang et al. *Expert Systems with Applications*. 2023. Vol. 227. Article 120352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120352>
 26. 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>
 27. 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>
 28. 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>
 29. 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>
 30. Bus-passenger-flow prediction model based on WPD, attention mechanism, and Bi-LSTM / Y. Pei, S. Ran, W. Wang, C. Dong. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, no. 20. Article 14889. DOI: <https://doi.org/10.3390/su152014889>
 31. 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>
 32. Real-time bus departure prediction using neural networks for smart IoT public bus transit / N. Rashvand, S. S. Hosseini, M. Azarbayjani, H. Tabkhi. *IoT*. 2024. Vol. 5, no. 4. P. 650–665. DOI: <https://doi.org/10.3390/iot5040029>
 33. 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>
 34. Ghandeharioun Z., Zendehdel Nobari P., 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>
 35. Evaluation of urban bus service reliability on variable time horizons using a hybrid deep learning method / T. Zhou, W. Wu, L. Peng, X. Wu, C. Jiao, J. Sun. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022. Vol. 220. Article 108090. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.108090>
 36. Passenger flow prediction for citywide bus stops based on gated multi-graph convolutional network / Y.-Y. Wang, C. Zhang, W.-P. Qu, Z.-H. Jiang. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2025. Advance online publication. DOI: <https://doi.org/10.1080/15472450.2025.2543820>

Dolia V.K. Intelligent adaptive bus route management based on real-time passenger flow forecasting

The article develops an organizational and methodological approach to intelligent adaptive management of an urban bus route based on real-time passenger flow forecasting. The relevance of the study is determined by the need to improve the quality of public transport services under

conditions of uneven demand, changing traffic situations, intraday fluctuations in route loading, and limited carrier resources. Unlike traditional approaches, which rely mainly on averaged or retrospective data, the proposed approach focuses on combining current route monitoring with short-term demand forecasting and the formation of proactive dispatching decisions. This makes it possible to consider the route not as a static system with fixed parameters, but as a controllable object whose state constantly changes under the influence of passenger demand, road conditions, trip duration, and vehicle availability.

The purpose of the study is to develop an approach that ensures the coordination of transport service quality indicators with the requirements of operational stability and the economic feasibility of carrier operations. The study forms a system of interrelated indicators covering actual and forecast passenger flow, headway, vehicle occupancy rate, average passenger waiting time, service regularity, revenue, costs, and financial result. The use of spatio-temporal passenger flow forecasting, rules for determining the required number of buses, adaptive headway, and the choice of control action with stability verification is substantiated. In addition, the possibility of adjusting the type of rolling stock depending on the expected level of demand, the permissible level of vehicle occupancy, and the carrier's resource constraints is taken into account.

The results of the study show that the proposed approach makes it possible to formalize the transition from reactive to proactive bus route management, promptly identify risks of vehicle overcrowding, reduce expected passenger waiting time, and account for the carrier's financial constraints. The proposed decision-making logic involves comparing forecast load with permissible capacity, assessing the impact of headway changes on service regularity, and verifying the economic result before implementing a control action. Particular attention is paid to the possibility of using GPS monitoring data, automated passenger counting, and electronic ticketing to update model parameters in real time, refine demand estimates at individual stops, identify critical overload periods, and improve forecast reliability. The practical significance of the study lies in the possibility of applying the results in dispatching management systems, digital transport monitoring platforms, and information-analytical decision support modules in the field of urban passenger transport. The obtained results may serve as a methodological basis for further testing on actual urban route data, comparing alternative dispatching response scenarios, and developing intelligent transport systems in cities with different levels of passenger demand.

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

Доля Віктор Костянтинівич – проф., д.т.н., професор кафедри транспортних технологій і систем, Державний науково-виробничий комплекс «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна, e-mail: <https://orcid.org/0000-0002-9639-3640>
viktordolya@me.com,

Дата першого надходження статті 02.07.2026.

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 \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)