УДК 656.072 DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2026.112.0.301

ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ РУХОМОГО СКЛАДУ ПІД ЧАС ОРГАНІЗАЦІЇ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ПАСАЖИРІВ У ПРИМІСЬКОМУ СПОЛУЧЕННІ З ВИКОРИСТАННЯМ ВЕЛОСИПЕДНОГО РУХУ

Наглюк І. С., Абрамова Л. С., Кушнір Д. Е., Сидорчук В. В.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. *У статті розроблено інноваційний структурний контур функціональних зв'язків транспортного процесу, який розглядає велосипедний рух не як відокремлений елемент, а як інтегрований інтенсифікатор використання автобусних мереж. Створена методологічна основа для кількісного аналізу показників ефективності роботи рухомого складу в умовах мультимодальності. Запропоновано комплексний підхід, що поєднує математичне моделювання, аналіз техніко-економічних параметрів та імітаційне моделювання стохастичних процесів пасажиропотоків. За допомогою розробленого програмного забезпечення на основі макросів у середовищі Microsoft Excel було проведено 100 імітаційних експериментів для трьох марок автобусів: ЕТАЛОН А08128, MAN NL 202 та MAN R07 Lions Coach. Результати дозволяють транспортним компаніям приймати обґрунтовані управлінські рішення щодо вибору типу та кількості рухомого складу з огляду на прогнозоване збільшення попиту, зумовленого розвитком велоінфраструктури.*

Ключові слова: *громадський транспорт, пасажиропотік, попит, моделювання, велосипедний рух, маршрут, транспортна інфраструктура.*

Вступ

Сучасні тенденції розвитку транспортних систем у світі свідчать про збільшення попиту на екологічно стійкі, енергоефективні та екологічно чисті види транспорту, зокрема в приміських районах великих міст [1, 2]. Умови України, що визначаються інтенсивною міграцією населення, заторами на дорогах, нестачею паркувальних місць і збільшеним навантаженням на навколишнє середовище, актуалізують пошук нових моделей організації пасажирських перевезень. Одним із перспективних напрямів є інтеграція велосипедного транспорту в систему приміського громадського транспорту, що відповідає принципам сталого розвитку та інтермодальності [3, 4].

Досвід Європейського Союзу демонструє високу ефективність поєднання велосипедного та інших видів транспорту в приміських і регіональних сполученнях [5, 6]. Зокрема дослідження Європейської федерації велосипедистів підтверджують, що розвиток велосипедної інфраструктури при залізничних станціях та можливість перевезення велосипедів у поїздах істотно підвищують доступність громадського транспорту та зменшують рівень використання приватних автомобілів [7].

Аналогічні висновки отримані в наукових роботах з моделювання інтеграції велосипеда та залізничного транспорту в Нідерландах, де зафіксовано збільшення пасажиропотоку та підвищення транспортної доступності територій [8, 9].

В Україні передумови для розвитку комбінованих перевезень із використанням велосипеда вже закладені в стратегічних документах і муніципальних програмах. Так, Концепція розвитку велосипедної інфраструктури міста Київ передбачає створення понад 1000 км велосипедних маршрутів, зокрема приміських, та інтеграцію велосипедного руху з метрополітеном і залізничним транспортом [10]. Харківська область має значний потенціал для розвитку велосипедної інфраструктури, що зумовлено високою щільністю міського населення, значною міграцією пасажирів і сприятливим рельєфом для велосипедного руху.

Ключовим документом, що визначає перспективи розвитку, є Концепція розвитку велосипедного руху й облаштування велосипедної інфраструктури в місті Харкові, яка була представлена 2025 року.

Вона передбачає створення майже 757 кілометрів велосипедних маршрутів, інтегрованих у загальну транспортну систему міста, з урахуванням основних зон пасажиропотоку, житлових районів, промислових зон і транспортних вузлів [11].

ISSN 2521-1773 (Online); 2219-5548 (Print)

У зв'язку з цим розроблення моделі ефективної організації перевезень пасажирів у приміському сполученні з використанням велосипедного руху є актуальним науково-практичним завданням, що спрямоване на підвищення мобільності населення, зниження транспортних витрат і екологічного навантаження, а також адаптацію європейського досвіду до умов України.

Аналіз публікацій

Громадський транспорт та велосипеди є двома важливими компонентами сталої міської і приміської транспортних систем, а їх інтеграція збільшує їхній потенціал для зменшення використання автомобілів. Однак спільне використання має один суттєвий недолік: перехід між двома видами транспорту.

Цей додатковий крок створює відчуття негручності для потенційних пасажирів [12]. Розуміння факторів, що їх спричиняють, дозволяє впроваджувати політику та заходи, що забезпечують ефективну інтеграцію та, як наслідок, ефективний перехід до більш сталих варіантів транспорту. У статті [12] досліджується вплив сприйнятої незручності пересадки на вибір використання велосипеда як засобу доступу або виходу до зупинки громадського транспорту. Використовуючи інформацію з онлайн-анкети опитування в регіоні Нор-Йерен у Норвегії, було розроблено модель структурних рівнянь. Результати аналізу довели, що сприйняття незручності пересадки здійснює основну функцію у виборі поєднання велосипедів і громадського транспорту, оскільки воно може передбачити до 10 % дисперсії у виборі використання велосипедів.

Покращення інтеграції велосипедного руху в міських і приміських системах громадського транспорту повинно мати основу на результатах кількісного аналізу якості обслуговування в мультимодальному комплексі [13]. Поєднання можливостей переміщення автобусами на великі відстані та велосипедами на відстанях «останньої милі» дає можливість збільшувати попит [14].

Вивчення впливу транспортної інфраструктури, мультимодальних комплексів на привабливість міських і приміських перевезень є надзвичайно важливим, оскільки воно відображає здатність регіону приваблювати різні соціальні групи, зокрема мешканців, відвідувачів і підприємства [15]. Для побудови якісної технології функціонування мультимодального комплексу необхідно вирішити питання досягнення безперебійної інтеграції велосипеда та громадського транспорту.

У цьому контексті вивчається проблема побудови доступної та сталої мобільності населення міст і приміських громад для задоволення реальних потреб у переміщенні [16]. Крім того, одне з найперспективніших рішень щодо мобільності стосується концепції мобільності як послуги, яка є «майбутнім міського та приміського транспорту», здатним зменшити кількість автомобілів та їх використання, сприяючи більш інтермодальним послугам.

Пропонуються нові варіанти мобільності, які змінюють наявні умови доступності, їх справедливий розподіл у різних районах та серед населення [16]. Це технологічне рішення для мобільності значною мірою залежить від мультимодальної доступності та інтеграції. Результати в [16] вказують на підвищення територіальної доступності, зокрема в периферійних районах.

Сучасні методи моделювання ефективної організації пасажирських перевезень є комплексними, їхньою основою є поєднання класичних транспортних моделей, оптимізаційних методів та інтелектуальних алгоритмів [17]. Найбільш перспективним є інтегрований підхід, що поєднує мультимодальне планування, поведінкові моделі та машинне навчання, особливо в умовах розвитку велосипедної і приміської мобільності.

Таким чином, інтеграція громадського транспорту та велосипедного руху є ефективним інструментом формування стійкої міської і приміської мобільності. Водночас сприйняття незручності пересадок залишається ключовим обмежувальним фактором, що істотно впливає на вибір пасажирів і рівень попиту на мультимодальні перевезення. Дослідження доводять важливість кількісного аналізу якості послуг, оптимізації процесів пересадок і використання інтегрованих методів моделювання. Тому перспективним напрямом нашого дослідження є розроблення моделі ефективної організації приміського пасажирського перевезення з використанням велосипедного транспорту, що підвищить транспортну доступність і привабливість громадського транспорту.

Мета та постановка завдання

Мета дослідження – удосконалення процесу транспортного обслуговування пасажи-

рів у приміському сполученні через інтеграцію велосипедного руху в загальну структуру переміщень.

Основними завданнями дослідження є такі: розроблення схеми структурного контуру функціональних зв'язків досліджуваного процесу, визначення необхідних інфраструктурних і технологічних умов для впровадження велосипедного руху, побудова математичних моделей комбінованої транспортної системи, здійснення імітаційного моделювання для визначення впливу додаткового попиту на показники роботи різних типів автобусів, проведення порівняльного техніко-економічного аналізу ефективності використання різних марок рухомого складу для виявлення оптимального варіанта організації перевезень.

Виклад основного матеріалу

Формування моделі ефективної організації перевезень пасажирів у приміському сполученні з використанням велосипедного руху ґрунтується на створенні цілісного технологічного ланцюга, де велосипедний рух є інтенсифікатором використання автобусних перевезень.

На відміну від традиційних підходів, запропонована модель розглядає інтеграцію велосипедів не як допоміжний елемент, а як повноцінний компонент транспортної системи, що дозволяє оптимізувати навантаження на автобусні перевезення та підвищити їх мобільність.

На основі методів математичного моделювання та аналізу технічних характеристик рухомого складу обґрунтовується алгоритм взаємодії пасажирів з автобусною мережею через систему велосипедних стійок і спеціалізованих терміналів.

Основний акцент робиться на розрахунку часової та економічної доцільності поєднання цих видів транспорту для мешканців Зміївського району, що дозволяє досягти вищої швидкості сполучення, як порівняти з індивідуальними транспортними засобами або лише з пішохідним доступом до зупинок.

У нашому дослідженні запропоновано комбінувати автобусне приміське перевезення пасажирів із залученням до цього процесу велосипедного руху. Для того відсотка населення, яке використовує приміський автобусний транспорт для поїздок у сполученні між Харковом та Змієвом важливим є їхній первинний транспортно-пересадочний комплекс, тобто міська харківська «Автостанція № 3» (АС – 3).

Для реалізації комбінованого перевезення пасажирів із використанням велосипедного транспорту, крім найбільших населених пунктів вздовж маршруту, необхідно розбудовувати велоінфраструктуру і в менших населених пунктах, щоб спонукати людей використовувати свої велосипеди для подолання шляху до зупиночних пунктів, зокрема як приклад можна розглянути такі населені пункти, як Бутівка, Вирішальний, Темнівка, Водяне тощо.

Через те, що не всі населені пункти знаходяться в максимальному наближенні до зупинних пунктів і для того, щоб дістатись їх, необхідно подолати декілька кілометрів пішки. Для створення умов використання велосипедів для руху від населеного пункту до зупинки необхідно облаштовувати місця для тимчасового зберігання велосипедів.

Технологічна схема використання велосипедного транспорту як елементу комбінованої системи наведена на рис. 1, де суцільною стрілкою позначено рух пасажирів від населеного пункту до зупинки, а пунктирною стрілкою – напрямок руху пасажирів на велосипедах до зупинки у випадку наявності місця зберігання велосипеда, що утворює додатковий попит.

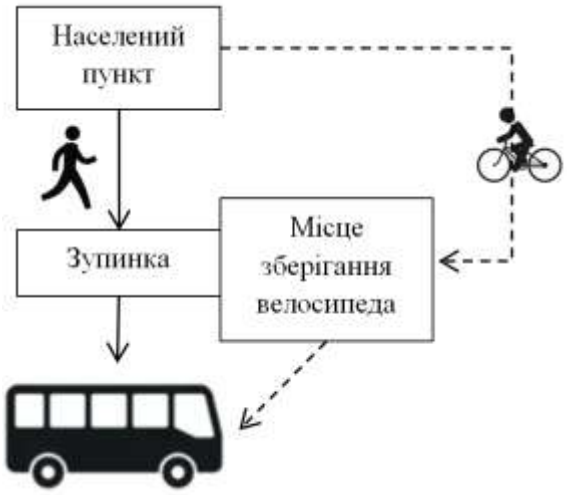

Рис. 1. Схема формування варіанта комбінованого перевезення пасажирів з використанням велосипедів

У процесі дослідження ефективності розроблення комбінованого сполучення на приміських маршрутах з урахуванням використання велосипедного транспорту необхідно визначити показники ефективності. Для цього спочатку потрібно розробити схему структурного контуру функціонального зв'язку досліджуваного процесу (рис. 2).

ISSN 2521-1773 (Online); 2219-5548 (Print)

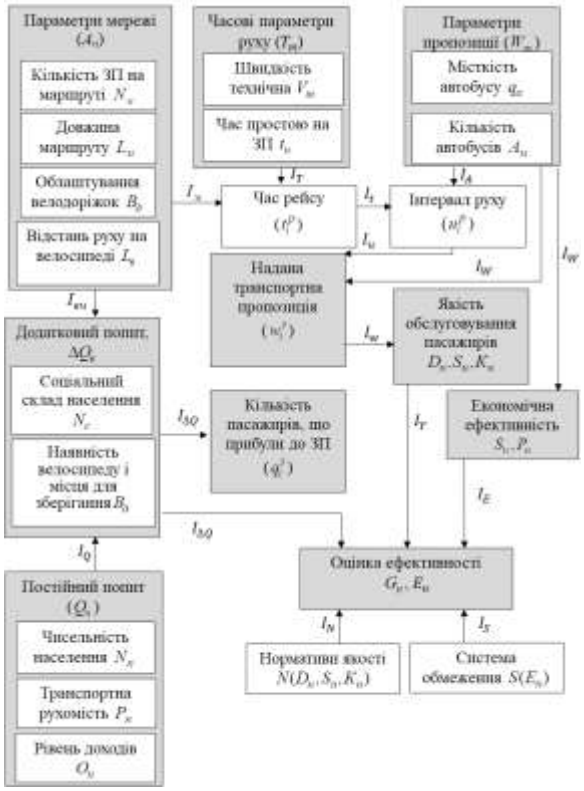

Рис. 2. Схема структурного контуру функціонального зв'язку досліджуваного процесу

Згідно з рис. 2 визначимо всі складові, що впливають на показники ефективності: якість обслуговування пасажирів – G_n та економічна ефективність – E_n. Наведена стала підсистема параметрів маршруту (A_n), досліджуючи яку, введенням комбінованої форми перевезення (автобусом та велосипедом) отримаємо кількісні значення таких елементів, як додатковий попит на транспортну послугу серед населення ($\Delta Q_в$) Також ця підсистема (A_n), як зокрема і інші, мають прямий вплив на надану транспортну пропозицію ($w_i^з$). На неї також впливають часові параметри руху (W_t), час рейсу (t_i^p), інтервал руху (u_i^p), параметри пропозиції (W_m). Підсистема постійного ($Q_ч$) та додаткового попиту ($\Delta Q_в$), отриманого введенням велосипедного руху, визначають нові значення показника попиту – кількості пасажирів, що прибули на ЗП ($q_i^з$). Співвідношення між показниками кількості пасажирів, що прибули на ЗП ($q_i^з$), та наданої транспортної пропозиції ($w_i^з$)впливають на параметри якості обслуговування пасажирів на заданому маршруті, тобто на транспортну доступність (D_n), хв; своєчасність (S_n), авт./год; рівень комфорту (коефіцієнт заповнення салону автобуса) (K_n). Вони спрямовані до найважливішого в нашому випадку показника – якості обслуговування пасажирів. Іншим важливим параметром є економічна ефективність. Він так само напряму залежить від параметрів пропозиції (W_m). За дослідженням цих двох параметрів можна визначити доцільність використання велосипедів для комбінованого сполучення на приміському маршруті Харків – Зміїв.

На рисунку 2 позначені такі інформаційні потоки: $I_м(N_м, L_м, B_д, L_в)$ – інформація про параметри мережі; $I_T(V_m, t_n)$ – інформація про часові параметри; $I_W(q_A, A_m)$ – інформація про параметри пропозиції; $I_A(A_m)$ – інформація про параметри автобуса; $I_{\Delta Q}(N_c, B_д)$ – інформація про додатковий попит; $I_w(w_i^з)$ – інформація про надану транспортну пропозицію; $I_Y(D_n, S_n, K_n)$ – інформація про параметри якості обслуговування; $I_E(C_n, P_P)$ – інформація про параметри економічної ефективності; $I_N(N(D_n, S_n, K_n))$ – інформація про нормативні показники якості; $I_S(S(E_n))$ – інформація про систему обмежень значень показників економічної ефективності.

Якість обслуговування пасажирів (G_n), яка визначається з показників доступність, своєчасність та комфорт перевезень:

$$G_n = f(D_n, S_n, K_n). \qquad (1)$$

Економічна доцільність прийняття рішення за вибором комбінованого сполучення визначається зі значень показників собівартості перевезення пасажирів (C_n), грн/пас., та прибутку компанії від перевезення пасажирів за рік (P_P), грн:

$$E_n = f(C_n, P_P). \qquad (2)$$

Визначимо аналітичні вирази складових побудованого контуру для побудови моделей та процесу моделювання за визначеними умовами функціонування комбінованої схеми організації перевезення пасажирів на маршруті:

час, необхідний для одного рейсу безпосередньо залежить від тривалості всіх необхідних технологічних операцій:

$$t_i^p = t_{рух} + t_{ппз} + t_{пкз}, \quad (3)$$

де $t_{рух}$ – час руху автобуса вздовж маршруту, год; $t_{ппз}$ – час на простій автобуса на проміжних зупинках маршруту, год; $t_{пкз}$ – час на відстій автобуса на кінцевих зупиночних пунктах маршруту, год;

інтервали руху між транспортними засобами на певний зупинний пункт вздовж маршруту:

$$u_i^p = \frac{2(\sum_{a=1}^{l} t_{рух_a} + \sum_{b=1}^{g} t_{ппз_b} + t_{пз} + t_{тпв})}{A_m}, \quad (4)$$

де $t_{рух_a}$ – час руху автобуса вздовж *a*-го перегону маршруту, хв; $t_{ппз_b}$ – час простою автобуса на *b*-й проміжній зупинці, хв; $t_{пз}$ – час простою автобуса на початковій зупинці, хв; $t_{тпв}$ – час простою автобуса в пункті відстою, хв; l – кількість перегонів на маршруті; g – кількість проміжних зупинок на маршруті; A_m – кількість автобусів, од;

кількість автобусів, яка необхідна для покриття попиту населення на пасажирські перевезення на цьому приміському маршруті [18]:

$$A_m = \frac{F_m \cdot t_{об}}{q_a \cdot \gamma_p}, \quad (5)$$

де F_m – пасажиропотік на приміському маршруті, пас./год; $t_{об}$ – час оборотного рейсу, год; q_a – місткість автобуса, пас.; γ_p – рівень коефіцієнта використання місткості;

час оборотного рейсу на маршруті приміського сполучення [18]:

$$t_{об} = 2\left(\sum_{a=1}^{l} t_{рух_a} + \sum_{b=1}^{g} t_{ппз_b} + t_{пз}\right); \quad (6)$$

пробіг на приміському маршруті (L_m): [18]

$$L_m = N_m \cdot L_м, \quad (7)$$

де N_m – необхідна кількість рейсів на маршруті приміського сполучення протягом певного періоду часу для задоволення попиту; $L_м$ – довжина маршруту, км;

необхідна кількість рейсів на приміському маршруті приміського сполучення протягом певного періоду часу для задоволення попиту: [18]

$$N_m = \frac{T \cdot F_m}{q_н \cdot \gamma_p}, \quad (8)$$

де T – тривалість розрахункового періоду, год; F_m – пасажиропотік на маршруті, пас./год;

кількість пасажирів, що прибули до зупинного пункту з урахуванням введення комбінованої системи пасажирських перевезень на приміському маршруті:

$$q_i^з = \Delta Q_в + Q_ч, \quad (9)$$

де $\Delta Q_в$ – додатковий попит на перевезення, пас.; $Q_ч$ – постійний попит на перевезення, пас;

додатковий попит на перевезення за комбінованої системи буде залежати від соціального складу населення та відповідної інфраструктури у відсотках забезпечення:

$$\Delta Q_в = N_c \cdot B_Д, \quad (10)$$

де N_c – кількість пасажирів, що користуються сполученням без використання автобуса, пас.; $B_Д$ – питома вага тих, хто готовий скористатися велосипедом для під'їзду до зупинного пункту маршруту за умови відповідної інфраструктури, %.

Основним видом ресурсу, який необхідний для реалізації транспортного процесу є надана транспортна пропозиція:

$$w_i^з = \frac{q_н \cdot A_н \cdot t}{t_{об}}, \quad (11)$$

де t – розрахунковий період, год.

Коефіцієнт заповнення салону автобуса ($k_з$) визначається як співвідношення фактичної кількості пасажирів ($N_ф$) до максимально допустимої його пасажиромісткості ($N_{макс}$) [18]:

$$k_з = \frac{N_ф}{N_{макс}}. \quad (12)$$

ISSN 2521-1773 (Online); 2219-5548 (Print)

Транспортна доступність у приміському сполученні з урахуванням велосипедного руху визначається як інтегральний показник сумарних часових, просторових, економічних і сервісних витрат пасажира під час здійснення комбінованої поїздки за схемою «велосипед – автобус – велосипед». Використання «велосипедної складової» дозволяє суттєво розширити зону доступності зупинок, зменшити загальний час поїздки та підвищити мобільність населення, що формує передумови для збільшення рівня ефективності та сталості приміських транспортних систем.

Комплексне визначення транспортної доступності:

$$D_n = \sum_{i=1}^{I} v_i \frac{X_{норм}}{X_i}, \qquad (13)$$

де v_i – вагові коефіцієнти *i*-х факторів; $X_{норм}$ – нормативні значення факторів; X_i – фактичні параметри; I – кількість факторів.

До параметрів належать загальний час поїздки, відстань під'їзду, інтервал руху автобусів, зручність пересадки, наявність велоінфраструктури, безпечність руху.

Своєчасність перевезення пасажира (S_n) визначається через співвідношення фактичного часу, необхідного для здійснення одного рейсу ($t_{iф}^p$), до нормативного значення ($t_{iн}^p$):

$$S_n = \frac{t_{iф}^p}{t_{iн}^p}. \qquad (14)$$

Собівартість перевезення пасажирів (C_n) враховує вартість експлуатації відповідної марки автобуса за один кілометр пробігу ($C_{1км}$), грн/км, пробіг на маршруті (L_m), км, кількість пасажирів, що прибули для перевезення ($q_i^з$), та коефіцієнт заповнення салону автобуса ($k_з$):

$$C_n = \frac{C_{1км} \cdot L_m}{q_i^з \cdot k_з}. \qquad (15)$$

Прибуток компанії від перевезення пасажирів за рік (P_P):

$$P_P = (q_i^з \cdot k_з \cdot N_m \cdot D_p \cdot T) - \\ -(2 \cdot L_m \cdot N_m \cdot D_p \cdot C_{1км}), \qquad (16)$$

де D_p – кількість робочих днів на рік, дн.; T – тариф перевезення пасажира в приміському сполученні, грн/пас·км.

Для процесу моделювання за визначеним контуром та умовами впровадження комбінованого перевезення пасажирів на маршруті Харків – Зміїв була розроблена програма в середовищі «Microsoft Excel» з урахуванням вбудованих функції макросів для функціонала генерування даних та розрахунку значень параметрів.

Моделювання здійснювалось з урахуванням обмежень за кількістю ресурсів (табл. 1). і спостережень, що дорівнювала 100 одиницям.

Таблиця 1 – Вихідні значення параметра для проведення моделювання

Назва параметру	Значення
Довжина маршруту, км	38,2
Час рейсу, хв	68
Кількість автобусів на маршруті, од.	3
Час рейсу, хв	68
Експлуатаційна швидкість, км/год	29,5
Час простою в початковому пункті, хв	10
Час простою в кінцевому пункті, хв	5
Час простою на проміжних зупинках, хв	1
Рейсовий обсяг перевезень, пас	56
Пасажиропотік на найбільш навантаженій ділянці у ранковий період, пас./год	49
Закон розподілу експлуатаційної швидкості	нормальний
Закон розподілу пасажиропотоку в будні	нормальний
Додатковий рейсовий обсяг перевезень, пас.	{2:10}
Відстань переміщення на велосипеді, км	{2:12}
Доступність, хв	{5:20}
Своєчасність, авт./год	{0:2}
Коефіцієнт заповнення салону автобуса	{0,5:0,85}

Розрахунок проводився для трьох марок автобусів, які експлуатуються на маршруті: ЕТАЛОН А08128, MAN NL 202, MAN R07 Lions Coach.

Була врахована інформація, отримана під час спостережень за роботою автобусів на маршруті з урахуванням розкладу руху, визначені діапазони значень змінних параметрів та встановлені їх мінімальні та максимальні значення.

На основі проведених спостережень за реальним процесом перевезення пасажирів на приміському маршруті Харків – Зміїв можемо порівняти поточний попит серед населення з результатами імітаційного моделювання за визначенням параметрів роботи маршруту під час створення комбінованої системи перевезення населення (рис. 3). Тенденція зміни значень зберігається за всіма значеннями параметра та доводить рівномірне збільшення значень з урахуванням збільшення попиту в разі впровадження технології, що пропонується.

Рис. 3. Динаміка зміни рейсового обсягу пасажирських перевезень в процесі інтеграції велосипедного руху

У розробленій моделі основними блоками програмного продукту є модуль імітаційного моделювання часу руху за ділянками мережі. Для його реалізації використана інформація статистичного оброблення результатів обстеження часу руху автобусів відповідно до умов. На основі визначеного нормального закону розподілу часу руху в кожному дослідженні генеруються його значення.

У цьому дослідженні розглянемо приклад отримання значень коефіцієнта заповнення салону автобуса для трьох їх видів та умов збільшення попиту (рис.4–6).

На основі отриманих даних д ля автобуса ЕТАЛОН А08128 було визначено, що ця модель автобуса в переважній більшості, а саме у 80 % рейсів, раціонально використовує заповнення салону, що є цілком прийнятними в процесі експлуатації цієї марки на заданому маршруті за змодельованих умов.

Рис. 4. Варіація коефіцієнта заповнення салону автобуса марки ЕТАЛОН А08128 у серії експериментальних спостережень

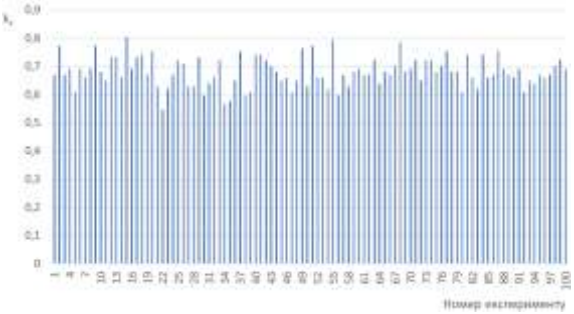

Рис. 5. Варіація коефіцієнта заповнення салону автобуса марки MAN NL 202 у серії експериментальних спостережень

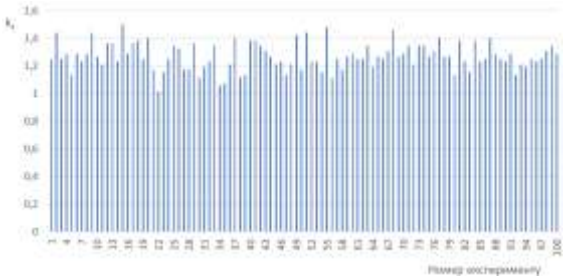

Рис. 6. Варіація коефіцієнта заповнення салону автобуса марки MAN R07 Lions Coach у серії експериментальних спостережень

Рівень заповнення салону автобуса марки MAN NL 202 в середньому має значення 0,78, що не є раціональним (рис. 5). А для марки MAN R07 Lions Coach значення коефіцієнта заповнення салону автобуса в середньому перевищують рівень одиниці (рис .6), що значно знищує рівень комфорту пасажирів у разі збільшення попиту.

Визначені значення коефіцієнта заповнення салону автобуса в години пік за максимального попиту на маршруті (рис. 7–9). Ця інформація може бути використана для підбору значень оптимальних управлінських рішень із забезпечення максимізації якості обслуговування під час реалізації поїздки.

ISSN 2521-1773 (Online); 2219-5548 (Print)

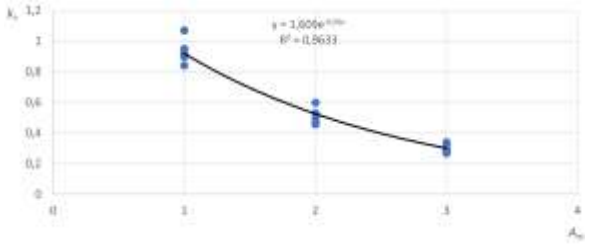

Рис. 7. Залежність коефіцієнта заповнення салону автобуса ЕТАЛОН А08128 від кількості автобусів (за максимальної кількості пасажирів)

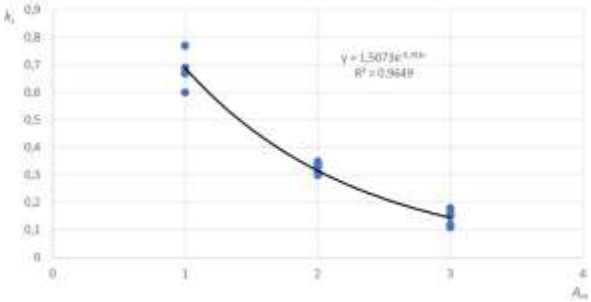

Рис. 8. Залежність коефіцієнта заповнення салону автобуса MAN NL 202 від кількості автобусів (за максимальної кількості пасажирів)

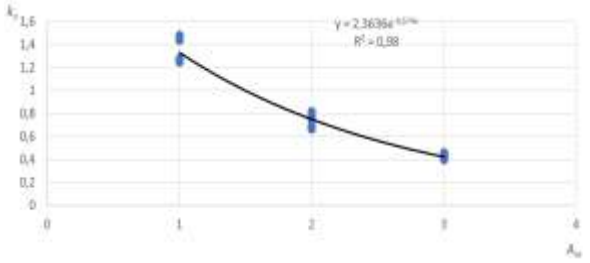

Рис. 9. Залежність коефіцієнта заповнення салону автобуса MAN R07 Lions Coach від кількості автобусів (за максимальній кількості пасажирів)

Оптимальні параметри роботи автобуса мають забезпечувати достатній рівень використання його місткості для забезпечення рентабельності роботи перевізників та надавати можливість використовувати для цього певну модель автобуса та їхню кількість.

Здійснено аналіз значень собівартості перевезення одного пасажира за умови використання вибраних моделей автобусів на маршруті з урахуванням їхньої кількості (рис.10–12).

Таким чином, у процесі моделювання можна визначити умови використання відповідного автобуса за впровадження комбінованого перевезення пасажирів. На прикладі марки автобуса ЕТАЛОН А08128 отримані такі результати: у разі використання одного автобуса за максимального рівня пасажиропотоку коефіцієнт заповнення салону змінюється в діапазоні від 0,97 до 1,07, що є перевищенням норми та не задовольняє умовам комфорту пасажирів.

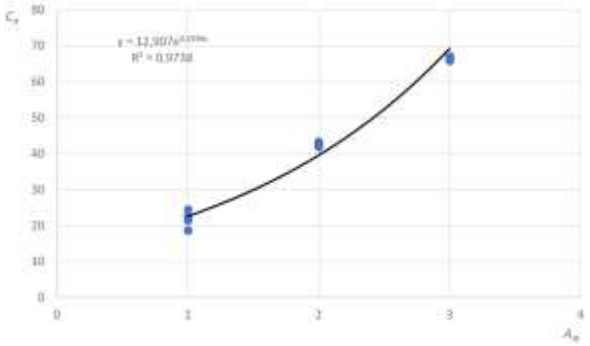

Рис. 10. Собівартість перевезення одного пасажира за умови використання автобуса марки ЕТАЛОН А08128 (середня кількість пасажирів)

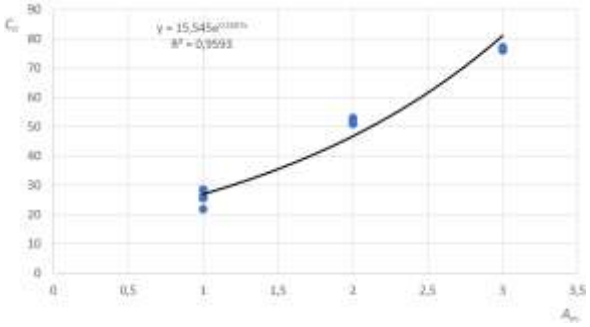

Рис. 11. Собівартість перевезення одного пасажира за умови використання автобуса марки MAN NL 202 (середня кількість пасажирів)

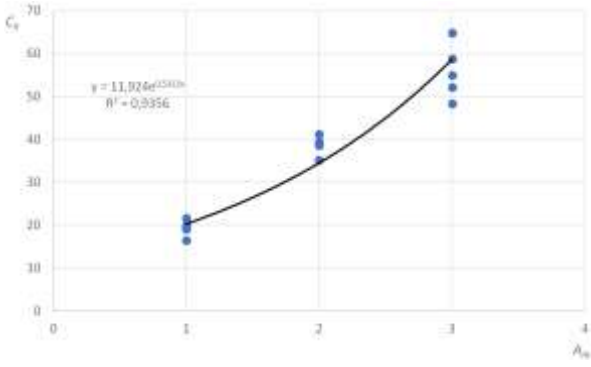

Рис. 12. Собівартість перевезення одного пасажира за умови використання автобуса марки MAN R07 Lions Coach (середня кількість пасажирів)

За цих умов собівартість перевезення пасажира складає 23,7 грн. За умови використання двох автобусів коефіцієнт заповнення салону знижується до значень 0,53, що збільшує рівень комфорту пасажирів, а собівартість таких перевезень буде більше за собівартість, якщо використаний один автобус, на 83 % – 43,3 грн. У разі використання

трьох автобусів цієї марки коефіцієнт заповнення салону знижується до 0,34, а собівартість, як порівняти з використанням двох автобусів, збільшиться на 55 % – до 67,1 грн.

Висновки

У статті доведено, що залучення велосипедного руху є дієвим інструментом інтенсифікації використання приміського громадського транспорту. Це дозволяє розширити зону доступності зупинок та залучити додатковий пасажиропотік із віддалених населених пунктів.

Розроблено структурну схему функціональних взаємозв'язків процесу організації перевезень, яка відображає взаємодію попиту, транспортної пропозиції, параметрів якості обслуговування та економічної ефективності. Побудований контур інтегрує підсистеми постійного та додаткового попиту, що формуються завдяки впровадженню велосипедного руху, параметри транспортної пропозиції, часові характеристики руху та технічні параметри рухомого складу. Показники транспортної доступності, своєчасності та комфортності перевезень для приміських маршрутів об'єднані в єдиному аналітичному просторі, що дозволяє комплексно оцінювати якість обслуговування пасажирів.

Визначені умови для впровадження велосипедного руху, які містять розвиток велосипедної інфраструктури, облаштування тимчасових місць для зберігання велосипедів у районі зупинок, коригування графіків руху й адаптацію транспортного забезпечення до збільшення попиту.

Розроблено математичний апарат, що описує взаємодію попиту та пропозиції. Модель дозволяє розраховувати сумарний пасажиропотік як суму постійного попиту та додаткового «велосипедного» компонента, а також визначати необхідну кількість автобусів для підтримання заданого рівня якості.

Під час здійснення імітаційного моделювання для трьох марок автобусів (ЕТАЛОН А08128, MAN NL 202, MAN R07 Lions Coach) було визначено, що в разі збільшення рівня попиту найбільш збалансовані показники комфорту та економічної ефективності забезпечує використання автобусів марки ЕТАЛОН А08128. Зокрема у разі застосування двох автобусів коефіцієнт заповнення салону становить у середньому 0,53–0,75, що відповідає нормативним вимогам комфорту, а собівартість перевезення одного пасажира не перевищує 43,3 гривні. Для автобусів MAN NL 202 визначено недостатній рівень завантаження (приблизно 0,72), що знижує економічну ефективність, тоді як для MAN R07 Lions Coach зафіксовано перевантаження салону (коефіцієнт більше ніж 1,0), що негативно впливає на комфорт.

Перспективи подальших досліджень містять розширення моделі з урахуванням сезонних коливань попиту, поведінкових характеристик пасажирів, а також адаптацію запропонованого підходу до інших видів транспортних сполучень і територіальних умов.

Література

1. Qamruzzaman M. Unlocking the Nexus: Tourism, Clean Energy, Innovation, and Environmental Sustainability in the Top 20 Tourist Nations. *Sustainability Analytics and Modeling*. 2024. P. 100037. DOI:10.1016/j.samod.2024.100037
2. Sezer N., Bayhan S. Towards clean urban mobility: A hydrogen-powered self-sustaining dual station for fuel cell and battery electric bus fleets. *Energy*. 2026. Vol. 344. P. 139877. DOI:10.1016/j.energy.2025.139877.
3. Solutions for Improving Transit through Intermodal Passenger Terminals / M. Roşca et al. *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 46. P. 225–232. DOI:10.1016/j.promfg.2020.03.033.
4. May info-mobility solutions contribute to increase sustainable transport connectivity? Lessons learned from the E-CHAIN project / E. M. Bertolini et al. *Transportation Research Procedia*. 2025. Vol. 83. P. 110–117. DOI:10.1016/j.trpro. 2025.02.016.
5. Elvarsson A., Zani D., Adey B. T. Fast-lane for planning cycling infrastructure: On the effectiveness and efficiency of cycling infrastructure planning processes. *Journal of Cycling and Micromobility Research*, 2026. Vol. 7. P. 100103. DOI:10.1016/j.jcmr.2025.100103.
6. Cycling infrastructure and transportational and recreational physical activity in Canadians / S. A. Prince et al. *Journal of Transport & Health*. 2025. Vol. 42. P. 102046. DOI:10.1016/j.jth. 2025. 102046.
7. ECF study on rail and cycling integration. URL: https://transition-pathways.europa.eu/tourism/ knowledge-documents/ecf-study-rail-and-cycling-integration (дата звернення: 10.02.2026).
8. Geurs K. T., La Paix L., Van Weperen S. A multi-modal network approach to model public transport accessibility impacts of bicycle-train integration policies. *European Transport Research Review*. 2016. Vol. 8. No. 4. DOI:10.1007/s12544-016-0212-x.
9. The bicycle-train travellers in the Netherlands: personal profiles and travel choices / Jonkeren, O. et al. *Transportation*. 2021.Vol. 48. P. 455–476. DOI:10.1007/s11116-019-10061-3.
10. Kyiv City Council approved the Cycling Concept. URL: https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/news-events/news/kyiv-city-council-

approved-cycling-concept-2018-02-21_en?utm_ source= chatgpt.com (дата звернення: 10.02.2026).
11. У Харкові візьмуться за облаштування велосипедної інфраструктури. URL: https://cfts.org.ua/news/2025/01/21/u_kharkovi_vizmutsya_za_oblashtuvannya_velosipedno_infrastrukturi_81715?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 10.02.2026).
12. Kosmidis I., Müller-Eie D. Measuring perceived transfer inconvenience for multimodal commute trips combining bicycles and public transport. *Travel Behaviour and Society*. 2026. Vol. 43. P. 101167. DOI:10.1016/j.tbs.2025.101167.
13. Multimodal public transport, travel behaviour, and social equity / S. Tao et al. *Travel Behaviour and Society*. 2026. P. 101237. DOI:10.1016/j.tbs.2026.101237.
14. Cheranchery M. F., Karthika M.G., Firoz N. Augmenting last-mile connectivity with multimodal transport: Do choice riders favor integrated bike taxi-bus service in metro cities? *Travel Behaviour and Society*. 2025. Vol. 38. P. 100938, DOI:10.1016/j.tbs.2024.100938.
15. Cheng J., Chen Z. Evaluating multimodal transportation's impact on city attractiveness: A machine learning approach. *Travel Behaviour and Society*. 2025. Vol. 38. P. 100932. DOI:10.1016/j.tbs.2024.100932.
16. Lopes A., Moura F., Vale D. The effects of bike-sharing-transit integration on accessibility equity. *Journal of Transport Geography*. 2025. Vol. 128. P. 104344. DOI:10.1016/j.jtrangeo.2025.104344.
17. Multimodal Transport Optimization from Doorstep to Airport Using Mixed-Integer Linear Programming and Dynamic Programming / E. D. Spyrou et al. *Sustainability*. 2025. Vol. 17. No. 17. P. 7937. DOI:10.3390/su17177937.
18. Вдовиченко В. О., Потаман Н. В. Пасажирські автомобільні перевезення. Харків: ХНАДУ, 2017. 335 с.

References

1. Qamruzzaman, M. (2024). Unlocking the Nexus: Tourism, Clean Energy, Innovation, and Environmental Sustainability in the Top 20 Tourist Nations. *Sustainability Analytics and Modeling*. P. 100037. DOI:10.1016/j.samod.2024.100037
2. Sezer, N., Bayhan, S. (2026). Towards clean urban mobility: A hydrogen-powered self-sustaining dual station for fuel cell and battery electric bus fleets. *Energy*, vol. 344, p. 139877. DOI:10.1016/j.energy.2025.139877.
3. Solutions for Improving Transit through Intermodal Passenger Terminals / M. Roşca et al (2020). *Procedia Manufacturing*, vol. 46, p. 225–232. DOI:10.1016/j.promfg.2020.03.033.
4. May info-mobility solutions contribute to increase sustainable transport connectivity? Lessons learned from the E-CHAIN project / E. M. Bertolini et al (2025). *Transportation Research Procedia*, vol. 83, p. 110–117. DOI:10.1016/j.trpro.2025.02.016.
5. Elvarsson, A., Zani, D., Adey, B. T. (2026). Fast-lane for planning cycling infrastructure: On the effectiveness and efficiency of cycling infrastructure planning processes. *Journal of Cycling and Micromobility Research*, vol. 7, p. 100103. DOI:10.1016/j.jcmr.2025.100103.
6. Cycling infrastructure and transportational and recreational physical activity in Canadians / S. A. Prince et al (2025). *Journal of Transport & Health*, vol. 42, p. 102046. DOI:10.1016/ j.jth. 2025.102046.
7. ECF study on rail and cycling integration. URL: https://transition-pathways.europa.eu/tourism/knowledge-documents/ecf-study-rail-and-cycling-integration.
8. Geurs, K. T., La Paix, L., Van Weperen, S. (2016). A multi-modal network approach to model public transport accessibility impacts of bicycle-train integration policies. *European Transport Research Review*. vol. 8, no. 4. DOI:10.1007/s12544-016-0212-x.
9. The bicycle-train travellers in the Netherlands: personal profiles and travel choices / Jonkeren, O. et al (2021). *Transportation*, vol. 48, p. 455–476. DOI:10.1007/s11116-019-10061-3.
10. Kyiv City Council approved the Cycling Concept. URL: https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/news-events/news/kyiv-city-council-approved-cycling-concept-2018-02-21_en?utm_source=chatgpt.com.
11. Kharkiv will undertake the development of bicycle infrastructure. URL: https://cfts.org.ua/news/ 2025/01/21/u_kharkovi_vizmutsya_za_oblashtuvannya_velosipedno_infrastrukturi_81715?utm_source=chatgpt.com. [in Ukrainian].
12. Kosmidis, I., Müller-Eie, D. (2026). Measuring perceived transfer inconvenience for multimodal commute trips combining bicycles and public transport. *Travel Behaviour and Society*, vol. 43, p. 101167. DOI:10.1016/j.tbs.2025.101167.
13. Multimodal public transport, travel behaviour, and social equity / S. Tao et al. (2026). *Travel Behaviour and Society*, p. 101237. DOI:10.1016/j.tbs.2026.101237.
14. Cheranchery, M. F., Karthika, M.G., Firoz, N. (2025). Augmenting last-mile connectivity with multimodal transport: Do choice riders favor integrated bike taxi-bus service in metro cities? *Travel Behaviour and Society*, vol. 38, p. 100938, DOI:10.1016/j.tbs.2024.100938.
15. Cheng, J., Chen, Z. (2025). Evaluating multimodal transportation's impact on city attractiveness: A machine learning approach. *Travel Behaviour and Society*, vol. 38, p. 100932. DOI:10.1016/j.tbs.2024.100932.
16. Lopes, A., Moura, F., Vale, D. (2025). The effects of bike-sharing-transit integration on accessibility equity. *Journal of Transport Geography*, vol. 128, p. 104344. DOI:10.1016/j.jtrangeo. 2025.104344.
17. Multimodal Transport Optimization from Doorstep to Airport Using Mixed-Integer Linear Programming and Dynamic Programming / E. D. Spyrou et al. (2025). *Sustainability*, vol. 17, no. 17, p. 7937. DOI:10.3390/su17177937.
18. Vdovichenko, V. O., Potaman, N. V. (2017). Passenger automobile transportation. Kharkiv: KhNAHU, 335 p.

Наглюк Іван Сергійович, д.т.н., проф. каф. організації та безпеки дорожнього руху, isnagluk@ukr.net, тел. +38 067-298-50-99, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9411-4479
Абрамова Людмила Сергіївна, д.т.н., проф. каф. організації та безпеки дорожнього руху, abramova_ls@ukr.net, тел. +38 099-787-53-23, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1182-9618
Кушнір Дмитро Едуардович, асистент каф. транспортних технологій, krou.060999@gmail.com, тел. +38 063-383-55-53, ORCID: https://orcid.org/ 0009-0000-6016-0119
Сидорчук Валерія Вячеславівна, студентка факультету транспортних систем, s.valeria.261204@gmail.com, тел.. +38 066-415-77-90, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-2013-9470

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

Evaluation Of Rolling Stock Performance Indicators In The Organization Of Passenger Transportation On Suburban Routes Using A Bicycle Traffic

Abstract. Problem. *Modern trends in the development of transport systems in the world indicate the growing role of environmentally sustainable, energy-efficient and environmentally friendly modes of transport, especially in suburban areas of large cities. The development of a model for the effective organization of passenger transportation in suburban traffic using bicycles is an urgent scientific and practical task aimed at increasing population mobility, reducing transport costs and environmental burden, as well as adapting European experience to the conditions of Ukraine.* ***Goal***. *Improving passenger transportation services on commuter routes by integrating bicycle traffic into the overall transportation system.* ***Methodology***. *A comprehensive methodological framework has been developed that, for the first time, integrates transport network parameters, travel time characteristics, quality indicators (accessibility, punctuality, comfort), and economic efficiency into a single analytical framework. This enables the modeling of demand-shift scenarios resulting from the implementation of a cycling component. It has been established that a critical factor in the effectiveness of the integrated system is the provision of covered bicycle parking areas near bus stops. This makes it possible to attract residents of settlements (Butivka, Vyrishalnyi, etc.) that are located beyond walking distance of the Kharkiv – Zmiiv route. A mathematical framework has been developed to describe the interaction between supply and demand. The model allows for the calculation of total passenger traffic as the sum of constant demand and an additional "bicycle" component, as well as for determining the number of buses required to maintain a specified level of service quality. To perform the calculations, the authors created a specialized program in the Microsoft Excel environment that uses macros to generate data. The simulation modeling included 100 experiments, which allowed us to take into account the stochastic nature of the transport process and the variability of passenger flows. The final analysis was carried out by comparing the technical and economic performance indicators of three different brands of buses (ETALON A08128, MAN NL 202, MAN R07 Lions Coach).* ***Originality***. *Bicycle traffic is considered not as an auxiliary element, but as a full-fledged intensifier of the use of bus transportation, integrated into a single technological chain. For the first time, within the framework of one study, indicators of transport accessibility, timeliness and comfort for suburban routes were combined in a single analytical space. The original approach is to model scenarios of demand changes on a specific route "Kharkiv – Zmiiv" taking into account the specifics of the "bicycle component" according to the scheme "bicycle - bus - bicycle".* ***Practical value***. *The modeling results allow transport companies to reasonably choose the brand and number of rolling stock, which provides a balance between passenger comfort and transportation profitability. The developed model is a ready-made tool for local authorities when designing bicycle infrastructure and adjusting traffic schedules taking into account the growing multimodal demand. The implementation of the proposed approach contributes to the implementation of sustainable mobility development strategies in regions, reducing the environmental load and increasing the accessibility of territories.*

Key words*: public transport, passenger flow, demand, modeling, cycling, route, transport infrastructure.*

Nahlyuk Ivan, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Road Traffic Organization and Safety, ORCID: 0000-0001-9411-4479, isnagluk@ukr.net,
Abramova Lyudmila, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Road Traffic Organization and Safety, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1182-9618 abramova_ls@ukr.net,
Kushnir Dmytro, Assistant Professor, Department of Transport Technologies, ORCID: https://orcid.org/ 0009-0000-6016-0119, krou.060999@gmail.com,
Sydorchuk Valeria, student of the Faculty of Transport Systems, ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2991-0741, s.valeria.261204@gmail.com

Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Стаття надійшла до редакції / Received: 11.01.2026.
Прийнята до друку після рецензування / Revised and Accepted: 17.01.2026.
Дата публікації статті / Published: 11.05.2026.