

**Павлова І. О.**

Луцький національний технічний університет

**Куць Н. Г.**

Луцький національний технічний університет

**Дубицький О. С.**

Луцький національний технічний університет

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ ІНЖЕНЕРНИХ ІННОВАЦІЙ НА СТАЛИЙ РОЗВИТОК ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

*У статті досліджено вплив інженерних інновацій на розвиток міської транспортної інфраструктури, визначено їхню роль у підвищенні ефективності, безпеки та оптимізації транспортних мереж. Виявлено, що впровадження сучасних технологічних рішень, зокрема цифрових платформ управління трафіком, інтелектуальних транспортних систем та автоматизованих диспетчерських центрів, сприяє зменшенню заток, покращенню мобільності та підвищенню якості транспортного обслуговування. Метою статті є аналіз впливу інженерних інновацій на ефективність міської транспортної інфраструктури, визначення основних технологічних тенденцій, що сприяють оптимізації маршрутної мережі, автоматизації управління перевезеннями та інтеграції цифрових інструментів у транспортну логістику. Для досягнення цієї мети застосовано методи системного аналізу, порівняльного підходу, моделювання та структурного аналізу. Встановлено, що основними проблемами впровадження інновацій є технологічні обмеження, зокрема недостатній рівень цифровізації транспортних мереж та інтеграції розумних транспортних систем, а також нормативні труднощі, пов'язані з відсутністю єдиних стандартів управління міськими перевезеннями. Розроблено концептуальну модель інтеграції інженерних інновацій, що враховує технологічні та інфраструктурні аспекти, забезпечуючи комплексний підхід до модернізації міського транспорту. Доведено, що використання інтелектуальних транспортних систем, адаптивного регулювання світлофорного руху, автоматизованих систем паркування та прогнозних алгоритмів для управління громадським транспортом сприяє зменшенню заток, оптимізації перевезень та підвищенню ефективності міських маршрутів. Обґрунтовано необхідність удосконалення нормативної бази, що регулює інтеграцію цифрових транспортних платформ та автоматизованого управління міською логістикою. Перспективними напрямками подальших досліджень є розробка удосконалених методів оцінювання ефективності інженерних інновацій у міській транспортній інфраструктурі та створення стандартів для уніфікованого впровадження цифрових транспортних систем.*

**Ключові слова:** цифровізація транспорту, інтелектуальні технології, адаптивні системи, екологічні рішення, дорожня безпека, енергоефективність, автоматизація управління.

**Постановка проблеми.** Розвиток транспортної інфраструктури є важливим фактором економічного зростання, забезпечення мобільності населення та підвищення конкурентоспроможності регіонів. В умовах урбанізації, інтенсивного розвитку вантажних і пасажирських перевезень та посилюваних вимог до екологічної безпеки сучасні транспортні системи потребують впровадження інноваційних інженерних рішень, спрямованих на підвищення їхньої ефективності, екологічної стійкості та технологічної адаптивності. Важливість цього процесу зумовлена необхідністю підвищення ефективності управління транспортними потоками, оптимізації витрат на будів-

ництво та експлуатацію об'єктів інфраструктури, а також забезпечення тривалого використання й безпеки транспортних мереж.

Сучасні наукові дослідження спрямовані на розробку новітніх матеріалів, удосконалення методів прогнозування навантажень та зношення дорожнього покриття, впровадження цифрових технологій для управління транспортними системами, використання штучного інтелекту для оптимізації логістичних процесів та моніторингу стану інфраструктури. Застосування автоматизованих систем аналізу трафіку, адаптивного освітлення, «розумних» мостів та інших інженерних рішень сприяє зниженню експлуатаційних витрат,

підвищенню рівня безпеки та екологічної стійкості міських і міжміських перевезень.

Практичні завдання у цій сфері передбачають розроблення комплексних стратегій модернізації інфраструктури з урахуванням технологічних змін, аналіз економічної доцільності використання інноваційних рішень, а також упровадження механізмів державного та приватного фінансування проєктів транспортної інженерії. Підвищення ефективності транспортної мережі та її адаптація до сучасних викликів вимагають системного підходу, що об'єднує інженерні, економічні та екологічні аспекти сталого розвитку.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Аналіз наукових досліджень, присвячених впливу інженерних інновацій на сталий розвиток транспортної інфраструктури, стосується переважно чотирьох основних напрямів, кожен з яких висвітлює основні результати та перспективи подальших досліджень.

Перший блок наукових праць стосується впровадження інноваційних рішень у транспортну інфраструктуру. В. Ху (W. Hu) та співавтори [1] встановили, що використання сучасних будівельних матеріалів сприяє зниженню екологічного навантаження та збільшує термін експлуатації дорожнього покриття. Ефективність впровадження інтелектуальних транспортних систем у міське середовище, що дозволяє суттєво знизити рівень заторів та оптимізувати транспортні потоки, підтвердив С. Нараянаасвами (S. Narayanaswami) [2]. Учені Е. Броневич та К. Огороднік (E. Broniewicz та K. Ogrodnik) [3] довели доцільність застосування багатокритеріального аналізу для оцінювання ефективності транспортних проєктів, що забезпечує збалансований розвиток інфраструктури. Перспективним є розширення аналізу адаптивності інноваційних рішень у транспортній інфраструктурі, а також розроблення інтегрованих моделей міської інфраструктури, що враховують екологічні та соціальні чинники, сприяючи підвищенню мобільності, безпеки та стійкості транспортних систем.

Другий блок досліджень охоплює питання цифровізації та модернізації транспортних мереж. Х. Ду (H. Du) та співавтори [4] здійснили комплексний бібліометричний аналіз розвитку міської інфраструктури за 25 років і спрогнозували подальшу інтеграцію технологій штучного інтелекту та автоматизованого управління. К. Й. Шах (K. J. Shah) та співавтори [5] ідентифікували основні перешкоди для впровадження екологічного транспорту та запропонували технологічні стра-

тегії для їх подолання. Ф. Лосурдо (F. Losurdo) та співавтори [6] довели, що цифрові системи моніторингу підвищують рівень безпеки дорожнього руху та сприяють зменшенню аварійності. У подальших дослідженнях у цьому напрямі важливо приділити увагу оцінці ефективності цифрових інновацій у транспортному секторі, аналізу їхнього впливу на мобільність і безпеку, а також дослідженню процесу інтеграції «розумного» транспорту в національні транспортні стратегії.

Третій блок присвячений упровадженню інтелектуальних систем у транспортну інфраструктуру. Науковці А. Л. С. Баззан і Ф. Клюгль (A. L. C. Bazzan, F. Klügl) [7] з'ясували, що використання штучного інтелекту в управлінні дорожнім рухом дозволяє скоротити середній час поїздки на 15–20 %. Автори Т. Собрал, Т. Галв'яо та Дж. Боржес (T. Sobral, T. Galvão, J. Borges) [8] підтвердили ефективність візуалізаційних методів аналізу мобільності, що сприяє точнішому прогнозуванню та оптимізації маршрутів. К. К. Тох (C. K. Toh) та співавтори [9] довели, що розумні дорожні системи на основі великих даних та IoT сприяють зниженню рівня забруднення повітря та підвищенню пропускну здатності транспортних мереж. Подальший аналіз може бути спрямований на оцінювання довгострокового впливу інтелектуальних транспортних систем на соціально-економічні показники та розробку механізмів регулювання персональних даних у транспортних мережах.

Четвертий блок наукових розвідок фокусується на життєвому циклі інфраструктури та екологічній політиці. Ф. Ванг (F. Wang) та співавтори [10] встановили, що застосування енергоощадних матеріалів у дорожньому будівництві дозволяє знизити витрати енергії на 30 % порівняно зі стандартними технологіями. М. А. Ахад (M. A. Ahad) та колеги [11] довели, що використання концепції «розумного міста» сприяє скороченню енергоспоживання на 25 % та ефективнішому використанню міської інфраструктури. С. Такер (S. Thacker) та колектив науковців [12] наголосили на важливості синергії державного й приватного фінансування для забезпечення сталого розвитку транспортної інфраструктури. Доповнює цей блок дослідження О. О. Коростіна [13], який стверджує, що застосування технологій штучного інтелекту для автоматизації перевезень дозволяє знизити адміністративні витрати, покращити точність обробки документації та підвищити рівень безпеки логістичних операцій. У подальших дослідженнях необхідно зосередитися на економічній доціль-

ності впровадження енергоощадних та цифрових інновацій у транспортну інфраструктуру на локальному та національному рівнях, а також розробленні міжнародних стандартів цифрової взаємодії у сфері транспортних перевезень.

Загалом, аналіз досліджень підтверджує, що інженерні інновації сприяють підвищенню ефективності транспортної інфраструктури, зменшенню експлуатаційних витрат, зниженню рівня забруднення та підвищенню безпеки дорожнього руху. Попри активне впровадження інженерних інновацій у транспортну інфраструктуру, їхній вплив на сталий розвиток досліджено фрагментарно, без комплексного оцінювання довгострокової ефективності та екологічної стійкості. Сучасні технологічні рішення розглядаються переважно ізольовано, без аналізу їхньої взаємодії в єдиній системі. Відсутність цілісної моделі інтеграції інженерних інновацій ускладнює їхню практичну реалізацію, а технологічні, економічні та нормативні обмеження залишаються недостатньо вивченими.

Запропоноване дослідження сприяє формуванню цілісного підходу до інтеграції інженерних інновацій у транспортну інфраструктуру, враховуючи їхній вплив на ефективність, безпеку та екологічну стійкість. Розроблена концептуальна модель інтеграції технологічних рішень дозволяє оцінити їхню взаємодію в єдиній транспортній системі та сприяти підвищенню її адаптивності до майбутніх викликів.

**Постановка завдання.** Метою статті є аналіз впливу інженерних інновацій на сталий розвиток транспортної інфраструктури, визначення основних технологічних тенденцій, що сприяють підвищенню ефективності, безпеки та екологічності транспортних мереж, а також обґрунтування перспективних напрямів їх подальшого впровадження.

Завдання статті:

1. Дослідити вплив інженерних інновацій на сталий розвиток транспортної інфраструктури, визначивши їхню роль у підвищенні ефективності, безпеки та екологічної стійкості транспортних мереж, а також проаналізувати сучасні технологічні рішення, зокрема цифрові системи управління, інтелектуальні транспортні технології та інноваційні будівельні матеріали.

2. Розробити концептуальну модель інтеграції інженерних інновацій у транспортну інфраструктуру, враховуючи технологічні та екологічні аспекти, а також визначити нормативні та технічні бар'єри, що впливають на їхнє впровадження.

3. Сформулювати рекомендації щодо вдосконалення транспортної інфраструктури, визначивши оптимальні підходи до реалізації сучасних інженерних рішень, подолання бар'єрів їхнього застосування та створення сприятливих умов для їхньої інтеграції.

**Виклад основного матеріалу.** Міська транспортна інфраструктура є комплексною системою, що забезпечує мобільність населення, ефективність перевезень та стає функціонування міських транспортних мереж. До її основних складових належать транспортні вузли, дорожня мережа, громадський транспорт, паркувальні зони, навігаційні та інформаційні системи, а також автоматизовані диспетчерські центри, що регулюють рух транспорту. Ефективність інфраструктури залежить від рівня інтеграції цифрових технологій, здатності адаптуватися до збільшуваного транспортного навантаження та можливості забезпечення безперебійного функціонування міських перевезень.

Сталий розвиток транспортної інфраструктури ґрунтується на принципах ефективності, інтелектуального управління міським трафіком та соціальної доступності, що уможливорюється завдяки впровадженню інженерних інновацій. Зростання рівня урбанізації, підвищення навантаження на транспортні вузли та необхідність модернізації маршрутної мережі потребують оптимізації логістики міського транспорту, розширення мережі паркувальних зон та впровадження адаптивних транспортних рішень. Інноваційні інженерні рішення сприяють підвищенню оперативності реагування на транспортні потоки, зниженню аварійності, розширенню автоматизованих систем регулювання руху.

Розвиток розумних технологій керування транспортними мережами дозволяє адаптувати інфраструктуру до реальних умов експлуатації та оптимізувати логістичні потоки, що є важливим фактором її стабільного функціонування (табл. 1).

У сучасних умовах вплив інженерних інновацій на сталий розвиток міської транспортної інфраструктури проявляється в комплексному підході до модернізації транспортних вузлів, розширення адаптивних маршрутів громадського транспорту та цифровізації систем управління перевезеннями. Оптимізація маршрутної мережі та інтеграція інтелектуальних диспетчерських центрів дозволяє скоротити середній час у дорозі на 20–30 %, що, відповідно, знижує навантаження на транспортні вузли та сприяє ефективному перерозподілу трафіку [7, с. 92].

Таблиця 1

**Вплив інженерних інновацій на сталий розвиток транспортної інфраструктури**

| Аспект впливу інженерних інновацій | Характер впливу                                                                                                    | Основні зміни в сучасних умовах                                                                                                                |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Економічна ефективність            | Скорочення витрат на обслуговування, оптимізація ресурсів, зниження експлуатаційних витрат громадського транспорту | Розширення системи автоматизованих диспетчерських центрів, використання прогнозних алгоритмів для регулювання міських перевезень               |
| Інтелектуальне управління трафіком | Оптимізація трафіку, зменшення кількості заторів, покращення мобільності населення                                 | Адаптивне керування світлофорами, системи прогнозування завантаженості маршрутів, автоматизовані платформи координації громадського транспорту |
| Транспортна доступність            | Підвищення якості маршрутної мережі, зменшення часу очікування громадського транспорту                             | Інтелектуальні транспортні системи, інтеграція транспортних вузлів, цифрова оптимізація перевезень                                             |
| Довговічність інфраструктури       | Скорочення витрат на модернізацію, оптимізація управління міським трафіком                                         | Використання сенсорних технологій для моніторингу транспортних потоків, інтеграція автоматизованих диспетчерських систем                       |

Джерело: сформовано авторами на основі [1, с. 372; 2, с. 160; 4, с. 729; 9; 11]

Важливим напрямом є інтеграція безконтактних систем оплати проїзду, цифрових навігаційних платформ та автоматизованих зупинок громадського транспорту, що дозволяє підвищити комфорт пасажирів та скоротити час очікування на маршрутах.

Сучасна транспортна інфраструктура розвивається через упровадження інноваційних технологій, що підвищують її ефективність, безпеку та екологічну стійкість. Інтелектуальні транспортні системи, цифрові методи управління трафіком і використання вдосконалених будівельних матеріалів сприяють оптимізації дорожнього руху, зниженню аварійності та збільшенню терміну експлуатації покриття. Взаємодія транспортних засобів із інфраструктурою, автоматизовані системи моніторингу та регулювання забезпечують адаптивне управління трафіком і зменшення зато-

рів. Основні технологічні рішення та їхній очікуваний ефект наведено в таблиці 2.

У сучасних умовах технологічні рішення активно впроваджуються в транспортну інфраструктуру, змінюючи підхід до управління дорожнім рухом, будівництва та експлуатації транспортних мереж. Цифрові системи управління використовуються у великих містах для оптимізації світлофорного регулювання, прогнозування заторів та автоматичного розподілу трафіку. Наприклад, у м. Київ упроваджено систему адаптивного керування світлофорами, яка реагує на реальний потік транспорту, скорочуючи час очікування на перехрестях та зменшуючи перевантаження центральних магістралей [12, с. 330].

Інтелектуальні транспортні системи активно використовуються для моніторингу стану доріг та аналізу безпеки руху. У м. Львів працюють

Таблиця 2

**Сучасні технологічні рішення для підвищення безпеки та екологічності транспортних мереж**

| Технологічне рішення                      | Сутність рішення                                                                                                                                | Очікуваний ефект                                                                                                      |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Цифрові системи управління дорожнім рухом | Використання штучного інтелекту, великих даних та прогнозних алгоритмів для адаптивного регулювання світлофорів, розподілу транспортних потоків | Зменшення кількості заторів, оптимізація руху, скорочення часу в дорозі та викидів CO <sub>2</sub>                    |
| Інтелектуальні транспортні системи (ITS)  | Автоматизовані системи моніторингу та управління рухом, інтегровані з інфраструктурою                                                           | Підвищення безпеки, зменшення аварійності, покращення транспортної доступності                                        |
| Інноваційні будівельні матеріали          | Самовідновлювані асфальти, бетон з нанодобавками, екологічні композитні матеріали                                                               | Збільшення тривалості терміну експлуатації покриття, зменшення витрат на ремонт, покращення екологічних характеристик |
| Автоматизовані транспортні засоби         | Інфраструктура, що підтримує безпілотний транспорт, зокрема датчики та системи зв'язку                                                          | Зниження аварійності, оптимізація руху, підвищення ефективності використання доріг                                    |

Джерело: сформовано авторами на основі [2, с. 168; 4, с. 725; 6, с. 160]

камери відеоспостереження з функцією розпізнавання номерних знаків і визначення швидкості, що дозволяє в реальному часі фіксувати порушення [14]. Подібні системи інтегруються з навігаційними додатками, що дозволяє водіям отримувати актуальну інформацію про стан доріг і можливі маршрути об'їзду.

Інноваційні будівельні матеріали починають застосовуватися для продовження терміну служби дорожнього покриття та зменшення витрат на його обслуговування. Наприклад, у Польщі на експериментальних ділянках трас використовують самовідновлюваний асфальт, що під дією сонячного тепла може самостійно відновлювати мікротріщини, подовжуючи строк експлуатації дороги без необхідності частого ремонту [15]. В Україні активно використовують модифіковані бітуми для покращення зносостійкості асфальтобетону, що особливо важливо для магістралей із високим навантаженням.

Автоматизовані транспортні засоби тестуються в багатьох країнах, і хоча в Україні безпілотні автомобілі ще не стали частиною міської інфраструктури, деякі компанії починають використовувати автономні дрони для доставлення малих вантажів. Варто зазначити, що в США та Європі вже створюються спеціальні смуги для безпілотного транспорту, що дозволяє уникати конфліктів з іншими учасниками руху [16, с. 114]. Подібні рішення в перспективі можуть бути адаптовані для громадського транспорту й логістики в Україні, що підвищать безпеку та ефективність перевезень.

Сучасні технологічні рішення демонструють високу ефективність у покращенні безпеки,

комfortу та економічності транспортних систем, однак їх масове впровадження залежить від фінансування, адаптації нормативної бази та готовності інфраструктури до інтеграції з новими технологіями.

Розробка концептуальної моделі інтеграції інженерних інновацій у транспортну інфраструктуру є важливим етапом у формуванні ефективної, адаптивної та екологічно безпечної транспортної системи. Запропонована модель відрізняється від традиційних підходів тим, що поєднує технологічні, економічні та екологічні аспекти впровадження інновацій, дозволяючи оцінювати не лише їхню ефективність, а й взаємозв'язок із соціальними та фінансовими чинниками. Базуючись на принципах сталого розвитку, модель передбачає інтеграцію цифрових технологій, автоматизованих систем управління та використання екологічно чистих матеріалів, забезпечуючи гармонійне функціонування транспортної інфраструктури (рис. 1).

Запропонована концептуальна модель інтеграції інженерних інновацій у транспортну інфраструктуру базується на взаємодії чотирьох основних елементів: цифрової інтеграції, інноваційних матеріалів, екологічних технологій та автоматизованого управління. Цифрова інтеграція забезпечує обробку даних у реальному часі для оптимізації трафіку, зменшення кількості заторів і підвищення ефективності використання дорожньої мережі. Інноваційні матеріали сприяють збільшенню терміну експлуатації дорожнього покриття та зниженню витрат на ремонт через використання самовідновлюваних та екологічно чистих матеріалів.

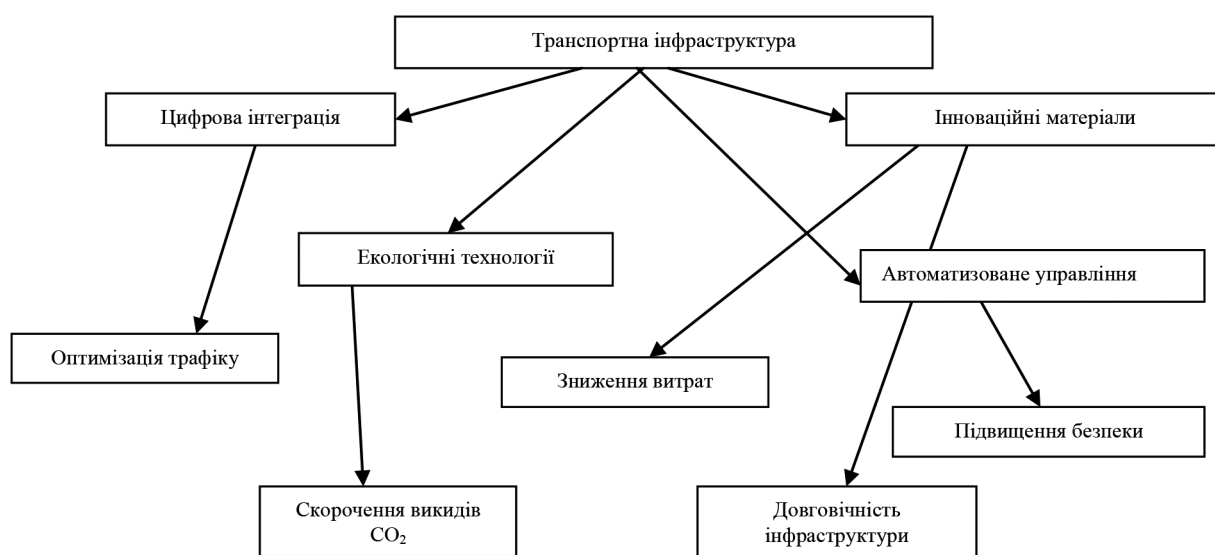


Рис. 1. Концептуальна модель інтеграції інженерних інновацій у транспортну інфраструктуру

Джерело: власна розробка авторів

Екологічні технології дозволяють скоротити викиди CO<sub>2</sub>, забезпечуючи інтеграцію електро-транспортної мережі завдяки адаптивним світлофорним системам, безпілотному транспорту та інтелектуальному контролю трафіку. Синергія цих компонентів спрямована на створення адаптивної транспортної системи, здатної реагувати на змінні умови експлуатації, забезпечуючи високу ефективність, екологічну стійкість і мінімізацію витрат.

Функціонування моделі в сучасних умовах передбачає широке застосування великих даних для аналітики та прогнозування транспортних потоків, поступову інтеграцію інноваційних будівельних матеріалів у дорожнє покриття, а також адаптацію міської інфраструктури до автоматизованого управління рухом. Упровадження цієї моделі дозволяє не лише підвищити надійність транспортних мереж, а й забезпечити їхню стійкість до майбутніх викликів, зокрема урбанізаційного зростання та змін клімату.

Упровадження інженерних інновацій у транспортну інфраструктуру супроводжується низкою технологічних, економічних і нормативних обмежень, які впливають на швидкість та ефективність інтеграції сучасних рішень. Технологічні обмеження включають недостатню розвиненість цифрових систем управління транспортними потоками, обмежену інтеграцію інтелектуальних транспортних технологій із наявною інфраструктурою, а також труднощі в адаптації міських та міжміських транспортних вузлів до автоматизованого управління й аналізу великих даних [8]. Використання штучного інтелекту та IoT у транспортному секторі потребує потужних обчислювальних ресурсів, стабільних каналів зв'язку та комплексної системи моніторингу, що залишається проблемним у багатьох регіонах через застарілі комунікаційні мережі.

Економічні обмеження пов'язані з високою вартістю цифровізації транспортної інфраструктури, необхідністю значних капіталовкладень у створення автоматизованих диспетчерських центрів, сенсорних мереж та бездротових технологій зв'язку. Впровадження інтелектуальних транспортних систем та автоматизованого моніторингу трафіку потребує розроблення ефективних механізмів фінансування, зокрема державно-приватного партнерства, що є критичним фактором для сталого розвитку транспортної галузі.

Нормативні обмеження пов'язані з відсутністю адаптованого законодавства для регулювання впровадження автономного транспорту, інтелектуального керування міським рухом та інтеграції екологічних технологій у транспортні мережі. Недостатня уніфікація стандартів цифрової взаємодії між різними операторами транспортних систем ускладнює створення єдиної інформаційної платформи управління трафіком та підвищення ефективності транспортної логістики [6, с. 161].

Удосконалення транспортної інфраструктури потребує комплексного підходу, що включає цифровізацію управління міськими транспортними мережами, інтеграцію інтелектуальних транспортних систем (ITS) і впровадження автоматизованого моніторингу трафіку. Використання штучного інтелекту та аналітичних платформ дозволяє оптимізувати маршрути, зменшити затримки на дорогах, підвищити ефективність громадського транспорту та знизити навантаження на транспортні вузли.

Особливу увагу необхідно приділити розвитку міської транспортної логістики, що охоплює вдосконалення систем паркування, впровадження автоматизованих зупинок громадського транспорту, розширення мережі зарядних станцій для електротранспорту та створення єдиної інтегрованої платформи управління перевезеннями. Важливим напрямом є модернізація дорожньої інфраструктури з акцентом на розширення розумних світлофорних систем, динамічних інформаційних табло та технологій адаптивного керування трафіком, що забезпечують підвищення безпеки та ефективності руху.

Автоматизація транспортних процесів вимагає інтеграції даних про завантаженість маршрутів, стан міських транспортних вузлів, роботу громадського транспорту та управління дорожньою навігацією. Впровадження таких рішень дозволяє забезпечити оперативне реагування на зміни трафіку, скоротити час у дорозі для пасажирів та підвищити ефективність використання міської інфраструктури.

Для ефективної інтеграції інноваційних рішень необхідно адаптувати нормативно-правову базу, що регулює застосування цифрових систем управління міським транспортом, розвиток автономного громадського транспорту та модернізацію маршрутної мережі. Запровадження комплексного підходу до розвитку міської транспортної інфраструктури сприятиме покращенню мобільності населення, оптимізації логістичних

процесів та підвищенню рівня безпеки пасажирських і вантажних перевезень.

**Висновки.** У дослідженні встановлено, що впровадження інженерних інновацій є важливим фактором розвитку міської транспортної інфраструктури, сприяючи підвищенню ефективності, безпеки та адаптивності транспортних мереж. Аналіз сучасних технологічних рішень показав, що інтеграція інтелектуальних транспортних систем, автоматизованих платформ управління трафіком, розумних світлофорів та цифрових диспетчерських центрів дозволяє оптимізувати транспортні потоки, скоротити час у дорозі та підвищити рівень безпеки на міських маршрутах.

Розроблено концептуальну модель інтеграції інженерних інновацій, що враховує технологічні та нормативні аспекти, забезпечуючи комплексний підхід до модернізації транспортної системи. Визначено, що така модель сприяє покращенню координації між інфраструктурними об'єктами, спрощує впровадження цифрових рішень та дозволяє ефективно управляти міськими транспортними вузлами.

Основними бар'єрами для впровадження інновацій у міську транспортну систему є технологічні

обмеження, зокрема недостатня цифровізація мереж та слабка інтеграція розумного транспорту в наявну інфраструктуру. Нормативні труднощі пов'язані з відсутністю адаптованої законодавчої бази для автоматизованого управління трафіком, регулювання автономного громадського транспорту та інтеграції цифрових платформ між різними операторами.

Запропоновані рекомендації стосуються вдосконалення міської транспортної інфраструктури шляхом впровадження розумних систем керування рухом, оптимізації міських маршрутів та автоматизації транспортних процесів. Важливим напрямом є створення єдиної цифрової платформи управління перевезеннями, що забезпечить інтеграцію різних видів транспорту, оптимізацію транспортних вузлів та підвищення ефективності міських перевезень.

Перспективи подальших досліджень охоплюють удосконалення методів оцінювання ефективності інженерних інновацій у транспортній інфраструктурі, аналіз інтеграції автоматизованих транспортних рішень у міське середовище та розробку стандартів для гармонізації цифрових транспортних систем.

#### Список літератури:

1. Hu W., Shu X., Huang B. Sustainability innovations in transportation infrastructure: An overview of the special volume on sustainable road paving. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 235. P. 369–377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.258>
2. Narayanaswami S. Urban transportation: innovations in infrastructure planning and development. *The International Journal of Logistics Management*. 2017. Vol. 28. № 1. P. 150–171. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJLM-08-2015-0135>
3. Broniewicz E., Ogrodnik K. Multi-criteria analysis of transport infrastructure projects. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2020. Vol. 83. Article 102351. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102351>
4. Du H., Liu D., Lu Z., Crittenden J., Mao G., Wang S., Zou H. Research development on sustainable urban infrastructure from 1991 to 2017: A bibliometric analysis to inform future innovations. *Earth's Future*. 2019. Vol. 7. № 7. P. 718–733. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018EF001117>
5. Shah K. J., Pan S.-Y., Lee I., Kim H., You Z., Zheng J.-M., Chiang P.-C. Green transportation for sustainability: Review of current barriers, strategies, and innovative technologies. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 326. Article 129392. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129392>
6. Losurdo F., Dileo I., Siergiejczyk M., Krzykowska K., Krzykowski M. Innovation in the ICT infrastructure as a key factor in enhancing road safety: A multi-sectoral approach. *2017 25th International Conference on Systems Engineering (ICSEng)* (Las Vegas, 22–24 August 2017). Las Vegas, NV, USA, 2017. P. 157–162. DOI: 10.1109/ICSEng.2017.69
7. Bazzan A. L. C., Klügl F. Introduction to intelligent systems in traffic and transportation. Springer Nature, 2022. URL: <https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=p4RyEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1> (date of access: 31.01.2025).
8. Sobral T., Galvão T., Borges J. Visualization of urban mobility data from intelligent transportation systems. *Sensors*. 2019. Vol. 19. № 2. Article 332. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19020332>
9. Toh C. K., Sanguesa J. A., Cano J. C., Martinez F. J. Advances in smart roads for future smart cities. *Proceedings of the Royal Society A*. 2020. Vol. 476. № 2233. Article 20190439. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.2019.0439>

10. Wang F., Xie J., Wu S., Li J., Barbieri D.M., Zhang L. Life cycle energy consumption by roads and associated interpretative analysis of sustainable policies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 141. Article 110823. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110823>
11. Ahad M.A., Paiva S., Tripathi G., Feroz N. Enabling technologies and sustainable smart cities. *Sustainable Cities and Society*. 2020. Vol. 61. Article 102301. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102301>
12. Thacker S., Adshead D., Fay M., Hallegatte S., Harvey M., Meller H., O'Regan N., Rozenberg J., Watkins G., Hall J. W. Infrastructure for sustainable development. *Nature Sustainability*. 2019. Vol. 2. № 4. P. 324–331. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0256-8>
13. Коростін О.О. Ефективність розпізнавання тексту в автоматизації міжнародних морських перевезень за допомогою штучного інтелекту. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2024. № 3. С. 29–38. DOI: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.3.4>
14. В Україні запускають єдину систему відеомоніторингу стану публічної безпеки, зокрема розпізнавання облич. *Судово-юридична газета*. 2024. URL: <https://sud.ua/uk/news/publication/290740-v-ukraine-zapuskayut-edinuyu-sistemu-videomonitoringa-sostoyaniya-publichnoy-bezopasnosti-v-tom-chisle-raspoznawanie-litsa> (дата звернення: 25.01.2025).
15. Malinowski S., Wróbel M., Bandura L., Wozuk A., Franus W. Use of new green bitumen modifier for asphalt mixtures recycling. *Materials*. 2022. Vol. 15. № 17. Article 6070. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15176070>
16. Boban M., Kousaridas A., Manolakis K., Eichinger J., Xu W. Connected Roads of the Future: Use Cases, Requirements, and Design Considerations for Vehicle-to-Everything Communications. *IEEE Vehicular Technology Magazine*. 2018. Vol. 13. № 3. P. 110–123. DOI: <https://doi.org/10.1109/MVT.2017.2777259>

#### **Pavlova I. O., Kuts N. H., Dubytskyi O. S. ANALYSIS OF THE IMPACT OF ENGINEERING INNOVATIONS ON THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE**

*The article examines the impact of engineering innovations on the development of urban transport infrastructure, highlighting their role in enhancing efficiency, safety, and optimizing transport networks. It has been identified that the implementation of modern technological solutions, including digital traffic management platforms, intelligent transport systems, and automated dispatch centers, contributes to reducing congestion, improving mobility, and enhancing the quality of transport services. The aim of the article is to analyze the impact of engineering innovations on the efficiency of urban transport infrastructure, identify key technological trends that facilitate route network optimization, automation of transport operations, and integration of digital tools into transport logistics. To achieve this goal, methods of system analysis, comparative approach, modeling, and structural analysis were applied. It has been established that the main challenges in implementing innovations include technological constraints, particularly the insufficient level of digitalization of transport networks and the integration of smart transport systems, as well as regulatory difficulties due to the lack of unified standards for managing urban transportation. A conceptual model for integrating engineering innovations has been developed, considering technological and infrastructural aspects, ensuring a comprehensive approach to modernizing urban transport. It has been proven that the use of intelligent transport systems, adaptive traffic light control, automated parking systems, and predictive algorithms for managing public transport contributes to reducing congestion, optimizing transportation, and increasing the efficiency of urban routes. The necessity of improving the regulatory framework governing the integration of digital transport platforms and automated urban logistics management has been substantiated. Promising areas for future research include the development of advanced methods for assessing the efficiency of engineering innovations in urban transport infrastructure and the creation of standards for the unified implementation of digital transport systems.*

**Key words:** smart mobility, predictive analytics, infrastructure modernization, sustainable transport, traffic optimization, autonomous solutions, renewable energy integration.