

УДК 656.1:711.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.2/50>**Чижик В.М.**<https://orcid.org/0000-0003-0518-5246>

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Козак Р.<https://orcid.org/0009-0001-4025-2304>

«Lifeway Food»

Швець М.Д.<https://orcid.org/0000-0003-1445-5199>

Національний університет водного господарства та природокористування

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МАРШРУТНИХ МЕРЕЖ МІСТ

У статті здійснено наукове осмислення сучасних підходів і методичних інструментаріїв оцінювання ефективності функціонування маршрутних мереж міського транспорту в умовах прискореної урбанізації, зростання інтенсивності мобільності населення та актуалізації вимог до якості транспортно-обслуговування. Узагальнено й проаналізовано провідні наукові підходи до формування системи критеріїв і показників результативності міських транспортних систем, у межах яких акцентовано на таких параметрах, як рівень транспортної доступності, регулярність і надійність перевізного процесу, ступінь використання провізної спроможності рухомого складу, економічна обґрунтованість функціонування маршрутів, екологічна безпечність транспортної діяльності, а також індикатори задоволеності пасажирів якістю транспортних послуг. Окреслено можливості застосування кількісних і якісних методів дослідження, зокрема статистичного аналізу, соціологічних опитувань, експертного оцінювання, а також використання геоінформаційних систем, транспортного моделювання, аналізу великих масивів цифрових даних (GPS-трекінг, електронні квитки, мобільні додатки) для комплексного моніторингу стану та оптимізації маршрутних мереж. Наголошено, що результативна процедура оцінювання можлива лише за умови інтеграції техніко-економічних, соціальних, просторово-планувальних і екологічних параметрів, що забезпечує формування комплексного та об'єктивного уявлення про функціонування системи міського транспорту. З'ясовано, що впровадження комплексного підходу до оцінки ефективності маршрутних мереж сприяє підвищенню якості транспортних послуг, раціоналізації управлінських рішень і сталому розвитку міської транспортної системи. Отримані результати можуть бути імplementовані в практичну діяльність органів місцевого самоврядування, а також використані фахівцями у сфері урбаністики, транспортного менеджменту та інфраструктурного розвитку з метою оптимізації системи пасажирських перевезень і підвищення рівня транспортної доступності та комфорту населення.

Ключові слова: міський транспорт, пасажиропотоки, транспортна інфраструктура, доступність перевезень, мобільність населення, показники якості послуг, оптимізація перевезень, транспортне планування, сталий розвиток, моделювання перевезень.

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку систем міського транспорту характеризується динамічним зростанням мобільності населення, ускладненням структури транспортних потоків, а також суттєвим підвищенням вимог суспільства до якості, надійності та безпеки транспортно-обслуговування. Урбанізаційні процеси, зрос-

тання щільності забудови та концентрації ділової активності зумовлюють підвищене навантаження на міську транспортну інфраструктуру, що актуалізує потребу в раціональній організації маршрутних мереж і оптимізації їх функціонування.

Ефективність функціонування маршрутних мереж міського пасажирського транспорту



є визначальним детермінантом соціально-економічного розвитку територіальних утворень, оскільки безпосередньо корелює з рівнем просторової доступності робочих місць, освітніх і медичних послуг, інтенсивністю ділової активності населення, а також формуванням інвестиційної привабливості міста загалом. Крім цього, стан та якість організації транспортних перевезень мають істотний вплив на екологічну ситуацію в міському середовищі, рівень шумового та атмосферного забруднення, а також на загальний рівень комфортності й безпеки проживання міського населення.

Водночас аналіз наукових досліджень і практики управління міським транспортом свідчить про те, що наявні підходи до оцінювання ефективності маршрутних мереж у багатьох випадках мають фрагментарний характер. Вони здебільшого орієнтовані на окремі групи показників, зокрема економічні, техніко-експлуатаційні або організаційні, без урахування системної взаємодії всіх елементів транспортної інфраструктури. Такий підхід не дозволяє повністю відобразити комплексний характер функціонування міських транспортних систем і обмежує можливості для формування обґрунтованих управлінських рішень.

З огляду на зазначене, актуалізується потреба в розробленні, удосконаленні та систематизації сучасних методик комплексного оцінювання ефективності функціонування маршрутних мереж міст. Використання науково обґрунтованих, інтегрованих підходів до оцінки дасть змогу підвищити якість стратегічного та оперативного управління розвитком міського транспорту, оптимізувати планування маршрутів, покращити якість транспортних послуг і, як наслідок, сприятиме сталому розвитку міських територій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях ефективність маршрутних мереж міст розглядається комплексно із застосуванням кількісних і якісних показників, технологій оброблення великих даних (далі – Big Data), мультикритеріальних підходів, а також з урахуванням екологічних і соціальних аспектів, принципів сталого розвитку та концепції «розумного міста». Зокрема, А. Кашканов та О. Пальчевський наголошують, що підвищення ефективності міських маршрутних мереж потребує комплексного врахування інфраструктурного навантаження, безпеки та екологічних вимог, інвестицій у модернізацію транспортної системи й застосування науково обґрунтованих методик

оцінювання, оскільки ігнорування цих чинників ускладнює експлуатацію та не відповідає потребам урбанізованого суспільства [1].

Ґрунтовний аналітичний огляд стратегій формування міських пасажирських маршрутних мереж з урахуванням просторових, соціально-економічних і організаційних чинників здійснюють С. Сахно, Є. Любий, О. Колій. Дослідники обґрунтовують модернізацію підходів до проектування маршрутної мережі з акцентом на підвищення якості транспортного обслуговування [2].

Науковці С. Чуйко та В. Шумляківський на основі емпіричних досліджень подають комплексну характеристику маршрутної мережі міста, аналізують підходи до підвищення якості транспортного обслуговування, систематизують показники та виявляють недоліки традиційних моделей її організації. Автори також обґрунтовують технічні рішення з удосконалення транспортної системи на основі розрахунку показників ефективності маршрутної мережі [3].

Науковці Д. Захаров та О. Палант систематизують засади управління міським громадським транспортом, визначають його роль у забезпеченні мобільності та конкурентоспроможності міст, а також пропонують методіку оцінювання ефективності транспортних систем, акцентуючи на проблемах українських реалій [4].

Дослідники В. Вдовиченко, О. Черепеха та Д. Великодний обґрунтовують науково-технологічні засади підвищення результативності функціонування транспортно-пересадочних вузлів у системі міського пасажирського транспорту, зокрема через упровадження адаптаційної моделі управління взаємодією учасників маршрутного процесу, спрямованої на підвищення якості обслуговування, оптимізацію ресурсів і зниження конфліктності руху [5].

Методіку аналізу топологічної структури міських транспортних мереж на основі параметрів вузлів, центральності та кластеризації, що дає змогу ідентифікувати вузькі місця мережі, основні транспортні артерії та оцінити їхню роль у забезпеченні мобільності населення, розробляють Г.-Л. Цзя (G.-L. Jia), Р.-Г. Ма (R.-G. Ma), Ж.-Х. Ху (Z.-H. Hu) [6].

На зростанні ролі Big Data й теорії складних мереж в оцінюванні ефективності маршрутних систем, зокрема на основі даних смарткарт, наголошують Л. Сун (L. Sun), Н. Ашрафі (N. Ashrafi) та М. Пішгар (M. Pishgar), підкреслюючи проблеми сегментації користувачів у зашумлених масивах даних [7].

Науковець Л. Ван та колеги (L. Wang et al.) пропонують кількісний підхід до оцінювання ефективності міської транспортної мережі на основі теорії тіньової ефективності та концепції «подвійного штрафу за час», ефективність якого підтверджено методом DEA, та обґрунтовують доцільність комбінованих стратегій оптимізації маршрутних мереж [8].

Аналіз наукових джерел засвідчує, що попри істотні напрацювання у сфері формування підходів і методичного інструментарію оцінювання ефективності функціонування міських маршрутних мереж, окреслена проблематика й надалі зберігає актуальність і дискусійний характер. Переважна більшість наявних методик орієнтована на оцінку окремих груп показників (економічних, техніко-експлуатаційних або соціальних), що унеможливує отримання цілісного уявлення про результативність функціонування транспортної системи загалом. У цьому контексті актуалізується необхідність розроблення комплексних, інтегрованих підходів до оцінювання, які б поєднували кількісні та якісні критерії, враховували інтереси основних стейкхолдерів та специфіку розвитку міського простору.

Постановка завдання. Метою статті є комплексне дослідження сучасних підходів (методик) до оцінки ефективності функціонування маршрутних мереж міст, а також обґрунтування можливостей їх удосконалення з урахуванням потреб населення, вимог сталого розвитку та цифровізації транспортних систем.

Відповідно до мети сформульовано такі завдання:

1) проаналізувати сучасні методики оцінки ефективності маршрутних мереж міст з урахуванням кількісних і якісних показників;

2) дослідити роль цифрових технологій (GIS, Big Data, інтелектуальні транспортні системи (далі – ITS), мобільні сервіси) у підвищенні ефективності транспортної аналітики та оптимізації маршрутних мереж;

3) визначити обмеження й ризики впровадження цифрових рішень і запропонувати напрями їх інтеграції для підвищення якості транспортного обслуговування та управління міською мобільністю.

Виклад основного матеріалу. У сучасних умовах інтенсивної урбанізації, зростання масштабів міських агломерацій та підвищення рівня мобільності населення ефективне функціонування маршрутних мереж міського транспорту набуває не лише практичної, а й стратегічної зна-

чущості. Від якості організації транспортного обслуговування безпосередньо залежать доступність робочих місць, освітніх і соціальних послуг, рівень соціальної інтеграції населення, а також екологічний стан міського середовища. У зв'язку з цим гарантування доступності, надійності, безпечності та належного рівня якості транспортних послуг визначається як базова умова забезпечення сталого розвитку урбанізованих територій і підвищення рівня життя міського населення.

У цьому контексті суттєво зростає потреба у впровадженні науково обґрунтованих підходів і сучасних методик оцінювання ефективності функціонування маршрутних мереж, які мають ґрунтуватися на комплексному аналізі показників транспортної роботи, пасажиропотоків, часових витрат, економічної доцільності, екологічних наслідків та рівня задоволеності користувачів. Їх використання забезпечує не тільки об'єктивну діагностику поточного стану транспортної системи, а й дозволяє оперативно ідентифікувати структурні дисбаланси, критичні сегменти та управлінські рішення з низькою результативністю, а також науково обґрунтовувати напрями подальшого вдосконалення, оптимізації й модернізації її функціонування. З огляду на це, аналіз і узагальнення сучасних підходів до оцінки ефективності функціонування маршрутних мереж міст є важливою частиною теоретико-методологічної бази дослідження та логічним підґрунтям для формування практичних рекомендацій [9].

Наявні показники й критерії оцінювання ефективності транспортних мереж доцільно використовувати як методологічну основу комплексного аналізу функціонування міського громадського транспорту. Такий підхід дозволяє не лише систематизувати різноманітні параметри діяльності транспортної системи, а й забезпечує можливість їхнього порівняльного аналізу та використання в процесі обґрунтування управлінських рішень, оскільки ефективність маршрутних мереж традиційно оцінюється за сукупністю техніко-експлуатаційних, соціально-економічних та організаційно-управлінських показників, що відображають різні аспекти функціонування транспортної інфраструктури.

До основних кількісних показників, які найчастіше застосовуються в практиці транспортного планування, належать щільність маршрутної мережі, рівень транспортної доступності територій, середня експлуатаційна швидкість руху, інтервали між рухом транспортних засобів, коефіцієнт використання пасажиромісткості, регуляр-

ність перевезень, стабільність дотримання розкладів, а також обсяги пасажиропотоків. Зазначені показники дозволяють об'єктивно оцінити рівень організації перевізного процесу, ефективність використання ресурсів та відповідність мережі потребам населення [10, с. 185].

Водночас у межах сучасних наукових підходів усе більшої актуальності набувають якісні критерії оцінювання ефективності транспортного обслуговування, зокрема рівень комфортності транспортних переміщень, безпекові характеристики пасажирських перевезень, надійність функціонування маршрутної мережі, ступінь задоволеності споживачів транспортних послуг, показники доступності для маломобільних груп населення, а також екологічні критерії діяльності транспортної системи. Урахування цих критеріїв дає змогу перейти від суто техніко-економічного бачення ефективності до більш людиноцентрованого підходу, орієнтованого на потреби громади та принципи сталого розвитку міського середовища.

Отже, типізація наявних показників і критеріїв дає підстави стверджувати, що найбільш аргументованою є комплексна оцінка ефективності маршрутних мереж, яка інтегрує кількісні і якісні характеристики в єдину аналітичну систему. Такий підхід узгоджується з сучасними методиками дослідження транспортних систем, забезпечує цілісне бачення реального стану функціонування громадського транспорту та формує наукове підґрунтя для розроблення дієвих стратегій розвитку міської транспортної інфраструктури.

Умови цифрової трансформації міської інфраструктури об'єктивно зумовлюють потребу в ґрунтовному переосмисленні традиційних підходів до оцінювання ефективності функціонування маршрутних мереж міського пасажирського транспорту. Сучасні міста характеризуються стрімким зростанням мобільності населення, ускладненням просторово-часової структури транспортних потоків, підвищенням очікувань пасажирів щодо якості, надійності та доступності транспортних послуг, а також орієнтацією на імплементацію принципів сталого розвитку, що передбачають збалансування соціальних, економічних і екологічних складників транспортної політики. У таких умовах застосування виключно класичних методів аналізу та планування маршрутних мереж уже не забезпечує необхідної повноти й достовірності оцінювання [11, с. 239].

Актуалізується потреба у впровадженні сучасних цифрових інструментів і технологічних рішень, що забезпечують можливість

здійснення високоточного, комплексного та динамічного аналізу транспортних процесів, прогнозування їхньої еволюції та оперативної корекції управлінських рішень. Зокрема, геоінформаційні системи (далі – GIS) створюють умови для просторового моделювання параметрів транспортної мережі, візуалізації потоків пасажирів і проведення аналізу територіальної доступності транспортних послуг.

Технології Big Data уможливають опрацювання значних масивів інформації, отриманої з валідаторів, мобільних пристроїв, GPS-трекерів і сенсорних систем, що розширює аналітичний потенціал досліджень і дає змогу виявляти латентні закономірності в транспортній поведінці користувачів. ITS є інструментом підвищення ефективності управління дорожнім рухом, оптимізації маршрутної мережі та мінімізації перевантаження елементів транспортної інфраструктури. Водночас мобільні сервіси моніторингу транспортної мобільності забезпечують розширення механізмів зворотного зв'язку з пасажиром та формують підґрунтя для клієнтоорієнтованої трансформації міських транспортних систем.

GIS-технології є одним із найбільш результативних і методологічно обґрунтованих інструментів просторово-аналітичного дослідження транспортної інфраструктури та організації міських маршрутних мереж. Їх застосування забезпечує інтеграцію різномірних просторових і статистичних даних у єдине інформаційно-аналітичне середовище, що дозволяє здійснювати багатфакторне моделювання функціонування транспортної системи з урахуванням територіально-планувальної структури міста, інтенсивності та типу забудови, просторового розміщення об'єктів соціальної інфраструктури, а також соціально-демографічних характеристик населення [12, с. 1801].

Застосування GIS-технологій у сфері транспортних досліджень забезпечує розширені аналітичні можливості для здійснення комплексної оцінки транспортної доступності територій шляхом використання ізохронного та ізодистантного моделювання, а також дає змогу ідентифікувати зони транспортної дискримінації й території з недостатнім рівнем транспортного забезпечення. За допомогою інструментів мережевого аналізу (network analysis) стає можливим виявлення надмірного дублювання маршрутів, нераціональної конфігурації транспортної мережі, а також «білих плям» у покритті міського простору громадським транспортом. Окрім цього, GIS дозволяють здійснювати імітаційне моделювання пасажиропо-

токів, аналіз пропускної спроможності окремих ділянок мережі, оцінювання рівня транспортного навантаження та формування сценаріїв розвитку транспортної системи [13, с. 612].

Важливою перевагою GIS є можливість прогнозування наслідків управлінських рішень, зокрема зміни конфігурації маршрутів, розміщення зупинок, упровадження нових транспортних ліній або оптимізації інтервалів руху. Картографічне подання результатів аналізу у формі тематичних карт, аналітичних діаграм та інтерактивних просторових моделей істотно підвищує аналітичну інформативність і рівень інтерпретації даних, а також забезпечує науково обґрунтоване прогнозування розвитку транспортної інфраструктури та оптимізацію процесів ухвалення управлінських рішень у сфері міської мобільності.

Роль технологій Big Data у підвищенні точності оцінювання ефективності функціонування маршрутних мереж є визначальною в умовах цифровізації міських транспортних систем. Сучасні інструменти збору, зберігання та аналітичної обробки великих масивів даних забезпечують формування репрезентативної, об'єктивної та динамічної інформаційно-аналітичної бази для моніторингу й оцінювання результативності роботи громадського транспорту [14].

На відміну від традиційних методів отримання емпіричної інформації (анкетні опитування, вибіркові натурні обстеження пасажиропотоків, ручні підрахунки), використання Big Data-орієнтованих підходів дає змогу здійснювати безперервний збір і обробку даних у режимі, наближеному до реального часу, що істотно підвищує рівень точності, актуальності та достовірності результатів оцінювання.

Основними джерелами великих даних у транспортному плануванні є дані GPS/GLONASS-моніторингу рухомого складу, агреговані знеособлені дані мобільних операторів щодо просторово-часової мобільності населення, інформація автоматизованих систем оплати проїзду (електронні квитки, валідатори), дані ITS, зокрема сенсорів транспортних потоків, детекторів трафіку та систем відеоаналітики. Комплексна інтеграція та багатовимірний аналіз зазначених масивів даних у межах єдиної інформаційної платформи дозволяє з високим рівнем деталізації оцінювати реальні параметри пасажиропотоків, середню експлуатаційну швидкість, часові інтервали руху, надійність дотримання розкладу, показники доступності та якості транспортного обслуговування [15, с. 354].

Окрім того, використання методів інтелектуального аналізу даних (далі – Data Mining), алгоритмів машинного навчання та інструментів предиктивної аналітики формує науково-методичні передумови для ідентифікації прихованих закономірностей транспортної поведінки населення, здійснення прогнозування попиту на пасажирські перевезення та обґрунтованої оптимізації параметрів маршрутної мережі з урахуванням концептуальних засад сталого розвитку міських територій.

Упровадження ITS розглядається як один із базових детермінантів модернізації міської транспортної інфраструктури та оптимізації показників результативності функціонування маршрутних мереж. ITS забезпечують інтегрований автоматизований збір, передачу, зберігання та аналітичну обробку великих масивів даних про параметри транспортних потоків і стан дорожнього середовища, що створює підґрунтя для безперервного оперативного моніторингу та науково обґрунтованого управління процесами перевезень.

Використання технологічного інструментарію ITS, зокрема систем GPS/GLONASS-моніторингу, відеоаналітики, сенсорних детекторів трафіку, автоматизованих систем диспетчерського управління та адаптивних систем світлофорного регулювання, дає змогу здійснювати ідентифікацію та прогнозування перевантажень вулично-дорожньої мережі, моделювання сценаріїв розвитку транспортної ситуації, а також динамічну оптимізацію маршрутів руху транспортних засобів. Застосування таких рішень сприяє підвищенню регулярності та надійності роботи громадського транспорту, скороченню середньої тривалості поїздок, мінімізації часових втрат пасажирів і зниженню рівня транспортних затримок [16, с. 68].

У контексті оцінювання ефективності функціонування маршрутних мереж упровадження ITS забезпечує перехід від переважно статичних показників (планові інтервали руху, середні швидкості, нормативні коефіцієнти) до системи динамічних індикаторів, що формуються в режимі реального часу та більш об'єктивно відображають фактичний рівень якості транспортного обслуговування населення і результативність управлінських рішень.

Одним з основних векторів цифрової трансформації транспортної сфери є розвиток мобільних застосунків та інтегрованих онлайн-платформ, що забезпечують багатоканальну комунікацію між перевізниками, органами публічного управління та споживачами транспортних послуг. Зазначені цифрові інструменти є елементами

ITS і формують інформаційно-аналітичне середовище для підтримки управлінських рішень у сфері міської мобільності. Їх функціональність охоплює механізми оперативного інформування, персоналізованої взаємодії з користувачами, а також інструменти збору й обробки структурованого та неструктурованого зворотного зв'язку [17, с. 1351].

Використання мобільних сервісів забезпечує систематичне акумулювання даних щодо рівня задоволеності пасажирів якістю транспортного обслуговування, доступності та зручності маршрутів, дотримання розкладів руху, комфортності поїздок, а також ідентифікацію проблемних аспектів функціонування маршрутної мережі. Отримані дані можуть розглядатися як важливий елемент клієнтської аналітики (customer analytics), що дозволяє підвищити обґрунтованість управлінських рішень у сфері організації пасажирських перевезень.

Аналітична обробка масивів даних, згенерованих користувачами через мобільні застосунки, надає можливість здійснювати поглиблене дослідження транспортної поведінки населення, моделювати попит на перевезення, визначати просторово-часові характеристики мобільності, виявляти години пікового навантаження та найбільш інтенсивні напрямки переміщення. На цій основі формується система клієнтоорієнтованих індикаторів ефективності функціонування маршрутної мережі, що дозволяє перейти від формально-нормативного підходу до оцінювання якості транспортного обслуговування до підходу, зорієнтованого на реальні потреби, очікування та досвід користувачів. Така трансформація зумовлює зростання соціальної ефективності функціонування транспортних систем і забезпечує їх більшу відповідність концептуальним засадам сталого розвитку міської мобільності [18, с. 215].

Узагальнення аналітичних можливостей GIS, технологій аналізу Big Data, ITS та мобільних цифрових сервісів свідчить про доцільність їх комплексної інтеграції в межах єдиної інформаційно-аналітичної платформи оцінювання ефективності функціонування маршрутних мереж міст. Поєднання зазначених інструментів забезпечує формування багатовимірної моделі дослідження транспортних процесів, яка охоплює просторові, часові, соціально-демографічні, поведінкові та операційно-експлуатаційні характеристики міської мобільності.

Застосування цифрових технологій у процедурі оцінювання забезпечує підвищення об'єктивності,

валідності та наукової релевантності отриманих результатів, оскільки ґрунтується на аналітичній обробці значних обсягів емпіричних даних у режимі реального часу. Використання інструментарію Data Mining, методів прогнозного моделювання та сценарного прогнозування формує методологічне підґрунтя для науково обґрунтованого передбачення тенденцій розвитку транспортних систем, оптимізації параметрів маршрутних мереж, а також підвищення ефективності систем підтримки прийняття управлінських рішень у контексті сталого розвитку міської транспортної інфраструктури та управління міською мобільністю.

Отже, сучасні цифрові технології мають значний потенціал у сфері оцінювання ефективності функціонування маршрутних мереж міст. Їх застосування дозволяє не лише вдосконалити методичні підходи до аналізу, а й забезпечити перехід до більш гнучкої, адаптивної та клієнтоорієнтованої системи управління міським транспортом. В умовах цифровізації міської інфраструктури впровадження таких інструментів є не лише доцільним, а й необхідним напрямом розвитку сучасних транспортних систем.

Цифрові технології дедалі інтенсивніше імплементуються в транспортні системи, трансформуючи підходи до збору, обробки та інтерпретації даних щодо транспортних потоків і показників якості транспортного обслуговування населення. Застосування цифрових інструментів – від телематичних систем і GPS-моніторингу до технологій Big Data та штучного інтелекту – формує нові можливості для оптимізації транспортних процесів і підвищення обґрунтованості управлінських рішень у режимі реального часу. Основні цифрові інструменти транспортного аналізу наведено в табл. 1.

У сукупності зазначені цифрові інструменти формують технологічну основу цифрової транспортної інфраструктури та сприяють переходу до data-driven – підходу в управлінні транспортними системами, що забезпечує більш точний аналіз транспортних потоків, підвищення якості транспортного обслуговування населення та сталий розвиток міських територій.

Використання цифрових технологій у сфері транспорту надає можливість безперервного моніторингу транспортних потоків у режимі реального часу (real-time monitoring). Це досягається завдяки застосуванню сенсорних мереж, GPS-навігації, систем автоматизованого збору даних та платформ ITS. Отримана оперативна інформація дає змогу впроваджувати механізми адаптивного

Основні цифрові інструменти транспортного аналізу

Цифровий інструмент	Сутність	Основні можливості в транспортному аналізі
Інтелектуальні транспортні системи (ITS)	Комплекс цифрових технологій управління та координації транспортних процесів у реальному часі	Збір і аналіз даних про транспортні потоки, оптимізація режимів руху, прогнозування заторів, оцінювання рівня безпеки та впливу транспорту на довкілля
GPS/GNSS і телематичні технології	Технології високоточного позиціонування та передавання даних про рух об'єктів	Відстеження транспорту в реальному часі, збір експлуатаційних показників, диспетчеризація, оптимізація маршрутів
Big Data та інтелектуальна аналітика	Обробка великих масивів транспортних даних із використанням ШІ та машинного навчання	Прогнозування попиту, моделювання розвитку мережі, оцінювання ефективності управлінських рішень
Інтернет речей (далі – IoT) у транспорті	Мережа сенсорів і пристроїв збору даних про стан транспортної системи	Моніторинг інтенсивності руху, швидкості, завантаженості інфраструктури, стану доріг і довкілля

Джерело: створено авторами

управління транспортними процесами, зокрема динамічно коригувати маршрути руху, інтервали між рейсами та розклади залежно від поточної дорожньої ситуації. Такий підхід сприяє підвищенню пропускної здатності вулично-дорожньої мережі, зменшенню рівня заторів, скороченню часу очікування пасажирів та загальному підвищенню якості транспортного обслуговування населення [19, с. 178].

Інтеграція систем GPS-моніторингу, телематичних платформ та бортових діагностичних модулів (OBD) дозволяє суттєво підвищити ефективність функціонування транспортних систем. Урахування зібраних даних дає змогу оптимізувати маршрути руху транспортних засобів з огляду на реальне навантаження на дорожню мережу, скоротити експлуатаційні витрати, зокрема витрати пального, та впровадити концепцію предиктивного технічного обслуговування (predictive maintenance) на основі прогнозування технічного стану рухомого складу.

Таким чином, у сукупності це забезпечує підвищення надійності транспортних перевезень, економічної доцільності їх організації та раціональне використання ресурсів.

Використання технологій Big Data та алгоритмів штучного інтелекту (Artificial Intelligence, зокрема Machine Learning) у транспортній сфері забезпечує якісно новий рівень інтегрованого аналізу мобільності населення. Опрацювання великих обсягів даних, отриманих із мобільних пристроїв, систем електронного квитка, GPS-моніторингу, інструментів відеоаналітики та сенсорної інфраструктури, дає змогу ідентифікувати латентні закономірності у структурі транспортних потоків,

здійснювати імітаційне моделювання динаміки їх розвитку та прогнозувати пікові навантаження на транспортну систему. Застосування таких аналітичних підходів формує підґрунтя для прийняття науково верифікованих управлінських рішень у галузі транспортного планування, оптимізації маршрутних мереж, а також сприяє підвищенню рівня доступності, ефективності та якості транспортних послуг [20].

Цифрові технології мають важливе значення для забезпечення безпеки дорожнього руху та оптимізації якості транспортних послуг. Застосування систем моніторингу поведінкових параметрів водіїв (driver behavior monitoring), контролю технічного стану транспортних засобів, а також інтелектуального аналізу дорожньої ситуації в режимі реального часу надає можливість оперативної ідентифікації потенційних ризиків. Використання засобів відеоаналітики, систем запобігання зіткненням, автоматизованого контролю швидкісного режиму та інших компонентів ITS сприяє зниженню рівня аварійності й формуванню безпечнішого та більш керованого транспортного середовища. Отже, імплементація цифрових технологій у сферу транспорту не лише оптимізує показники ефективності функціонування транспортних систем, а й детермінує підвищення рівня довіри пасажирів та інтегральних показників якості надання транспортних послуг.

Ефективність упровадження цифрових технологій у транспортній галузі зумовлюється наявністю розвинутого комплексу матеріально-технічного забезпечення та спеціалізованої інфраструктури. Цифрова трансформація транспортних систем передбачає насамперед функці-

онування високошвидкісних телекомунікаційних мереж (зокрема стандартів 4G/5G та волоконно-оптичних ліній зв'язку), які гарантують надійну й безперервну передачу значних масивів даних у режимі реального часу. Важливим складником є також потужні обчислювальні ресурси, представлені серверною інфраструктурою, хмарними обчислювальними середовищами, платформами аналізу Big Data та засобами штучного інтелекту. Суттєвого значення набуває інтеграція фізичної та цифрової інфраструктури, що охоплює сенсорні мережі, пристрої IoT, інтелектуальні транспортні системи й автоматизовані центри управління транспортними потоками [10, с. 186].

Водночас у значній кількості країн і регіонів, зокрема з перехідною економікою, експлуатація морально й фізично зношених інженерно-технічних комунікацій, обмежена пропускна спроможність телекомунікаційних мереж, а також дискретний і несистемний характер розвитку цифрової інфраструктури істотно стримують масштабування та інтеграцію сучасних цифрових рішень у сфері управління рухом і зумовлюють зниження їх прикладної результативності.

Зростання масштабів цифровізації транспорту супроводжується інтенсифікацією процесів збору, зберігання та обробки великих масивів даних, зокрема персональної інформації користувачів, геолокаційних даних, параметрів руху транспортних засобів і показників функціонування інфраструктури. Це об'єктивно підвищує рівень кіберризиків, пов'язаних із можливістю несанкціонованого доступу, витоку інформації, кібератак на критично важливі об'єкти транспортної системи та втручання в процеси управління рухом. У зв'язку з цим питання забезпечення інформаційної безпеки, кіберстійкості (cyber resilience), конфіденційності та цілісності даних набувають статусу пріоритетних завдань у межах розроблення й експлуатації цифрових транспортних платформ.

Одним із суттєвих стримувальних чинників цифрової трансформації транспортної галузі є її висока вартість. Упровадження інтелектуальних транспортних систем, автоматизованих систем керування транспортними потоками, цифрових пасажирських сервісів і аналітичних інформаційних платформ зумовлює суттєві фінансові витрати. Вони пов'язані з модернізацією матеріально-технічної інфраструктури, придбанням спеціалізованих технічних засобів (сенсорних модулів, контролерів, серверного та мережевого обладнання), проектуванням, розробленням і ліцензуванням програмного забезпечення, а також організацією

системної підготовки та підвищення кваліфікації фахівців. Для багатьох органів місцевого самоврядування та транспортних операторів, особливо в умовах обмежених бюджетних ресурсів, такі витрати можуть бути важливою перешкодою для реалізації проєктів цифровізації [21, с. 167].

Важливою проблемою цифровізації транспортної галузі є також інтероперабельність (interoperability) інформаційних систем. Цифрові рішення, розроблені різними виробниками або впроваджені в різний час, нерідко ґрунтуються на різних технічних стандартах, протоколах обміну даними та архітектурних підходах. Відсутність уніфікованих стандартів і недостатній рівень сумісності між окремими компонентами цифрової інфраструктури ускладнюють інтеграцію даних, знижують ефективність міжсистемної взаємодії та можуть призводити до фрагментації інформаційного простору транспортної системи.

Таким чином, цифрові інструменти аналізу транспортних потоків і якості обслуговування мають значний потенціал у підвищенні ефективності транспортних систем. Вони сприяють оперативному управлінню трафіком, оптимізації маршрутів, підвищенню безпеки та прогнозуванню попиту на транспортні послуги. Водночас необхідно враховувати технічні, фінансові та правові обмеження, що можуть гальмувати впровадження таких рішень.

Для успішного використання цифрових інструментів транспортної аналітики важливо стимулювати розвиток інфраструктури, посилювати кібербезпеку, створювати єдині стандарти взаємодії цифрових систем та вкладати інвестиції в їх упровадження. Такий підхід сприятиме сталому розвитку транспортних мереж і підвищенню якості транспортного обслуговування населення.

Висновки. Проведене дослідження сучасних методик оцінки ефективності функціонування маршрутних мереж міст підтвердило доцільність комплексного підходу, що поєднує кількісні та якісні показники, охоплюючи техніко-експлуатаційні, соціально-економічні й організаційно-управлінські аспекти діяльності транспортних систем. Такий підхід дозволяє всебічно оцінювати стан маршрутних мереж, ідентифікувати критичні сегменти та дисбаланси, а також створює наукове підґрунтя для розроблення рекомендацій щодо їх удосконалення з урахуванням потреб населення та принципів сталого розвитку.

Дослідження цифрових технологій, зокрема GIS, Big Data, ITS та мобільних сервісів, продемонструвало їхній потенціал у забезпеченні

багатомірний аналіз транспортних потоків, прогнозуванні попиту, оцінюванні якості та доступності транспортного обслуговування, а також у підтримці оперативного управління маршрутними мережами.

Водночас ефективне впровадження цифрових рішень у транспортній сфері потребує врахування технічних, фінансових, правових та кібербезпекових обмежень, розробки стандартизованих та інтегрованих платформ, що забезпечують надійну взаємодію систем і захист даних. Сукупне використання сучасних аналітичних методів і цифрових технологій створює передумови для переходу

до більш гнучкої, адаптивної та клієнтоорієнтованої моделі управління міським транспортом, підвищує ефективність маршрутних мереж та сприяє покращенню якості транспортних послуг для населення в умовах цифровізації міської інфраструктури.

Перспективним напрямом подальших досліджень є вдосконалення оцінювання ефективності маршрутних мереж шляхом поєднання традиційних методик із сучасними цифровими інструментами, що дає змогу сформувати більш адаптивну, орієнтовану на користувача та сталу систему міського транспорту.

Список літератури:

1. Кашканов А. А., Пальчевський О. В. Проблеми функціонування транспортних систем великих міст України в сучасних умовах. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2022. № 1 (18). С. 68–96. URL: <https://surl.lu/sjvlem> (дата звернення: 15.01.2026).
2. Сахно С., Любий Є., Колій О. Аналіз стратегій формування маршрутних мереж міст. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 12(43), Ч. II. С. 331–340. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.331-340](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.331-340)
3. Чуйко С. П., Шумляківський В. П. Основні параметри і предмет розвитку маршрутної мережі автобусних міських перевезень. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Т. 33 (72), № 5. С. 337–342. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/52>
4. Захаров Д. С., Палант О. Ю. Теоретичні та методологічні основи управління міським громадським транспортом. *Sciences of Europe*. 2025. № 174. URL: <https://surl.li/aytsbh> (дата звернення: 16.01.2026).
5. Вдовиченко В. О., Черепеха О. С., Великодний Д. О. Методологічні основи підвищення ефективності транспортного обслуговування пасажирів в пересадочних вузлах наземного міського транспорту: монографія. Харків, 2024. 1756 с. URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/07358c59-11eb-4432-b8e4-e3f111cabfc0/content> (дата звернення: 16.01.2026).
6. Jia G.-L., Ma R.-G., Hu Z.-H. Urban Transit Network Properties Evaluation and Optimization Based on Complex Network Theory. *Sustainability*. 2019. Vol. 11. № 7. Article 2007. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11072007>
7. Sun L., Ashrafi N., Pishgar M. Optimizing Urban Mobility Through Complex Network Analysis and Big Data from Smart Cards. *IoT*. 2025. Vol. 6. № 3. Article 44. DOI: <https://doi.org/10.3390/iot6030044>
8. Wang L., Fang L., Baoming H., Zhang Q., Zhang C. Simulation-Based Optimization of Transport Efficiency of an Urban Rail Transit Network. *Appl. Sci*. 2023. Vol. 13. № 3. Article 471. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13031471>
9. Транспортні системи: актуальні проблеми планування, функціонування та аналізу: колективна монографія / Є. В. Любий та ін. Харків: СГ НТМ «Новий курс», 2025. 262 с. DOI: <https://doi.org/10.61718/tsl2025m1>
10. Mustafayev K. Information technologies in transport (Industry 4.0; digital transport corridors and platforms; modeling and simulation transport systems, etc.). *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2024. № 3. 183–190. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-79-23>.
11. Тарасенко О., Харченко Т., Лебідь Г. Розвиток пасажирського транспорту в умовах цифровізації: економічні та інфраструктурні аспекти. *Вісник ХНТУ*. 2025. № 1(92), Ч. 1. С. 235–243. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.31>
12. Kyiashko D. Development of a hybrid testing framework for multimodal systems based on ai agents. *Наука і техніка сьогодні*. 2025. № 11(52). С. 1774–1788. URL: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11\(52\)-1774-1788](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11(52)-1774-1788)
13. Li Yo., Li Ya., Yang Y. Test-Agent: A Multimodal App Automation Testing Framework Based on the Large Language Model. *2024 IEEE 4th International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI)* (Wuhan, 18-20 October 2024). Wuhan, China, 2024. P. 609–614. DOI: <https://doi.org/10.1109/DTPI61353.2024.10778901>
14. Xie J., Chen Z., Zhang R., Wan X., Li G. Large multimodal agents: A survey. *Visual Intelligence*. 2024. Vol. 3. № 1 DOI: <https://doi.org/10.1007/s44267-025-00093-y>

15. Poperehnyak S., Bakaiev O., Shevchuk Y. Construction of a stable system of interaction of IoT devices in a smart home using a generator of pseudo-random numbers. *CPITS 2025: Workshop on Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems* (Kyiv, February 28, 2025). Kyiv, 2025. P. 349–362. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3991/paper25.pdf> (дата звернення: 16.01.2026).
16. Chandrasekaran M. Enhancing Efficiency and Flexibility of Rapid Prototyping for Scalable Multimodal Intelligent Agents. *2024 Artificial Intelligence for Business (AIB)* (Laguna Hills, CA, USA, 02-04 December 2024). Laguna Hills, 2024. P. 66–71. DOI: <https://doi.org/10.1109/AIB62249.2024.00019>
17. Гарькава В., Єганов О., Навроцький В., Воробей В. Інформатика та програмування: основи розробки сучасних інформаційних систем управління на транспорті. *Наука і техніка*. 2025. № 7(48). С. 1349–1358. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-7\(48\)-1349-1358](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-7(48)-1349-1358)
18. Кузев І., Ковцур К. Інформаційні системи та комп'ютерні технології на транспорті. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 8(39), Ч. I. С. 212–218. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.212-218](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.212-218)
19. Самойленко Є. С. Удосконалення методу оцінки впливу транспортного потоку на довілля вулично-дорожньої мережі міста: дис... канд. техн. наук. 05.22.01. Київ, 2024. 204 с. URL: http://diser.ntu.edu.ua/Samoilenko_dis.pdf (дата звернення 16.01.2026).
20. Кір'янов О. Ф., Мороз М. М., Загорянський В. Г., Кузев І. О. Інформаційні системи і технології: навч. посібн. Кременчук, 2022. 281 с. URL: <https://surl.li/oiuvmj> (дата звернення 17.01.2026).
21. Даніл'ян В. О., Масан В. В., Сидорець Д. П. Цифровий розвиток залізничного транспорту в умовах глобальних перспектив та викликів. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2023. № 83. С. 165–170. DOI: <https://doi.org/10.18664/btie.83.300193>

Chyzyk V. M., Kozak R., Shvets M. D. MODERN APPROACHES TO EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF ROUTE NETWORKS IN CITIES

The article discusses modern approaches and methods for assessing the effectiveness of urban route networks in the context of intensive urban development, increased population mobility, and the need to improve the quality of transport services. It analyzes the main scientific approaches to the formation of a system of criteria and indicators of the effectiveness of urban transport systems, among which special attention is paid to such characteristics as transport accessibility, regularity and reliability of traffic, the level of vehicle load, the economic feasibility of route operation, the environmental safety of transport, and the level of passenger satisfaction with the quality of services provided. The possibilities of applying quantitative and qualitative research methods, in particular statistical analysis, sociological surveys, expert assessment, as well as the use of geographic information systems, transport modeling, and analysis of large digital data sets (GPS tracking, electronic tickets, mobile applications) for comprehensive monitoring of the state and optimization of route networks are outlined. It is emphasized that effective assessment is only possible if technical, economic, social, spatial, and environmental aspects are combined, which allows for an objective picture of the functioning of urban transport. It has been determined that the implementation of a comprehensive approach to assessing the efficiency of route networks contributes to improving the quality of transport services, rationalizing management decisions, and the sustainable development of the urban transport system. The results obtained can be used by local authorities, specialists in the field of urban planning, transport management, and infrastructure development to improve the organization of passenger transport and increase the level of comfort for the population.

Keywords: *urban transport, passenger flows, transport infrastructure, transport accessibility, population mobility, service quality indicators, transport optimization, transport planning, sustainable development, transport modeling.*

Дата першого надходження статті до видання: 28.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026