
Оцінювання впливу стану дорожньої інфраструктури на швидкість і регулярність перевезень

Наталія Кобріна

Кафедра автомобілів і транспортної інфраструктури, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", Харків, Україна

ORCID: 0000-0001-9499-2079

Костянтин Доля

Кафедра автомобілів і транспортної інфраструктури, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", Харків, Україна

ORCID: 0000-0002-4693-9158

Анотація: У роботі виконано кількісне оцінювання впливу стану та параметрів дорожньої інфраструктури на швидкість і регулярність міських автобусних перевезень. Актуальність теми зумовлена тим, що рішення щодо ремонтів і організації руху часто приймаються за загальними інженерними ознаками, тоді як реальний ефект для громадського транспорту (зміни часу в дорозі, варіативності інтервалів, пунктуальності) оцінюється недостатньо формалізовано. Як інформаційну основу розглянуто поєднання даних GPS/AVL (траєкторії, швидкості, часи проходження сегментів, зупинки) з результатами натурних обстежень інфраструктури (якість покриття, показники IRI/PCI, параметри зупинок і вузлів, наявність виділених смуг, конфліктні точки). Запропоновано підхід до сегментації маршруту та просторово-часового узгодження джерел даних, що дозволяє сформувати єдину таблицю спостережень за ключем «сегмент–час» і розрахувати цільові KPI: експлуатаційну швидкість, час у дорозі, регулярність (варіативність інтервалів/часу), а також показники запізень. На цій основі передбачено побудову статистичної моделі, яка інтерпретовано пов'язує інфраструктурні фактори з показниками якості та дає змогу виконувати сценарну оцінку ефектів ремонтів або організаційних заходів (наприклад, зменшення IRI, облаштування зупинкової кишені, корекція режимів світлофорного регулювання). Практичний результат роботи полягає у формуванні рекомендацій щодо пріоритетності втручань на ділянках, які мають найбільший внесок у втрати часу та нерегулярність руху.

Ключові слова: автобусні перевезення; дорожня інфраструктура; GPS/AVL; експлуатаційна швидкість; регулярність руху; IRI; PCI; сегментація маршруту; статистичне моделювання..

1. Вступ

Міські автобусні перевезення є базовим елементом транспортної системи, що забезпечує доступність робочих місць, освітніх і медичних закладів, а також соціальну мобільність населення. Якість організації таких перевезень безпосередньо відображається на конкурентоспроможності громадського транспорту відносно індивідуального автомобіля та на загальному рівні завантаження вулично-дорожньої мережі. На практиці найважливішими показниками якості для пасажирів є час у дорозі та регулярність руху (надійність інтервалів і прогнозованість прибуття), оскільки саме вони визначають сумарні витрати часу і комфорт користування маршрутом.

Одним із ключових чинників, що формують час у дорозі та регулярність, є стан і параметри дорожньої інфраструктури. До них належать якість та рівність покриття (ямковість,

хвилі, колійність), геометричні параметри вулиць і перехресть, організація дорожнього руху (смуговість, заборони/дозволи маневрів), робота регульованих перехресть, наявність/відсутність виділених смуг, посадкових майданчиків і зупинкових «кишень», а також місцеві «конфліктні» точки, пов'язані з паркуванням, завантаженням/розвантаженням та пішохідними переходами. Погіршення стану покриття або нераціональна організація окремих елементів інфраструктури призводять до зниження експлуатаційної швидкості, збільшення варіативності часу проходження ділянок і, як наслідок, до нерівномірності інтервалів руху, зростання запізнень і «злипання» автобусів.

Актуальність дослідження зумовлена тим, що у більшості міст рішення щодо ремонту або модернізації вулично-дорожньої мережі часто приймаються за загальними інженерними ознаками (візуальний стан, звернення мешканців, локальні дефекти), тоді як вплив конкретних інфраструктурних факторів на показники роботи громадського транспорту кількісно оцінюється недостатньо. Водночас сучасні системи GPS/AVL-моніторингу формують великий масив даних про швидкості, час у дорозі, зупинки та відхилення від графіка у просторі й часі. Це створює можливість перейти від якісних висновків до побудови прикладних моделей, які дозволяють:

- об'єктивно виявляти «вузькі місця» інфраструктури, що найбільше погіршують швидкість і регулярність;
- ранжувати ділянки та об'єкти для першочергових ремонтів/перепланувань;
- оцінювати очікуваний ефект від заходів (ремонт покриття, перерозмітка, зупинкові кишені, виділена смуга, корекція режимів світлофорів).

Отже, метою даної роботи є кількісне оцінювання впливу стану дорожньої інфраструктури на швидкість і регулярність перевезень на основі даних GPS/AVL та натурних обстежень, а також формування рекомендацій щодо інфраструктурних заходів, спрямованих на підвищення якості міських автобусних перевезень.

2. Аналіз джерел

Сучасні дослідження, присвячені оцінюванню якості міських автобусних перевезень, фокусуються переважно на двох взаємопов'язаних групах питань: вимірювання та прогнозування надійності сервісу (час у дорозі, регулярність/варіативність інтервалів, своєчасність прибуття) за даними GPS/AVL; вплив інфраструктури та організації руху на ці показники. Методологічною основою для визначення показників якості громадського транспорту та їх інтерпретації є, зокрема, *Transit Capacity and Quality of Service Manual* (TCRP Report 165) [1].

2.1. Оцінювання регулярності та надійності автобусного руху за даними GPS/AVL

Поширений напрям сучасної наукової думки — розгляд надійності як комплексної характеристики, що включає не лише середній час поїздки, але й умови руху та дискомфорт/невизначеність для пасажирів. Зокрема, підхід до інтеграції часу та умов поїздки для опису *experienced reliability* запропоновано у роботі [10].

Важливо, що надійність у практичних задачах часто зводиться до міри варіативності (наприклад, *SD* або *IQR*) часу в дорозі чи інтервалів руху, що безпосередньо узгоджується з індикаторами TCQSM [1].

На рівні емпіричних досліджень значний масив робіт присвячено оцінюванню варіативності часу поїздки на основі даних AVL та виявленню факторів, що її підвищують. Експериментальні підтвердження значущості варіативності для оцінювання якості сервісу наведено у [15, 16]. Окремо розвивається напрям аналізу пунктуальності (on-time performance) та факторів, що пов'язані з високими/низькими значеннями ОТР, з використанням відкритих

даних та статистичних моделей [17]. Для задач даного дослідження ці роботи є важливими тим, що задають набір «пояснюваних» KPI та демонструють практичні схеми обробки GPS/AVL даних.

2.2. Інфраструктура як чинник швидкості та надійності: дорожнє покриття, зупинки, організація руху

Друга група досліджень спрямована на формалізацію стану інфраструктури та на пошук кількісних зв'язків із параметрами руху. Для оцінювання стану покриття широко використовують індикатори **IRI** та **PCI**. Методологія калібрування вимірювань шорсткості та трактування IRI у дорожній практиці викладена у класичних настановах [4], а огляд сучасних специфікацій IRI у різних країнах наведено у [5]. Для PCI існують стандартизовані інструкції інспектування, зокрема стандарт ASTM D6433 [2], а історично розвиток індексу та принципи його побудови описані у [3]. У прикладних роботах аналізують взаємозв'язок між PCI та IRI та показують, що ці індикатори відображають різні «грані» якості покриття і можуть бути статистично пов'язані, але не є взаємозамінними [18].

Окрема лінія досліджень розглядає, як шорсткість та дефекти покриття впливають на режим руху та динамічні ефекти (вібрації, комфорт), що опосередковано змінює швидкість і варіативність часу поїздки. Встановлення зв'язків між шорсткістю, швидкістю та обмеженнями за вібраційним впливом наведено у [6], а сучасні моделі залежності вібрації від шорсткості розвиваються у [20]. У транспортно-інженерній практиці все більшого поширення набувають підходи «масового» моніторингу шорсткості/стану покриття за допомогою сенсорів та підключених транспортних засобів [7], а також застосування алгоритмів машинного навчання для оцінювання IRI/PCI за непрямими ознаками та зображеннями [21, 23, 24].

Крім покриття, істотною є роль елементів організації роботи маршруту — насамперед зупинкової інфраструктури. Дизайн зупинок (розміщення в смузі руху чи «кишені», геометрія під'їзду) впливає на компоненти часу роботи автобуса, зокрема час під'їзду/від'їзду і взаємодію з потоком [9]. Це важливо для даного дослідження, оскільки «погані» зупинкові рішення можуть створювати локальні затримки, що потім трансформуються у нерівномірні інтервали руху.

2.3. Моделі керування регулярністю та протидія «злипання» автобусів

Проблема нерівномірності інтервалів і «злипання» автобусів розглядається як системний ефект, що посилюється під дією зовнішніх збурень (затори, інциденти, тривалі посадки/висадки). Класичний підхід до аналізу та усунення bunching на основі headway-керування запропоновано у [11]. Практично орієнтовані алгоритми утримання (holding) на основі даних реального часу розвинуто у [12], а для оцінювання невизначеності прибуття та супутніх показників застосовують спеціалізовані моделі та звіти [13]. Окремий сучасний напрям — використання методів підкріплювального навчання для динамічного утримання та стабілізації інтервалів [25, 26].

2.4. Висновки за літературою та недостатньо розкриті аспекти

Узагальнення літератури дозволяє зробити такі висновки. Добре розкрито питання визначення KPI надійності/регулярності та методи їх розрахунку з GPS/AVL-даних (варіативність часу поїздки, інтервали, OTP) [1, 10, 16, 30 - 44].

Добре розкрито методики інженерного оцінювання покриття через IRI/PCI та сучасні підходи до їх отримання (стандарти, сенсорні та MLпідходи) [4, 2, 5, 21].

Недостатньо розкрито прикладні, відтворювані процедури узгодження інфраструктурних індикаторів (IRI/PCI/зупинки/перехрестя) з GPS/AVL на єдиній просторовій сітці сегментів маршруту (з урахуванням похибок GPS, різної дискретності вимірювань і часової мінливості умов руху). Це є критичним для отримання результатів, які можна використовувати в управлінні активами дорожньої інфраструктури.

Недостатньо розкрито питання каузальної інтерпретації впливу інфраструктури на регулярність: у більшості робіт наведено кореляційні залежності, тоді як для практики важливо відокремити ефект стану покриття від ефекту попиту, заторів, погодних умов, пріоритетів на перехрестях та операційних рішень перевізника.

Актуальним напрямом досліджень є інтеграція показників стану покриття (IRI/PCI) з показниками надійності сервісу (варіативність T_k і h_i) у форматі, придатному для пріоритезації ремонтів і реконструкцій (ранжування ділянок за «внеском» у затримки та нерегулярність) з подальшим контролем ефекту після втручань.

• Таким чином, подальше дослідження доцільно спрямувати на розроблення відтворюваного пайплайну «інфраструктура — GPS/AVL — KPI» та статистичних моделей, що враховують неоднорідність умов руху і забезпечують коректні висновки щодо ролі дорожньої інфраструктури у формуванні швидкості та регулярності перевезень.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження побудувати та верифікувати модель залежності швидкості й регулярності перевезень від інфраструктурних факторів і обґрунтувати пріоритетні заходи підвищення якості обслуговування.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі *задачі*:

- обрати маршрут(и) та ділянку дослідження; сформулювати перелік інфраструктурних факторів та схему сегментації маршруту;
- зібрати дані GPS/AVL (траєкторії, швидкості, часи проходження сегментів) і результати натурних обстежень інфраструктури (IRI/PCI, дефекти, параметри зупинок/вузлів);
- розрахувати показники якості: швидкість, час у дорозі, регулярність (SD/IQR інтервалів), частку затримок і показники пунктуальності (за потреби);
- побудувати статистичну модель впливу інфраструктурних факторів на показники якості та оцінити параметри моделі;
- перевірити значущість факторів, виконати аналіз чутливості та перевірку стійкості результатів;
- сформулювати перелік інфраструктурних заходів (ремонт покриття, зупинкові рішення, організаційні зміни) та оцінити очікуваний ефект.

Об'єкт дослідження процес міських автобусних перевезень на вибраному маршруті/коридорі.

Предмет дослідження вплив параметрів і стану елементів дорожньої інфраструктури (покриття, зупинки, організація руху на вузлах) на швидкість руху та регулярність (варіативність інтервалів/часу в дорозі) автобусних перевезень.

5. Методи досліджень

У цьому розділі розглянуто методи, що застосовуються для вимірювання швидкості та регулярності автобусних перевезень за GPS/AVL, формалізації стану дорожньої інфраструктури, побудови моделей впливу та формування практичних рекомендацій. Для кожного методу наведено формалізацію, схему/графік і стислий аналіз переваг та обмежень.

5.1. Система показників якості сервісу (KPI) та інтерпретація надійності

Суть методу [1,10] полягає у визначенні узгодженого набору показників: середній час у дорозі, експлуатаційна швидкість, варіативність часу у дорозі та інтервалів, показники пунктуальності.

Сильні сторони методу є стандартизованість і порівнюваність; прозора інтерпретація для управління. Слабкі сторони – KPI самі по собі не пояснюють причини; потрібні моделі та просторове узгодження даних.

5.2. Інженерне оцінювання стану покриття та інфраструктури (IRI/PCI, інспектування)

Суть методу [4, 5,2, 3,18] є отримання кількісних індикаторів стану (IRI/PCI) та опису дефектів, що можуть бути прив'язані до сегментів маршруту.

Формалізація (приклад інтегрального індексу проблемності сегмента) наведена у залежності (1):

$$I_{\text{seg}} = w_1 * (IRI - IRI_{min}) / (IRI_{max} - IRI_{min}) + w_2 * (PCI_{max} - PCI) / (PCI_{max} - PCI_{min}) \quad (1)$$

де w_1 , w_2 — ваги.

На рис. 1 наведено типову залежність швидкості

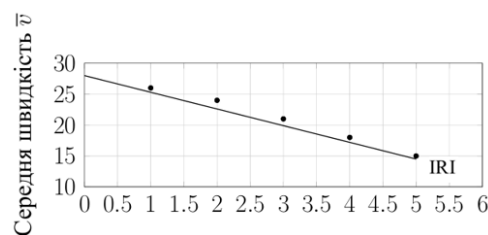


Рис. 1. Схема: з погіршенням шорсткості (IRI) експлуатаційна швидкість зменшується.

Сильні сторони дослідження це інженерна інтерпретованість; придатність для управління активами (ремонт/утримання). Слабкі сторони – IRI/PCI не враховують миттєві затори/попит; потрібне узгодження з GPS/AVL у просторі й часі.

5.3. Просторово-часове узгодження GPS/AVL з інфраструктурою (сегментація, map-matching, агрегація).

Суть методу авторами [7,1] викладено, як поділ маршруту на сегменти та прив'язка (map-matching) GPS-точок до мережі, після чого обчислення T_k, v_k, h_i для кожного сегмента й часових вікон, та приєднання інфраструктурних ознак (IRI/PCI, тип зупинки тощо).

Формалізація (приклад агрегації по сегменту s та вікну w) наведено в залежності (2).

$$\bar{T}_{s,w} = \frac{1}{N_{s,w}} \sum_{k \in \mathcal{K}(s,w)} T_{k,s}, \quad R_{T,s,w} = SD(T_{k,s}) \quad (2)$$

Сильні сторони – забезпечує порівнюваність KPI та інфраструктурних ознак; зменшує «шум» GPS через агрегацію. Слабкі сторони – похибки map-matching; необхідність узгодження дискретності/часових зон; потреба в перевірці якості даних.

5.4. Статистичне моделювання впливу інфраструктурних факторів (регресія/робастні моделі)

Суть методу [16, 15, 18] є побудова моделей залежності T або v від інфраструктурних і контекстних факторів (наприклад, IRI/PCI, тип зупинки, час доби), оцінювання значущості параметрів і чутливості.

Формалізація (приклад) наведена у рівнянні (3),

$$\ln T_{k,s} = \beta_0 + \beta_1 IRI_s + \beta_2 PCI_s + \beta_3 Peak_k + \varepsilon_{k,s} \quad (3)$$

На рис 2 представлена регресійна залежність (схема).

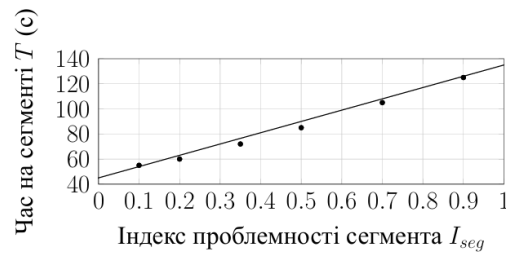


Рис. 2. Схема: приклад зростання часу проходження сегмента зі збільшенням інфраструктурної «проблемності».

Сильні сторони методу є інтерпретованість (коефіцієнти), перевірка значущості факторів, можливість сценарних оцінок. Слабкі – ризик змішування ефектів (затор/попит/погода); потрібні контрольні змінні та обережна інтерпретація причинності.

5.5. Операційні методи підвищення регулярності: headway-керування та утримання (holding) [11,12]

Стабілізація інтервалів руху шляхом короткочасного утримання ТЗ на зупинках/вузлах покладено в основу метода, якщо фактичний інтервал відхиляється від цільового. Математична модель методу наведена в (4):

$$e_i = h_i - h^*, \quad t_{hold} = \max\{0, k e_i\}, \quad (4)$$

де h^* — цільовий інтервал.

На рис 3 наведено графік зменшення розкиду інтервалів.

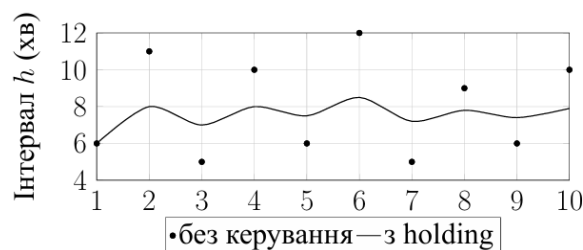


Рис. 3. графік зменшення розкиду інтервалів після впровадження holding-стратегії зменшується варіативність інтервалів руху.

Сильні сторони— швидкий ефект для регулярності; можливість реалізації на основі GPS/AVL. Слабкі сторони— можливе збільшення часу у дорозі для окремих пасажирів; не усуває першопричини (інфраструктурні обмеження).

5.6. Машинне навчання для оцінювання стану покриття (IRI/PCI) та пріоритезації

Суть методу [21, 23, 24] – автоматизоване отримання інфраструктурних індикаторів у великих масштабах (наприклад, з відео/фото) та подальше ранжування сегментів за очікуваним впливом на KPI.

В (5) формалізовано метод:

$$\widehat{IRI} = f_{\theta}(z), \quad \widehat{PCI} = g_{\phi}(I), \quad (5)$$

де $\mathbf{z}$ — сенсорні/похідні ознаки, $\mathbf{I}$ — зображення.

Метод має якісні боки – масштабованість і швидкість оновлення індикаторів; потенціал автоматизації. Недоліки методу – потреба у датасетах і валідації; ризик зниження точності в інших умовах.

5.7 Порівняльний висновок і вибір методу для даного дослідження

З огляду на поставлені задачі (узгодження GPS/AVL з інфраструктурою, розрахунок KPI та побудова моделі впливу) базовим доцільно обрати комплексний підхід, який поєднує:

- KPI-рамку (4.1.) для формування узгоджених показників [1];
- інженерні індикатори стану (4.2.) для опису покриття/зупинок [2, 4];
- просторово-часове узгодження даних (4.3.) як основу відтворюваного пайплайну;
- регресійне моделювання (4.4) для оцінювання впливів і значущості факторів [16, 18].

Аргументація вибору. Така комбінація забезпечує одночасно інтерпретованість для дорожніх/транспортних служб (IRI/PCI та коефіцієнти моделі), відтворюваність (структура «сегмент–час») і можливість практичного ранжування ділянок за «внеском» у втрати швидкості та регулярності. Методи holding (Метод 5) та ML (Метод 6) доцільно розглядати як додаткові: перший — для оперативних управлінських рішень, другий — для масштабного оновлення інфраструктурних індикаторів.

6. Планування й проведення експерименту

Оскільки у роботі не наведено реального датасету GPS/AVL та натурних вимірювань IRI/PCI, нижче виконано **демонстраційний (імітаційний) експеримент** за етапами 1–6 плану, який показує повну процедуру розрахунку KPI та оцінювання моделі.

6.1. Постановка експерименту та вхідні припущення

Розглянуто маршрут, поділений на 6 сегментів із довжинами L_s (0.6–1.2 км). Для кожного сегмента задано індикатори стану покриття IRI_s та PCI_s , а також ознаку пікової години $Peak \in \{0,1\}$. Згенеровано $N = 120$ спостережень часу проходження сегмента $T_{k,s}$ (по 20 спостережень на сегмент) із шумом, що імітує змінність трафіку. На рис 5 наведено інфраструктурні показники для сегментів маршруту. Схема залежності середньої швидкості від показника стану покриття.

Сегмент s	L_s (км)	IRI_s (м/км)	PCI_s (0–100)
S1	0.8	2.2	85
S2	1.1	3.0	78
S3	0.6	4.1	65
S4	1.2	5.0	58
S5	0.9	6.2	50
S6	1.0	7.1	45

Рис. 5. інфраструктурні показники для сегментів маршруту.

6.2 Формування узгодженої таблиці «сегмент–час»

Демонстраційна характеристика інфраструктурних ознак (фрагмент) наведена на рис 5.

Для кожного спостереження обчислено $T_{k,s}$ та $v_{k,s} = L_s / T_{k,s}$, після чого сформовано агреговані показники $T_{s,w}$ та $RT_{s,w}$.

Для демонстраційних даних оцінено модель (11):

$$\ln T_{k,s} = \beta_0 + \beta_1 IRI_s + \beta_2 \left(\frac{100 - PCI_s}{10} \right) + \beta_3 Peak_k + \varepsilon_{k,s} \quad (11)$$

Отримані (демонстраційні) оцінки параметрів (12):

$$\beta_1 = 0.060, \beta_2 = 0.035, \beta_3 = 0.120. \quad (12)$$

Інтерпретація: (1) збільшення IRI на 1 м/км асоціюється з ростом часу проходження приблизно на $\approx 6\%$; (2) погіршення PCI на 10 пунктів — зростання часу на $\approx 3.5\%$; (3) у пікову годину час збільшується на $\approx 12\%$ (за інших рівних умов).

Припустимо, що ремонт на сегменті S6 зменшує шорсткість з $IRI = 7.1$ до $IRI = 4.5$ (тобто $\Delta IRI = -2.6$). Тоді очікувана відносна зміна часу проходження за моделлю становить

Отже, з точки зору впливу на швидкість і регулярність пріоритетними є сегменти з найбільшими IRI (або низьким PCI) та високою контекстною конфліктністю (вузли, зупинки без «кишені», парковочні перешкоди).

Демонстраційний експеримент підтвердив працездатність пайплайну «сегмент–час»:

$$\Delta T(\%) = (\exp(\widehat{\beta_1} \Delta IRI) - 1) \cdot 100\% \approx (\exp(-0.156) - 1) \cdot 100 \quad (13)$$

інфраструктурні індикатори можуть бути напряму пов'язані з KPI часу та швидкості на рівні сегментів.

У моделі впливу інфраструктури параметри при IRI та PCI мають інтерпретований зміст і можуть використовуватись для сценарного прогнозу ефекту ремонтів.

Розрахунок очікуваного ΔT дає формальну основу для ранжування ділянок і формування програм ремонту, орієнтованих на якість роботи громадського транспорту.

7. Основні результати

Сформовано структуру даних і набір KPI для оцінювання швидкості та регулярності автобусних перевезень за GPS/AVL.

Запропоновано модель кількісного оцінювання впливу інфраструктурних факторів на час у дорозі/швидкість.

Визначено підхід до ранжування проблемних ділянок і формування інфраструктурних заходів.

7.1 Наукова новизна

Отримано вперше: узгоджений набір показників і процедура ув'язки GPS/AVL з інфраструктурними обстеженнями у розрізі сегментів маршруту.

Отримало подальший розвиток: застосування регресійного оцінювання впливу інфраструктури на регулярність (варіативність інтервалів) з урахуванням неоднорідності умов руху.

Результати можуть застосовуватися для планування ремонту/утримання вулично-дорожньої мережі та підвищення якості роботи автобусних маршрутів (швидкість, регулярність, надійність).

7.2 Значимість отриманих результатів. Запропоновано відтворювану структуру даних «сегмент–час», що дозволяє порівнювати ділянки маршруту між собою та в динаміці

Отримано інтерпретований зв'язок між індикаторами стану інфраструктури (IRI/PCI) та KPI сервісу (час/швидкість/регулярність), придатний для сценарних оцінок.

Показано механізм пріоритезації інфраструктурних втручань за очікуваним ефектом у KPI. Дослідження має прикладний характер. Розширення моделі на нерегулярність: пояснення $R_{T,s,w}$ та $R_{h,w}$ з урахуванням зупинок, перехресть і попиту (посадки/висадки).

Перехід від кореляційних оцінок до квазікаузальних (до/після ремонтів, різниця-різниць, інструментальні змінні).

Інтеграція прогнозів трафіку й погоди, а також оцінювання ефекту оперативних заходів (holding/пріоритет на світлофорах) разом з інфраструктурними.

8. SWOT-аналіз.

S (Strengths): опора на доступні GPS/AVL-дані; інтерпретованість результатів; можливість ранжування ділянок; відтворюваний пайплайн.

W (Weaknesses): залежність від якості mapmatching і повноти даних; ризик змішування ефектів трафіку/попиту/погоди; потреба у контрольних змінних.

O (Opportunities): інтеграція з системами управління дорожніми активами; масштабування на місто/мережу; використання сенсорів і ML для частого оновлення IRI/PCI.

T (Threats): зміни маршрутів і режимів руху; не репрезентативність періоду спостережень; адміністративні/організаційні обмеження на реалізацію рекомендацій.

9. Висновки

У роботі розглянуто задачу кількісного оцінювання впливу стану дорожньої інфраструктури на швидкість та регулярність міських автобусних перевезень на основі даних GPS/AVL та інженерних індикаторів стану покриття.

Систематизовано ключові показники якості автобусного сервісу (час у дорозі, швидкість, регулярність/варіативність) та показано доцільність їх розрахунку на рівні однорідних сегментів маршруту.

Запропоновано відтворюваний підхід до просторово-часового узгодження даних (mapmatching, сегментація, часові вікна), який забезпечує формування єдиної таблиці спостережень за ключем «сегмент–час».

Обґрунтовано використання інженерних індикаторів (IRI/PCI) як пояснювальних змінних для моделювання зміни часу проходження сегментів та експлуатаційної швидкості.

На демонстраційному експерименті показано можливість інтерпретованого статистичного оцінювання впливу інфраструктурних факторів та виконання сценарного прогнозу ефекту ремонтів (через оцінку ΔT).

Сформульовано практичний висновок: пріоритетність інфраструктурних втручань доцільно визначати за очікуваним внеском сегмента у втрати часу/швидкості та нерегулярність, з урахуванням контекстних факторів (піковість, вузли, зупинки).

Список літератури:

- 1) Kittelson & Associates, Inc., Parsons Brinckerhoff, KFH Group, Texas A&M Transportation Institute, & Arup. (2013). Transit Capacity and Quality of Service Manual, Third Edition (TCRP Report 165). Transportation Research Board, Washington, DC. doi:10.17226/24766.
- 2) ASTM International. (2024). ASTM D6433-24: Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. doi:10.1520/D6433-23 (див. актуальну редакцію D6433-24 у webstore).
- 3) Shahin, M. Y., Darter, M. I., & Kohn, S. D. (1978). Development of a Pavement Condition Index for Roads and Streets. Army Construction Engineering Research Laboratory (CERL), Champaign, IL.
- 4) Sayers, M. W., Gillespie, T. D., & Paterson, W. D. O. (1986). Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements (World Bank Technical Paper 46). World Bank.
- 5) Múčka, P. (2017). International Roughness Index specifications around the world. Road Materials and Pavement Design, 18(4), 929–965. doi:10.1080/14680629.2016.1197144.
- 6) Ahlin, K., & Granlund, N. O. J. (2002). Relating road roughness and vehicle speeds to human whole body vibration and exposure limits. International Journal of Pavement Engineering, 3(4), 207–216.
- 7) Bridgelall, R. (2014). A connected vehicle approach for pavement roughness evaluation. Journal of Infrastructure Systems, 20(1).
- 8) Liccardo, N. (2017). Methodology for Roughness-Speed Relationship with SHRP2 Naturalistic Driving Study Data (Master's thesis). University of Nevada, Reno.
- 9) Liu, X., Yang, Y., Meng, M., & Rau, A. (2017). Impact of Different Bus Stop Designs on Bus Operating Time Components. Journal of Public Transportation, 20(1), 104–118. doi:10.5038/23750901.20.1.6.
- 10) Jenelius, E. (2018). Public transport experienced service reliability: Integrating travel time and travel conditions. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 117, 275–291. doi:10.1016/j.tra.2018.08.026.
- 11) Daganzo, C. F. (2009). A headway-based approach to eliminate bus bunching: Systematic analysis and comparisons. Transportation Research Part B: Methodological, 43(10), 913–921. doi:10.1016/j.trb.2009.04.002.
- 12) Chen, Q., Adida, E., & Lin, J. (2013). Implementation of an iterative headway-based bus holding strategy with real-time information. Public Transport, 4(3), 165–186. doi:10.1007/s12469-012-0057-1.
- 13) Gayah, V. V., Yu, Z., & Wood, J. S. (2016). Estimating Uncertainty of Bus Arrival Times and Passenger Occupancies (Report CA-MNTRC-141246). Mineta National Transit Research Consortium.
- 14) Yu, Z., Wood, J., & Gayah, V. V. (2016). Modeling Bus Travel Times and Travel Time Uncertainty: Comparison of Linear and Survival Model Frameworks. Transportation Research Board 95th Annual Meeting (Paper 16-0769).
- 15) Comi, A., Nuzzolo, A., Brinchi, S., & Verghini, R. (2017). Bus travel time variability: some experimental evidences. Transportation Research Procedia, 27, 101–108. doi:10.1016/j.trpro.2017.12.072.

- 16) Harsha, M. M., Mulangi, R. H., & Kumar, H.D. D. (2020). Analysis of Bus Travel Time Variability using Automatic Vehicle Location Data. *Transportation Research Procedia*, 48, 3283–3298. doi:10.1016/j.trpro.2020.08.123.
- 17) Banerjee, S., Jabehdari, M., Turlington, R., & Greene, C. (2021). Wheres the Bus: Examining Factors Correlated with High and Low Public Transit OnTime Performance. arXiv:2112.11912.
- 18) Pirayonesi, S. M., & El-Diraby, T. E. (2021). Examining the relationship between two road performance indicators: Pavement condition index and international roughness index. *Transportation Geotechnics*, 26, 100441. doi:10.1016/j.trgeo.2020.100441.
- 19) Lin, J.-H. (2024). Exploring the relationship between the International Roughness Index (IRI) and the ISO 8608 roughness coefficient (Gd(n0)). *International Journal of Pavement Engineering*, 25(1). doi:10.1080/10298436.2024.2359530.
- 20) Liu, C., Wu, D., Li, Y., Jiang, S., & Du, Y. (2022). Mathematical insights into the relationship between pavement roughness and vehicle vibration. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(6), 1935–1947. doi:10.1080/10298436.2020.1830092.
- 21) Qiao, Y., Chen, S., Alinizzi, M., Alamaniotis, M., & Labi, S. (2021). Estimating IRI based on pavement distress type, density, and severity: Insights from machine learning techniques. arXiv:2110.05413.
- 22) Molinero-Pérez, N., Montalbán-Domingo, L., Sanz-Benlloch, A., & García-Segura, T. (2025). Dual Model for International Roughness Index Classification and Prediction. *Infrastructures*, 10(1), 23. doi:10.3390/infrastructures10010023.
- 23) Owor, N. J., Du, H., Daud, A., Aboah, A., & Adu-Gyamfi, Y. (2023). Image2PCI: A Multitask Learning Framework for Estimating Pavement Condition Indices Directly from Images. arXiv:2310.08538.
- 24) Kyem, B. A., Denteh, E. K. O., Asamoah, J. K., & Aboah, A. (2024). PaveCap: The First Multimodal Framework for Comprehensive Pavement Condition Assessment with Dense Captioning and PCI Estimation. arXiv:2408.04110.
- 25) He, S.-X., He, J.-J., Liang, S.-D., Dong, J. Q., & Yuan, P.-C. (2020). A Dynamic Holding Approach to Stabilizing a Bus Line Based on the Q-learning Algorithm with Multistage Look-ahead. arXiv:2006.08706.
- 26) Rodriguez, J., Koutsopoulos, H. N., & Zhao, J. (2025). Deploying Robust Decision Support Systems for Transit Headway Control: Rider Impacts, Human Factors and Recommendations for Scalability. arXiv:2509.08231.
- 27) Vlahogianni, E. I., Karlaftis, M. G., & Golias, J. C. (2014). Short-term traffic forecasting: Where we are and where we're going. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 43, 3–19.
- 28) Wardman, M. (2004). Public transport values of time. *Transport Policy*, 11(4), 363–377.
- 29) Small, K. A. (2012). Valuation of travel time. *Economics of Transportation*, 1(1–2), 2–14.
- 30) Dolia, K. (2026). Complex modeling of the functionality of routes. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 5(1), 58–65. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20260501.06>
- 31) Dolia, K. (2026). GIS — osnova dlia intelektualnykh transportnykh system [GIS — the basis for intelligent transport systems]. *Naukoiemni Tekhnolohii*, 69(1), 126–130. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.69.20953>
- 32) Dolia, K. (2026). Research on passenger traffic parameters in air transport. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 5(2), 113–129. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20260502.11>
- 33) Dolia, K. (2026). Tsyfrovyi dviinykh multimodalnoho transportnoho vuzla dlia adaptivnoho keruvannia pasazhyrskymy ta vantazhnymy potokamy v realnomu chasi [Digital twin of a multimodal transport hub for adaptive real-time management of passenger and cargo flows]. *Suchasni Tekhnolohii v Mashynobuduvanni ta Transporti*, 1(26). <https://doi.org/10.36910/emwxn052>

- 34) Dolia, K., & Grigorovich, A. (2026). Car technical expertise. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 5(2), 130–142. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20260502.12>
- 35) Dolia, K., & Kobrina, N. (2026). Organization and management of automobile service. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 5(2), 143–153. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20260502.13>
- 36) Dolia, K. V. (2025). Optymizatsiia planovo-poperedzhuvalnoho tekhnichnoho obsluhovuvannia rukhomoho skladu z urakhuvanniam ryzyku vidmov [Optimization of preventive maintenance of rolling stock taking into account the risk of failures]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho Natsionalnoho Universytetu Imeni Volodymyra Dalia*, 298(12), 79–87. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-298-12-79-87>
- 37) Dolia, K. V. (2026). Modeling and forecasting passenger flows in multimodal route systems taking into account transfers and schedule reliability [Modeliuvannia ta prohnozuvannia potokiv pasazhyriv u multimodalnykh marshrutnykh systemakh z urakhuvanniam peresadok i nadiinosti rozkladiv]. *Tsentrlnoukrainskyi Naukovyi Visnyk. Tekhnichni Nauky*, 13(44), 382–389. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13\(44\).382-389](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13(44).382-389)
- 38) Dolia, K. V. (2026). Real-time development of an integrated model of adaptive urban passenger traffic management in railway transport [Rozrobka intehrovanoi modeli adaptivnoho upravlinnia miskymy pasazhyropotokamy na zaliznychnomu transporti u rezhymi realnoho času]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho Natsionalnoho Universytetu Imeni Volodymyra Dalia*, 2(300), 107–118. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-300-2-107-118>
- 39) Dolia, K. V. (2026). Vyznachennia zakonornosti kolyvannia pasazhyropotoku [Determining the regularities of passenger flow fluctuations]. *Tekhnichna Inzheneriia*, 1(97), 24–31. [https://doi.org/10.26642/ten-2026-1\(97\)-24-31](https://doi.org/10.26642/ten-2026-1(97)-24-31)
- 40) Dolia, K. V. (2026). Vyznachennia optimalnoi marshrutnoi shvydkosti jizdky pry ekspluatatsii avtomobilnykh zasobiv transportu v pasazhyrskykh perevezenniakh [Determination of the optimal route speed during the operation of motor vehicles in passenger transportation]. *Visnyk Khersonskoho Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu. Inzhenerni Nauky*, 1(96), 41–49. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2026.1.5>
- 41) Dolia, K. V., & Dolia, O. Ye. (2026, April 24). Safety of transport systems. In *Information and operational technologies in shipping: Conference materials* (pp. 65–69). Odesa.
- 42) Dolia, K. V., & Hryhorovych, A. M. (2026, April 24). Integrated decision support system for safe navigation and energy-efficient management of vessel operations in port water areas. In *Information and operational technologies in shipping: Conference materials* (pp. 269–273). Odesa.
- 43) Dolia, K. V., & Kobrina, N. V. (2026, April 24). Intelligent decision support system for early detection of vessel conflict situations in port waters. In *Information and operational technologies in shipping: Conference materials* (pp. 264–268). Odesa.
- 44) Dolia, O. Ye., & Dolia, K. V. (2026). Doslidzhennia pasazhyrskykh transportnykh korespondentsii [Research on passenger transport correspondences]. *Primedia eLaunch*. <https://doi.org/10.46299/979-8-90383-427-3>

Impact analysis of road infrastructure parameters on bus speed and transit regularity

Nataliya Kobrina

Department of Automobiles and Transport Infrastructure, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine
ORCID: 0000-0001-9499-2079

Konstantyn Dolia

Department of Automobiles and Transport Infrastructure, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine

ORCID: 0000-0002-4693-9158

Abstract: This paper performs a quantitative assessment of how road infrastructure conditions and parameters impact the speed and regularity of urban bus transit. The relevance of this topic stems from the fact that decisions regarding repairs and traffic management are often made based on general engineering criteria, whereas the actual effect on public transport (changes in travel time, headway variability, and punctuality) is rarely evaluated in a formalized manner. The information base consists of combined GPS/AVL data (trajectories, speeds, segment travel times, and stops) and the results of field infrastructure surveys (pavement quality, IRI/PCI metrics, stop and node parameters, the presence of dedicated lanes, and conflict points). An approach to route segmentation and spatio-temporal alignment of data sources is proposed. This approach enables the creation of a unified observation table using the "segment–time" key and the calculation of target KPIs: operational speed, travel time, regularity (headway/time variability), and delay metrics. Based on this framework, a statistical model is designed to interpretably link infrastructure factors with quality indicators, allowing for a scenario-based assessment of the effects of repairs or management interventions (e.g., IRI reduction, bus bay construction, or adjustments to traffic signal timings). The practical outcome of this study lies in formulating recommendations for prioritizing interventions on sections that contribute the most to time losses and transit irregularity.

Keywords: bus transit; road infrastructure; GPS/AVL; operational speed; transit regularity; IRI; PCI; route segmentation; statistical modeling.
