

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ ОЦІНЮВАННЯ ДОРІГ
 MATHEMATICAL MODELS AND ALGORITHMS FOR ROAD ASSESSMENT



Соколова Наталія Михайлівна, кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: nata_ns@ukr.net, тел. +380675872662.

<https://orcid.org/0000-0003-0678-8882>



Конча Павло Андрійович, аспірант кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна e-mail: pasha.av.80@gmail.com, тел. +380503537308

<https://orcid.org/0000-0001-6867-0172>

Анотація. Метою статті є визначення основних методів оцінки стану доріг та обґрунтування їхньої ефективності для забезпечення безпеки руху та довговічності дорожньої інфраструктури. Стан доріг є ключовим показником якості транспортної інфраструктури, який впливає на безпеку дорожнього руху, економічну ефективність перевезень та комфорт учасників дорожнього руху. У роботі розглядаються методи оцінювання доріг, спрямовані на виявлення дефектів покриття, визначення міцності дорожнього одягу, оцінку зчпних якостей, рівності покриття та світлотехнічних характеристик. Увагу приділено аналізу візуальних обстежень, відеодіагностики та автоматизованих систем, які забезпечують оперативність і точність отримання даних. Застосування статичних і динамічних методів оцінки міцності дорожнього одягу дозволяє моделювати реальні експлуатаційні умови і прогнозувати довговічність покриття. Оцінка зчпних якостей покриття проводиться за допомогою спеціалізованих автомобілів та портативних приладів, що дозволяє забезпечити безпечність дорожнього руху навіть за несприятливих умов. Аналіз рівності дорожнього покриття з використанням триметрової рейки, нівелірів та поштовхомірів дозволяє отримати дані, які впливають на комфорт водіїв і пасажирів, а також зменшують знос транспортних засобів. Міжнародний індекс рівності IRI використовується як уніфікований показник для порівняння доріг різних країн. Світлотехнічні характеристики дорожньої інфраструктури, такі як коефіцієнт світлоповертання та яскравості дорожніх знаків і розмітки, є визначальними для забезпечення видимості в умовах поганого освітлення. Їхня відповідність сучасним стандартам є критично важливою для зменшення аварійності.

Результати дослідження підкреслюють необхідність інтеграції інноваційних технологій у процес моніторингу стану доріг. Зокрема, автоматизовані системи відеодіагностики та використання міжнародних стандартів дозволяють підвищити ефективність управління дорожньою мережею. У статті акцентується увага на важливості систематичного моніторингу та пріоритетизації ремонтних робіт на основі комплексного аналізу. Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням технологій оцінки дорожнього покриття, зокрема, у напрямку розвитку мобільних систем моніторингу та аналізу взаємозв'язків між параметрами стану доріг і характеристиками руху.

Ключові слова: оцінка доріг, дефектність покриття, міцність дорожнього одягу, зчпні якості, рівність дороги, світлотехнічні характеристики.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Забезпечення належного стану доріг є важливим викликом для сучасного суспільства, оскільки стан дорожньої інфраструктури безпосередньо впливає на безпеку учасників дорожнього руху, економічну ефективність транспортних систем та екологічні наслідки. Дефекти покриття, низька міцність дорожнього одягу, нерівність та незадовільні світлотехнічні характеристики створюють умови для підвищення аварійності, додаткового зношування транспортних засобів і підвищення витрат на утримання доріг. У контексті сучасних наукових досліджень особливого значення набуває застосування методів оцінки стану доріг, що забезпечують точність і оперативність отримання даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження в галузі оцінки доріг зосереджені на удосконаленні методів та засобів діагностики, що дозволяє підвищити точність і ефективність процесів визначення якості дорожніх покриттів. У роботах Смолянук Р. В. та Смолянук Н. В. обговорюється автоматизація виявлення дорожньої розмітки, що є важливою для зменшення людського фактору та підвищення оперативності. Аналіз методів діагностики показників якості автомобільних доріг, представлений Мороз Т. М., вказує на різноманітність підходів та інструментів для оцінки стану покриття, а також на потребу вдосконалення технологій моніторингу. Дослідження Рибіцького Л. і Павлюка Д. стосуються покращення методів оцінки зчпних якостей дорожніх покриттів в Україні, що є ключовим фактором для безпеки руху. Саркісян Г. С. та інші автори досліджували метрологічне забезпечення геодезичних робіт при визначенні рівності дорожнього покриття, підкреслюючи важливість точності вимірювань для забезпечення високої якості доріг. Розгляд зв'язку між оцінками рівності поверхні дорожнього покриття за показниками поштовхоміра та IRI, здійснений Савенком В. Я. та Кіяшком Д. І., надає додаткові перспективи для розвитку універсальних методів контролю. Останні роботи в галузі освітлення, зокрема дослідження Назаренка Л. А. та колег, є важливою складовою безпеки дорожнього руху в темну пору доби. Разом з тим, невирішеними залишаються питання удосконалення автоматизованих систем для точної оцінки доріг, а також вдосконалення методів оцінки зчпних якостей, що забезпечують більш точну діагностику стану покриттів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Оцінка стану доріг є ключовим аспектом забезпечення безпеки руху та довговічності транспортної інфраструктури. Вона дозволяє виявити слабкі місця дорожнього покриття, оцінити його зчпні властивості, міцність та рівність, а також відповідність стандартам освітлення та розмітки. Для цього застосовуються різноманітні методи, що дозволяють отримати точні та об'єктивні дані для планування ремонтних або реконструктивних робіт.

Для оцінки загального стану доріг використовуються методи візуального обстеження, відеодіагностики та автоматизовані системи. Візуальне обстеження дозволяє визначити основні дефекти дорожнього покриття, такі як тріщини, вибоїни та руйнування. Відеодіагностика забезпечує можливість більш детального аналізу стану дороги завдяки використанню камер високої роздільної здатності, які фіксують усі пошкодження. Автоматизовані системи відеодіагностики інтегрують сучасні технології аналізу зображень і даних, що забезпечує точність і швидкість оцінювання. Наприклад, першим вітчизняним експериментом відеодіагностики загального стану доріг стала установка лазерного сканера ЛВС-1-ХНАДУ. Потім на базі фургона ГАЗ-2705 створили три комплекси діагностики доріг: ЛВС-2-ХНАДУ для вимірювання рівності покриття, автоматизовану систему відеодіагностики «Око» та «Око-2» для оцінки стану покриття, а також систему відеодіагностики інженерного обладнання доріг. Лабораторія була вдосконалена за допомогою ЛВС-3, яка має нові датчики для кращої точності зйомки. Усі системи працюють на живленні від автомобіля. Спеціальне програмне забезпечення обробляє отримані дані та передає їх на комп'ютер [1, с.156]. Ці методи дозволяють оперативно формувати звіти про дефектність покриття для подальшого прийняття управлінських рішень. Вони також забезпечують можливість моніторингу змін у стані доріг протягом тривалого періоду. Візуальні та відеоінструменти є основою для пріоритетизації ремонтних робіт.

Такий підхід дозволяє знижувати витрати на утримання доріг завдяки превентивним заходам.

Міцність дорожнього одягу оцінюється за допомогою статичних і динамічних методів. Метод статичних навантажень за допомогою жорсткого штампа дозволяє визначити його деформаційні властивості та залишкову міцність. Модуль пружності визначається за допомогою прогиноміра (балка Бенкельмана) та жорсткого штампу, який привантажується згори вантажним автомобілем [2, с.97]. Метод динамічного навантаження застосовується для моделювання реальних умов експлуатації дороги, де використовуються спеціальні установки для створення повторюваних навантажень. Ці методи дають змогу оцінити здатність дорожнього покриття витримувати довготривалі експлуатаційні навантаження без втрати функціональних властивостей. Вони також дозволяють виявляти ділянки, які потребують негайного зміцнення або реконструкції. Результати таких досліджень є важливими для визначення типу матеріалів, які будуть використані під час ремонту. Аналіз міцності дозволяє уникнути катастрофічних руйнувань дорожнього покриття внаслідок перевантаження.

Зчіпні якості дорожнього одягу відіграють важливу роль у забезпеченні безпеки дорожнього руху. Для їх оцінки використовуються автомобілі з динамометричними установками, які дозволяють вимірювати коефіцієнт зчеплення під час руху. Портативні прилади є альтернативою, що дозволяє проводити вимірювання у локальних ділянках дороги. У ЄС для вимірювання зчіпних якостей дорожнього одягу використовуються різні прилади та методи. Для визначення поздовжнього коефіцієнта тертя (LFC) застосовують такі інструменти, як ROARDK, ROAR NL, RWS NL Skid Resistance Trailer, Skidometer BV-8, SRM, TRT, SRT-3, IMAG та Grip Tester. Коефіцієнт бокової сили тертя (SFC) вимірюється за допомогою таких систем, як SCRIM, SKM та Mu-Meter. Для портативних вимірювань поздовжнього коефіцієнта тертя використовують DFT Dynamic Friction Tester, SRT Pendulum, T2GO та VTI Portable Friction Tester [3, с.2]. Ці показники допомагають виявляти ділянки з низьким коефіцієнтом зчеплення, що можуть становити загрозу для безпеки учасників руху, особливо під час дощу чи інших несприятливих умов. Зчіпні якості також впливають на ефективність гальмування, особливо на крутих поворотах або спусках. Результати вимірювань використовуються для коригування типу покриття або нанесення додаткових протизношувальних шарів. Підвищення зчіпних якостей сприяє зменшенню кількості дорожньо-транспортних пригод. Систематичний контроль цих показників є основою для забезпечення безпеки всіх учасників дорожнього руху.

Показники рівності дорожнього покриття оцінюються за допомогою кількох інструментів. Використання триметрової рейки дозволяє виміряти локальні нерівності на поверхні дороги. Нівеліри та нівелірні рейки забезпечують можливість більш детального аналізу висотних змін покриття. Як і будь-який засіб вимірювань, нівеліри та рейки мають бути технічно справними, атестовані та пройти метрологічну повірку відповідно до закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [4]. Для ефективної роботи з нівеліру перед початком нівелювання необхідно виконати низку перевірок. Перш за все, перевіряють зовнішній стан приладу та його комплектність, а також паралельність осі круглого рівня та осі обертання нівеліра. Крім того, важливо перевірити правильність встановлення сітки ниток і горизонтальність лінії візування. Також здійснюється перевірка діапазону та похибки роботи компенсатора нівеліра. Для цього нівелір встановлюють строго в створі та посередині між рейками, визначаючи п'ять перевищень при різних положеннях бульбашки круглого рівня відносно початкового положення на станції [5, с.131].

Поштовхоміри використовуються для визначення відносних переміщень підвіски між віссю автомобіля та корпусом, і їх встановлюють на легкових автомобілях або на причепах з одним чи двома колесами. Під час оцінки рівності покриття за допомогою поштовхомірів, необхідність ремонту покриття визначається за показниками рівності. Показник пружності дорожнього покриття має бути не менше проектного для відповідного типу покриття та характеру руху транспортних засобів. Гранично допустимі значення показника рівності під час вимірювання поштовхоміром змінюються залежно від інтенсивності руху на дорогах. Наприклад, для вулиць з інтенсивністю руху понад 10 000 автомобілів на добу показник рівності має бути не більше 80 см/км, для доріг з інтенсивністю від 500 до 10 000 автомобілів – не більше 150 см/км, а для інших вулиць – не більше 230 см/км [6, с.264].

Крім того, міжнародний індекс рівності IRI є стандартом, який дозволяє порівнювати стан доріг

у різних країнах і визначати пріоритети для їх ремонту. Показник рівності дорожніх покриттів за показником IRI обчислюють за такою формулою [2, с.100]:

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^L |z_3 - z_4| dl,$$

де IRI – міжнародний Індекс Рівності дорожніх покриттів;

L – довжина ділянки вимірювання;

l – крок вимірювання, м.

Міжнародний показник рівності (IRI) дозволяє підвищити точність та достовірність оцінки експлуатаційних властивостей дорожнього покриття, а також об'єктивно визначити рівень комфорту руху [7, с.83]. За допомогою IRI можна оцінити ділянки дороги будь-якої довжини, виявити найбільш ушкоджені відрізки та визначити вплив окремих нерівностей на загальні та миттєві показники рівності.

Загалом, показники рівності впливають на комфорт водіїв і пасажирів, знижуючи втомлюваність під час тривалих поїздок. Рівність дороги також сприяє зменшенню витрат на обслуговування транспортних засобів, оскільки знижує навантаження на підвіску. Регулярний моніторинг нерівностей дозволяє оперативно усувати дефекти, що сприяє продовженню терміну експлуатації покриття.

Світлотехнічні характеристики доріг є важливим фактором у забезпеченні видимості та безпеки. Сучасне дорожнє покриття не має норм щодо світлотехнічних характеристик. Для більшості типів покриттів спектральний коефіцієнт відбиття змінюється залежно від довжини хвилі. Згідно з дослідженнями, проведеними Екріасом і його колегами у 2008 році, спектральні коефіцієнти відбиття більшості зразків дорожнього полотна мають мінімальні значення в короткохвильовій частині спектра та збільшуються у бік довгохвильової області. Спектральний коефіцієнт відбиття покриття також залежить від його складу. Наприклад, при додаванні білих домішок він може зсуватися у бік коротших хвиль [8, с.12]. Для оцінки використовуються коефіцієнти колірності та яскравості дорожніх знаків за денного освітлення, що впливають на їхню помітність. Коефіцієнт світлоповертання дорожніх знаків є ще одним важливим показником, що визначає їхню ефективність у нічний час. Коефіцієнт яскравості поверхні горизонтальної розмітки визначає інтенсивність світла, що відбивається від поверхні розмітки, і залежить від її матеріалу та стану. Високий коефіцієнт яскравості покращує видимість розмітки в умовах поганого освітлення або вночі. Коефіцієнт світлоповертання поверхні горизонтальної розмітки характеризує здатність розмітки відбивати світло, що падає на неї, назад до джерела світла. Цей коефіцієнт залежить від матеріалу та кольору розмітки, а також від її стану та зношеності. Високі світлотехнічні характеристики знижують ризик аварій у темну пору доби. Вони також сприяють зменшенню втоми водіїв під час тривалих нічних поїздок. Аналіз цих показників допомагає удосконалювати стандарти дорожніх знаків і розмітки. Висока якість світлотехнічних елементів позитивно впливає на загальну культуру водіння, забезпечуючи комфортні умови для всіх учасників дорожнього руху.

Загалом, методи оцінки стану доріг є багатограничними і спрямовані на забезпечення безпечної, комфортної та довговічної експлуатації дорожньої інфраструктури. Використання сучасних технологій та інтеграція різних підходів дозволяє отримати об'єктивну інформацію про стан доріг, що є основою для прийняття ефективних управлінських рішень. Сучасні автоматизовані системи відеодіагностики дозволяють отримувати високоточні дані про стан дорожнього покриття у реальному часі, що значно скорочує час на виявлення дефектів і визначення пріоритетів для ремонтних робіт. Використання міжнародних стандартів, таких як IRI (International Roughness Index), забезпечує уніфікований підхід до оцінки стану доріг та порівняння їх характеристик на глобальному рівні. Ці технології сприяють підвищенню безпеки дорожнього руху, адже дозволяють своєчасно виявляти небезпечні ділянки та усувати їх. Крім того, автоматизовані системи зменшують вплив людського фактору на процес оцінки,

забезпечуючи об'єктивність результатів. Інтеграція даних, отриманих із різних джерел, у єдину інформаційну систему дозволяє більш ефективно планувати ремонтні роботи та оптимізувати витрати на утримання доріг. Регулярний моніторинг із застосуванням інноваційних технологій сприяє збереженню довговічності дорожнього покриття, що є важливим аспектом сталого розвитку транспортної інфраструктури. Особливо актуальним є впровадження систем штучного інтелекту, які аналізують великі обсяги даних і формують рекомендації для прийняття управлінських рішень.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Аналіз методів оцінки стану доріг дозволив виявити їхню значущість для забезпечення якісної експлуатації дорожньої інфраструктури. Візуальне обстеження, відеодіагностика та автоматизовані системи є ефективними для оцінки загального стану доріг та виявлення дефектів покриття. Методи оцінки міцності дорожнього одягу, зокрема статичні та динамічні, забезпечують розуміння здатності доріг витримувати навантаження. Зчіпні якості покриття є ключовим показником для забезпечення безпеки руху, а їх вимірювання дозволяє своєчасно виявляти небезпечні ділянки. Оцінка рівності дорожнього покриття має вирішальне значення для комфорту водіїв і зменшення витрат на обслуговування транспортних засобів. Світлотехнічні характеристики дороги впливають на видимість і безпеку в умовах поганого освітлення. Усі ці аспекти разом створюють підґрунтя для розробки комплексної системи моніторингу стану доріг. Результати дослідження підкреслюють важливість інтеграції сучасних технологій для підвищення ефективності управління дорожньою мережею.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням технологій оцінки дорожнього покриття, зокрема, у напрямку розвитку мобільних систем моніторингу та аналізу взаємозв'язків між параметрами стану доріг і характеристиками руху.

Література

1. Смолянук Р. В., Смолянук Н. В. Автоматизація процесу виявлення дорожньої розмітки. *SWorldJournal*. 2023. № 18. С. 155-162.
2. Мороз Т. М. Аналіз методів діагностування показників якості автомобільних доріг. *Будівництво та цивільна інженерія*. 2022. № 112. С. 93-103.
3. Рибіцький Л., Павлюк Д. Удосконалення методів і засобів оцінки зчіпних якостей дорожніх покриттів в Україні. *European Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2021. № 1. С. 1-7.
4. Про метрологію та метрологічну діяльність: закон України від 05.06.2014 № 1314-VII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1314-18> (дата звернення 20.12.2024).
5. Саркісян Г. С., Тимошевський В. В., Урдзік С. М. Метрологічне забезпечення геодезичних робіт при визначенні рівності дорожнього покриття. *Комунальне господарство міст*. 2021. № 166. С. 130-133.
6. Завальний О. В., Линник І. Е. Експлуатація та утримання міських територій : підручник. Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. 407 с.
7. Савенко В. Я., Кіяшко Д. І. Зв'язок між оцінками рівності поверхні дорожнього покриття за показниками поштовхоміра та IRI. *Вісник ХНАДУ*. 2011. № 53. С. 83-86.
8. Назаренко Л. А., Можаровська Т. В., Чернець В. С. Мезопічна фотометрія та вуличне освітлення. *Український метрологічний журнал*. 2016. № 2. С. 9-14.

MATHEMATICAL MODELS AND ALGORITHMS FOR ROAD ASSESSMENT

Sokolova Natalia M., PhD in Economics, Associate Professor, Associate Professor of Transport Construction and Property Management, Associate Professor, National University of Transport, Kyiv, Ukraine e-mail: nata_ns@ukr.net, тел. +380675872662, <https://orcid.org/0000-0003-0678-8882>

Koncha Pavlo A., Postgraduate student, National University of Transport, Kyiv, Ukraine, e-mail: pasha.av.80@gmail.com, тел +380503537308, <https://orcid.org/0000-0001-6867-0172>

References

1. Smolianyuk, R.V., Smolianyuk, N.V. (2023), "Automation of the process of road marking detection", *SWorldJournal*, no. 18, pp. 155-162.
2. Moroz, T.M. (2022), "Analysis of methods for diagnosing the quality indicators of highways", *Construction and Civil Engineering*, no. 112, pp. 93-103.
3. Rybitskyi, L., Pavlyuk, D. (2021), "Improvement of methods and tools for assessing the adhesion properties of road surfaces in Ukraine", *European Journal of Intelligent Transportation Systems*, no. 1, pp. 1-7.
4. Pro metrologiiu ta metrologichnu diialnist, "On Metrology and Metrological Activity: Law of Ukraine of June 5, 2014 No. 1314-VII", available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1314-18> (Accessed 20 Dec 2024).
5. Sarkisian, H.S., Tymoshevskiy, V.V., Urdzik, S.M. (2021), "Metrological support for geodetic works in determining the smoothness of road surfaces", *Municipal Economy of Cities*, no. 166, pp. 130-133.
6. Zavalii, O.V., Linnik, I.E. (2023), "Operation and maintenance of urban areas: textbook", Kharkiv National University of Urban Economy named after O.M. Beketov, Kharkiv, 407 p.
7. Savenko, V.Ya., Kiyashko, D.I. (2011), "Relationship between surface evenness indicators of road pavement measured by bump integrator and IRI", *Bulletin of KhNADU*, no. 53, pp. 83-86.
8. Nazarenko, L.A., Mozharovska, T.V., Chernets, V.S. (2016), "Mesopic photometry and street lighting", *Ukrainian Metrological Journal*, no. 2, pp. 9-14.