

DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2026-86-135>

УДК 330.342.3

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ МЕТРОПОЛІТЕНІВ У ПАРАДИГМІ МІСЬКОЇ МОБІЛЬНОСТІ: СВІТОВИЙ ДОСВІД ТА УКРАЇНСЬКІ РЕАЛІЇ

AUTOMATION AND ENERGY EFFICIENCY OF METROS IN THE PARADIGM OF URBAN MOBILITY: GLOBAL EXPERIENCE AND UKRAINIAN REALITIES

Грибенюк Сергій Миколайович

доктор філософії, провідний інженер-проектувальник,
ТОВ «РС ІНЖЕНЕРІНГ»

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9699-9116>

Hrybeniuk Serhii
RS ENGINEERING LLC

У статті досліджено проблеми автоматизації та підвищення енергоефективності метрополітенів у сучасних умовах розвитку міської мобільності. Проаналізовано світовий досвід впровадження автоматизованих систем управління поїздами та визначено їх економічні переваги. Обґрунтовано, що автоматизація метрополітенів забезпечує зниження експлуатаційних витрат, підвищує регулярність руху, оптимізує використання інфраструктури та скорочує енергоспоживання. Особливу увагу приділено ролі метрополітенів у системі економіки міської мобільності та їх значенню для забезпечення сталої транспортної політики країн. Проаналізовано сучасний стан метрополітенів України, де проблеми модернізації інфраструктури віддаляють перспективи впровадження цифрових систем управління через обмеженість фінансових ресурсів і недостатність зовнішньої інвестиційної підтримки. Доведено, що стабільність та швидкість функціонування метро впливають на ринок праці, ділову активність, розвиток міських територій та ефективність використання часу населення.

Ключові слова: економіка міської мобільності, метрополітен, енергоефективність, цифровізація, експлуатаційні витрати, автоматизовані системи управління, основні засоби.

The article examines the problems of automation and energy efficiency improvement of metro systems in the context of urban mobility development. The relevance of the study is determined by rising energy costs, the need to optimize operating expenses, and the growing importance of sustainable public transport systems in large cities. The paper analyzes the global experience of implementing automated train control systems and identifies the main economic effects of metro automation. It is substantiated that automation should be considered not only as a technological modernization tool but also as an important factor in improving the economic efficiency of urban transport systems. Automated traffic management systems contribute to reducing electricity consumption, improving traffic regularity, increasing line capacity, and optimizing the use of transport infrastructure. Special attention is paid to the role of metro systems within the paradigm of urban mobility economics. It is established that metro systems influence labor mobility, accessibility of economic activity, and the quality of life of the population. Therefore, the efficiency of metro systems should be assessed not only through technical indicators but also through their broader socio-economic impact on urban development. The study also investigates current trends in transport digitalization and integrated mobility systems. It is shown that leading metropolitan systems increasingly combine automation technologies with sustainable mobility strategies aimed at reducing dependence on private cars and improving environmental sustainability. Particular attention is devoted to the Ukrainian context. The paper identifies the key challenges faced by Ukrainian metros, including infrastructure deterioration, high energy intensity, limited investment resources, and the consequences of economic instability. It is substantiated that gradual implementation of digital dispatching systems, automated traffic control, and energy monitoring technologies may become a realistic direction for the modernization of Ukrainian metro systems and improvement of their economic efficiency.

Keywords: urban mobility economics, metro systems, energy efficiency, digitalization, operating costs, automated control systems, fixed assets.

Постановка проблеми. У сучасних умовах розвитку великих міст метрополітени залишаються одним із ключових елементів системи міської мобільності. Висока провізна спроможність, незалежність від дорожніх заторів, стабільність графіків руху та екологічність зумовлюють його стратегічне значення для забезпечення ефективного функціонування міського господарства. Разом із тим розвиток транспортних систем супроводжується постійним зростанням вимог до якості та безпеки перевезень, енергоефективності та економічності результативності функціонування транспортних підприємств.

Упродовж останніх десятиліть у розвинутих країнах світу спостерігається активне впровадження систем автоматичного ведення поїздів (САВП) метрополітену, цифрових технологій диспетчеризації та інтелектуальних систем контролю руху. Автоматизація метрополітенів розглядається не лише як технічна модернізація транспортного комплексу, а як важливий економічний інструмент підвищення ефективності міської мобільності. Використання сучасних систем управління дозволяє скоротити експлуатаційні витрати, оптимізувати режими руху, зменшити споживання електроенергії, підвищити регулярність перевезень та збільшити пропускну спроможність ліній.

Особливого значення проблема енергоефективності набуває в умовах зростання вартості енергетичних ресурсів та необхідності забезпечення сталого розвитку міських транспортних систем. Для метрополітену, який є одним із найбільших споживачів електроенергії у структурі міського громадського транспорту, питання оптимізації енергоспоживання безпосередньо пов'язане з економічною ефективністю функціонування транспортних підприємств. У світовій практиці підвищення енергоефективності метрополітенів дедалі частіше досягається саме за рахунок цифровізації та автоматизації процесів управління рухом поїздів.

В Україні проблема модернізації метрополітенів має особливу актуальність. Значна частина основних фондів (технічного обладнання, рухомого складу, систем сигналізації та управління тощо) експлуатується протягом тривалого часу та потребує оновлення. Обмеженість фінансових ресурсів, високий рівень зношеності основних фондів, зростання експлуатаційних витрат та необхідність забезпечення стабільного функціонування метрополітенів в умовах воєнних та економічних

викликів ускладнюють процес технологічної модернізації галузі.

Разом з тим міжнародний досвід демонструє, що навіть часткове впровадження автоматизованих систем управління дозволяє суттєво підвищити економічну ефективність функціонування метрополітену без необхідності повного переходу до безпілотного руху поїздів. У сучасній парадигмі міської мобільності автоматизація метро дедалі більше розглядається як комплексний інструмент оптимізації транспортної системи міст, який поєднує економічні, енергетичні, соціальні та екологічні фактори.

У зв'язку з цим дослідження світового досвіду автоматизації метрополітенів, аналіз енергоефективності сучасних систем управління поїздами та оцінка можливостей адаптації міжнародних практик до українських реалій набувають важливого наукового і практичного значення.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Проблематика автоматизації метрополітенів та підвищення їх енергоефективності протягом останніх десятиліть активно досліджується як у технічній, так і в економічній науковій літературі. Разом із тим більшість існуючих досліджень зосереджена на інженерних (технічних і техніко-технологічних) аспектах функціонування систем автоматичного ведення поїздів, тоді як економічні наслідки автоматизації та її вплив на ефективність міської мобільності залишаються недостатньо розкритими.

У сучасних дослідженнях значна увага приділяється розвитку систем автоматичного управління рухом поїздів, цифрових систем сигналізації, технологій СВТС (Communication-Based Train Control) та безпілотного керування поїздами метрополітену. У роботах зарубіжних авторів автоматизація розглядається як інструмент підвищення безпеки руху, скорочення інтервалів між поїздами та оптимізації використання інфраструктури. Значний внесок у дослідження проблем автоматизації рейкового транспорту та систем управління рухом поїздів здійснили Jörn Pachl [1], Vukan R. Vuchic [2], а також фахівці Міжнародного союзу громадського транспорту (UITP) [3] та Міжнародної агенції з енергетики [4], у працях яких розглядаються питання цифровізації транспортних систем, автоматизації руху поїздів та підвищення ефективності функціонування метрополітенів.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із питаннями енергоефективності метрополіте-

нів. У працях А. Albrecht [5], Х. Yang, Х. Li [6] та деяких інших вітчизняних авторів, зокрема [7], розглядаються проблеми оптимізації режимів руху поїздів, мінімізації споживання електроенергії, використання рекуперативного гальмування та впровадження інтелектуальних систем керування енергоспоживанням. Більшість цих досліджень базується на математичному моделюванні та технічній оптимізації режимів експлуатації транспортних систем.

Водночас у сучасній науковій літературі поступово формується підхід, відповідно до якого автоматизація метрополітенів розглядається не лише як технічний, а й як економічний та управлінський процес. У роботах [8], R. Cervero [9], K. Button [10] досліджуються економічні аспекти функціонування міського рейкового електротранспорту, ефективність інвестицій у транспортну інфраструктуру та вплив транспортних систем на розвиток міської мобільності. Автори підкреслюють, що сучасний громадський транспорт повинен оцінюватися не лише за показниками експлуатаційної діяльності, а й через його вплив на економіку міста, продуктивність міського середовища та якість життя населення.

У межах концепції економіки міської мобільності особливого значення набувають дослідження, присвячені інтеграції цифрових технологій у транспортні системи. У працях J. Vanister [11], D. Levinson [12] та K. Button [10] аналізуються питання сталого розвитку транспорту, цифровізації міської мобільності та підвищення ефективності громадського транспорту за рахунок автоматизації управлінських процесів.

Українські науковці також приділяють увагу проблемам функціонування метрополітенів, однак переважна частина досліджень має технічний або експлуатаційний характер. У роботах В. Ляшенка [13], О. Красноштана [14] досліджуються питання розвитку транспортної інфраструктури, організації перевезень, модернізації рухомого складу та управління транспортними системами. Деякі економічні аспекти функціонування метрополітенів у зв'язку з впровадженням САВП розглядаються у роботах Стаматіна В.В. та інших [15-17].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Разом із тим економічні аспекти автоматизації метрополітенів, питання оцінки енергоефективності та впливу цифрових систем управління на економічну результативність функціонування метрополітенів України залишаються недостатньо дослідженими.

Аналіз наукової літератури свідчить про наявність значної кількості досліджень, присвячених технічним аспектам автоматизації та енергозбереження у метрополітенах. Водночас недостатньо уваги приділяється комплексному аналізу економічних ефектів автоматизації, взаємозв'язку між цифровізацією транспортних систем та ефективністю міської мобільності, а також можливостям адаптації світового досвіду з питання, що розглядається, до українських умов господарювання.

Отже, **метою статті** є дослідження світового досвіду автоматизації та підвищення енергоефективності метрополітенів, визначення економічних ефектів впровадження сучасних систем автоматичного ведення поїздів, а також оцінка можливостей адаптації міжнародних практик до умов функціонування метрополітенів України в контексті розвитку міської мобільності.

Виклад основного матеріалу дослідження. У сучасній парадигмі розвитку міської мобільності метрополітен розглядається не лише як вид громадського транспорту, а як один із базових елементів функціонування мегаполісів. Висока інтенсивність пасажиропотоків, зростання навантаження на транспортну інфраструктуру та необхідність забезпечення стабільності перевезень обумовлюють підвищення вимог до ефективності функціонування систем метрополітену. У цих умовах автоматизація процесів управління рухом поїздів і підвищення енергоефективності стають взаємопов'язаними напрямками модернізації транспортних систем.

Світова практика свідчить, що сучасний розвиток метрополітенів дедалі більше орієнтується на цифровізацію управління транспортними процесами. Особливого поширення набувають системи автоматичного управління рухом поїздів, які дозволяють забезпечити стабільність інтервалів руху, підвищити пропускну спроможність ліній та скоротити експлуатаційні витрати. У провідних метрополітенах світу автоматизація вже розглядається як необхідна умова ефективного функціонування транспортної системи в умовах зростаючої урбанізації.

Найбільш активно автоматизовані системи управління впроваджуються у метрополітенах країн Європи та Азії. Зокрема, у Сінгапурі, Копенгагені, Дубаї, Парижі функціонують лінії метрополітену з високим рівнем автоматизації управління рухом поїздів. Основною метою впровадження таких систем є не лише скорочення ролі людського фактора, а

насамперед забезпечення економічної ефективності функціонування транспортної інфраструктури.

Сучасні автоматизовані системи управління дозволяють оптимізувати режими руху поїздів у режимі реального часу. Це забезпечує більш точне регулювання прискорення, гальмування та підтримання швидкості руху, що безпосередньо впливає на рівень споживання електроенергії. На відміну від традиційного ручного керування, автоматизовані системи забезпечують стабільність експлуатаційних параметрів та мінімізують непродуктивні енергетичні втрати [7; 15-17].

Підвищення енергоефективності метрополітенів є одним із ключових напрямів сучасної транспортної політики. Метрополітен належить до найбільш енергоємних видів міського транспорту, тому навіть незначне скорочення споживання електроенергії забезпечує суттєвий економічний ефект. У світовій практиці автоматизація руху поїздів дедалі частіше використовується саме як інструмент зниження енергетичних витрат.

Економічний ефект автоматизації проявляється у декількох напрямках одночасно. По-перше, скорочуються витрати на електроенергію за рахунок оптимізації режимів руху. По-друге, підвищується регулярність перевезень, що позитивно впливає на привабливість метрополітену для пасажирів. По-третє, зменшується вплив людського фактора на процес управління рухом, що сприяє підвищенню безпеки та стабільності функціонування транспортної системи. Крім того, автоматизація дозволяє більш ефективно використовувати пропускну спроможність існуючої інфраструктури без необхідності масштабного будівництва нових ліній [7; 15-17].

Особливого значення автоматизація набуває в умовах зростання вартості енергоресурсів. У багатьох країнах витрати на електроенергію становлять одну з найбільших статей експлуатаційних витрат метрополітенів. Саме тому сучасні транспортні оператори дедалі активніше впроваджують цифрові системи управління, орієнтовані на мінімізацію енергоспоживання та оптимізацію режимів експлуатації транспортної системи.

Разом із тим рівень автоматизації метрополітенів у різних країнах суттєво відрізняється. Якщо у ряді міст автоматизовані системи функціонують протягом тривалого часу та охоплюють значну частину транспортної мережі, то в інших – процес модернізації відбувається значно повільніше через високі

капітальні витрати та складність інтеграції нових технологій у наявну інфраструктуру.

Для України питання автоматизації метрополітенів також поступово набуває актуальності. Метрополітени Києва, Харкова та Дніпра функціонують в умовах значного зносу основних фондів та обмежених фінансових ресурсів. На відміну від багатьох провідних метрополітенів світу, українські системи метро протягом тривалого часу функціонують в умовах хронічного дефіциту інвестицій, що суттєво впливає на темпи технологічної модернізації галузі. Значна частина рухомого складу, систем сигналізації та управління була впроваджена у попередні десятиліття та не повною мірою відповідає сучасним вимогам енергоефективності та цифровізації транспортних процесів. Наявні недоліки у функціонуванні українських метрополітенів підвищують експлуатаційні витрати підприємств та створюють додаткові ризики для стабільності функціонування всієї транспортної системи міст.

Особливої актуальності проблема модернізації метрополітенів набула в умовах зростання вартості електроенергії. Для українських метрополітенів енергетичні витрати становлять одну з найбільших складових собівартості перевезень. Високий рівень енергоємності застарілих систем управління рухом та значний ступінь фізичного зносу обладнання обмежують можливості підвищення економічної ефективності функціонування метро.

Суттєвий вплив на розвиток метрополітенів України справляють також наслідки воєнних дій, коли метрополітени виконують не лише транспортну, а й критично важливу соціальну функцію, забезпечуючи не тільки безперервність міської мобільності, а використовуються як найважливіший елемент системи цивільного захисту населення.

Повномасштабне впровадження безпілотного руху поїздів в українських містах у короткостроковій перспективі є малоімовірним через значну вартість модернізації та необхідність комплексного оновлення інфраструктури та перепідготовки кадрів [17]. Саме тому більш реалістичним напрямом розвитку може стати поступове впровадження окремих елементів автоматизації, зокрема систем оптимізації та контролю режимів руху, цифрового диспетчерського управління та енергоефективних алгоритмів керування поїздами. Такий підхід дозволяє поступово підвищувати енергоефективність та економічну резуль-

тативність функціонування метрополітенів без необхідності одномоментної масштабної модернізації всієї інфраструктури.

Важливим фактором розвитку українських метрополітенів може стати міжнародна фінансова підтримка та інтеграція у європейські програми модернізації транспортної інфраструктури.

У сучасних умовах автоматизація українських метрополітенів повинна розглядатися не як виключно технічний процес, а як інструмент підвищення економічної ефективності функціонування транспортної системи міст, де фони функціонують. Її впровадження дозволяє забезпечити комплексний ефект, який проявляється у зниженні експлуатаційних витрат, підвищенні якості транспортних послуг, покращенні енергоефективності та підвищенні конкурентоспроможності громадського транспорту у структурі міської мобільності.

У сучасній науковій літературі та у сучасній транспортній політиці дедалі ширше використовується концепція економіки міської мобільності, відповідно до якої транспортна система розглядається не ізольовано, а як один із ключових чинників економічного розвитку міст. У межах даного підходу ефективність функціонування транспорту визначається не лише обсягами перевезень або технічними характеристиками інфраструктури, а й впливом транспортної системи на продуктивність міського середовища, доступність економічної активності та якість життя населення. За таких умов метрополітени виконують значно ширшу функцію, ніж забезпечення пасажирських перевезень. Стабільність та швидкість функціонування метро впливають на ринок праці, ділову активність, розвиток міських територій та ефективність використання часу населення. Саме тому автоматизація метрополітенів в сучасних умовах набуває значення не лише технічної модернізації, а й як важливий елемент економічної політики міст.

Одним із ключових факторів сучасної економіки міської мобільності є часовий ресурс. Транспортні затримки, нестабільність графіків руху та перевантаженість транспортної системи формують значні економічні втрати як для населення, так і для міської економіки загалом. Автоматизовані системи управління рухом поїздів дозволяють підвищити регулярність перевезень, мінімізувати часові втрати пасажирів та забезпечити більш прогнозоване функціонування транспортної системи [15].

У багатьох містах світу автоматизація метро стала складовою ширшої стратегії

розвитку сталої міської мобільності. Так, у Сінгапурі, Парижі та Копенгагені розвиток автоматизованих систем управління метрополітенами поєднується із заходами щодо обмеження використання приватного автомобільного транспорту. У результаті підвищується транспортна доступність міст, скорочується рівень заторів на автошляхах та зменшується навантаження на міську транспортну інфраструктуру.

Важливим елементом економіки міської мобільності є також інтеграція різних видів транспорту в єдину транспортну систему. У сучасних умовах метрополітени дедалі частіше функціонують як базовий елемент мультимодальної міської транспортної мережі, взаємодіючи з автобусними маршрутами, трамвайним та тролейбусним сполученням, приміським залізничним транспортом та мікромобільністю [18]. Автоматизація та цифровізація транспортних процесів створюють передумови для більш ефективної координації роботи різних елементів транспортної системи міст.

Крім економічних ефектів автоматизація метрополітенів формує суттєві позитивні соціальні та екологічні наслідки, сприяє зменшенню залежності населення від приватних автомобілів, скороченню рівня викидів у довкілля та покращує екологічний стан міського середовища. У транспортній політиці багатьох країн саме громадський транспорт розглядається як основа формування сталих моделей міської мобільності.

Для України концепція економіки міської мобільності перебуває на стадії формування. Транспортна політика тривалий час орієнтувалася переважно на вирішення поточних експлуатаційних проблем, тоді як питання інтеграції транспортних систем, цифровізації управління та оптимізації міської транспортної мережі не завжди розглядалися комплексно. Разом із тим сучасні економічні та енергетичні виклики формують необхідність переходу до нової моделі розвитку транспортних систем, у межах якої автоматизація метрополітену може стати одним із ключових напрямів модернізації міської інфраструктури.

Світовий досвід свідчить, що впровадження САВП забезпечує комплексний економічний ефект, який проявляється у зниженні експлуатаційних витрат, підвищенні продуктивності транспортної інфраструктури та покращенні якості транспортного обслуговування населення. Однією з основних економічних переваг автоматизації метрополі-

тенів, як було відмічено вище, є скорочення витрат на електроенергію. У структурі експлуатаційних витрат електротранспорту енергетична складова традиційно займає значну частку, а в умовах постійного зростання вартості енергоресурсів проблема енергоефективності набуває стратегічного значення. Автоматизовані системи управління дозволяють забезпечити більш раціональні режими прискорення та гальмування поїздів, стабілізувати швидкісний режим руху та за рахунок цього мінімізувати непродуктивні витрати електроенергії.

На відміну від ручного керування, автоматизовані системи забезпечують високу точність виконання режимів руху та практично виключають значну частину суб'єктивних факторів, пов'язаних зі стилем керування машиністів [15]. У результаті знижується рівень перевитрат електроенергії, підвищується стабільність енергоспоживання та оптимізується використання ресурсів.

Важливим економічним ефектом автоматизації є також підвищення пропускної спроможності ліній метрополітену [15]. Сучасні цифрові системи управління рухом дозволяють скорочувати інтервали між поїздами без необхідності масштабного будівництва нової інфраструктури. У багатьох випадках це забезпечує значно вищу економічну ефективність порівняно з капіталомістким розширенням транспортної мережі. Таким чином автоматизація дозволяє більш ефективно використовувати вже існуючі інфраструктурні ресурси метрополітену.

Підвищення регулярності руху поїздів також формує вагомий економічний ефект [15]. Стабільність графіка безпосередньо впливає на привабливість метрополітену для пасажирів, знижує часові втрати населення на переміщення та підвищує конкурентоспроможність громадського транспорту відносно індивідуального автомобільного. У сучасній економіці міської мобільності час дедалі частіше розглядається як один із ключових економічних ресурсів, тому скорочення транспортних затримок має важливе соціально-економічне значення.

Крім зниження експлуатаційних витрат автоматизація сприяє також оптимізації використання рухомого складу. Завдяки більш точному регулюванню графіків руху та скороченню нерівномірності навантаження транспортні оператори отримують можливість ефективніше використовувати наявний парк поїздів. Це дозволяє частково стримувати зростання

витрат на оновлення рухомого складу та підвищує загальну економічну результативність функціонування метрополітену.

Використання цифрових систем моніторингу та управління дозволяє своєчасно виявляти технічні відхилення, прогнозувати ступінь зношення обладнання та оптимізувати систему технічного обслуговування. У результаті скорочуються витрати на аварійні ремонти та підвищується надійність функціонування транспортної системи.

У сучасних умовах автоматизація перетворюється на важливий фактор забезпечення економічної стійкості метрополітенів. Зростання вартості енергоресурсів, посилення вимог до якості транспортного обслуговування та необхідність скорочення бюджетних витрат стимулюють транспортних операторів до впровадження цифрових систем управління як інструменту оптимізації функціонування всієї транспортної системи міст.

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що автоматизація та підвищення енергоефективності метрополітенів у сучасних умовах розвитку міської мобільності перетворюються з суто технічного напрямку модернізації на важливий елемент економічної політики великих міст. Доведено, що впровадження автоматизованих систем управління поїздами забезпечує комплексний економічний ефект, який проявляється у зниженні експлуатаційних витрат, підвищенні енергоефективності, оптимізації використання інфраструктури та покращенні якості транспортного обслуговування населення.

Визначено, що в сучасній парадигмі економіки міської мобільності метрополітени виконують не лише перевізну функцію, а виступають одним із базових елементів забезпечення економічної продуктивності міського середовища. Стабільність функціонування транспортної системи, регулярність руху поїздів та мінімізація часових втрат населення на переміщення формують суттєвий соціально-економічний ефект, що виходить за межі традиційного розуміння транспортної ефективності.

Показано, що світовий досвід розвитку метрополітенів свідчить про поступовий перехід до цифрових моделей управління транспортними процесами, у межах яких автоматизація розглядається як інструмент забезпечення сталої міської мобільності, підвищення конкурентоспроможності громадського транспорту та зниження енергетичних

витрат. Встановлено, що найбільш успішні транспортні системи поєднують автоматизацію руху поїздів із комплексною інтеграцією різних видів транспорту та розвитком мультимодальних транспортних мереж.

Обґрунтовано, що для України повномасштабне впровадження безпілотних систем управління поїздами у короткостроковій перспективі є економічно складним завданням через високий рівень зношеності інфраструктури та обмеженість інвестиційних ресурсів. У зв'язку з цим найбільш реалістичним напрямом модернізації є поетапне впровадження окремих елементів автоматизації, зокрема цифрових систем диспетчерського управління, автоматизованого контролю режимів руху та систем моніторингу енергоспоживання.

Встановлено, що в умовах зростання вартості енергоресурсів та посилення вимог до ефективності використання бюджетних ресурсів питання енергоефективності метрополітенів набувають стратегічного значення. Підвищення енергоефективності дозволяє не лише скоротити витрати транспортних підприємств, а й забезпечити підвищення стійкості функціонування міської транспортної системи в умовах сучасних економічних та енергетичних викликів.

Таким чином, автоматизація та енергоефективність метрополітенів повинні розглядатися як взаємопов'язані напрями розвитку міського громадського транспорту, реалізація яких створює передумови для формування більш стійкої, ефективної та інтегрованої системи міської мобільності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Pachl, J. *Railway Operation and Control*. VTD Rail Publishing, 2018. 4th edition. 302 p.
2. Vuchic V. *Urban Transit Systems and Technology*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. Edition 1st. 624 p.
3. UITP. *Data & Statistics*. International Association of Public Transport. 2026. <https://www.uitp.org/knowledge-research/data/>
4. *The Future of Rail. Opportunities for energy and the environment*. International Energy Agency. 2019. 175 p.
5. Albrecht A. et al. Energy-efficient train control: From local convexity to global optimization and uniqueness. *Automatica*. 2013. Vol. 49. Iss. 10. P. 3072-3078.
6. Yang X., Li X. A Survey on Energy-Efficient Train Operation for Urban Rail Transit. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2015. Vol. 17. Iss. 1. P. 2-13.
7. Стаматін В.В., Захаров Д.С., Тарараєв Ю.О. Інвестиційна ефективність впровадження системи автоведення поїздів метрополітену. *Держава та регіони*. 2020. № 4 (115). С. 74-80.
8. Chevrier R., Pellegrini P., Rodriguez J. Energy saving in railway timetabling: A bi-objective evolutionary approach for computing alternative running times. *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*. 2013. Vol. 37. P. 20-41.
9. Cervero R. *The transit metropolis: a global inquiry*. Island Press, Washington, D.C., 1998. 464 p.
10. Button K. *Transport Economics*. Edward Elgar Publishing. 2010. Edition 3rd. 528 p.
11. Banister D. The Sustainable Mobility Paradigm. *Transport Policy*. 2008. Vol. 15 (2). P. 73-80.
12. Levinson D. M. and Krizek K. J. The end of traffic and the future of access: a roadmap to the new transport landscape. *Network Design Lab*, 2017. 60 p.
13. Ляшенко В.М. Порівняльний аналіз оптимізаційних алгоритмів для побудови оптимізованих траєкторій руху рейкового транспорту. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2026. № 1. С. 106-117.
14. Красноштан О.М. Наукові основи формування стратегії інноваційного розвитку транспортної системи країни : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : спец. 05.22.01 «Транспортні системи». Київ : Нац. транспортний ун-т, 2024. 54 с.
15. Стаматін В.В., Палант О.Ю., Тараруєв Ю.О. Економічні аспекти підвищення пропускної здатності станцій метрополітену. *Вчені записки ТНУ*. 2020. Т. 31 (70). № 5. С. 57-64.
16. Стаматін В.В., Палант О.В., Тараруєв Ю.О. Економічні аспекти підвищення ресурсу рейкового господарства в зв'язку з впровадженням САВП (на прикладі КП «Харківський метрополітен»). *Проблеми системного підходу в економіці*. 2020. Вип. 5(79). С. 68-74.
17. Стаматін В.В., Палант О.Ю., Тараруєв Ю.О. Економічний вплив впровадження системи автоведення потягів метрополітену на трудові ресурси підприємства (на прикладі КП «Харківський метрополітен»). *Економічний простір*. 2020. № 161. С. 82-88.
18. Захаров Д.С. Корінна зміна підходів до формування маршрутної мережі міського громадського транспорту. *Наука і техніка сьогодні*. Сер. Економіка. 2023. Вип. 13 (27). С. 290-300.

REFERENCES:

1. Pachl J. (2018) *Railway Operation and Control*. VTD Rail Publishing. 4th edition. 302 p.
2. Vuchic V. (2007) *Urban Transit Systems and Technology*. Hoboken: John Wiley & Sons. Edition 1th. 624 p.
3. UITP. (2026) *Data & Statistics*. International Association of Public Transport. <https://www.uitp.org/knowledge-research/data/>
4. The Future of Rail. Opportunities for energy and the environment (2019) International Energy Agency. 175 p.
5. Albrecht A. et al. (2013) Energy-efficient train control: From local convexity to global optimization and uniqueness. *Automatica*. Vol. 49. Iss. 10. P. 3072-3078.
6. Yang X., Li X. (2015) A Survey on Energy-Efficient Train Operation for Urban Rail Transit. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. Vol. 17. Iss. 1. P. 2-13.
7. 7. Zakharov D.S., Stamatina V.V., Tararuyev Yu.O. (2020) Investytsiyna efektyvnist' vprovadzhennya systemy avtovodennya poyizdiv metropolitenu [Investment efficiency of the implementation of the metro train auto-guidance system] *State and Regions*. No. 4 (115). P. 74-80. (in Ukrainian)
8. Chevrier R., Pellegrini P., Rodriguez J. (2013) Energy saving in railway timetabling: A bi-objective evolutionary approach for computing alternative running times. *Transportation Research*. Part C: Emerging Technologies. Vol. 37. P. 20-41.
9. Cervero R. (1998) *The transit metropolis: a global inquiry*. Island Press, Washington, D.C. 464 p.
10. Button K. (2010) *Transport Economics*. Edward Elgar Publishing. Edition 3th. 528 p.
11. Banister D. (2011) The Sustainable Mobility Paradigm. *Transport Policy*. 2008. Vol. 15 (2). P. 73-80.
12. Levinson D. M., Krizek K. J. (2017) The end of traffic and the future of access: a roadmap to the new transport landscape. Network Design Lab. 60 p.
13. Lyashenko V.M. (2026) Porivnyal'nyy analiz optymizatsiynykh alhorytmiv dlya pobudovy optymizovanykh trayektoriy rukhu reykovoho transportu [Comparative analysis of optimization algorithms for building optimized trajectories of rail transport movement] *Information and control systems in railway transport*. No. 1. P. 106-117. (in Ukrainian)
14. Krasnoshtan O.M. (2024) Naukovi osnovy formuvannya stratehiyi innovatsiynoho rozvytku transportnoyi systemy krayiny [Scientific bases for the formation of the country's transportation system innovative development strategy]. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Kyiv : National Transport University (in Ukrainian)
15. Stamatina V.V., Palant O.Yu., Tararuyev Y.O. (2020) Ekonomichni aspekty pidvyshchennya propusknoyi zdatnosti stantsiy metropolitenu [Economic aspects of increasing the throughput of metro stations]. *Scientific notes of TNU*. Vol. 31 (70). No. 5. P. 57-64. (in Ukrainian)
16. Palant O.V., Tararuyev Yu.O. Stamatina V.V. (2020) Ekonomichni aspekty pidvyshchennya resursu reykovoho gospodarstva v zv'yazku z vprovadzhennyam SAVP (na prykladi KP «Kharkivs'kyy metropoliten») [Economic aspects of increasing the resource of the rail infrastructure in connection with the implementation of the SAVP (on the example of the KP "Kharkiv Metro")] *Problems of the system approach in economics*. Iss. 5(79). P. 68-74. (in Ukrainian)
17. Stamatina V.V., Palant O.Yu., Tararuyev Y.O. (2020) Ekonomichnyy vplyv vprovadzhennya systemy avtovodennya potyahiv metropolitenu na trudovi resursy pidpryemstva (na prykladi KP «Kharkivs'kyy metropoliten») [Economic impact of implementing the metro train auto-guidance system on the enterprise's labor resources (using the example of the Kharkiv Metro Enterprise)] *Economic Space*. No. 161. P. 82-88. (in Ukrainian)
18. Zakharov D.S. (2023) Korinna zmina pidkhodiv do formuvannya marshrutnoyi merezhi mis'koho hromads'koho transportu [A radical change in approaches to the formation of a route network of urban public transport] *Science and Technology Today*. Ser. Economics. Iss. 13 (27). P. 290-300. (in Ukrainian)

Дата надходження статті: 23.04.2026

Дата прийняття статті: 12.05.2026

Дата публікації статті: 25.05.2026