

Ю. МАЦЕЛЮХ, В. ЛИТВИН

АНАЛІЗ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ТА ВПЛИВ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ НА СКОРОЧЕННЯ ВИКИДІВ ВУГЛЕЦЮ В РОЗУМНОМУ МІСТІ

Стан забруднення атмосфери зумовлений зростанням населення, кількості транспорту та згенерованими обсягами викидів. **Об'єктом дослідження** є процес аналізу пасажирських перевезень у місті. **Предметом** – методи аналізу пасажирських перевезень. **Мета:** аналіз пасажирських перевезень та підходів до оптимізації громадського транспорту на засадах концепції розумного міста. **Завдання:** аналіз пасажирських перевезень, класифікація наявних концептуальних підходів до оптимізації громадського транспорту з низькими викидами вуглецю, систематизація методів, засобів і типів нейронних мереж у розумних містах, дослідження впровадження успішних проектів. **Методи** статистичного аналізу, лінійної та нелінійної інтерполяції, логічного узагальнення, порівняння, групування, аналізу й синтезу. **Результати:** аналіз пасажирських перевезень у місті виявив, що статистичні набори інформації вказують на зниження основних показників пасажиропотоків та зростання обсягів викидів вуглецевмісних сполук. Класифікація наявних підходів до оптимізації громадського транспорту здійснена за його пріоритетністю, гібридизацією та електризацією транспортних засобів та впровадженням ІТ-моніторингу. Під час систематизації методів і засобів у розумних містах виокремлено: розумні транспортні системи; електричні транспортні засоби; мережі спільного використання транспорту; розумні застосунки та інформаційні системи; інноваційні системи оплати; безпілотні транспортні засоби; інформаційні табло та системи оголошень; мережі велосипедних доріжок і обладнані тротуари; системи екологічного моніторингу. Серед нейронних мереж запропоновано використовувати рекурентні, конволюційні та глибокі нейронні мережі як ті, що сприяють оптимізації маршруту та передбаченню трафіку. **Висновки.** Статистичний аналіз пасажирських перевезень установив, що зниження викидів діоксиду вуглецю є невіршеним завданням як для громадського транспорту, так системи перевезень. Запропоновано до методів і засобів, що оптимізують громадський транспорт, долучити успішні в усьому світі ініціативи реалізації концепції розумного міста, що зменшують вуглецевий слід. Рекомендовано застосовувати рекурентні, конволюційні та глибокі нейронні мережі для оптимізації пасажирських перевезень у розумних містах.

Ключові слова: пасажирські перевезення; розумне місто; викиди вуглецю; системний аналіз; методи аналізу.

Вступ

Щороку проблема забруднення довкілля викидами вуглецевмісних сполук в атмосферу посилюється зі зростанням на планеті населення, кількості транспорту, що здійснює їх транспортування, та обсягів викидів, які ці транспортні засоби генерують. Гострою, а інколи критичною ця проблема є у великих містах з багатомільйонним населенням. Як пасажирський, так і вантажний транспорт є одним із основних джерел викидів парникових газів, що призводить до зміни клімату. Унаслідок цього чимало міст у всьому світі почали впроваджувати заходи щодо скорочення викидів вуглецю. Одним із найефективніших способів зменшення викидів вуглекислого газу в транспортній галузі є впровадження концепції розумного міста, де одним із ключових завдань є зниження обсягів вуглецевмісних викидів шляхом оптимізації мережі маршрутів пасажирських перевезень. Це обґрунтовує **актуальність** окреслених досліджень.

Ефективність мережі маршрутів пасажирських перевезень з огляду на концепції розумного міста несе позитивні зміни як для багатомільйонних міст, так і для міст обласного та районного рівня з меншою кількістю населення, оскільки позитивно впливає на підвищення ефективності та результативності роботи всіх транспортних мереж у населеному пункті. Загалом, позитивні зміни в роботі громадського транспорту, зокрема коректування маршрутів, їх довжини, збільшення чи зменшення інтервалів між транспортними засобами, зміна графіків роботи тощо, впливають і на обсяги викидів парникових газів, зменшуючи їх. Значну роль у вирішенні цієї проблеми відіграє впровадження нових інформаційних технологій, які, підвищуючи продуктивність роботи транспортної мережі в розумному місті, мають на меті зробити громадський транспорт привабливим для користувачів через скорочення часу перебування в дорозі, покращення якості обслуговування та якості життя населення. Для компаній упровадження сучасних інформаційних технологій робить бізнес

більш прибутковим завдяки збільшенню обсягів перевезень (кількості перевезених пасажирів) і, зрештою, зростання обсягів отриманих прибутків. Водночас із зменшенням викидів в атмосферу вуглецевмісних сполук транспортні компанії вирішують також соціальні та екологічні проблеми міста. Тому пошук нових теоретичних підходів, методів і засобів аналізу пасажирських перевезень з метою розроблення в майбутньому інноваційних моделей та інструментів оптимізації роботи громадського транспорту має практичний характер і сприяє скороченню викидів вуглецю в розумному місті. Об'єктом досліджень є процес аналізу пасажирських перевезень у розумному місті та його вплив на зменшення вуглецевмісних викидів у атмосферу. Предметом дослідження є засади оптимізації перевезень пасажирів у громадському транспорті для зниження забруднення атмосфери.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Учені різноманітних наукових напрямів у всьому світі вже десятиріччями працюють над вирішенням цієї проблеми. Розвитку теоретико-методологічних основ аналізу пасажирських перевезень, побудові сучасних інформаційно-комунікаційних моделей та інструментів оптимізації процесів організації пасажирських перевезень присвячені праці відомих науковців як в Україні, так і за її межами. Серед дослідників, чії студії спричинили визначні зміни в теоретичних поглядах і практичних підходах до принципів побудови систем аналізу пасажирських перевезень на основі концепції розумного міста, варто згадати таких учених: О. Борейко [1, 2], Ю. Боз [3], М. Бублик [4, 5], С. Бушуєв [6], Н. Ван [7], Т. Ванлі [8], Р. Вольняк [9], А. Гендуєс [10], Ю. Дай [11], І. Йонек-Ковальська [12], Дж. Кім [13], Д. Коштура [14], В. Литвин [15], Ю. Лім [16], Х. Лін [17], Ю. Мацелюх [18], Н. Натх [19], Х. Нгуєн [20], Л. Подлесна [21], З. Спайсер [24], Дж. Тан [25], В. Теслюк [2], А. Шаріфі [22], С. Шіу [23], Ю. Чень [26], З. Чень [27], К. Чен [28].

Ю. Боз і Т. Кай [3] розглядають основні характеристики розумного міста та їх важливість, щоб трансформувати міста до розумних та серед стійких міських послуг відводять ключову роль розумним послугам перевезення пасажирів. На основі зібраної інформації автори стверджують, що міста з населенням, значно нижчим за великі метрополіси,

більш успішно надають послуги з перевезення пасажирів у громадському транспорті, які можна пов'язати з концепцією розумного міста.

Значну роль у розвитку розумних міст відіграють інформаційні технології, які стрімко розвиваються з початком ХХІ ст. Так, О. Борейко, В. Теслюк, С. Бушуєв [1, 2, 6], Т. Ванлі [8] досліджують інструменти та засоби організування пасажирських перевезень у межах концепції розумних міст, де інновації, складність бізнесу, інформаційно-комунікаційна та транспортна інфраструктури є ключовими факторами розумного міста. М. Бублик [4, 5] обґрунтовує шляхи впровадження концепції розумної спеціалізації для трансформування як всієї української економіки загалом, так і транспортної індустрії зокрема, до циркулярної, де джерелом економічних доходів транспортних компаній є не тільки результати їх господарської діяльності, а зниження викидів в атмосферу вуглецевмісних сполук й перероблення відходів, що несуть загрозу всьому людству.

Н. Ван [6] розглядає підходи до розумного міського планування, де критичною сферою міського розвитку є якість пасажирських перевезень, спрямованих на створення сталого, ефективного та придатного для життя міського середовища. Автори роботи [6] провели комплексний аналіз, визначивши місця зі зниженими викидами вуглекислого газу, оптимізувавши розподіл ресурсів для економічної ефективності та підвищення естетичної привабливості для задоволення громади, а також довели ефективність запропонованого підходу до створення екологічно стійких, економічно й естетично привабливих міських просторів. Р. Вольняк [9], А. Гендуєс [10], І. Йонек-Ковальська [12] вивчають засоби трансформації міст до розумних, де серед основних інструментів ключову роль відіграє розумний транспорт, яким міська влада може ефективно керувати для трансформації та змін у контексті розумних міст, створюючи нові, руйнуючи старі та підтримуючи ефективні інституційні механізми. Ю. Дай [11] досліджує загальну основу процесу трансформації розумного міста та його транспортної системи, описує роль зацікавлених сторін для міст на різних етапах трансформації в напрямі до розумного міста, виокремлює інформаційні та науково-технологічні технології як інструмент залучення стейкхолдерів для трансформації до розумного міста, а також пропонує чотири альтернативні сценарії трансформації до розумного

міста, де розумним пасажирським перевезенням надається значна роль.

Х. Нгуен та співавтори праці [20] досліджують сутність поняття "розумне місто" з підтримкою Інтернет-речей, що охоплює багато різних сфер, таких як розумний транспорт, охорона здоров'я та сільське господарство, де досягнення штучного інтелекту найбільше сприяють зростанню впровадження Інтернет-речей. У статті [20] автори на основі Інтернет-речей також запропонували концепцію розумного міста, передумови його розвитку та його компоненти, де особлива увага зосереджена на вивченні останніх розробок розумних міст із підтримкою Інтернет-речей та проривів за допомогою технологій штучного інтелекту, щоб висвітлити поточний етап, основні тенденції та нерозв'язані проблеми впровадження технологій Інтернет-речей на основі штучного інтелекту для створення розумних міст.

Ю. Чень [26], З. Чень [27], К. Чен [28] обґрунтовують способи підвищення екологічної та економічної ефективності розумного міста, що досягається завдяки впливам технологій, транспортної інфраструктури та збереженню енергії. Автори студій [26–28] вважають розумне місто прискорювачем як для підвищення економічної ефективності, так і для покращення навколишнього середовища завдяки зниженню викидів вуглецевмісних сполук в атмосферу, а також доводять, що ефективність розумного міста залежить від міської транспортної структури та характеристик її складників.

Дж. Тан та інші вчені [25] досліджують механізми взаємодії розумної енергії та їх вплив на викиди вуглецю в розумних містах як єдину та цілісну систему, обґрунтовуючи це кількісними оцінками впливів розумної енергії на вуглецеву емісію в розумному місті. Крім того, науковці запропонували використовувати підхід синтетичної різниці у відмінності та підхід просторової різниці у відмінності в моделях для оцінювання впливів розумної енергії на карбонові викиди в розумному місті та довели значне зниження вуглецевих викидів, беручи до уваги ефекти просторового поширення розумної енергії в межах розумного міста.

У роботі [22] А. Шаріфі зі співавторами встановлюють зв'язки між розумними містами та цілями сталого розвитку, які ще недостатньо вивчені, а також виокремлюють три основні цілі сталого розвитку – ЦСР 6, ЦСР 7 і ЦСР 11 [29], на досягнення яких спрямована трансформація технологій розумного

міста, незважаючи на те, що існує упередженість щодо звітів про переваги розумних міст. Цілі сталого розвитку затверджені протягом останнього двадцятиліття в резолюціях міжнародних конвенцій Генеральної Асамблеї ООН [29], в українських державних Програмах, постановах, указах та Національних доповідях [30–34]. Цілі сталого розвитку, зокрема ЦСР 6, ЦСР 7, ЦСР 11 – ЦСР 13 [29, 33–34] визнають засадничі напрями розвитку суспільства, серед яких визначальними є забезпечення доступу до якісної води та належних санітарних умов, доступності та чистоти енергії, а також сталий розвиток міст і громад, відповідальне споживання та боротьба зі зміною клімату. Відповідно до цього управління пасажирськими перевезеннями в розумних містах покликане створити умови для покращення якості проживання в містах та зменшення викидів в атмосферу вуглецевмісних сполук. Це потребує безпрецедентних зусиль у всіх секторах суспільства, де влада й бізнес мають налагодити партнерські відносини заради досягнення успіху в процесі трансформації до розумних міст, де забезпечено доступ до чистого навколишнього середовища без викидів, скидів і відходів.

В основі інноваційних моделей для зниження обсягів викидів вуглецевмісних сполук у роботах М. Бублик [35–37] розроблено концепцію техносолітону, у якій значна роль відводиться оцінюванню шкоди та збитків у високозабруднювальних секторах економіки для визначення пріоритетів у всіх секторах економіки, соціального розвитку та збереження довкілля. Зниження викидів у атмосферу від транспортної системи має значний вплив на формування циркулярної економіки, покращення якості життя та досягнення цілей сталого розвитку в розумних містах [38].

Визначення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Мета роботи, завдання

Узагальнюючи проведені дослідження окресленої проблеми та вивчення наявних методів розвитку пасажирських перевезень у розумних містах, бачимо, що нині нерозв'язаним питанням є пошук ефективних підходів для оптимізації системи організації мереж громадського транспорту, що сприяють зниженню викидів вуглекислого газу в атмосферу для побудови розумних міст. Недостатньо також приділено уваги аналізу пасажирських перевезень у містах і визначенню наявних проблем і упереджень,

що перешкоджають упровадженню концепції розумного міста в його транспортну систему загалом та пасажирські перевезення зокрема. Це вказує на необхідність наукових досліджень в окресленому напрямі, а саме на проведення аналізу пасажирських перевезень у містах і визначення сучасних ефективних підходів щодо покращення організації мереж громадського транспорту, які сприяють зниженню викидів вуглекислого газу в атмосферу для побудови розумних міст, що і є **метою цієї роботи**.

У статті розв'язуються такі **завдання**: аналіз пасажирських перевезень в обласному місті з населенням меншим ніж 1 млн зареєстрованих мешканців; аналіз та класифікація наявних концептуальних підходів до оптимізації організації мереж громадського транспорту з метою скорочення викидів вуглецю; систематизація методів і засобів, покликаних покращити функціонування транспортних систем пасажирських перевезень у розумних містах; вивчення успішних проєктів оптимізації мережі громадського транспорту та визначення наявних проблем та упереджень, що перешкоджають їх упровадженню; дослідження типів різних нейронних мереж, використання яких сприяє оптимізації маршруту та передбачення трафіку на дорозі.

Результати досліджень та їх обговорення

Оптимізація системи організації мереж громадського транспорту загалом позитивно впливає на покращення економічної ефективності та результатів господарської діяльності всіх транспортних мереж у населеному пункті, однак це ще не означає, що саме це сприятиме зниженню викидів вуглекислого газу в атмосферу, досягненню цілей сталого розвитку та розбудові принципів розумних міст. Для дослідження пасажирських перевезень в обласному місті з населенням меншим ніж 1 млн зареєстрованих мешканців були обрані показники за 2007–2021 рр., зібрані Головним управлінням статистики у Львівській області [39]. За інформацією порталу "Панель міста" [40], перевезення пасажирів транспортом загального користування (пасажироперевезення громадським транспортом) здійснювалися в межах міста в обсягах, наведених на рис. 1. Як видно з графіка (рис. 1), обсяг пасажироперевезень громадським транспортом має спадну тенденцію. На жаль, з 2022 р. такі факти через воєнний стан не досліджуються [41]. Це зумовлено обмеженнями на оприлюднення відкритої інформації під час війни,

відповідно до Закону України "Про державну статистику", з метою забезпечення виконання вимог щодо конфіденційності статистичних відомостей.

Схожа спадна тенденція спостерігається в дослідженні динаміки пасажироперевезень автобусним громадським транспортом (рис. 2; складено авторами за матеріалами [39–41]), тролейбусами (рис. 3; побудовано авторами за матеріалами [39–41]) і трамваями (рис. 4; побудовано авторами за матеріалами [39–41]). За інформацією Головного управління статистики у Львівській області [39], упродовж 2013–2019 рр. спостерігалось зростання обсягів пасажиропотоків у електричному громадському транспорті. Різкий спад пасажирських перевезень 2020 р. зумовлений карантинними обмеженнями під час пандемії COVID-19.

У табл. 1 наведені такі показники: обсяги перевезень пасажирів автомобільним транспортом, загальна кількість автомобільних маршрутів і автомашин на маршрутах, середній вік автомашин, що здійснюють міські пасажирські перевезення, та кількість зупинок автомобільного транспорту. З табл. 1 видно, що останнє оновлення автопарку відбулося 2019 р., ще до початку пандемії COVID-19, тому маємо з кожним наступним роком зростання середнього віку автомашин, що здійснюють пасажирські перевезення, який 2023 р. становив 13 років. Обсяги пасажиропотоків у автомобільному транспорті впродовж 2021–2022 рр. майже відновилися до показників початку пандемії, хоча забезпечується це зростанням інтенсивності перевезень (збільшенням кількості рейсів на маршруті, переповненістю транспорту тощо). Зниження кількості машин на маршрутах 2022 р. було зумовлено виведенням з ладу транспортних засобів унаслідок ворожих обстрілів та використанням їх для евакуації населення із зон проведення інтенсивних бойових дій. Тому було прийнято рішення, що такі змінні показники не доцільно застосовувати для прогнозування пасажиропотоків, оскільки це тільки призведе до недостовірних результатів.

У табл. 2 та 3 наведені основні показники щодо перевезень пасажирів міським електротранспортом, серед яких загальна кількість трамвайних і тролейбусних маршрутів, їх загальна протяжність, загальна кількість трамваїв і тролейбусів на маршрутах, середній вік міських електротранспортних засобів, що здійснюють перевезення, та кількість трамвайних і тролейбусних зупинок.

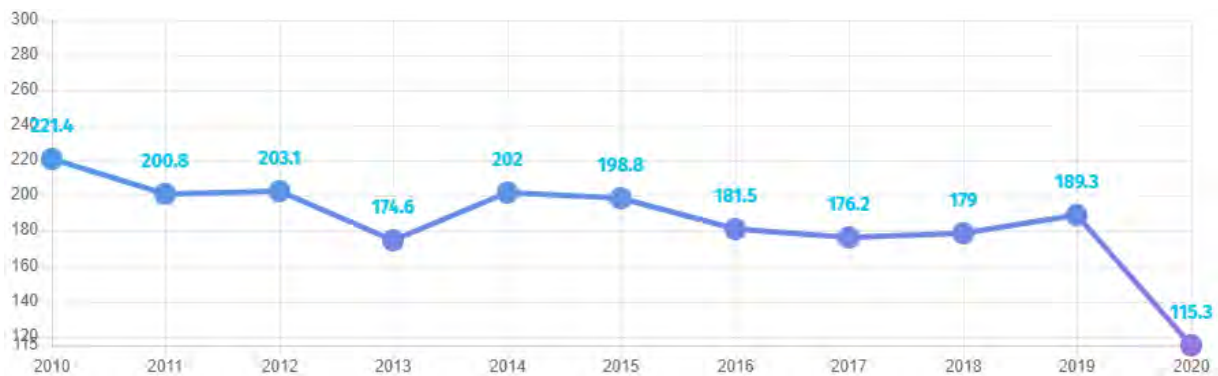


Рис. 1. Перевезення пасажирів транспортом загального користування (складено авторами за матеріалами [39–41])



Рис. 2. Перевезення пасажирів автомобільним транспортом



Рис. 3. Перевезення пасажирів тролейбусами



Рис. 4. Перевезення пасажирів трамваями

Використовуючи методи лінійної та нелінійної апроксимації на основі показників, поданих у табл. 2 та 3, було інтерпольовано обсяги пасажиропотоків у електротранспорті у Львові до 2025 року (рис. 5). Найвищі показники детермінації ($R^2 = 0,8535$ і $R^2 = 0,6715$) для

пасажирських перевезень тролейбусами й трамваями відповідно мають поліномічні функції 5-го степеня ($y = 1.3494x^5 - 54.833x^4 + 763.97x^3 - 3969x^2 + 4087.3x + 36756$ та $y = 2.8964x^5 - 125.5x^4 + 1882.5x^3 - 11460x^2 + 25166x + 35388$).

Таблиця 1. Основні показники перевезення пасажирів автомобільним транспортом та їх динаміка (складено авторами за матеріалами [39–41])

Роки	Перевезення пасажирів автомобільним транспортом, млн осіб	Загальна кількість автомобільних маршрутів, од.	Загальна кількість автомашин на маршрутах, од.	Середній вік автомашин, що здійснюють міські пасажирські перевезення, роки	Кількість зупинок автомобільного транспорту
2010	145.9	74	840	–	–
2011	141.4	74	840	–	–
2012	134.8	52	607	–	–
2013	115.8	52	620	–	–
2014	125.1	53	620	11.5	661
2015	109.7	55	640	12.5	661
2016	93.3	50	604	9.4	726
2017	90.4	56	642	8.6	803
2018	89.0	56	622	9.3	908
2019	89.8	52	507	8.7	803
2020	50.9	59	498	8.7	765
2021	69.0	51	440	9.7	1057
2022	80.0	67	393	12	773
2023	–	50	426	13	1066

Таблиця 2. Основні показники перевезення пасажирів у трамваях та їх динаміка (складено авторами за матеріалами [39–41])

Роки	Перевезення пасажирів, тис. осіб	Загальна кількість маршрутів	Загальна протяжність маршрутів	Загальна кількість машин на маршрутах, од.	Середній вік машин, що здійснюють перевезення, рік	Загальна кількість зупинок, од.
2010	49603.1	9	102.6	64	26.9	117
2011	36892.2	9	102.6	60	26.6	117
2012	43287.0	8	94.4	62	27.7	117
2013	35935.2	10	116.3	65	28.3	117
2014	50549.3	10	116.3	70	29.1	124
2015	59572.5	10	116.3	65	30.1	124
2016	56555.9	10	134.1	70	29.6	142
2017	54018.6	9	93.0	62	30.7	142
2018	58808.4	9	93.0	75	34	144
2019	63122.5	9	116.2	86	34	136
2020	34711.2	7	81.9	67	33.6	142
2021	36427.7	8	81.9	70	34.5	142
2022	–	7	99.1	70	34.6	133
2023	–	8	81.9	72	34.7	134

Таблиця 3. Основні показники перевезення пасажирів у тролейбусах та їх динаміка (складено авторами за матеріалами [39–41])

Роки	Перевезення пасажирів, тис. осіб	Загальна кількість маршрутів	Загальна протяжність маршрутів	Загальна кількість машин на маршрутах, од.	Середній вік машин, що здійснюють перевезення, рік	Загальна кількість зупинок, од.
2010	25876.4	10	135.9	67	15.1	172
2011	22453.5	10	137.9	58	16.9	177
2012	25012.2	10	142.3	59	17.8	186
2013	22904.5	9	145.8	60	19.2	186
2014	26397.5	10	167.6	60	19.8	186
2015	29518.3	10	168.8	55	20.29	190
2016	31575.2	10	167.9	55	20.5	192
2017	31765.9	9	149.0	52	20.3	192
2018	31220.1	10	149.0	56	24.0	192
2019	36409.5	9	133.4	65	21.0	197
2020	29676.8	11	132.6	60	13.7	199
2021	32555.7	9	132.6	65	13.8	199
2022	–	10	136.0	69	14.9	203
2023	–	10	136.2	69	15.9	204

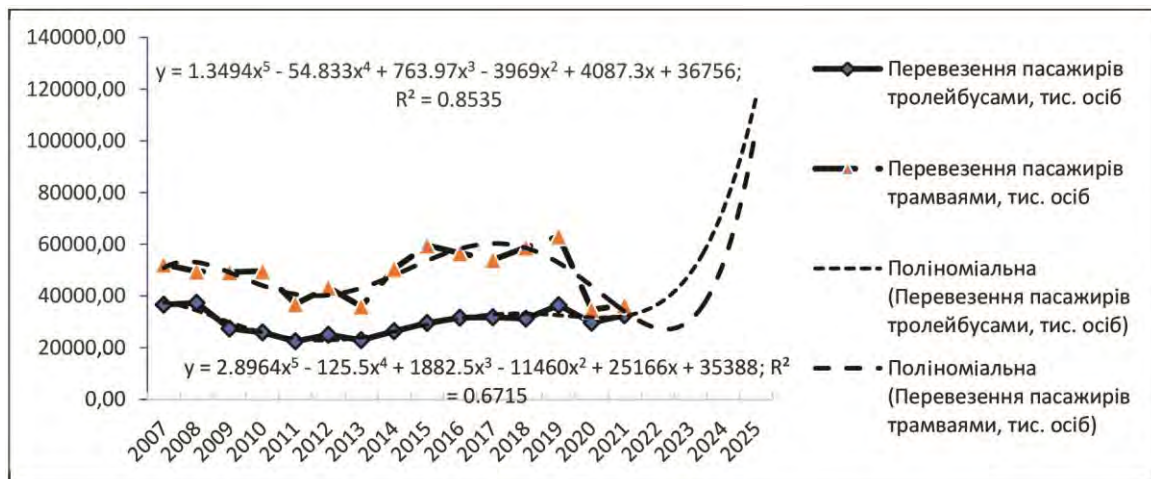


Рис. 5. Динаміка обсягів пасажиропотоків у електротранспорті у Львові та їх обчислені значення до 2025 р. (власні розрахунки)

Обсяги пасажиропотоків у електротранспорті Львова під час пандемії 2021 р. так і не відновили своїх значень до показників її початку (табл. 2 та 3), хоча відбулося зростання кількості транспортних засобів (на маршрутах Львова курсувало на 3 трамваї та 5 тролейбусів більше). Карантинні обмеження таки вплинули на роботу електротранспорту, оскільки пасажиропотік забезпечується не тільки зростанням кількості транспортних засобів, а насамперед збільшенням кількості пасажирів (що проживають в населеному пункті та мають потребу в переміщенні). Незважаючи на оптимістичність здобутих значень пасажиропотоків за отриманими залежностями (досягнення протягом 2023–2024 рр. допандемічного рівня показників для обсягів пасажирських перевезень тролейбусами й трамваями), вони розраховані внаслідок інтерполяції ретроспективної інформації, яка жодним чином не бере до уваги ні зменшення кількості населення міст унаслідок переходу російсько-української війни в повномасштабну фазу інтенсивних бойових дій на третині території держави, ні припинення роботи транспорту під час майже постійних і частих повітряних тривог тощо. Отже, наявні набори показників є неповними й не містять достатньої кількості відомостей про чинники, важливі для прийняття ефективних управлінських рішень.

Аналізуючи наявні набори показників щодо викидів забруднювальних речовин в атмосферне повітря від пересувних джерел у Львівській області, бачимо, що карантинні обмеження 2020 р. посилили тенденцію до їх зменшення (рис. 6; побудовано авторами за матеріалами [39–42]). Щодо динаміки викидів діоксиду вуглецю пересувними джерелами

у Львівській області маємо дві різні тенденції на двох проміжках – від 2006 до 2015 р. і від 2016 до 2022 р. (рис. 7; побудовано авторами за матеріалами [39–42]), зумовлені зміною методик розрахунку. Так, з 2006 р. в методиці беруться до уваги викиди від автомобільного, залізничного, авіаційного та водного транспортів, куди з 2007 р. ще додали викиди з виробничої техніки (пересувної), та з 2016 р. у методиці беруться до уваги основні відомості про кінцеве використання палива автомобільним транспортом, які збираються з енергетичного балансу всієї України. Оскільки викиди в атмосферне повітря діоксиду вуглецю від пересувних джерел забруднення у Львівській області зросли із незначним збільшенням пасажирських перевезень автобусними транспортними засобами (рис. 7), то необхідно зважати на частку, яку становить громадський транспорт у загальному обсязі спожитого ним палива.

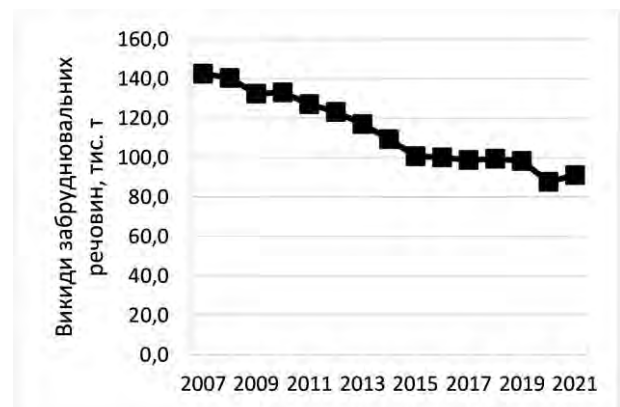


Рис. 6. Динаміка викидів забруднювальних речовин в атмосферне повітря від пересувних джерел забруднення

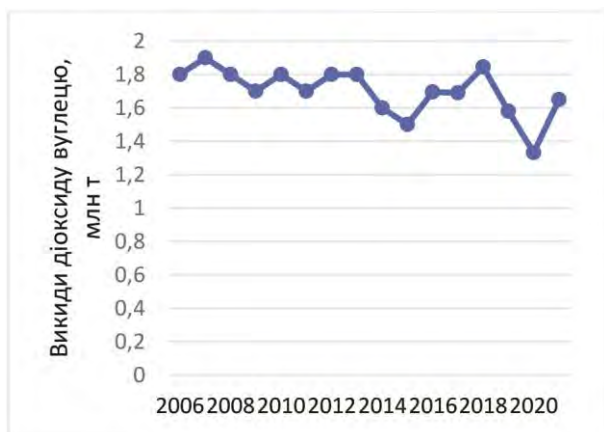


Рис. 7. Динаміка викидів діоксиду вуглецю в атмосферне повітря від пересувних джерел забруднення

Розглянемо структуру викидів діоксиду вуглецю транспортною системою за міжнародними методиками [43–45]. Як показано в праці [43], легкі, середні та важкі транспортні засоби, що здійснюють вантажні перевезення, сумарно становлять 40% викидів від загального обсягу викидів. До джерел викидів у атмосферу, спричинених роботою транспортної системи, належать також легкові автомобілі, мікроавтобуси, автобуси, тролейбуси, трамваї, фонікулери, мотоцикли, водний, залізничний та повітряний транспорт тощо. Таку саму частку викидів (41%) спричиняють легкові автомобілі. Цей недолік автомобільного ринку нині є критичним, оскільки, як вважають фахівці [44], викиди від легких вантажівок збільшаться удвічі порівняно зі стандартними легковими автомобілями в період

2021–2026 рр. (165–178 г CO₂/миль проти 240–257 г CO₂/миль відповідно) [45]. До пересувних джерел, що генерують викиди в атмосферу вуглецевмісних сполук, також належать авіаційні перевезення – 7%, перевезення залізничним транспортом – 2%, водним транспортом – 2%, мотоциклами та автобусами – 1% [43]. Отже, на громадський транспорт припадає менше ніж 5% від усіх викидів вуглецевмісних сполук в атмосферу. З огляду на показники, наведені на рис. 7, можна розрахувати, що стосовно всіх викидів близько 83 тис. т у середньому генерується автобусними транспортними засобами.

Отже, аналіз пасажирських перевезень в обласному місті, яке є типовим прикладом населеного пункту з населенням меншим ніж 1 млн зареєстрованих мешканців та з розвинутою мережею громадських перевезень, указує на необхідність пошуку ефективних підходів зменшення забруднення атмосфери вуглецевмісними сполуками шляхом оптимізування організації мереж громадського транспорту на засадах концепції розумного міста.

Унаслідок вивчення досягнень сучасних наукових теорій, викладених у роботах учених [46–53], серед відомих напрямів оптимізації мережі громадського транспорту в межах концепції розумного міста виокремимо три основні підходи: 1) надання громадському транспорту пріоритетності на дорозі; 2) перехід на електричні та гібридні транспортні засоби; 3) упровадження інформаційних технологій моніторингу (рис. 8).



Рис. 8. Основні напрями оптимізації мережі громадського транспорту в межах концепції розумного міста (систематизовано авторами за матеріалами [42–48])

За першим підходом у розумному місті зменшення кількості транспортних засобів на дорозі досягається завдяки наданню переваги громадському транспорту, знижуючи привабливість його альтернативи – водіння автомобіля. Коли пересування громадським транспортом є швидшим і зручнішим, ніж їздити автомобілем, коли громадський транспорт їздить часто та є дешевшим, то щоразу більше людей

ним користуватимуться. Така оптимізація правил дорожнього руху також сприяє сталому розвитку міст, оскільки збільшує доступність громадського транспорту та зв'язує околиці населених пунктів із середмістям, що зменшує потребу мати власний автомобіль і необхідність відповідної кількості місць для паркування. Це збільшує територію для інших цілей, таких як зелені зони або велосипедні доріжки.

Загалом, такий процес може допомогти зменшити розростання міст і сприятиме впровадженню більш стійких моделей розвитку міської інфраструктури. Зрештою, це дасть змогу досягти цілей сталого розвитку завдяки зменшенню кількості автомобілів на дорозі та пов'язаних із цим викидами оксидів вуглецю в атмосферу.

За другим підходом у розумному місті зміни концентруються на структурній трансформації парку транспортних засобів у напрямі збільшення частки електричних і гібридних автобусів, що приводить до оптимізації самих типів транспортних засобів і може суттєво зменшити вуглецевий слід громадського транспорту. Перехід на електричні або гібридні автобуси сприятиме значному скороченню викидів вуглекислого газу порівняно з традиційними дизельними автобусами.

У третьому підході ключову роль відіграють інформаційні технології, що дають змогу відстежувати в реальному часі транспортні засоби, допомагають спостерігати за трафіком на дорозі, прогнозувати

маршрут, спричиняють зменшення споживання палива шляхом скорочення як довжини маршрутів, так і часу перебування транспортних засобів у дорозі. Така оптимізація сприяє також зменшенню часу очікування пасажирів на транспортні засоби та їхнього перебування в дорозі.

Проаналізуємо наявні методи й засоби, покликані оптимізувати функціонування транспортних систем пасажирських перевезень у розумних містах щодо зниження вуглецевих викидів (див. рис. 9).

1. Розумні транспортні системи.
2. Електричні транспортні засоби.
3. Мережі спільного використання транспорту.
4. Розумні застосунки та інформаційні системи.
5. Інноваційні системи оплати.
6. Безпілотні транспортні засоби.
7. Інформаційні табло та системи оголошень.
8. Мережі велосипедних доріжок та обладнані тротуари.
9. Системи екологічного моніторингу.



Рис. 9. Методи та засоби оптимізації мереж транспортних систем пасажирських перевезень (власна розробка)

Детально розглянемо перелічені методи оптимізації функціонування мережі транспортних систем пасажирських перевезень у розумних містах щодо зниження вуглецевих викидів (рис. 9). Кожен інструмент має певні ознаки та потребує конкретних практичних заходів для його застосування [54–56]. У процесі впровадження концепції розумного міста, звичайно, ці інструменти необхідно адаптувати до конкретних обставин та особливостей транспортної мережі міста, щоб досягти успіху.

Розумні транспортні системи використовують різні технології, зокрема сенсори, мережі зв'язку та аналітичні алгоритми, щоб забезпечити оптимальне управління громадським транспортом у місті. Розумні

транспортні системи дають змогу максимально скоротити час очікування пасажирів на громадський транспорт, спростити оплату та забезпечити безпеку для населення.

До електричних транспортних засобів належать електромобілі, електричні скутери, електричні велосипеди, що мають нульовий викид шкідливих речовин, мінімізують витрати на паливо та забезпечують більшу екологічність всієї транспортної системи розумного міста.

У кожній країні розвиваються свої мережі спільного використання транспорту. Найбільш відомими у світі є мережі типу *Carsharing* та *Bike-sharing*. Вони створюють можливості

застосовувати транспорт у разі потреби, а не володіти ним, що знижує витрати на утримання та сприяє більш ефективному його використанню.

Мережі спеціальних велосипедних доріжок та обладнані для пішоходів тротуари в розумних містах створюють особливе транспортне середовище, де спеціальні розділені доріжки та тротуари для велосипедистів і пішоходів забезпечують безпеку та зручність для їх користувачів.

Зі стрімким розвитком інформаційних технологій і мобільних пристроїв з'явилися розумні застосунки та функціональні інформаційні системи. Вони допомагають пасажиром знайти інформацію про маршрути, точний час прибуття транспорту та розмір і спосіб оплати послуг. Розумні застосунки також наділені функціями забезпечення дотримання розкладу, візуалізації маршрутів і рекомендації переліку можливих маршрутів. Це не тільки підвищує ефективність використання громадського транспорту, а й зменшує затори на дорогах.

Інформаційні табло та системи оголошень надають пасажиром необхідну інформацію про маршрути, розклади та їх зміну через затримку транспорту безпосередньо на зупинках і в транспортних засобах. Це позитивно впливає на систему ефективного планування подорожей, сприяє комфорту пасажирів під час перебування в транспорті та на зупинках.

Упровадження інформаційних технологій у систему банкігу сприяло розвитку електронних систем оплат. Нині звичними є оплата безконтактними картками з допомогою мобільних застосунків та інших систем оплати, що суттєво спрощує сам процес оплати за користування транспортом, забезпечує швидкість і зручність для пасажирів, скорочує час очікування на зупинках та перебування в дорозі.

Щоразу більшої популярності набувають безпілотні транспортні засоби, до переліку яких можна додати автономні автомобілі, автономні автобуси та навіть дрони. Вони покликані забезпечити ефективність та безпечність транспортної системи, сприяти зниженню кількості аварій на дорогах, як би фантастично це не виглядало.

Поширення системи екологічного моніторингу в містах уможливило відслідковування стану довкілля, контроль концентрації шкідливих речовин у повітрі, що потрапляють туди через викиди забруднювальних речовин від транспорту та різних виробничих процесів у промисловості та на комунальних господарствах. Зібрана інформація систематизується екологічними інспекціями та дає змогу керівникам

органів самоврядування та громадськості приймати ефективні управлінські рішення з метою зниження викидів та покращення якості повітря в містах.

Проаналізовані методи та засоби є лише деякими з тих, що покликані оптимізувати функціонування транспортних систем пасажирських перевезень у розумних містах з погляду зниження вуглецевих викидів. Їх перелік сформовано також з огляду на потреби в забезпеченні ефективності та зручності транспортної системи для пасажирів.

Аналіз сучасного доробку вчених [43, 50, 51] дав змогу виокремити успішні проекти оптимізації мережі громадського транспорту, що використовуються для створення розумних міст. Нижче опишемо деякі з цих проектів.

У кількох містах світу успішно оптимізували мережу громадського транспорту, щоб зменшити викиди вуглецю. Наприклад, у Парижі міська влада запровадила новий план громадського транспорту, який віддав пріоритет автобусним і велосипедним доріжкам, зменшивши кількість автомобілів на дорозі та збільшивши кількість пасажирів громадського транспорту. Цей план сприяв скороченню викидів вуглецю від транспорту в місті на 14% [50].

Іншим прикладом є місто Богота, де запроваджено систему швидкого автобусного транспорту – *bus rapid transit (BRT)*, яка скоротила час у дорозі та покращила сполучення в місті. Ця система зменшила викиди вуглекислого газу на понад 300 тис. т на рік, що еквівалентно виведенню з доріг 60 тис. автомобілів [43]. Система швидкого автобусного транспорту (*BRT*) у Боготі є одним із найуспішніших проектів оптимізації мережі громадського транспорту у світі.

Система, відома як *TransMilenio*, була вперше впроваджена 2000 р. і відтоді розширилася, щоб охопити понад 112 кілометрів смуг, призначених лише для автобусів, щодня обслуговуючи понад 2,6 млн пасажирів [43]. Однією з ключових особливостей системи *TransMilenio* є використання зчленованих автобусів, що можуть перевозити до 160 пасажирів одночасно. Ці автобуси курсують виділеними смугами, уникаючи заторів і скорочуючи час подорожі для пасажирів. Система також використовує передоплачену систему смарт-карток, щоб пришвидшити посадку та зменшити затримки. *TransMilenio* досягла успіху в скороченні викидів вуглецю в Боготі. Забезпечивши швидшу та ефективнішу систему громадського транспорту, місто зменшило кількість автомобілів на дорогах,

що призвело до зниження забруднення повітря та викидів парникових газів. За інформацією Інституту світових ресурсів, система скорочує викиди вуглецю на понад 300 тис. т на рік, що еквівалентно виведенню з доріг 60 тис. автомобілів.

Окрім скорочення викидів вуглецю, система *TransMilenio* також мала значний соціальний та економічний вплив у Боготі. Покращивши зв'язок і доступність, система збільшила мобільність і економічні можливості для жителів, особливо тих, хто проживає в районах із низьким рівнем доходу. Система також сприяла відродженню громадських просторів, до того ж чимало автобусних станцій призначені для збору громади. Незважаючи на успіх, система *TransMilenio* зіткнулася з деякими проблемами, зокрема переповненістю в години пік і питаннями з обслуговуванням. Однак міська влада продовжує інвестувати в систему, розширюючи її на нові території та запроваджуючи сучасні технології для покращення продуктивності.

Загалом, схожою до системи *TransMilenio* в Боготі є система електричного австралійського транспорту майбутнього (*Electric Australian transport Systems*) [44], що є яскравим прикладом того, як оптимізація мережі громадського транспорту може зменшити викиди вуглецю та покращити якість життя мешканців. Справді, цей успіх надихнув уряди на подібні проекти в інших містах світу, продемонструвавши потенціал громадського транспорту для відігравання вирішальної ролі у розв'язанні проблеми зміни клімату та сприянні сталому розвитку міст.

Існує декілька методів оптимізації маршрутів, що можуть бути використані для досягнення мети цієї роботи. Один із методів – це використання алгоритмів маршрутизації. Ці алгоритми допомагають знайти найкоротший маршрут між двома точками на мапі, беручи до уваги різні фактори, зокрема дорожні затори та інші перешкоди. Якщо такий алгоритм застосовуватиметься для кожного маршруту громадського транспорту у Львові, то це допоможе розв'язати проблему затримок і зменшити час переміщення пасажирів.

Ще один метод – аналіз інформації про використання громадського транспорту у Львові. Збір відомостей про рух транспорту, пасажиропотік та затримки може допомогти визначити найбільш популярні маршрути та пункти призначення, а також виявити проблемні ділянки маршруту. Цю інформацію можна застосовувати для оптимізації

старих маршрутів і планування нових, що задовольнятимуть потреби пасажирів.

Також можна використовувати інформаційні технології для підвищення ефективності громадського транспорту. Наприклад, установлення GPS-систем в автобусах і тролейбусах дасть змогу відслідковувати рух транспорту в режимі реального часу та надавати пасажирам точну інформацію про час прибуття транспорту на зупинку.

Геоінформаційні системи (ГІС) визначають найкоротший маршрут з огляду на різні обмеження, зокрема дорожні умови, розклади громадського транспорту та інші фактори.

Системи прогнозування пасажиропотоків прогнозують пасажиропотоки в різні години дня та на різних маршрутах, що допомагає підвищити ефективність транспорту та зменшити час очікування для пасажирів.

Використання інформації зі смартфонів пасажирів дає змогу в режимі реального часу відстежувати рух пасажирів і користуватися цією інформацією для оптимізації маршрутів транспорту.

Аналіз відомостей про історію подорожей допомагає визначити найпопулярніші маршрути та розклади громадського транспорту, що оптимізує маршрути та скорочує час очікування для пасажирів.

Використання розумних зупинок та системи "розумний регулятор" забезпечує координацію руху різних видів транспорту на ділянці дороги, що дає змогу зменшити час простою транспорту.

Для оптимізації маршруту кожного пасажиром можна використовувати алгоритми машинного навчання, що працюватимуть на основі інформації про рух транспорту в реальному часі, наявність вільних місць у транспорті та інші параметри. Тобто необхідно, щоб інтелектуальна система оптимізації маршруту мала доступ до такої інформації, зокрема, що надають GPS-трекери в транспорті, відкриті джерела даних про трафік та інші розроблені рішення.

Крім того, для забезпечення оптимального маршруту для кожного пасажиром система має брати до уваги його особисті уподобання. Наприклад, якщо пасажир хоче швидко дістатися до місця призначення, система пропонуватиме маршрути, які допоможуть це зробити. Якщо ж пасажир більш переймається комфортом подорожі, система буде пропонувати маршрути з меншою кількістю пересадок або з більш зручним транспортом.

Отже, важливо, щоб інтелектуальна система оптимізації маршруту збирала, аналізувала й використовувала різноманітну інформацію, щоб надати оптимальні маршрути кожному пасажирові громадського транспорту в реальному часі.

Якщо на дорозі виникає затор або змінюється розташування громадського транспорту, інтелектуальна система має динамічно корегувати маршрути. Для цього вона повинна мати доступ до поточної інформації про трафік, затори та розташування громадського транспорту, наприклад, за допомогою GPS-модулів і мережі датчиків, розміщених на дорогах.

Коли інтелектуальна система отримує оновлену інформацію про стан дороги та розташування громадського транспорту, вона має вирішувати, чи залишати пасажира на поточному маршруті, чи запропонувати альтернативний для досягнення мети з максимальною швидкістю та комфортом.

У разі затору чи зміни розташування громадського транспорту інтелектуальна система має швидко зробити розрахунки та запропонувати оптимальний маршрут. Важливо, щоб інформація про затори та інші перешкоди відображалася на табло в салоні громадського транспорту та на мобільному пристрої пасажира, щоб людина могла обрати оптимальний маршрут.

Для покращення процесу оптимізації маршруту та передбачення трафіку на дорозі можуть підійти різні типи нейронних мереж, залежно від точності та швидкості, які потрібні для системи [57].

1. Рекурентні нейронні мережі (RNN) – упроваджуються для роботи з послідовностями даних, такими як часові ряди. Вони можуть бути корисними для передбачення трафіку на дорозі на основі історичних даних.

2. Конволюційні нейронні мережі (CNN) – застосовуються для оброблення зображень, але також можуть бути корисними для передбачення трафіку на основі відеостримів з камер відеоспостереження.

3. Глибокі нейронні мережі (DNN) – упроваджуються для розв'язання складних завдань, зокрема передбачення маршрутів ускладнених міських мереж.

Нейронні мережі можуть бути використані для передбачення трафіку та оптимізації маршрутів у реальному часі, забезпечуючи ще більш точну та швидку роботу системи пасажирських перевезень.

Отже, організація транспортних систем пасажирських перевезень у розумних містах із низькими викидами CO₂ відрізняється від звичайної

організації системи перевезення пасажирів за декількома параметрами:

1) використання електричного або гібридного транспорту замість автомобілів із дизельними або бензиновими двигунами;

2) застосування спільного транспорту замість приватного, наприклад великі автобуси замість малих автомобілів. Це дає змогу знизити кількість транспорту на дорогах і зменшити затори;

3) використання мережі швидкісних трамваїв або метрополітенів. Ці системи перевезення пасажирів забезпечують високу швидкість і рівень комфорту, стаючи альтернативою приватному транспорту;

4) упровадження сучасних інформаційних технологій для оптимізації маршрутів та моніторингу транспортного потоку. Це дає змогу підвищити ефективність транспортної системи та забезпечити швидку реакцію на зміни в транспортному потоці;

5) застосування динамічної системи ціноутворення на квитки залежно від навантаженості транспортного засобу та попиту на послугу. Це дає змогу зменшити загальну вартість транспорту для користувачів та забезпечити оптимальне використання транспорту.

Усі ці параметри допомагають покращити рівень пасажирських перевезень у розумних містах та зменшити викиди CO₂.

Отже, використання нейронних мереж сприяє оптимізації маршруту та передбаченню трафіку на дорозі, що є одним із ключових завдань покращення мереж громадського транспорту з низьковуглецевими викидами в атмосферу в межах концепції розумного міста.

Висновки й перспективи подальшого розвитку

Унаслідок аналізу пасажирських перевезень в обласному місті з населенням меншим ніж 1 млн зареєстрованих мешканців та розвинутою мережею громадського транспорту виявлено, що з початком пандемії спостерігається зниження основних показників пасажиропотоків та деяке зростання обсягів викидів вуглецевовмісних сполук в атмосферу. Завдяки аналізу та класифікації наявних концептуальних підходів до оптимізації організації мереж громадського транспорту з метою скорочення викидів вуглецю встановлено три основні підходи: пріоритетність громадського транспорту, гібридизація та електризація транспортних засобів та впровадження IT-моніторингу. Під час систематизації наявних методів і засобів, покликаних оптимізувати функціонування транспортних

систем пасажирських перевезень у розумних містах, було досліджено такі групи: розумні транспортні системи; електричні транспортні засоби; мережі спільного використання транспорту; розумні застосунки та інформаційні системи; інноваційні системи оплати; безпілотні транспортні засоби; інформаційні табло та системи оголошень; мережі велосипедних доріжок та обладнані тротуари; системи екологічного моніторингу. Вивчення успішних проєктів оптимізації мережі громадського транспорту показало, що успішність впровадження змін для оптимізації транспортних мереж громадських перевезень не залежить від розмірів міст, а лише від вмотивованості учасників процесу змін (влада, бізнес та мешканці). Унаслідок визначення сучасних проблем та упереджень, що перешкоджають впровадженню ефективних проєктів, було виокремлено найбільш типову перешкоду – "опір змінам", шляхи подолання якої є завершеним теоретико-практичним завданням. У дослідженні різних типів нейронних мереж запропоновано використовувати ті, що сприяють оптимізації маршруту та передбаченню трафіку

на дорозі, а саме: рекурентні, конволюційні та глибокі нейронні мережі.

Отже, оптимізація мережі громадського транспорту відіграє вирішальну роль у зниженні викидів вуглекислого газу в транспортному секторі. Надаючи привабливу альтернативу водінню, зменшуючи вуглецевий слід громадського транспорту та сприяючи сталому розвитку міст, оптимізація мережі громадського транспорту може допомогти зменшити викиди вуглецю та пом'якшити наслідки зміни клімату. Успішні проєкти в містах по всьому світу продемонстрували ефективність оптимізації мережі громадського транспорту для зменшення викидів вуглецю, що робить цю стратегію критично важливою для урядів і міст у боротьбі зі зміною клімату й для підвищення якості життя населення.

Подальші дослідження важливо присвятити розробленню інтелектуальних систем, що сприятимуть оптимізації мереж громадського транспорту з низьковуглецевими викидами в атмосферу в межах концепції розумного міста.

Список літератури

1. Boreiko O., Teslyuk V. Structural model of passenger counting and public transport tracking system of smart city. *Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, Proceedings of International Conference*. 2016. P. 124–126. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH.2016.7507533>
2. Boreiko O., Teslyuk V. Model of data collection controller of automated processing systems for passenger traffic public transport smart city based on petri nets. *2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies*. 2017. P. 62–65. DOI: <https://doi.org/10.1109/AIACT.2017.8020066>
3. Boz Y., Cay T. How smart and sustainable are the cities in Türkiye? – National policies and the enthusiasm level of the local governments. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. No 4. 26002 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26002>
4. Bublyk M., Udovychenko T., Medvid R. Concept of smart specialization in the context of the development of Ukraine's economy. *Economics. Ecology. Socium*. 2019. Vol. 3. No 2. P. 55–61. DOI: <https://doi.org/10.31520/2616-7107/2019.3.2-6>
5. Bublyk M., Kowalska-Styczeń A., Lytvyn V., Vysotska V. The Ukrainian economy transformation into the circular based on fuzzy-logic cluster analysis. *Energies*. 2021. Vol. 14. No 18. 5951 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14185951>
6. Bushuyev S., Inna L., Alla B., Alexander L., Khusainova M. Creating urban transportation networks grounded in the principles of the smart port-city paradigm. *Procedia Computer Science*. 2023. Vol. 231. P. 323–328. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.12.211>
7. Wang H., Wang Y. Smart Cities Net Zero Planning considering renewable energy landscape design in Digital Twin. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2024. Vol. 63. 103629 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103629>
8. Vanli T., Akan T. Mapping synergies and trade-offs between smart city dimensions: A network analysis. *Cities*. 2023. Vol. 142. 104527 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104527>
9. Wolniak R., Jonek-Kowalska I. The level of the quality of life in the city and its monitoring. *Innovation: The European Journal of Social Science Research*. 2021. Vol. 34. No 3. P. 376–398. DOI: <https://doi.org/10.1080/13511610.2020.1828049>
10. Guenduez A., Mergel I., Schedler K., Fuchs S., Douillet C. Institutional work in smart cities: Interviews with smart city managers. *Urban Governance*. 2024. Vol. 2. No 1. P. 104–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ugj.2024.01.003>
11. Dai Y., Hasanefendic S., Bossink B. A systematic literature review of the smart city transformation process: The role and interaction of stakeholders and technology. *Sustainable Cities and Society*. 2024. Vol. 101, 105112 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105112>

12. Jonek-Kowalska I. Towards the reduction of CO₂ emissions. paths of pro-ecological transformation of energy mixes in european countries with an above-average share of coal in energy consumption. *Resources Policy*. 2022. Vol. 77. No 1. 102701 p. DOI: <https://10.1016/j.resourpol.2022.102701>.
13. Kim J., Feng Y. Understanding complex viewpoints in smart sustainable cities: The experience of Suzhou, China. *Cities*. 2024. Vol. 147, 104832 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.104832>
14. Koshtura D., Bublyk M., Matseliukh Y., Dosyn D., Chyrun L., Lozynska O., Karpov I., Peleshchak I., Maslak M., Sachenko O. Analysis of the demand for bicycle use in a smart city based on machine learning. *CEUR workshop proceedings*. 2020. Vol. 2631, P. 172–183. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2631/paper13.pdf> (дата звернення: 01.02.2024).
15. Литвин В., Бублик М., Висоцька В., Мацелюх Ю. Технологія візуальної симуляції пасажиропотоків у сфері громадського транспорту Smart City. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2022. №4. С. 106–121. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-4-10>
16. Lim Y., Edelenbos J., Gianoli A. What is the impact of smart city development? Empirical evidence from a Smart City Impact Index. *Urban Governance*. 2023. Vol. 4, P. 104-122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ugj.2023.11.003>
17. Lin H., Wang W., Zou Y., Chen H. An evaluation model for smart grids in support of smart cities based on the Hierarchy of Needs Theory. *Global Energy Interconnection*. 2023. Vol. 6. No 5. P. 634–644. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2023.10.009>
18. Matseliukh Y., Vysotska V., Bublyk M. Intelligent system of visual simulation of passenger flows. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. Vol. 2604. P. 906–920. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2604/paper60.pdf> (дата звернення: 01.02.2024).
19. Nath N., Nitanai R., Manabe R., Murayama A. A global-scale review of smart city practice and research focusing on residential neighbourhoods. *Habitat International*. 2023. Vol. 142, 102963 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2023.102963>
20. Nguyen H., Nawara D., Kashef R. Connecting the Indispensable Roles of IoT and Artificial Intelligence in Smart Cities: A Survey. *Journal of Information and Intelligence*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jiixd.2024.01.003>
21. Podlesna L., Bublyk M., Grybyk I., Matseliukh Y., Burov Y., Kravets P., Lozynska O., Karpov I., Peleshchak I., Peleshchak R. Optimization model of the buses number on the route based on queueing theory in a Smart City. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. Vol. 2631, P. 502 – 515. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2631/paper37.pdf> (дата звернення: 01.02.2024).
22. Sharifi A., Allam Z., Bibri S., Khavarian-Garmsir A. Smart cities and sustainable development goals (SDGs): A systematic literature review of co-benefits and trade-offs. *Cities*. 2024. Vol. 146. 104659 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104659>
23. Shiu S. Ageing in a smart city poses concerns on sustainability from a model perspective. *Aging and Health Research*. 2024. Vol. 4. No 1. 100179 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ahr.2023.100179>
24. Spicer Z., Goodman N., Wolfe D. How "smart" are smart cities? Resident attitudes towards smart city design. *Cities*, 2023. Vol. 141. 104442 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104442>
25. Tang J., Li Y. Study on the impact of smart energy on carbon emissions in smart cities from single and holistic perspectives – Empirical evidence from China. *Sustainable Cities and Society*. 2024. Vol. 101, 105145 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105145>
26. Chen Y., Chen S., Miao J. Does smart city pilot improve urban green economic efficiency: Accelerator or inhibitor. *Environmental Impact Assessment Review*. 2023. Vol. 104, 107328 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107328>
27. Chen Z., Gan W., Wu J., Lin H., Chen C. Metaverse for smart cities: A survey. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*. 2023. Vol. 4. P. 203–216. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2023.12.002>
28. Chen C., Li S., Wang L. Can smart cities reduce labor misallocation? Evidence from China. *Technological Forecasting and Social Change*. 2024. Vol. 201, 123264 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123264>
29. Резолюція Генеральної Асамблеї Організації Об'єднаних Націй "Глобальні цілі сталого розвитку до 2030 року", від 25 вересня 2015 року № 70/1 (Sustainable Development Goals (SDGs), United Nations General Assembly, 2015). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/722/2019> (дата звернення 01.02.2024).
30. Указ Президента України "Стратегія сталого розвитку «Україна – 2020»" (ухвалена від 12 січня 2015 р. № 5/2015) URL: <https://www.president.gov.ua/documents/7222019-29825> (дата звернення 01.02.2024).
31. Постанова КМ України "Державна стратегія регіонального розвитку до 2020 року" (затверджена від 6 серпня 2014 р. №385) URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/686-2019-%D1%80#Text> (дата звернення 01.02.2024).
32. Про засади державної регіональної політики (док. 156-VIII від 05.02.2015 р.)
33. Указ Президента України "Про цілі сталого розвитку України на період до 2030 року" № 722/2019, від 30.09.2019
34. Національна доповідь "Цілі сталого розвитку: Україна"
35. Bublyk M., Vysotska V., Matseliukh Y., Mayik V., Nashkarska M. Assessing Losses of Human Capital Due to Man-Made Pollution Caused by Emergencies. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. Vol. 2805. P. 74–86. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2805/paper6.pdf> (дата звернення: 01.02.2024).
36. Бублик М. Механізм регулювання техногенних збитків промислових підприємств: логістика рециркулювання як інструмент його застосування. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". "Логістика"*. 2012. № 749, С. 530–537. URL: <https://vlp.com.ua/taxonomy/term/3273> (дата звернення: 01.02.2024).

37. Bubyk M. Economic evaluation of technogenic losses of business entities on fuzzy logic based opportunities. *Zarządzanie organizacją w warunkach niepewności teoria i praktyka*. 2013. P. 19–29. URL: <https://www.ibuk.pl/fiszka/76/zarzadzanie-w-warunkach-niepewnosci.html> (дата звернення: 01.02.2024).
38. Jonek-Kowalska I. Housing infrastructure as a determinant of quality of life in selected polish smart cities. *Smart Cities*. 2022. Vol. 5. No 3. P. 924–946. DOI: <https://doi.org/10.3390/smartcities5030046>
39. Головне управління статистики у Львівській області. URL: https://ukrstat.gov.ua/csr_prezent/2.htm (дата звернення 01.02.2024).
40. Портал "Панель міста". URL: https://dashboard.city-adm.lviv.ua/perevezennya_pasazhyriv_miskym_transportom (дата звернення 01.02.2024).
41. Дія. Відкриті дані Центр компетенцій в сфері відкритих даних. URL: <https://data.gov.ua/organization/4218ee10-9c89-4e12-8df5-1734bdb4790e> (дата звернення 01.02.2024).
42. Показники роботи громадського транспорту. Набір даних. URL: <https://data.gov.ua/dataset/pokaznyky-roboty-hromadskoho-transportu> (дата звернення 01.02.2024).
43. Acosta F. Bogotá biarticulado de TransMilenio por la av. Caracas, 29 December 2023. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bogota1_biarticulado_de_TransMilenio_por_la_av._Caracas.JPG (дата звернення: 01.02.2024).
44. Transdev Australasia finalist in Global Sustainability Award, *Carbon footprint*. 2023. available at: <https://www.transdev.com/en/electro-mobility/> (дата звернення: 01.02.2024).
45. Murphy J. Truck Carbon Footprint Calculator: Choose Your Pickup's Year, Make, *Model Carbon Ecological Footprint Calculators*. 2023. URL: <https://8billiontrees.com/carbon-offsets-credits/carbon-ecological-footprint-calculators/truck-calculator/index.html> (дата звернення: 01.02.2024).
46. Dave P., Sahu L., Tripathi N., Bajaj S., Yadav R., Patel K. Emissions of non-methane volatile organic compounds from a landfill site in a major city of India: Impact on local air quality. *Heliyon*. 2020. Vol. 6. No 7. 4537 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04537>
47. Tiseo I. U.S. light-duty vehicle GHG emissions 1990-2019. *Statista*. 2021. Vol. 31. URL: <https://www.statista.com/statistics/1235094/us-light-duty-trucks-vehicle-ghg-emissions/> (дата звернення: 01.02.2024).
48. MotorTrend Staff. These are the most fuel-efficient Pickups you can buy. *MotorTrend*. 2021. Vol. 3. URL: <https://www.motortrend.com/features/most-fuel-efficient-pickup-trucks/> (дата звернення: 01.02.2024).
49. Wagner I. Light trucks in the U.S. – best-selling models 2020. *Statista*. 2021. Vol. 1. URL: <https://www.statista.com/statistics/204473/best-selling-trucks-in-the-united-states-from-january-to-october-2021/> (дата звернення: 01.02.2024).
50. Tiseo I. U.S. heavy-duty vehicle GHG emissions 1990-2019. *Statista*. 2021. Vol. 2. URL: <https://www.statista.com/statistics/1120519/us-med-heavy-trucks-vehicle-ghg-emissions/> (дата звернення: 01.02.2024).
51. Leung J. Federal Vehicle Standards, *Center for Climate and Energy Solutions*. 2021. Vol. 21. URL: <https://www.c2es.org/content/regulating-transportation-sector-carbon-emissions/> (дата звернення: 01.02.2024).
52. Zalzal P. The introduction of Ford's electric F-150 pickup truck is a big milestone in the race to zero-emission vehicles. *Climate*. 2021. Vol. 411. 202 p. URL: <https://blogs.edf.org/climate411/2021/05/17/the-introduction-of-fords-electric-f-150-pickup-truck-is-a-big-milestone-in-the-race-to-zero-emission-vehicles/> (дата звернення: 01.02.2024).
53. Taotao, D., John, D. Recent developments in bus rapid transit: a review of the literature. *Transport Reviews*. 2011. Vol. 31. No 1. P.69–96. DOI: <https://doi.org/10.1080/01441647.2010.492455>
54. Volvo Trucks USA. NFI begins piloting Volvo VNR electric heavy-duty trucks in Southern California. 2020. URL: <https://www.volvotrucks.us/news-and-stories/press-releases/2020/september/nfi-begins-piloting-volvo-vnr-electric-heavy-duty-trucks-in-southern-california/> (дата звернення: 01.02.2024).
55. The International Council on Clean Transportation. *Fact sheet: Europe*. 2019. URL: https://theicct.org/sites/default/files/Gas_v_Diesel_CO2_emissions_EN_Fact_Sheet2019_05_07_0.pdf (дата звернення: 01.02.2024).
56. Schildgen B. Do diesel engines produce less CO2 than regular engines? *Sierra Club*. 2018. URL: <https://www.sierraclub.org/sierra/ask-mr-green/do-diesel-engines-produce-less-co2-regular-engines> (дата звернення: 01.02.2024).
57. Majumder H., Mahmudul K., Tao H., Wei X. Road crack avoidance: a convolutional neural network-based smart transportation system for intelligent vehicles. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2023. Vol. 2. No 1. P.122–132. DOI: <https://doi.org/10.1080/15472450.2023.2175613>
58. Asha A., Arunachalam R., Poonguzhali I., Urooj S., Alelyani S. Optimized RNN-based performance prediction of IoT and WSN-oriented smart city application using improved honey badger algorithm. *Measurement*, 2023. Vol. 210, 112505 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112505>
59. Jingqiu G., Yangzexi L., Qingyan Y., Yibing W., Shouen F. GPS-based citywide traffic congestion forecasting using CNN-RNN and C3D hybrid model. *Transportmetrica A Transport Science*. 2021. Vol. 17. No 2. P.190–211. DOI: <https://doi.org/10.1080/23249935.2020.1745927>

60. Kong J., Huang J., Yu H., Deng H., Gong J., Chen H. RNN-based default logic for route planning in urban environments. *Neurocomputing*. 2019. Vol. 338. P. 307–320. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.02.012>
61. Badu-Marfo G., Farooq B., Mensah D., Al Mallah R. An ensemble federated learning framework for privacy-by-design mobility behaviour inference in smart cities. *Sustainable Cities and Society*. 2023. Vol. 97. 104703 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104703>
62. Herath H., Mittal M. Adoption of artificial intelligence in smart cities: A comprehensive review. *International Journal of Information Management Data Insights*. 2022. Vol. 2. No 1. 100076 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijime.2022.100076>

References

1. Boreiko, O., Teslyuk, V. (2016), "Structural model of passenger counting and public transport tracking system of smart city", *Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, Proceedings of International Conference*, P. 124–126, DOI: <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH.2016.7507533>
2. Boreiko, O., Teslyuk, V. (2017), "Model of data collection controller of automated processing systems for passenger traffic public transport smart city based on petri nets", *2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies*, P. 62–65. DOI: <https://doi.org/10.1109/AIACT.2017.8020066>
3. Boz, Y., Cay, T. (2024), "How smart and sustainable are the cities in Turkiye? - National policies and the enthusiasm level of the local governments", *Heliyon*, 10(4), 26002 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26002>
4. Bublyk, M., Udovychenko T., Medvid R. (2019), "Concept of smart specialization in the context of the development of Ukraines economy". *Economics. Ecology. Socium*, 3 (2), P. 55–61. DOI: <https://doi.org/10.31520/2616-7107/2019.3.2-6>
5. Bublyk, M., Kowalska-Styczeń, A., Lytvyn, V., Vysotska, V. (2021), "The Ukrainian economy transformation into the circular based on fuzzy-logic cluster analysis", *Energies*, 14(18), 5951 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14185951>
6. Bushuyev, S., Inna, L., Alla, B., Alexander, L., Khusainova, M. (2023), "Creating urban transportation networks grounded in the principles of the smart port-city paradigm", *Procedia Computer Science*, 231, P. 323–328. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.12.211>
7. Wang, H., Wang, Y. (2024), "Smart Cities Net Zero Planning considering renewable energy landscape design in Digital Twin". *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 63, 103629 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103629>
8. Vanlı, T., Akan, T. (2023), "Mapping synergies and trade-offs between smart city dimensions: A network analysis". *Cities*, 142, 104527 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104527>
9. Wolniak, R., Jonek-Kowalska, I., (2021), "The level of the quality of life in the city and its monitoring", *Innovation: The European Journal of Social Science Research*, 34(3), P. 376–398. DOI: <https://doi.org/10.1080/13511610.2020.1828049>
10. Guenduez, A., Mergel, I., Schedler, K., Fuchs, S., Douillet, C. (2024), "Institutional work in smart cities: Interviews with smart city managers". *Urban Governance*. 2 (1), P. 104–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ugj.2024.01.003>
11. Dai, Y., Hasanefendic, S., Bossink, B. (2024), "A systematic literature review of the smart city transformation process: The role and interaction of stakeholders and technology", *Sustainable Cities and Society*, 101, 105112 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105112>
12. Jonek-Kowalska, I. (2022), "Towards the reduction of CO₂ emissions. paths of pro-ecological transformation of energy mixes in european countries with an above-average share of coal in energy consumption", *Resources Policy*, 77, 102701 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102701>
13. Kim, J. S., Feng, Y. (2024), "Understanding complex viewpoints in smart sustainable cities: The experience of Suzhou, China". *Cities*, 147, 104832 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.104832>
14. Koshtura, D., Bublyk, M., Matseliukh, Y., Dosyn, D., Chyrun, L., Lozynska, O., Karpov, I., Peleshchak, I., Maslak, M., Sachenko, O. (2020), "Analysis of the demand for bicycle use in a smart city based on machine learning", *CEUR workshop proceedings*, 2631, P. 172–183, available at: <https://ceur-ws.org/Vol-2631/paper13.pdf> (last accessed 01.02.2024).
15. Lytvyn, V., Bublyk, M., Vysotska, V., Matseliukh, Y. (2022), "Visual simulation technology for passenger flows in the public transport field at smart city", *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 4, P. 106–121. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-4-10>
16. Lim, Y., Edelenbos, J., Gianoli, A. (2023), "What is the impact of smart city development? Empirical evidence from a Smart City Impact Index", *Urban Governance*, 4, P. 104–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ugj.2023.11.003>
17. Lin, H., Wang, W., Zou, Y., Chen, H. (2023), "An evaluation model for smart grids in support of smart cities based on the Hierarchy of Needs Theory", *Global Energy Interconnection*, 6(5), P. 634–644. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2023.10.009>
18. Matseliukh, Y., Vysotska, V., Bublyk, M. (2020), "Intelligent system of visual simulation of passenger flows". *CEUR Workshop Proceedings*, 2604, P. 906–920, available at: <https://ceur-ws.org/Vol-2604/paper60.pdf> (last accessed 01.02.2024).

19. Nath, N., Nitanaï, R., Manabe, R., Murayama, A. (2023), "A global-scale review of smart city practice and research focusing on residential neighbourhoods", *Habitat International*, 142, P. 102963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2023.102963>
20. Nguyen, H., Nawara, D., Kashef, R. (2024), "Connecting the indispensable roles of IoT and artificial intelligence in smart cities: a survey", *Journal of Information and Intelligence*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jiixd.2024.01.003>
21. Podlesna, L., Bublyk, M., Grybyk, I., Matseliukh, Y., Burov, Y., Kravets, P., Lozynska, O., Karpov, I., Peleshchak, I., Peleshchak, R. (2020), "Optimization model of the buses number on the route based on queueing theory in a Smart City", *CEUR Workshop Proceedings*, 2631, P. 502–515 available at: <https://ceur-ws.org/Vol-2631/paper37.pdf> (last accessed 01.02.2024).
22. Sharifi, A., Allam, Z., Bibri, S., Khavarian-Garmsir, A. (2024), "Smart cities and sustainable development goals (SDGs): A systematic literature review of co-benefits and trade-offs", *Cities*, 146, 104659 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104659>
23. Shiu, S. (2024), "Ageing in a smart city poses concerns on sustainability from a model perspective", *Aging and Health Research*, 4(1), 100179 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ahr.2023.100179>
24. Spicer, Z., Goodman, N., Wolfe, D. A. (2023), "How "smart" are smart cities? Resident attitudes towards smart city design". *Cities*, 141, 104442 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104442>
25. Tang, J., Li, Y. (2024), "Study on the impact of smart energy on carbon emissions in smart cities from single and holistic perspectives – Empirical evidence from China", *Sustainable Cities and Society*, 101, 105145 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105145>
26. Chen, Y., Chen, S., Miao, J. (2023), "Does smart city pilot improve urban green economic efficiency: Accelerator or inhibitor", *Environmental Impact Assessment Review*, 104, 107328 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107328>
27. Chen, Z., Gan, W., Wu, J., Lin, H., Chen, C. (2023), "Metaverse for smart cities: A survey", *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 4, P. 203–216. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2023.12.002>
28. Chen, C., Li, S., Wang, L. (2024), "Can smart cities reduce labor misallocation? Evidence from China", *Technological Forecasting and Social Change*, 201, 123264 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123264>
29. Resolution of the United Nations General Assembly "Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development", dated September 25, 2015 No. 70/1 (Sustainable Development Goals (SDGs), United Nations General Assembly, 2015), available at: <https://sdgs.un.org/2030agenda> (last accessed 01.02.2024).
30. Decree of the President of Ukraine "Sustainable Development Strategy "Ukraine – 2020" (approved on January 12, 2015 No. 5/2015), available at: <https://www.president.gov.ua/documents/7222019-29825> (last accessed 01.02.2024).
31. Resolution (Order) of the Cabinet of Ministers of Ukraine "State strategy for regional development until 2020" (approved on August 6, 2014 No. 385), available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/686-2019-%D1%80#Text> (last accessed 01.02.2024).
32. "On the principles of state regional policy" (doc. 156-VIII dated February 5, 2015), available at: https://ukrstat.gov.ua/csr_prezent/2.htm (last accessed 01.02.2024).
33. Decree of the President of Ukraine "On the Sustainable Development Goals of Ukraine for the period until 2030" No. 722/2019, dated September 30, 2019, available at: <https://www.undp.org/ukraine/publications/sustainable-development-strategy-ukraine-2030> (last accessed 01.02.2024).
34. National report "Goals of Sustainable Development: Ukraine", available at: <https://www.undp.org/ukraine/publications/sustainable-development-goals-2017-baseline-national-report> (last accessed 01.02.2024).
35. Bublyk, M., Vysotska, V., Matseliukh, Yu., Mayik, V., & Nashkerska M. (2020), "Assessing Losses of Human Capital Due to Man-Made Pollution Caused by Emergencies", *CEUR Workshop Proceedings*, 2805, P. 74–86, available at: <https://ceur-ws.org/Vol-2805/paper6.pdf> (last accessed 01.02.2024).
36. Bublyk, M. (2012), "Mechanism to regulate the technogenic damage of industrial enterprises: recycling logistics as an instrument of its application", *Bulletin of Lviv Polytechnic National University, Logistics*, 749, P. 530–537, available at: <https://vlp.com.ua/taxonomy/term/3273> (last accessed 01.02.2024).
37. Bublyk, M. (2013), "Economic evaluation of technogenic losses of business entities on fuzzy logic based opportunities". *Zarządzanie organizacja w warunkach niepewności teoria i praktyka*. P. 19 – 29, available at: <https://www.ibuk.pl/fizyka/76/zarzadzanie-w-warunkach-niepewnosci.html> (last accessed 01.02.2024).
38. Jonek-Kowalska, I. (2022), "Housing Infrastructure as a Determinant of Quality of Life in Selected Polish Smart Cities". *Smart Cities*, 5(3), P. 924–946. DOI: <https://doi.org/10.3390/smartsities5030046>
39. Main Department of Statistics in Lviv Region, available at: <https://www.lv.ukrstat.gov.ua/> (last accessed 01.02.2024).
40. "City Panel" portal, available at: https://dashboard.city-adm.lviv.ua/perevezennya_pasazhyriv_miskym_transportom (last accessed 01.02.2024).
41. Action. Open data Competence center in the field of open data, available at: <https://data.gov.ua/organization/4218ee10-9c89-4e12-8df5-1734bdb4790e> (last accessed 01.02.2024).

42. Performance indicators of public transport. Data set, available at: <https://data.gov.ua/dataset/pokaznyky-roboty-hromadskoho-transportu> (last accessed 01.02.2024).
43. Acosta, F., (2023), "Bogotá biarticulado de TransMilenio por la av. Caracas, 29 December 2013", available at: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BogotA1_biarticulado_de_TransMilenio_por_la_av._Caracas.JPG
44. Transdev Australasia finalist in Global Sustainability Award, (2023), *Carbon footprint*. available at: <https://www.transdev.com/en/electro-mobility/> (last accessed 01.02.2024).
45. Murphy J. (2023), "Truck Carbon Footprint Calculator: Choose Your Pickup's Year, Make", *Model Carbon Ecological Footprint Calculators*, available at: <https://8billiontrees.com/carbon-offsets-credits/carbon-ecological-footprint-calculators/truck-calculator/index.html> (last accessed 01.02.2024).
46. Dave, P., Sahu, L., Tripathi, N., Bajaj, S., Yadav, R., Patel, K. (2020), "Emissions of non-methane volatile organic compounds from a landfill site in a major city of India: Impact on local air quality", *Heliyon*, 6(7), P. e04537. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04537>
47. Tiseo, I. (2021), "U.S. light-duty vehicle GHG emissions 1990-2019", *Statista*, 31, available at: <https://www.statista.com/statistics/1235094/us-light-duty-trucks-vehicle-ghg-emissions/> (last accessed 01.02.2024).
48. MotorTrend Staff. (2021), "These are the most fuel-efficient Pickups you can buy", *MotorTrend*, 3, available at: <https://www.motortrend.com/features/most-fuel-efficient-pickup-trucks/> (last accessed 01.02.2024).
49. Wagner, I. (2021), "Light trucks in the U.S. – best-selling models 2020", *Statista*, 1, available at: <https://www.statista.com/statistics/204473/best-selling-trucks-in-the-united-states-from-january-to-october-2021/> (last accessed 01.02.2024).
50. Tiseo, I. (2021), "U.S. heavy-duty vehicle GHG emissions 1990-2019", *Statista*, 2, available at: <https://www.statista.com/statistics/1120519/us-med-heavy-trucks-vehicle-ghg-emissions/> (last accessed 01.02.2024).
51. Leung, J. (2021), "Federal Vehicle Standards", *Center for Climate and Energy Solutions*, 21, available at: <https://www.c2es.org/content/regulating-transportation-sector-carbon-emissions/> (last accessed 01.02.2024).
52. Zalzal, P. (2021), "The introduction of Ford's electric F-150 pickup truck is a big milestone in the race to zero-emission vehicles", *Climate*, 411, 202 p. available at: <https://blogs.edf.org/climate411/2021/05/17/the-introduction-of-fords-electric-f-150-pickup-truck-is-a-big-milestone-in-the-race-to-zero-emission-vehicles/> (last accessed 01.02.2024).
53. Taotao, D., John, D., (2011), "Recent developments in bus rapid transit: a review of the literature", *Transport Reviews*, 31 (1), P.69–96. DOI: [10.1080/01441647.2010.492455](https://doi.org/10.1080/01441647.2010.492455)
54. Volvo Trucks USA. (2020), NFI begins piloting Volvo VNR electric heavy-duty trucks in Southern California, available at: <https://www.volvotrucks.us/news-and-stories/press-releases/2020/september/nfi-begins-piloting-volvo-vnr-electric-heavy-duty-trucks-in-southern-california/> (last accessed 01.02.2024).
55. The International Council on Clean Transportation. (2019), *Fact sheet: Europe*, available at: https://theicct.org/sites/default/files/Gas_v_Diesel_CO2_emissions_EN_Fact_Sheet2019_05_07_0.pdf (last accessed 01.02.2024).
56. Schildgen, B. (2018). "Do diesel engines produce less CO₂ than regular engines?" *Sierra Club*, available at: <https://www.sierraclub.org/sierra/ask-mr-green/do-diesel-engines-produce-less-co2-regular-engines> (last accessed 01.02.2024).
57. Majumder, H., Mahmudul, K., Tao, H., Wei, X., (2023), "Road crack avoidance: a convolutional neural network-based smart transportation system for intelligent vehicles", *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2 (1), P.122–132. DOI: <https://doi.org/10.1080/15472450.2023.2175613>
58. Asha, A., Arunachalam, R., Poonguzhali, I., Urooj, S., Alelyani, S. (2023), "Optimized RNN-based performance prediction of IoT and WSN-oriented smart city application using improved honey badger algorithm", *Measurement*, 210, 112505 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112505>
59. Jingqiu, G., Yangzexi, L., Qingyan, Y., Yibing, W., Shouen, F., (2021), "GPS-based citywide traffic congestion forecasting using CNN-RNN and C3D hybrid model", *Transportmetrica A Transport Science*, 17 (2), P. 190–211. DOI: <https://doi.org/10.1080/23249935.2020.1745927>.
60. Kong, J., Huang, J., Yu, H., Deng, H., Gong, J., Chen, H. (2019), "RNN-based default logic for route planning in urban environments", *Neurocomputing*, 338, P. 307–320. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.02.012>
61. Badu-Marfo, G., Farooq, B., Mensah, D. O., Al Mallah, R. (2023), "An ensemble federated learning framework for privacy-by-design mobility behaviour inference in smart cities", *Sustainable Cities and Society*, 97, 104703 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104703>
62. Herath, H., Mittal, M. (2022), "Adoption of artificial intelligence in smart cities: A comprehensive review", *International Journal of Information Management Data Insights*, 2(1), 100076 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijime.2022.100076>

Відомості про авторів / About the Authors

Мацелюх Юрій Романович – Національний університет "Львівська політехніка", аспірант кафедри інформаційних систем та мереж, Львів, Україна; e-mail: indeed.post@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1721-7703>

Литвин Василь Володимирович – доктор технічних наук, професор, Національний університет "Львівська політехніка", завідувач кафедри інформаційних систем та мереж, Львів, Україна; e-mail: vasy1.v.lytvyn@lpnu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9676-0180>

Matseliukh Yurii – Lviv Polytechnic National University, PhD Student of Information Systems and Networks Department, Lviv, Ukraine.

Lytvyn Vasyl – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Lviv Polytechnic National University, Head of Information Systems and Networks Department, Lviv, Ukraine.

ANALYSIS OF PASSENGER TRANSPORTATION AND THE PUBLIC TRANSPORTATION IMPACT ON THE REDUCTION IN A SMART CITY

The state of atmospheric pollution is determined by the growth of the population, the amount of transport and the generated volumes of emissions. **The object** is the process of analyzing passenger transportation in the city. **The subject** is passenger transport analysis methods. **Purpose:** analysis of passenger transportation and approaches to optimization of public transport based on the concept of a smart city. **Tasks:** analysis of passenger transportation, classification of existing conceptual approaches to optimization of public transport with low carbon emissions, systematization of existing methods, means and types of neural networks in smart cities, analysis of successful implementation projects. **Methods** of statistical analysis, linear and non-linear interpolation, logical generalization, comparison, grouping, analysis and synthesis. **Results:** the analysis of passenger transportation in the city revealed that statistical data sets indicate a decrease in the main indicators of passenger traffic and an increase in the volume of emissions of carbon-containing compounds. The classification of existing approaches to the optimization of public transport is carried out according to the priority of public transport, hybridization and electrification of vehicles and the implementation of IT monitoring. During the systematization of methods and means in smart cities, the following are highlighted: smart transport systems; electric vehicles; transport sharing networks; smart applications and information systems; innovative payment systems; unmanned vehicles; information boards and announcement systems; networks of bicycle paths and equipped sidewalks; environmental monitoring systems. Among neural networks, recurrent, convolutional, and deep neural networks have been proposed as those that contribute to route optimization and traffic prediction. **Conclusions:** the statistical analysis of passenger transportation established that reducing carbon dioxide emissions is an unresolved task for both public transport and the transportation system. It is proposed to include methods and means that optimize public transport, reducing the carbon footprint of the initiatives of implementing the concept of a smart city, which are successful all over the world. It is proposed to use recurrent, convolutional and deep neural networks to optimize passenger transportation in smart cities.

Keywords: passenger carriage; smart city; low-carbon emissions; system analysis; analysis methods.

Бібліографічні опису / Bibliographic descriptions

Мацелюх Ю. Р., Литвин В. В. Аналіз пасажирських перевезень та вплив громадського транспорту на скорочення викидів вуглецю в розумному місті. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 1 (27). С. 109–127. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.109>

Matseliukh, Y., Lytvyn, V. (2024), "Analysis of passenger transportation and the public transportation impact on the reduction in a smart city", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (27), P. 109–127. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.109>