

БАГАТОРІВНЕВЕ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ РЕЗЕРВУ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ЗУПИННОГО ПУНКТУ НА СЕРВІСНО-РЕСУРСНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ МІСЬКОГО ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

Вдовиченко В.О., Підлубний С.Ю., Літинський М.В.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Запропоновано розглядати ефективність міського громадського пасажирського транспорту з позицій оцінки впливу резерву пропускної спроможності зупинного пункту на сервісно-ресурсні параметри роботи маршруту та кількості конфліктних ситуацій, що виникають у зупинному пункті під час взаємодії маршрутного потоку. На основі експериментальних досліджень встановлено характеристичну залежність впливу резерву пропускної спроможності зупинного пункту на ефективність роботи маршруту й визначено, що існує поріг переходу до умов конфліктної взаємодії. Аналіз кластерного розподілу кількості конфліктних ситуацій дав змогу визначити межу переходу, що залежить від рівня резерву пропускної спроможності зупинного пункту. З'ясовано, що в умовах нерівномірності інтервалу прибуття автобусів мінімальний рівень резерву пропускної спроможності зупинного пункту має становити від 0,4 до 0,6.

Ключові слова: транспортно-пересадочний вузол, міський громадський пасажирський транспорт, зупинний пункт, пропускна спроможність зупинного пункту.

Вступ

У сучасних умовах розвитку міських територій гостро постають питання забезпечення високоякісної та безпечної мобільності населення. Транспортний сервіс, що є важливою характеристикою соціального розвитку міст, нині є актуальним сектором забезпечення високого рівня якості життя населення. Передумовою такої ситуації є його значна роль у формуванні так званого «радіуса життєвого простору міста» та у високому рівні його впливу на екологічні та соціальні умови проживання населення [1]. Негативний вплив пасажирського транспорту стає основним джерелом погіршення умов розвитку міських територій.

Вимоги до економії ресурсів і зменшення негативних наслідків міського громадського пасажирського транспорту (МГПТ) стали основною парадигмою для впровадження принципів сталого розвитку транспорту міст і формування на їх основі критеріїв оцінювання ефективності його елементів.

Результативним методом реалізації мобільності населення в умовах зниження негативних наслідків і ресурсозбереження є використання МГПТ. Основною умовою формування пріоритетів населення у виборі варіантів сполучення на базі МГПТ є його відповідність висунутим ними соціально-маркетинговим потребам, що полягають у повному та вчасному задоволенні вимог пасажирів до якості пересування. Важливим

елементом МГПТ є транспортно-пересадочні вузли (ТПВ), які поряд з магістралями швидкісного транспорту є каркасом його мережі. Стан організації технологічних процесів у ТПВ впливає на використання потенціалу МГПТ та разом із завданням стабілізації руху по мережі нині є актуальним. Простий автобусів у зупинних пунктах (ЗП) у межах ТПВ належить до обслуговувальних функцій та дуже часто містить непродуктивні складники, що погіршують ефективність МГПТ. Ситуація значно ускладнюється через відсутність комплексного регулювання взаємодії МГПТ в ТПВ, що призводить до появи конфліктних ситуацій.

Такі ситуації є джерелом зниження провізної спроможності маршрутів, збільшення часу пересування пасажирів, виникнення дорожньо-транспортних пригод та додаткового забруднення атмосфери. Підвищення ефективності МГПТ вимагає використання багаторівневих моделей оцінювання впливу параметрів роботи елементів ТПВ, що мають зважати на особливості функціонування окремих елементів на умови сталого розвитку міст.

Аналіз публікацій

Оцінювання ефективності МГПТ є першочерговим завданням у формуванні стратегічних рішень з удосконалення його роботи. Необхідність розв'язання завдання об'єктивного подання результатів роботи МГПТ підтверджується в низці науково-практичних

робіт [2–8]. Процес перевезення пасажирів у міському сполученні має широкий спектр впливу на міське середовище й може бути схарактеризований значною кількістю показників. Групи основних показників, що впливають на ефективність роботи МГПТ, можна розподілити за такими категоріями:

- техніко-економічні показники;
- техніко-експлуатаційні показники;
- організаційно-технічні показники;
- показники якості обслуговування.

У роботах [2–8] питання оцінювання ефективності окремих елементів ТПВ у формальному вигляді не розглядається. Однак окремі автори робили спроби оцінити ефективність МГПТ на основі визначення індикаторів, що характеризують, зокрема, роботу окремих елементів. У праці [2] проаналізовано показники, за допомогою яких можна оцінити ефективність МГПТ. Залежно від підходів кількість індикаторів коливається від 7 до 54. Вони систематизовані за трьома базовими групами: економічні, екологічні, соціальні. Запропонована форма дає змогу проводити ретроспективне загальне оцінювання ефективності з позиції впливу на відповідність умовам сталого розвитку міського середовища. Відсутність формалізованих зв'язків між окремими операціями та ефективністю елементів МГПТ не дає змогу використовувати цей підхід для дослідження впливу організованості взаємодії в ТПВ.

Автори роботи [3] дослідили підходи до оцінювання економічної ефективності МГПТ щодо його впливу на покращення транспортного планування міст. У процесі аналізу встановлено, що економічна оцінка є дієвим інструментом для визначення перспективних напрямів удосконалення елементів транспортної інфраструктури. Водночас питання впливу параметрів взаємодії в елементах ТПВ у цій роботі не було проаналізовано.

У праці [4] запропоновано комплексний підхід до оцінювання ефективності систем громадського транспорту за різними цільовими інтересами. Цей підхід спрямований на визначення окремих пропозицій для операторів у керуванні МГПТ з метою покращення його продуктивності та управління. Як і попередні роботи, цей підхід не передбачає дослідження впливу окремих елементів ТПВ на ефективність МГПТ.

Вплив організаційних чинників на ефективність МГПТ запропоновано в праці [5]. Автори пропонують розглядати ефективність як технічну характеристику. У цій роботі

зроблено спробу подати ефективність у вигляді лінійної емпіричної функції, що містить параметри, які визначають рівень організованості процесів. Запропонована залежність побудована на основі статистичного оброблення результатів.

У дослідженні [6] автори запропонували оцінювати ефективність роботи маршрутів, зважаючи на корисність МГПТ. Ефективність у цьому разі передбачає оцінювання рівня зміни втрат від транспортної втоми, фінансових витрат на здійснення поїздок та очікуваної корисності від пересування. Всі елементи мають бути зведені до грошового оцінювання, але в роботі не наведено методики її встановлення. Запропонований підхід є узагальнювальною концепцією та надалі не був реалізований у вигляді конкретних функцій.

У статті [7] ефективність МГПТ визначається способом оцінювання сукупності техніко-експлуатаційних показників, що відтворюють сприйняття результативності роботи рухомого складу споживачами. Така форма дає змогу зрештою подати ефективність у вигляді інтегрального показника. Але вплив взаємодії в окремих елементах оцінити за допомогою цієї методики не можливо.

Однією із спроб визначити ефективність МГПТ є робота [8], у якій запропоновано оцінювати якість транспортних послуг. Оцінка передбачала функціональні та часові параметри. Ця праця має узагальнений характер і не містить конкретних моделей формалізації критерію ефективності.

На основі аналізу студій [2–8] можна дійти висновку, що в них методики оцінювання ефективності МГПТ залежно від параметрів взаємодії в ТПВ в явному вигляді не подані.

Роботи [9–13] присвячені оцінюванню ефективності функціонування окремих елементів пасажирської транспортної інфраструктури.

Для оцінювання ефективності функціонування зупинних пунктів у праці [9] запропоновано використовувати часові показники. Основним недоліком описаного підходу є обмеженість винятково внутрішнім середовищем та відсутність обліку впливів на стан роботи маршрутів.

Підвищення ефективності взаємодії суб'єктів МГПТ в ТПВ подано в студіях [10, 11]. Автори розглядають питання синхронізації руху автобусів щодо забезпечення мінімальних витрат часу пасажирів. Недоліком цього підходу є те, що в запропонованих моделях не бе-

реться до уваги вплив пропускної спроможності ЗП на тривалість затримок автобусів.

Підбиваючи підсумок аналізу публікацій [2–11], хочемо зазначити, що наявні підходи до оцінювання ефективності спрямовані на визначення результативності щодо певного переліку загальних властивостей МГПТ. Така форма подання не дає змогу оцінити вплив окремих елементів на ефективність МГПТ, оскільки не формалізує цей зв'язок. Розв'язання завдання впровадження методів оцінювання ефективності окремих елементів пасажирської транспортної інфраструктури, що містить ТПВ, лежить у сфері розвитку методологічних основ аналізу рівнів розгляду МГПТ [12]. Це вимагає нових форм опису параметрів функціонування ТПВ з огляду на багаторівневий вплив.

Мета й постановка завдання

Метою дослідження є визначення умов формування характеристичної зони підвищення ефективності роботи маршруту МГПТ на основі обліку рівня резервів пропускної спроможності ЗП.

Для досягнення поставленої мети було визначено такі завдання:

- на основі аналізу контурного зв'язку впливу технологічних рішень на ефективність взаємодії МГПТ сформовано принципи багаторівневого оцінювання ефективності ТПВ;
- експериментальним способом встановлено характеристичні залежності впливу рівня резерву пропускної спроможності ЗП на ефективність роботи маршруту МГПТ.

Виклад основного матеріалу

Результативність ТПВ зумовлена досягнутим цільовим ефектом, що має відтворювати різні рівні функціонування МГПТ. Стан операцій і алгоритмів, що забезпечують досягнення відповідних результатів, оцінюються показниками якості, до яких належать результативність, ресурсомісткість і рівень зворотного впливу.

Загалом ці показники та впливовості утворюють комплексну системну властивість – ефективність процесу. Ця властивість виявляється в реалізації функціональних процесів об'єкта й залежить від внутрішніх і зовнішніх умов реалізації. Оцінювання ефективності функціонування МГПТ передбачає чотири основні рівні [12]: елементний, агрегатний, системний та метасистемний. ЗП ТПВ належить до елементного рівня. Для оцінювання ефективності МГПТ на цьому рівні використовуються часові показники, що відтворю-

ють якість операцій в ТПВ. Це досягається способом визначення відповідності простою автобусів під обслуговуванням і витрат часу пасажирів на посадково-пересадкові операції щодо прийнятого ними за норматив значення.

Наявність характерного міжрівневого впливу в структурі опису взаємодії суб'єктів МГПТ вимагає розширення зони подання ефективності ТПВ. Такі умови ґрунтуються на принципах системного аналізу й реалізуються за допомогою оцінювання інтегрального впливу техніко-технологічної взаємодії ТПВ на загальну ефективність МГПТ. Зважаючи на такі вимоги, загальна структура оцінки ефективності у відповідному періоді (t) може бути подана у вигляді сукупності станів елементного рівня $S_e(t)$ (об'єктів пасажирської інфраструктури), агрегатного рівня $S_u(t)$ (маршрути МГПТ), системного рівня $S_t(t)$ (міської транспортної системи) та характеру впливу на метасистемний рівень $S_c(t)$ (міське середовище).

$$W(s) = \{S_e(t), S_u(t), S_t(t), S_c(t)\}. \quad (1)$$

Постановка завдання організації взаємодії суб'єктів у ТПВ передбачає в межах ресурсних можливостей ЗП (R) та вхідного маршрутного потоку (V) реалізацію такого варіанта рішень (Z), що спрямований на забезпечення ефективного стану всіх рівнів МГПТ.

$$Z \times R \times V \rightarrow W(s) \rightarrow \max. \quad (2)$$

Внаслідок наявності складних за розміром та характером взаємовпливів, розв'язання поставленого завдання щодо пошуку загальнорівневого ефективного стану МГПТ є дуже трудомісткою процедурою. Виконання окресленого завдання вимагає використання процедури єдності аналізу та синтезу дослідження окремих процесів. У межах цього підходу необхідно провести логічний розподіл загального завдання організації взаємодії в ТПВ на окремі складники щодо зон реалізації та їх характеристичного впливу на загальнорівневу ефективність МГПТ.

До внутрішніх елементних технологічних заходів належить формування інерційності роботи ЗП у вигляді створення певних резервів пропускної спроможності ЗП та розосередження вхідного маршрутного потоку за часом і територією ТПВ. Складність внутрішньої ко-

ординації зумовлена наявністю значного впливу на неї зовнішніх чинників, що виявляються в коливанні обсягу пасажирообміну, нерівномірності інтервалів прибуття автобусів та порушення їх ритмічності руху. Така ситуація значно обмежує внутрішні можливості досягнення ефективної взаємодії в ТПВ та потребує втручання в інші сфери реалізації технологічних процесів. Внутрішні агрегатні заходи спрямовані на зниження дисфункцій та реалізуються в межах окремих маршрутів МГПТ. Це може бути досягнуто завдяки створенню на маршрутах певного резерву провізної спроможності рухомого складу.

Резервування провізної спроможності маршрутів має мету – забезпечити компенсацію затримок часу, що призводить до зниження продуктивності роботи рухомого складу. Також нестабільність попиту в часі призводить до виникнення окремих пікових навантажень, що також потребують залучення певної частки провізної спроможності. Як показує практичний досвід обслуговування автобусних маршрутів у країнах ЄС, наявність резерву провізної спроможності на рівні 20–30 % гарантує якісне транспортне обслуговування пасажирів, навіть якщо виникає піковий попит в окремі періоди.

Важливою умовою прийняття комплексу технологічних рішень з покращення взаємодії є оцінювання концептів наслідків сервісно-ресурсних показників сталості МГПТ та рівня їх впливу на міське середовище. Для оцінювання метасистемного впливу використовуються вербальні форми опису концептів екологічної та транспортної безпеки процесів взаємодії в ТПВ щодо висунутих суспільством вимог.

На підставі аналізу умов загальнорівневої ефективності МГПТ та формалізації опису вимог до нього можна визначити контурний зв'язок (див. рис. 1).

На основі аналізу зв'язку та цільових завдань можна визначити склад критерію ефективності взаємодії в ТПВ, що відтворює характер спрямованості досягнення ефективного стану агрегатного рівня (маршрути МГПТ). З огляду на багаторівневість і системність подання ефективності МГПТ потрібно забезпечити синтез процедур оцінювання характеристик взаємодії в ТПВ та умов обліку багаторівневого впливу. Критерій оцінювання ефективності взаємодії в ТПВ можна подати у вигляді співвідношення фактичного сервісно-ресурсного потенціалу маршруту, що забезпечується в разі резерву пропускнуої спроможності ЗП ТПВ (z), до можливого

$$F_{TH}^{(t)}(z) = \sum_{i=1}^m \frac{A_{Ui}^r(z) \cdot KR_{Ui}^r(z)}{A_{Ui}^e \cdot KR_{Ui}^e} - 1 \rightarrow \max_{z \in Q}, \quad (3)$$

де $A_{Ui}^r(z)$ – фактичний рівень якості обслуговування пасажирів рейсу i , що досягається в процесі забезпечення резерву пропускнуої спроможності ЗП ТПВ на рівні z ; A_{Ui}^e – технічно можливий рівень якості обслуговування пасажирів; $KR_{Ui}^r(z)$ – фактичний рівень резерву провізної спроможності маршруту під час реалізації ресурсного забезпечення ЗП на рівні z ; KR_{Ui}^e – необхідний рівень резерву провізної спроможності маршруту; m – кількість рейсів маршруту, що проходять ТПВ.

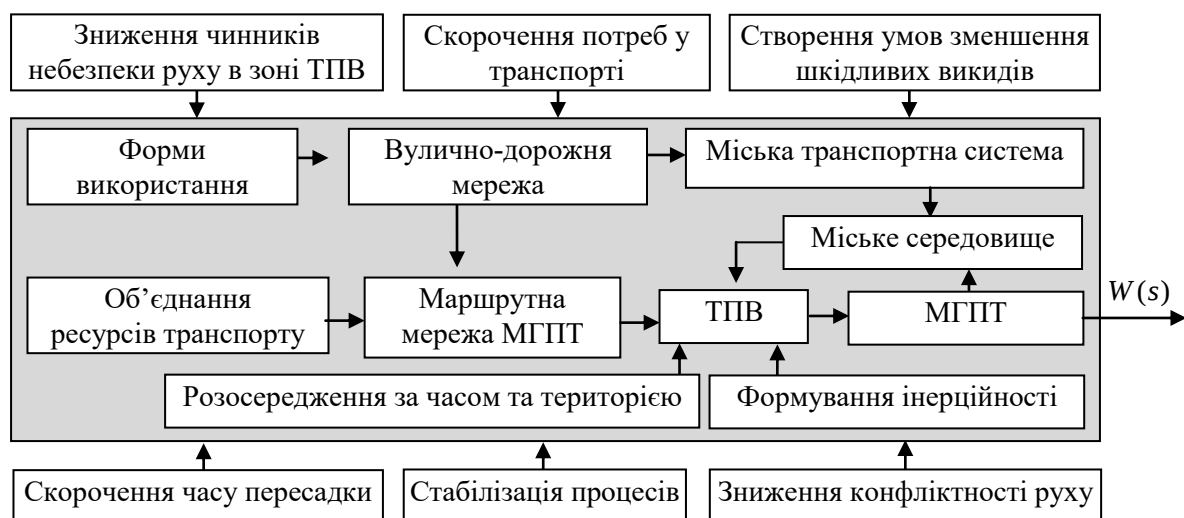


Рис. 1. Контурний зв'язок формування технологічних рішень підвищення ефективності взаємодії МГПТ в ТПВ

Рівень якості $A_U^r(z)$ може бути оцінено відносним показником, що відтворює відношення планових і фактичних витрат часу пасажирів на пересування по маршруту.

$$A_U^r(z) = \frac{t_p^n}{t_p^\phi}, \quad (4)$$

де t_p^n , t_p^ϕ – плановий і фактичний час пересування пасажирів по маршруту, хв.

Плановий час t_p^n відповідає умовам, за яких відсутні затримки пасажирів. Якщо на маршруті зовсім відсутні затримки руху, тоді $t_p^\phi = t_p^n$, а $A_U^r(z) = 1$, що є максимальним значенням якості на маршруті. Таке значення також приймає $A_U^e = 1$. У разі виникнення затримок у ЗП спостерігається ситуація $A_U^r(z) < A_U^e$.

Фактичний рівень резерву провізної спроможності маршруту $KR_U^r(z)$ демонструє, яка частка наданої транспортної пропозиції не задіяна й може бути використана для задоволення коливань попиту або компенсації зниження продуктивності автобусів.

$$KR_U^r(z) = 1 - \frac{F_n^r \cdot t_o^r}{q_n^r \cdot A_o^r}, \quad (5)$$

де F_n^r – стає значення максимального пасажиропотоку на маршруті, пас./год; t_o^r – фактичний час обертів, год; q_n^r – номінальна місткість автобуса, пас.; A_o^r – кількість автобусів на маршруті, од.

Мета резервування провізної спроможності маршруту полягає в забезпеченні певних умов гарантування якості в разі пікових зростань попиту. На етапі проектування послуги потрібно оцінити можливі ризики погіршення умов обслуговування пасажирів і встановити рівень резерву провізної спроможності маршруту. За результатами аналізу коливань попиту на маршрутах м. Дніпра встановлено, що достатнім є резерв $KR_{Ui}^e = 0,2$.

Поєднання параметрів якості та резерву провізної спроможності маршруту дає змогу сформулювати сервісно-ресурсну модель оцінювання ефективності МГПТ. На рис. 2 наведено схему розподілу сервісно-ресурсної ефективності МГПТ.

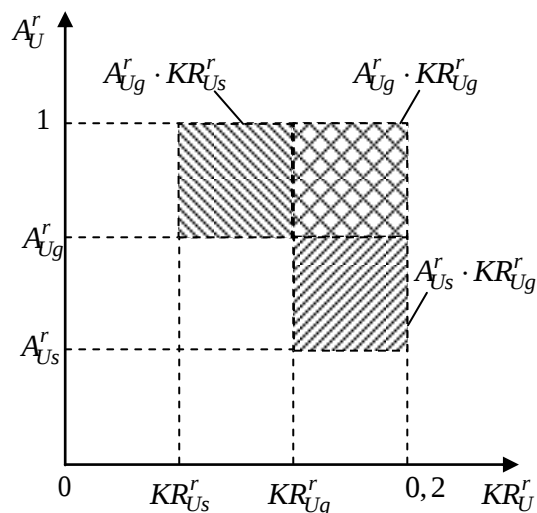


Рис. 2. Схема розподілу сервісно-ресурсної ефективності МГПТ

На схемі позначено межі переходу показників якості обслуговування щодо умов сприйняття їх пасажирями: $A_U^r \geq A_Ug^r$ – високий рівень, $A_Us^r \geq A_U^r > A_Ug^r$ – допустимий рівень, $A_U^r < A_Us^r$ – недопустимий рівень. Значення меж встановлюється на основі соціологічних досліджень сприйняття пасажирями якості транспортного обслуговування. Резерв провізної спроможності визначає умови протидії можливим зовнішнім впливам: $KR_U^r \geq KR_Ug^r$ – високий рівень, $KR_Us^r \geq KR_U^r > KR_Ug^r$ – середній рівень, $KR_U^r < KR_Us^r$ – низький рівень. У процесі роботи маршруту можливо декілька комбінацій. Серед них найкращим є варіант $A_Ug^r \cdot KR_Ug^r$, коли забезпечується високий рівень якості обслуговування та високий рівень резерву провізної спроможності маршруту. Рішення про інші допустимі варіанти приймається організатором перевезень з огляду на оцінки соціально-маркетингових вимог населення до якості транспортного обслуговування.

В умовах реалізації виробничих програм з організації обслуговування МГПТ в ЗП ТПВ важливим є облік міжрівневого впливу «елементарний рівень (зупинний пункт) – агрегатний рівень (маршрут)». Зв'язок полягає в зниженні провізних спроможностей маршруту внаслідок збільшення простою автобусів у ЗП через виникнення певних затримок. Прийнята як основоположна концепція забезпечення сервісно-ресурсної ефективності тех-

нологічних процесів [13] дає змогу визначити штрафні функції впливу резерву пропускної спроможності ЗП ТПВ на сервісно-ресурсний потенціал маршруту. За таких умов зв'язок між зниженням сервісно-ресурсного рівня ефективності роботи маршруту та виникненням непродуктивних простоїв у ЗП ТПВ можна описати за допомогою функцій штрафу:

$$A_U^r(z) = A_U^e - H_A^{TH}(z), \quad (6)$$

$$KR_U^r(z) = KR_U^e - H_R^{TH}(z), \quad (7)$$

де $H_A^{TH}(z)$, $H_R^{TH}(z)$ – штрафна функція, що відтворює негативні наслідки резерву пропускної спроможності ЗП ТПВ на рівні z на сервісно-ресурсний потенціал маршруту.

Якщо підставити в залежність (3) функції (6) і (7), виконати відповідні перетворення, отримаємо кінцевий вигляд критерію ефективності взаємодії в ЗП ТПВ:

$$F_{TH}^{(t)}(z) = \sum_{i=1}^m \frac{(A_{Ui}^e - H_{Ai}^{TH}(z))(KR_{Ui}^e - H_{Ri}^{TH}(z))}{A_{Ui}^e \cdot KR_{Ui}^e}. \quad (8)$$

Сервісна якість транспортних послуг на маршрутах визначається ступенем її відповідності потребам пасажирів з огляду на розриви між її абсолютним значенням та технічно можливим рівнем надання послуг. Однією з причин появи такого розриву, що визначає умови використання потенціалу маршрутів, є неефективна організація обслуговування маршрутного потоку в ТПВ.

Зважаючи на поданий вигляд критерію ефективності, можна сформулювати його фізичний зміст, що полягає в мінімізації штрафних сервісно-ресурсних функцій. Складники критерію ефективності, що відтворюють якість транспортного сервісу на маршруті, визначаються умовами відповідності вимог пасажирів за часом пересування. Ресурсний складник подається як співвідношення провізної спроможності до наявного на маршруті попиту. Для розрахунку цих показників використовуються структурні компоненти сервісно-ресурсної моделі МГПТ. Встановлення гранично допустимих значень рівня якості транспортного сервісу та резервів реалізується на основі виділення технічних можливостей їх досягнення в планових умовах роботи.

Облік впливу умов функціонування ЗП ТПВ на міжрівневий зв'язок «міська транс-

портна система – міське середовище» реалізується внаслідок визначення умов забезпечення мінімального рівня негативних наслідків роботи МГПТ. Відповідно до характеру причинно-наслідкових зв'язків можна визначити умови виникнення негативних наслідків щодо впливу на рівень міського середовища способом оцінювання дорожньо-транспортної та екологічної безпеки. Показник транспортної безпеки може бути поданий як сумарна мінімаксна функція, що виражає рівень ризику та рівень настання аварійної події в ЗП ТПВ в періоді (t) .

$$N_{TH}^t(z) = \sum_{i=1}^u \min_{w_i \in W} \max_{p_i(w_i) \in P} \int_{\tau_s}^{\tau_e} S_i(t) p_i dt, \quad (9)$$

де u – кількість чинників впливу на безпеку руху; $S_i(t)$ – функція ризику настання аварійної ситуації в ЗП ТПВ; p_i – ймовірність виникнення ДТП за умови i -го чинника впливу; w_i – чинник впливу на безпеку руху; W – зона чинників небезпеки руху; P – множина функцій розподілу ймовірності виникнення ДТП в ЗП ТПВ; $\tau_{s(e)}$ – початок (закінчення) періоду.

Зважаючи на умови мінімаксної функції, необхідно прагнути до виділення мінімальної кількості чинників виникнення аварійних ситуацій за одночасного використання максимальних значень ймовірності виникнення ДТП. Основним чинником зниження безпеки руху в ТПВ є конфліктні ситуації, за яких у ЗП перебувають два чи більше автобуси. Конфліктна ситуація в ЗП – це перевищення кількості автобусів, що можуть безперешкодно здійснювати маневрування та посадку-висадку пасажирів у ЗП.

Негативні екологічні наслідки роботи МГПТ в ТПВ визначаються обсягом шкідливих викидів та залежать від загального непродуктивного часу перебування автобусів у територіальному просторі ЗП.

$$E_{TH}^{(t)}(z) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k t_i^b \cdot M_{vj}, \quad (10)$$

де t_i^b – тривалість непродуктивного простою автобуса в ЗП; M_{vj} – питомі викиди шкідливих речовин n -ї групи автобусів, г/с.

З огляду на подані умови зниження негативних наслідків досягається завдяки забез-

печенню безконфліктності функціонування ЗП. На основі цього може бути виділена зона сталості за умов забезпечення мінімізації негативних впливів:

$$S_{TH}^{(t)}(z) = \begin{cases} \sum_{i=1}^m t_i^b \rightarrow 0 \\ \sum_{i=1}^m K_i^s \rightarrow 0 \end{cases}, \quad (11)$$

де K_i^s – конфліктна ситуація в ЗП ТПВ.

Беручи до уваги подані вимоги щодо умов забезпечення екологічної та дорожньої безпеки, із сукупності альтернатив можна визначити зону допустимих рішень щодо резервування пропускної спроможності ЗП:

$$Z = \{z_i \in d \mid d_j \rightarrow S_j, j = \overline{1, l}\}, \quad (14)$$

де z_i – альтернативне рішення резервування пропускної спроможності ЗП; d_j – зона допустимих рішень; S_j – допустимий стан ЗП; l – кількість станів ЗП, що забезпечують придатні умови для транспортної та екологічної безпеки.

Основним технологічним параметром ЗП є пропускна спроможність, що відтворює кількість автобусів, які можуть скористатися ЗП протягом періоду (t). Водночас необхідно наголосити, що використання як одиниці виміру кількості автобусів є некоректним, оскільки не бере до уваги тривалість перебування кожного автобуса в ЗП. Такий показник можна застосувати лише за умови сталої тривалості перебування автобусів в ЗП. Альтернативним варіантом оцінювання використання ЗП є рівень резерву пропускної спроможності ЗП (K_R). Він показує питому вагу часу в загальному періоді (t), що не задіяний автобусами для посадки-висадки пасажирів.

$$K_R(z) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m t_{ni}^s}{t}, \quad (15)$$

де t_{ni}^s – час перебування в ЗП, хв; t – тривалість періоду, хв.

Мінімальна тривалість перебування автобуса в ЗП визначається вимогами щодо здійснення технологічних операцій з маневрування автобуса, відкриття-закриття дверей та здійснення посадки-висадки пасажирів. Та-

кож може бути застосовано додатковий сервісний простір для накопичення пасажирів. Загальна тривалість перебування автобуса в ЗП визначається за формулою

$$t_n^s = \frac{t_m^s + t_{\text{вз}}^s + q_6 \cdot \tau_6 + q_3 \cdot \tau_3 + t_c^s}{60}, \quad (16)$$

де t_m^s – час маневрування автобуса під час заїзду та виїзду з ЗП, с; $t_{\text{вз}}^s$ – час відчинення та зачинення дверей автобуса, с; q_6 , q_3 – кількість пасажирів, що виходять і входять в автобус, пас.; τ_6 , τ_3 – час висадки й посадки пасажирів, с; t_c^s – додатковий час простою в ЗП, с.

Збільшення резерву пропускної спроможності ЗП дає змогу знизити ймовірність виникнення конфліктних ситуацій. Керувати параметром K_R можна за допомогою перерозподілу маршрутів між ЗП ТПВ або способом зміни тривалості t_c^s . Перерозподіл маршрутів між ЗП залежить від планувальної конфігурації та в багатьох випадках обмежений простором ТПВ. Основним джерелом впливу на K_R є час t_c^s , що може змінюватися в діапазоні від 0 с до максимального інтервалу прибуття автобусів у ЗП (I_n^s).

Використання як параметра впливу рівня резерву пропускної спроможності ЗП ТПВ ґрунтується на основних принципах стабілізації технологічних процесів та є дієвим інструментом забезпечення умов сталості МГПТ. Для визначення діапазону раціональних значень резервів пропускної спроможності зупинних пунктів ТПВ необхідно встановити залежність вигляду $W(s) = f(K_R)$. Представлене завдання може бути розв'язано за допомогою експериментальних досліджень.

Разом з формалізацією структурних складників критерію оцінювання ефективності основним завданням дослідження є визначення параметричного зв'язку між плановим резервом пропускної спроможності ЗП та сервісно-ресурсною ефективністю МГПТ. Зв'язок між цими параметрами міститься в розтинках, що відтворюють міжрівневі погодження сервісно-ресурсних трансформацій у структурі МГПТ. Складність опису процедури міжрівневих зв'язків викликана значними розмірами та стохастичними умовами взаємодії. Для пошуку характеристичних зв'язків впливу резерву пропускної спроможності ЗП

на ефективність використано імітаційне моделювання. На основі розробленої імітаційної моделі функціонування ЗП ТПВ проведені експериментальні дослідження. Одним з етапів імітаційного моделювання є визначення вхідних параметрів і характеристик зовнішніх впливів. Зовнішніми чинниками є: пасажирообмін у ЗП, інтервал прибуття автобусів, час посадки (висадки), час маневрування. Для визначення характеру зміни зовнішніх чинників проведено натурні спостереження на ЗП ТПВ м. Дніпра: «Мост-Сіті» (48.468193, 35.050661), «вул. Батумська» (48.516642, 35.079502), «пр. Дмитра Яворницького» (48.475311, 35.017468), «вул. 128 Бригади Тероборони» (48.475148, 35.014892), «пр. Лесі Українки» (48.463961, 35.028403). За результатами спостережень встановлено закономірності зміни параметрів (табл. 1).

На основі натурних спостережень встановлено, що в межах ЗП відбувається взаємодія від 3 до 7 маршрутів. Для імітаційних розрахунків прийнято середнє значення кількості маршрутів, що обслуговуються в одному ЗП, рівним 5.

У дискретно-подієвому моделюванні функціонування системи подається як хронологічна послідовність подій. Для моделювання прийнятий діапазон часу, що відповідає ранковому періоду пік (з 7 до 8 год).

На основі імітаційних розрахунків можна проаналізувати зміни сервісно-ресурсних показників маршруту залежно від зміни рівня резерву пропускної спроможності ЗП. Такий аналіз проводився на основі попередньо встановлених регресійних моделей та ставив за мету визначення основних тенденцій щодо встановлення причинно-наслідкових зв'язків впливу K_R на величини H_A^{TH} , H_U^{TH} , t^b , K^s . Ці зв'язки дали змогу проана-

лізувати вплив K_R на сервісно-ресурсну ефективність $F_{TH}^{(t)}$.

Зв'язок $K_R - H_A^{TH}$ відтворює характер впливу параметра K_R на зміну часу пересування пасажирів на маршруті. Розподіл отриманих під час імітаційного експерименту значень параметрів зв'язку та модельна крива подані на рис. 2.

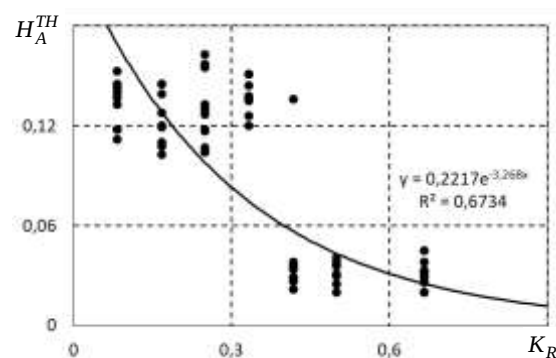


Рис. 2. Розподіл штрафної функції сервісного рівня МГПТ

Розподіл штрафної функції H_U^{TH} від K_R зображені на рис. 3.

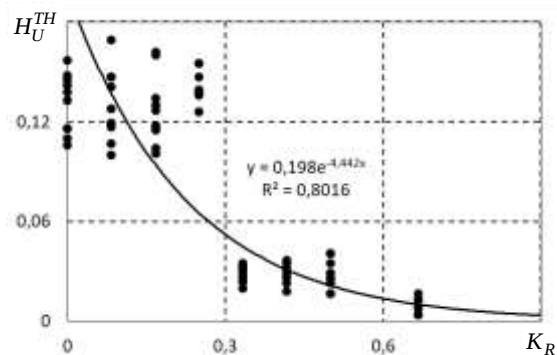


Рис. 3. Розподіл штрафної функції ресурсного рівня МГПТ

Таблиця 1 – Зміни параметрів вхідного маршрутного потоку

Параметр	Закон розподілу	Математичне очікування	Діапазон зміни	
			min	max
Кількість пасажирів, що виходять з автобуса, пас.	нормальний	7	3	10
Кількість пасажирів, що входять в автобус, пас.	нормальний	5	2	7
Відхилення прибуття в ЗП, хв	логнормальний	3,4	-2	5
Час посадки пасажирів, с	гамма-розподіл	3,4	1,8	5,1
Час висадки пасажирів, с	гамма-розподіл	5,5	3,7	8,9
Час маневрування автобуса, с	логнормальний	21	16	28

Впливи на формування умов сталого розвитку міського середовища відбуваються через негативні наслідки у вигляді появи чинників ДТП та екологічного впливу. Отримана під час моделювання інформація про кількість конфліктних ситуацій і тривалості непродуктивного простою в ЗП дають змогу подати зв'язки $K_R - t^b$, $K_R - K^S$ у вигляді графіків (рис. 4, 5).

З огляду на структуру ефективності можна подати $F_{TH}^{(t)}$ та визначити допустимі зони прийняття рішень (рис. 6).

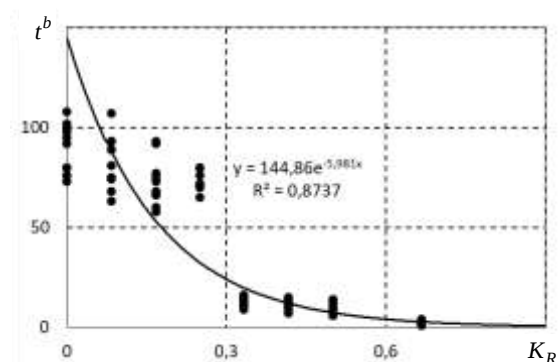


Рис. 4. Розподіл тривалості конфліктних ситуацій у ЗП

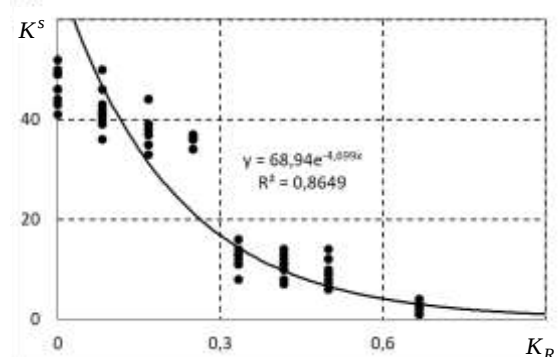


Рис. 5. Розподіл кількості конфліктних ситуацій у ЗП

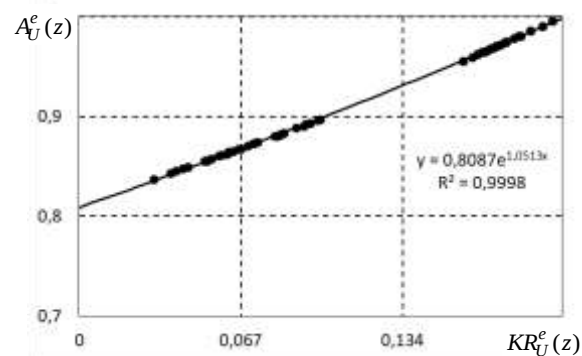


Рис. 6. Зміна сервісно-ресурсної ефективності МГПТ

За умови збільшення K_R знижується негативний вплив на рівень якості транспортного обслуговування та провізну спроможність маршруту. Така тенденція пояснюється наявністю чітко вираженого характеристичного зв'язку між резервом K_R та кількістю конфліктних ситуацій K^S . У цьому разі є певний поріг переходу від сталого стану до стану конфліктної взаємодії. Наявність двох кластерів розподілу кількості конфліктних ситуацій дає змогу встановити межу переходу резерву пропускної спроможності ЗП на рівні 0,3.

Значення резерву пропускної спроможності ЗП менше ніж 0,3 спричиняє стрімке збільшення кількості конфліктних ситуацій, що пояснюється відсутністю можливості реалізувати планові технологічні операції в ЗП і компенсувати відхилення інтервалу прибуття. Отриманий вигляд залежності демонструє, що за умови резерву пропускної спроможності на рівні 0,2 кількість конфліктних ситуацій становить 27 од., що на 155,9 % більше, ніж у разі резерву 0,4.

Водночас сумарна тривалість перебування автобусів у конфліктному стані за такого резерву становить 44 хв, що на 230,8 % більше, ніж за умови резерву 0,4. Такий стан призводить до різкого зростання негативного впливу МГПТ на міське середовище, що на практиці полягає в збільшенні ймовірності виникнення ДТП в зоні ТПВ та додатковому обсязі забруднювальних викидів в атмосферу.

Наявність причинно-наслідкового зв'язку між затримками автобусів у ТПВ та часом пересування призводить до зниження сервісно-ресурсної ефективності роботи маршруту. Зниження резерву пропускної спроможності ЗП до 0,2 спричиняє погіршення якості обслуговування на 92,2 % порівняно з рівнем резерву 0,4, а резерв провізної спроможності маршруту в цьому разі скорочується на 143,1 %.

Аналіз графіку зміни сервісно-ресурсної ефективності маршруту МГПТ демонструє, що за умови рівня резерву пропускної спроможності ЗП нижчого ніж 0,3 відбувається перехід до зони допустимої якості, але водночас значно скорочується резерв провізної спроможності маршруту. У цьому разі сервісно-ресурсна ефективність маршруту виходить за межі ефективної зони.

Для утримання результатів роботи МГПТ в межах ефективної зони необхідно мати резерв пропускної спроможності ЗП на рівні

не меншому ніж 0,3. Це забезпечує умови зниження негативного впливу на міське середовище й дає змогу утримати рівень сервісно-ресурсної якості в межах ефективного стану.

Висновки

Визначено контурний зв'язок формування сукупності технологічних рішень з підвищення ефективності взаємодії МГПТ в ТПВ. Цей зв'язок ґрунтується на обліку багаторівневого подання наслідків резервування пропускної спроможності ЗП ТПВ щодо сервісно-ресурсної ефективності маршрутів МГПТ та негативного впливу на міське середовище.

Поданий контурний зв'язок дав змогу обґрунтувати загальну структуру критерію оцінювання ефективності МГПТ залежно від рівня резерву пропускної спроможності ЗП ТПВ.

Особливістю запропонованого підходу є його орієнтація на оцінку зміни параметрів якості обслуговування пасажирів на маршрутах МГПТ та резервування їх провізної спроможності. Запропонований підхід допомагає оцінювати рівень ефективності МГПТ з огляду на вплив конфліктності взаємодії вхідного маршрутного потоку в ЗП ТПВ.

Експериментальним способом установлено, що сервісно-ресурсна ефективність маршруту та рівень конфліктності взаємодії має зворотну залежність від рівня резерву пропускної спроможності ЗП й описується експоненціальною функцією.

Скорочення рівня резерву пропускної спроможності ЗП призводить до зростання рівня конфліктності взаємодії, часу затримок автобусів під непродуктивними простоями, скорочується рівень резерву пропускної спроможності маршрутів і знижується якість обслуговування пасажирів.

Установлено, що існує певний поріг переходу від стабільного стану до умов конфліктної взаємодії. Аналіз двох кластерів розподілу кількості конфліктних ситуацій дає змогу визначити межу цього переходу на рівні резерву пропускної спроможності ЗП, що дорівнює 0,3. Якщо резерв пропускної спроможності ЗП зменшується нижче 0,3, відбувається різке зростання кількості конфліктних ситуацій.

Це пояснюється неможливістю здійснення запланованих технологічних операцій у ЗП та компенсації відхилень інтервалу прибуття.

В умовах коливання інтервалу прибуття автобусів до ТПВ мінімальний резерв пропу-

скної спроможності ЗП має становити 0,4–0,6. За такого рівня питома вага тривалості конфліктних станів у ЗП ТПВ буде 6,6–22 %, рівень зниження провізної спроможності маршруту становитиме 9,1–22,3 %, рівень погіршення якості – 3,1–6 %. Установлено, що за умови резерву пропускної спроможності ЗП на рівні меншому ніж 0,3 спостерігається перехід сервісно-ресурсної ефективності МГПТ до недопустимої зони, коли суттєво зменшується резерв провізної спроможності маршруту.

Отримані залежності дають змогу в плануванні роботи маршрутів МГПТ встановлювати допустимі значення часу перебування автобусів у ЗП, за якого досягається необхідний рівень резерву пропускної спроможності ЗП. Перспективи розвитку поданої методики полягають у подальших дослідженнях меж резервування пропускної спроможності ЗП в умовах синхронізації та стабілізації часових параметрів прибуття автобусів до ТПВ.

Література

1. Vuchic V.R. Urban transit: operations, planning, and economics. *John Wiley & Sons*. 2017. 624 p.
2. Buzási A., Csete M. Sustainability indicators in assessing urban transport systems. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. 2015. 43(3). P. 138–145. <https://doi.org/10.3311/PPtr.7825>
3. Daraio C., Diana M., Di Costa F., Leporelli C., Matteucci G., Nastasi A. Efficiency and effectiveness in the urban public transport sector: a critical review with directions for future research. *European Journal of Operational Research*. 2016. 248(1). P. 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.05.059>
4. Zhang C., Juan Z., Luo Q., Xiao G. Performance evaluation of public transit systems using a combined evaluation method. *Transport Policy*. 2016. 45. P. 156–167. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2015.10.001>
5. Ayadi A., Hammami S. An analysis of the performance of public bus transport in Tunisian cities. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2015. 75. P. 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.03.009>
6. Нагорний Є.В., Іванов І.Є. Структура корисності обслуговування населення пасажирським транспортом. *Science and Transport Progress*. 2021. № 2(92). С. 5–16. <https://doi.org/10.15802/stp2021/237286>
7. Świdorski A., Jóźwiak A., Jachimowski R. Operational quality measures of vehicles applied for the transport services evaluation using artificial neural networks. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*.

2018. 20(2). P. 292–299. <https://doi.org/10.17531/ein.2018.2.16>
8. Kłos-Adamkiewicz Z. Value of services for passenger in public transport – theoretical approach. *Euro-pean Journal of Service Management*. 2018. 25. P. 125–131. <https://doi.org/10.18276/ejsm.2018.25-15>
 9. Vdovychenko V. Influence of reserve of carrying capacity of massage of points is on the sentinel parameters of outage of passenger of transport vehicles. *Technology Audit and Production Reserves*. 2018. 1/2(39). P. 69–76. <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.123604>
 10. Nesheli M.M., Ceder A.A. Improved reliability of public transportation using real-time transfer synchronization. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2015. 60. P. 525–539. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.10.006>
 11. Wu W., Liu R., Jin W. Designing robust schedule coordination scheme for transit networks with safety control margins. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2016. 93. P. 495–519. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.07.009>
 12. Vdovychenko V., Nagornyy Y. (2016) Formation of methodological levels of assessing city public passenger transport efficiency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. 3(3(81)), P. 44–51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.71687>
 13. Vdovychenko V. Analysis of the resources provision of stopping points of transport-transfer stations of urban passenger transport. *Technology Audit and Production Reserves*. 2017. 2(2(40)). P. 50–56. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.129152>
- References**
1. Vuchic V.R. Urban transit: operations, planning, and economics. *John Wiley & Sons*. 2017. 624 p.
 2. Buzási A., Csete M. Sustainability indicators in assessing urban transport systems. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. 2015. 43(3), 138–145. <https://doi.org/10.3311/PPtr.7825>
 3. Daraio C., Diana M., Di Costa F., Leporelli C., Matteucci G., Nastasi A. Efficiency and effectiveness in the urban public transport sector: a critical review with directions for future research. *European Journal of Operational Research*. 2016. 248(1). 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.05.059>
 4. Zhang C., Juan Z., Luo Q., Xiao G. Performance evaluation of public transit systems using a combined evaluation method. *Transport Policy*. 2016. 45. 156–167. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2015.10.001>
 5. Ayadi A., Hammami S. An analysis of the performance of public bus transport in Tunisian cities. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2015. 75. 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.03.009>
 6. Nagornyy Y.V., Ivanov I.E. Structure of passenger transport service utility for population. *Science and Transport Progress*. 2021. № 2(92). 5–16. <https://doi.org/10.15802/stp2021/237286>
 7. Świdorski A., Jóźwiak A., Jachimowski R. Operational quality measures of vehicles applied for the transport services evaluation using artificial neural networks. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. 2018. 20(2). 292–299. <https://doi.org/10.17531/ein.2018.2.16>
 8. Kłos-Adamkiewicz, Z. Value of services for passenger in public transport – theoretical approach. *Euro-pean Journal of Service Management*. 2018. 25. 125–131. <https://doi.org/10.18276/ejsm.2018.25-15>
 9. Vdovychenko V. Influence of reserve of carrying capacity of massage of points is on the sentinel parameters of outage of passenger of transport vehicles. *Technology Audit and Production Reserves*. 2018. 1/2(39). 69–76. <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.123604>
 10. Nesheli M.M., Ceder A.A. Improved reliability of public transportation using real-time transfer synchronization. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2015. 60. 525–539. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.10.006>
 11. Wu W., Liu R., Jin W. Designing robust schedule coordination scheme for transit networks with safety control margins. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2016. 93. 495–519. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.07.009>
 12. Vdovychenko V., Nagornyy Y. (2016) Formation of methodological levels of assessing city public passenger transport efficiency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. 3(3(81)), 44–51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.71687>
 13. Vdovychenko V. Analysis of the resources provision of stopping points of transport-transfer stations of urban passenger transport. *Technology Audit and Production Reserves*. 2017. 2(2(40)). 50–56. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.129152>
- Вдовиченко Володимир Олексійович**, д.т.н., проф. каф. транспортних технологій, vval2301@gmail.com, тел. +38050-403-17-10, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2746-8175>
- Підлубний Сергій Юрійович**¹, аспірант каф. транспортних технологій, pidlubnyi_s@ukr.net, тел. +38050-362-40-42, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4840-7363>
- Літинський Максим Валерійович**, аспірант каф. транспортних технологій, litinskiymaksim91@gmail.com, тел. +38068-123-29-20, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1803-8639>
- Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Multilevel assessment of the impact of stopping point capacity reserve on the service-resource efficiency of urban passenger transport

Abstract. Problem. The efficiency of urban public passenger transport is proposed to be considered from the perspective of assessing the impact of the stopping point capacity reserve on the level of service-resource efficiency of route operations and accounting for conflict situations in route flow interactions. **Methodology.** Based on the consideration of conditions for stabilizing the operation of urban public passenger transport elements and the principles of sustainable urban development, the structure of the feedback loop influencing technological solutions to ensure the efficiency of route flow interactions at stopping points in transport hubs has been identified. The functional objective is to ensure the level of interaction organization aimed at maximizing the service-resource potential of routes and reducing conflict situations that lead to negative consequences for bus dwell time at stopping points.

Originality. The proposed relationship is based on a multilevel description of the consequences of reserving stopping point capacity on the service-resource potential of the route and the level of conflict in route flow interactions. A key feature of the proposed approach is its focus on assessing changes in passenger service quality parameters along the route and ensuring the necessary reserve of its carrying capacity. This approach enables the evaluation of urban passenger transport route efficiency, considering the impact of service conflicts in the inbound route flow at stopping points. **Results.** Based on experimental studies, a characteristic dependency of the impact of stopping point capacity reserve on the efficiency of urban public passenger transport routes has been established. The obtained efficiency evaluation function reflects trends described by an inverse exponential function. It has been determined that there is a transition threshold from a stable state to conditions of conflict interaction. The analysis of conflict situa-

tion distribution clusters allows for identifying this transition boundary at a stopping point capacity reserve level of 0.3. In the absence of precise coordination of route movement through the stopping point, the capacity reserve level should be at least 0.4–0.6. At this level, the proportion of conflict situations at the stopping point will not exceed 6.6–22 %, and the reduction in service-resource efficiency of the routes will remain within 9.1–22.3 %, which corresponds to acceptable passenger service quality conditions.

Practical value. The obtained dependencies allow for the establishment of rational values for the reserve parameters of stopping points at transport hubs. Based on the presented methodology, it is possible to assess the effectiveness of implementing optimization management measures aimed at organizing bus arrivals at stopping points.

Key words: transport interchange hub, urban public passenger transport, stopping point, stopping point capacity.

Volodymyr Vdovychenko, Doctor of technical sciences, Professor, Department of Transport Technology, vval2301@gmail.com,
+38 050-403-17-10,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2746-8175>

Serhii Pidlubnyi¹, Postgraduate Student, Department of Transport Technology, pidlubnyi_s@ukr.net,
+38050-362-40-42,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4840-7363>

Maksim Litynskyi, Postgraduate Student, Department of Transport Technology, litinskiymaksim91@gmail.com,
+38050-355-36-77,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1803-8639>

Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslav Mudry str., Kharkiv, Ukraine, 61002