

Гаркавенко О.А.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Губар В.Г.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ПОРТАТИВНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ

Стаття присвячена розробці та експериментальному дослідженню концепції портативного пристрою для об'єктивного вимірювання вібраційних характеристик дорожнього покриття. У статті розкрито проблему обмеженості існуючих методів оцінки якості дорожнього покриття, таких як суб'єктивний візуальний огляд та громіздки профілометри, що значно ускладнює оперативний моніторинг. Розкрито основну ідею використання високочутливого акселерометра для фіксації динамічних вібрацій під час руху та їх інтеграції з точними GPS-координатами. Визначено, що це дозволяє створювати детальні «вібраційні мапи» для локалізації проблемних ділянок та автоматично розрізняти типи покриття (асфальт, бруківка, плитка), а також ідентифікувати дефекти, такі як вибоїни та ями, що є критично важливим для проактивного обслуговування.

З'ясовано, що використання електросамоката як мобільної платформи для збору даних робить пристрій доступним, маневреним та економічно вигідним рішенням для охоплення ділянок, недоступних для автомобільного транспорту, відкриваючи нові можливості для міської інфраструктури. Досліджено функціональність компактного вимірювального комплексу, здатного надавати об'єктивні дані про стан та тип дорожнього покриття. Доведено, що це дозволить муніципальним службам оптимізувати планування ремонтних робіт та ефективніше використовувати ресурси, сприяючи підвищенню ефективності бюджетних витрат. Розглянуто наукову новизну, яка полягає у синергетичному поєднанні доступних технологій (мікроконтролер ESP32, модуль GY-91, GPS-модуль NeoBM) для створення вискоефективного інструменту, що дозволяє отримувати деталізовані «вібраційні мапи» та використовувати методи машинного навчання для класифікації. Визначено практичну цінність дослідження, що полягає у можливості широкого впровадження такого пристрою для регулярного моніторингу дорожньої мережі, сприяючи підвищенню якості дорожнього покриття та проактивному виявленню проблем, забезпечуючи довгострокову стійкість транспортної інфраструктури.

Ключові слова: дорожнє покриття, вібрації, акселерометр, GPS, портативний пристрій, електросамокат, вібраційна карта, класифікація покриття, ями, вибоїни, моніторинг доріг.

Постановка проблеми. Якість дорожнього покриття є фундаментальним аспектом, що безпосередньо впливає на безпеку учасників дорожнього руху, комфорт пересування, термін служби транспортних засобів та загальну ефективність функціонування транспортної інфраструктури. Недостатній рівень догляду за дорогами та відсутність своєчасного виявлення пошкоджень призводять до значних фінансових втрат, зростання кількості дорожньо-транспортних пригод та зниження пропускну здатності дорожньої мережі.

Існуючі підходи до оцінки стану дорожнього покриття часто характеризуються високою

трудомісткістю, суб'єктивністю та значними ресурсними потребами [1]. Візуальний огляд, попри свою простоту та доступність, залежить від кваліфікації інспектора та не дозволяє отримати об'єктивні кількісні дані про стан покриття. Лабораторні дослідження, що включають відбір та аналіз зразків матеріалів, забезпечують високу точність, проте є тривалими, витратними, руйнівними та непридатними для оперативного моніторингу великих ділянок. Спеціалізовані вимірювальні комплекси, такі як профілометри, хоча й надають високоточні дані, є громіздкими, надзвичайно дорогими та вимагають

спеціалізованого транспорту та кваліфікованого персоналу, що обмежує їхнє повсюдне використання, особливо для регулярних перевірок або у важкодоступних місцях.

В умовах зростаючого навантаження на дорожню мережу та природного старіння інфраструктури, виникає нагальна потреба у розробці більш доступних, портативних та об'єктивних інструментів для оцінки стану дорожнього покриття. Особливий інтерес становить можливість використання вібраційних характеристик, які можуть бути ефективно зібрані за допомогою акселерометрів. Такі пристрої дозволили б оперативно вимірювати рівень вібрацій, виявляти дефекти, точно класифікувати різні типи покриття, такі як плитка, асфальт, бруківка, а також ідентифікувати ями та вибоїни, прив'язуючи отримані дані до конкретних географічних координат за допомогою GPS. Це дало б змогу створювати детальні «вібраційні мапи» дорожнього покриття, що є цінним джерелом інформації для дорожніх служб, дозволяючи оптимізувати планування ремонтних робіт та ефективніше використовувати бюджетні кошти.

Пропоноване дослідження передбачає використання електросамоката як мобільної платформи для збору даних. Такий підхід підкреслює прагнення до створення максимально портативного та гнучкого рішення, яке може бути легко інтегроване у повсякденні засоби пересування, забезпечуючи моніторинг навіть на тих ділянках, які є недоступними для великогабаритного обладнання.

Таким чином, актуальна проблема полягає у відсутності ефективного, економічно вигідного та портативного рішення для об'єктивного моніторингу характеристик дорожнього покриття в реальному часі, що базується на вимірюванні вібрацій, дозволяє не лише виявляти дефекти та розрізняти різні типи покриття, а й будувати детальні «вібраційні мапи» з точною географічною прив'язкою. Вирішення цієї проблеми є важливим науково-технічним завданням, що має значне практичне значення для управління дорожньою інфраструктурою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед спеціалізованих вимірювальних комплексів особливе місце посідають профілометри [2]. Ці пристрої є основними інструментами для вимірювання поздовжнього профілю дорожнього покриття та розрахунку показника міжнародної рівності (IRI – International Roughness Index). Вони використовують різні технології,

включаючи лазерні датчики, ультразвукові сенсори або акселерометри, які зазвичай встановлюються на спеціалізовані автомобілі. Перевагами профілометрів є їхня висока точність у наданні кількісних даних про рівність дорожнього покриття, стандартизація вимірювання IRI як міжнародного показника якості доріг та можливість збору даних на високих швидкостях. Однак, профілометри є громіздкими та дуже дорогими системами, що вимагають значних інвестицій у обладнання та кваліфікований персонал. Їхня обмежена мобільність не дозволяє використовувати їх на вузьких вулицях, велосипедних доріжках або в місцях з обмеженим доступом. Крім того, показник IRI, хоча й є стандартом, не завжди надає детальну інформацію про конкретні типи дефектів, такі як ями чи вибоїни, або про тип самого покриття. Можливості для покращення полягають у розробці більш компактних, доступних та багатофункціональних пристроїв, які могли б доповнювати дані профілометрів, надаючи інформацію про тип покриття та локалізацію дефектів на мікрорівні.



Рис. 1. Приклад високошвидкісного профілометра

Останні роки відзначилися значним розвитком портативних та інтегрованих сенсорних систем, які використовують доступні компоненти для моніторингу дорожнього покриття. Одним з найбільш перспективних напрямків є використання систем на основі акселерометрів для вимірювання вібрацій, що виникають при русі транспортного засобу по дорожньому покриттю. Принцип роботи таких систем полягає у фіксації прискорень, що передаються від дорожнього покриття на транспортний засіб. Аналіз цих вібрацій, включаючи їх амплітуду, частотний спектр та середньоквадратичне значення, дозволяє оцінити рівність дороги, наявність дефектів і навіть розрізняти типи покриття. Серед існуючих рішень варто відзначити використання

вбудованих акселерометрів смартфонів для збору даних про стан доріг, що дозволяє створювати краудсорсингові платформи. Перевагами цього підходу є широке поширення смартфонів та низька вартість збору даних, проте недоліками є обмежена точність вбудованих сенсорів та залежність від моделі телефону та місця його розташування. Розробляються також спеціалізовані акселерометричні модулі, що базуються на високоточних акселерометрах та мікроконтролерах, призначені для встановлення на різні транспортні засоби. Ці модулі забезпечують вищу точність порівняно зі смартфонами та можливість оптимізації для конкретних завдань, хоча потребують розробки апаратної та програмної частини, а також калібрування [3].

Для створення «вібраційних мап» та точної локалізації дефектів, дані з акселерометрів обов'язково інтегруються з GPS-модулями. Цей підхід дозволяє прив'язувати кожне вимірювання вібрації до конкретних географічних координат, що є основою для побудови просторових карт стану дорожнього покриття, виявлення проблемних ділянок та відстеження їх динаміки. Більшість сучасних систем моніторингу доріг, включаючи профілометри та акселерометричні рішення, активно використовують GPS для географічної прив'язки даних [4].

Для автоматичної класифікації типів покриття та дефектів (асфальт, плитка, бруківка, ями, вибоїни) застосовуються різноманітні методи. Це може бути статистичний аналіз, що включає аналіз середньоквадратичного значення прискорення, дисперсії та пікових значень вібрацій. Також використовується спектральний аналіз, який вивчає частотний склад вібрацій, оскільки різні типи покриття та дефекти мають характерні частотні «відбитки» [5]. Все більшого поширення набуває машинне навчання, що передбачає використання алгоритмів класифікації, таких як метод опорних векторів (SVM), k-найближчих сусідів (k-NN), дерева рішень або нейронні мережі, для автоматичного розпізнавання типів покриття та дефектів на основі набору вібраційних характеристик. Цей підхід вимагає попереднього «навчання» моделі на розмічених даних.

Незважаючи на різноманітність існуючих рішень, залишається значна прогалина у створенні дійсно портативного, доступного та ефективного пристрою, який може бути використаний для регулярного моніторингу стану доріг на міському рівні, особливо на ділянках, недоступних для великих вимірювальних комплексів.

Використання електросамоката як платформи для дослідження є інноваційним підходом, що має ряд переваг. Це забезпечує високу маневреність, дозволяючи проводити вимірювання на вузьких вулицях, велосипедних доріжках, тротуарах та в паркових зонах. Доступність електросамокатів робить потенційну систему моніторингу більш поширеною та доступною. Вібрації, що передаються на самокат, є досить чутливими до дрібних нерівностей та дефектів, що дозволяє детально аналізувати стан покриття. Крім того, низька вартість експлуатації електросамоката робить його економічно вигідною платформою. Таким чином, розробка портативного пристрою на базі акселерометра та GPS, встановленого на електросамокаті, дозволить заповнити існуючу нішу, надаючи об'єктивні дані про вібраційні характеристики дорожнього покриття, будуючи детальні «вібраційні мапи» та класифікуючи типи покриття, що є значним кроком до оптимізації управління дорожньою інфраструктурою.

Постановка завдання. На основі проведеного аналізу існуючих рішень та виявлених проблем, головною метою даної роботи є розробка та експериментальне дослідження портативного пристрою для вимірювання вібраційних характеристик дорожнього покриття з GPS-прив'язкою та класифікацією його типу. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити низку конкретних завдань, які охоплюють як апаратну, так і програмну частини системи, а також передбачають проведення польових випробувань [6].

Першочерговим завданням є розробка апаратної частини пристрою. Це включає обґрунтований вибір відповідного акселерометра, що забезпечує необхідний діапазон вимірювань, чутливість та точність для фіксації вібрацій дорожнього покриття. Важливим є також вибір GPS-модуля, який гарантуватиме достатню точність позиціонування та швидкість оновлення даних для коректної прив'язки вібраційних показників до географічних координат. Центральним елементом системи є мікроконтролер, вибір якого має бути обґрунтований достатньою обчислювальною потужністю та обсягом пам'яті для ефективної обробки даних у реальному часі. Окрім того, необхідно розробити електричну схему пристрою, що забезпечить стабільну роботу всіх компонентів та їх взаємодію. Завершальним етапом апаратної розробки є створення компактного та захищеного корпусу, який забезпечить портативність пристрою та його стійкість до зовнішніх впливів під час експлуатації на електросамокаті.

Наступним важливим блоком завдань є розробка програмного забезпечення пристрою. Це передбачає створення алгоритму збору даних, який забезпечить синхронне та ефективне отримання інформації з акселерометра та GPS-модуля. Ключовим етапом є розробка алгоритмів фільтрації та попередньої обробки вібраційних даних, що дозволить усунути шуми та виділити значущі параметри, такі як середньоквадратичне значення прискорення, амплітуда та частотний спектр вібрацій. Особливу увагу слід приділити розробці алгоритму класифікації типу дорожнього покриття [7]. Це може включати застосування методів статистичного аналізу або, що є більш перспективним, використання алгоритмів машинного навчання, таких як метод опорних векторів (SVM), k-найближчих сусідів (k-NN) або нейронні мережі, для автоматичного розпізнавання асфальту, плитки, бруківки, а також ідентифікації ям та вибоїн на основі отриманих вібраційних характеристик. Також необхідно розробити інтерфейс для відображення та збереження даних, можливо, у вигляді мобільного додатку або запису на внутрішню пам'ять пристрою для подальшого аналізу.

Завершальним етапом роботи є проведення експериментальних досліджень та аналіз отриманих даних. Це включає проведення польових випробувань розробленого пристрою на електросамокаті на різних ділянках дорожнього покриття, що представляють різні типи (асфальт, плитка, бруківка) та містять типові дефекти (ями, вибоїни). Під час випробувань буде здійснюватися збір великого обсягу даних, що включають вібраційні характеристики та відповідні GPS-координати. Після збору даних буде проведено їх детальний аналіз, включаючи візуалізацію «вібраційних мап» та оцінку ефективності алгоритму класифікації. Важливою частиною

цього етапу є порівняння отриманих результатів з візуальними спостереженнями та, за можливості, з даними, отриманими за допомогою інших вимірювальних засобів, для оцінки точності та надійності розробленого пристрою.

Виклад основного матеріалу. Запропонована концепція пристрою представлена на Рисунку 3. Основна мета даної пропозиції полягає у створенні пристрою, що доповнює можливості користувача, надаючи об'єктивну інформацію про стан дорожнього покриття.

Основою апаратної частини пристрою є мікроконтролер ESP32, який забезпечує достатню продуктивність для обробки потоку даних з високою частотою дискретизації та одночасно взаємодіє з модулями зв'язку та пам'яті. Для вимірювання вібрацій використовується модуль GY-91 10DOF, що об'єднує в собі чотири датчики: тривісний гіроскоп, тривісний акселерометр і тривісний магнітометр, суміщені в чипі InvenSense MPU-9250. Акселерометр є ключовим сенсором, який вимірює прискорення по трьох вісях (X, Y, Z), а гіроскоп дозволяє фіксувати кутові швидкості, що є важливим для компенсації власних рухів електросамоката. Магнітометр може бути використаний для визначення орієнтації пристрою. Для отримання точних географічних координат (широта, довгота, висота) та часу використовується GPS-модуль NeobM. Барометр/термометр на чипі Bosch BMP280, інтегрований у модуль GY-91, надає додаткові дані про висоту та температуру, які можуть бути корисними для більш точного аналізу умов вимірювання.

Збір та збереження даних здійснюється шляхом запису інформації у форматі CSV-файлу на SD-карту, що дозволяє накопичувати значні обсяги даних для подальшого аналізу. Для зручності користувача, деяка ключова інформація,

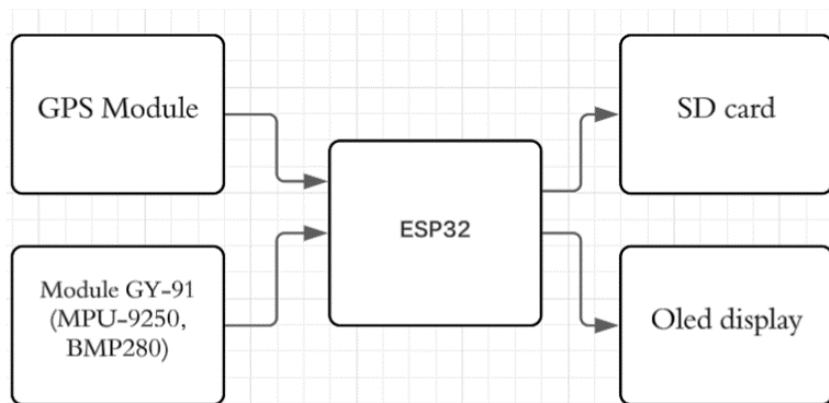


Рис. 2. Структурна схема портативного пристрою для вимірювання характеристик дорожнього покриття

така як поточний статус GPS, рівень вібрацій або тип виявленого покриття, виводиться на компактний OLED-дисплей. Корпус пристрою розроблений таким чином, щоб забезпечити його компактність, легкість та надійне кріплення до електросамоката, мінімізуючи вплив власних вібрацій самоката на вимірювання.

В результаті збору та попередньої обробки даних, пристрій формує таблицю даних у форматі CSV, яка записується на SD-карту. Цей формат дозволяє зберігати повний набір вимірних параметрів для подальшого глибокого аналізу та побудови вібраційних карт.

Результати експериментальних досліджень

Для перевірки ефективності розробленого пристрою було проведено випробування на електросамокаті у реальних міських умовах, охоплюючи ділянки з різними типами дорожнього покриття та ступенем зносу. Аналіз отриманих даних підтвердив чітку кореляцію між рівнем вібрацій та станом дорожнього покриття, а спектральний аналіз дозволив виявити характерні частотні патерни для кожного типу покриття. Застосований алгоритм класифікації продемонстрував високу точність у розрізненні типів покриття та ефективну локалізацію дефектів. Результати були візуалізовані у вигляді «вібраційного графіку».

Проведені експерименти підтвердили працездатність та ефективність розробленого портативного пристрою. Його мобільність та відносно низька вартість роблять його перспективним інструментом для регулярного моніторингу дорожньої мережі. Однак, були виявлені й певні

обмеження, такі як чутливість до швидкості руху (для більш точної класифікації бажано підтримувати відносно стабільну швидкість) та потенційний вплив вібрацій самої платформи, що потребує подальшої компенсації. Загалом, результати свідчать про значний потенціал запропонованого підходу для об'єктивної та оперативної оцінки стану дорожнього покриття.

Висновки. Практична значущість розробленого пристрою полягає у його здатності надавати об'єктивну та оперативну інформацію про стан дорожнього покриття. Це дозволить дорожнім службам та муніципалітетам більш ефективно планувати ремонтні роботи, оптимізувати використання бюджетних коштів, а також підвищити безпеку та комфорт дорожнього руху. Використання електросамоката як платформи робить рішення надзвичайно мобільним та доступним для моніторингу навіть у важкодоступних міських умовах.

Перспективи подальших досліджень включають покращення алгоритмів класифікації за рахунок використання більш складних моделей машинного навчання та збільшення обсягу навчальних даних для підвищення точності та стійкості до різних умов експлуатації.

Це компактний та портативний пристрій з вбудованим акумулятором, що кріпиться на електросамокаті. Він оснащений високоточним акселерометром для вимірювання вібрацій дорожнього покриття та GPS-модулем для прив'язки даних до координат. Зібрана інформація зберігається на SD-карті та відображається на невеликому OLED-дисплеї.

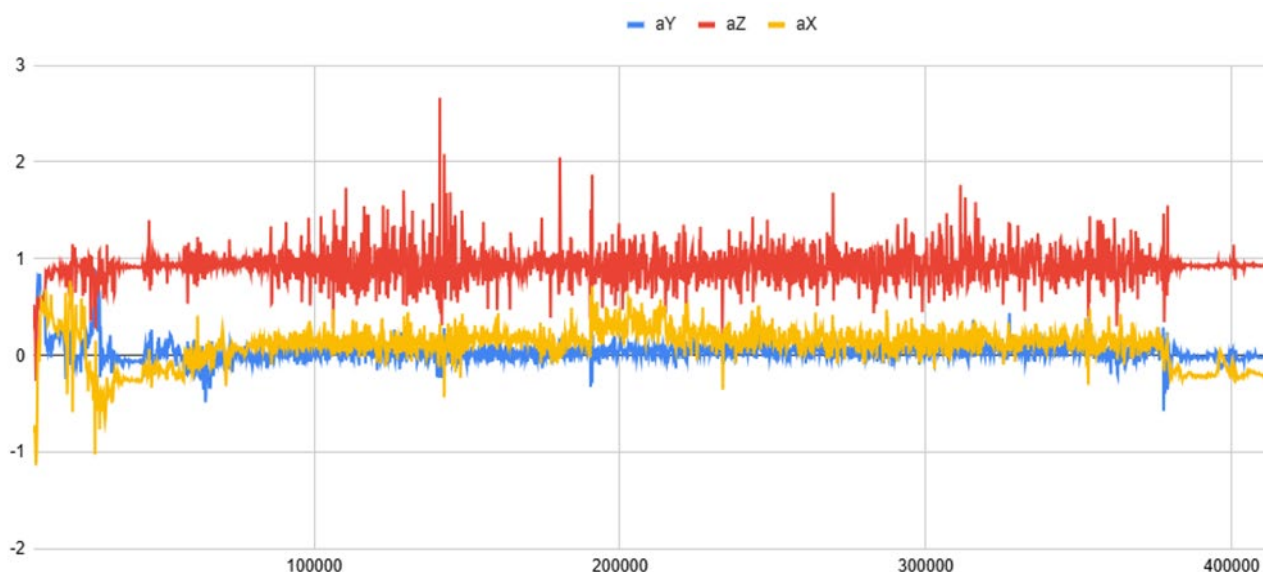


Рис. 3. Графік вібрації маршруту

Список літератури:

1. Ковальчук, О. В. Інженерія дорожнього покриття та діагностика. Львів : Видавництво Політехніки, 2024. 450 с.
2. Сміт, О. В. Методи та пристрої для оцінки стану дорожнього покриття. Київ : Техніка, 2022. 320 с.
3. Захарченко, М. С. Аналіз вібраційних сигналів для оцінки стану дорожнього покриття. Вісник транспортної інженерії. 2023. № 3 (78). С. 60–68.
4. Петренко, Г. М. Застосування GPS-технологій у системах дорожнього моніторингу. Геодезія та картографія. 2021. № 4. С. 112–118.
5. Сидоренко, Л. В. Машинне навчання для класифікації дорожнього покриття. Інформаційні технології в транспорті. 2023. № 1. С. 78–85.
6. Іванов, П. Р. Використання акселерометрів для моніторингу вібрацій. Сучасні технології в будівництві. 2023. № 2. С. 45–52.
7. Бондаренко, І. А., Мельник, В. П. Мобільні системи збору даних про дорожнє покриття на базі електросамокатів. У: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Інновації в дорожньому будівництві». Харків, 2024. С. 115–120.

Harkavenko O.A., Hubar V.H. RESEARCH AND SOLUTION OF THE PROBLEM OF A PORTABLE DEVICE FOR MEASURING ROAD SURFACE CHARACTERISTICS

The article is devoted to the development and experimental study of a portable device concept for objective measurement of road surface vibration characteristics. The article reveals the problem of limitations of existing road surface quality assessment methods, such as subjective visual inspection and bulky profilometers, which significantly complicates operational monitoring. The main idea of using a highly sensitive accelerometer to record dynamic vibrations during movement and integrating them with precise GPS coordinates is unveiled. It is determined that this allows for the creation of detailed “vibration maps” to localize problematic areas and automatically distinguish between surface types (asphalt, cobblestone, tile), as well as identify defects such as potholes and cracks, which is critically important for proactive maintenance.

It is clarified that using an electric scooter as a mobile data collection platform makes the device an accessible, maneuverable, and cost-effective solution for covering areas inaccessible to vehicular traffic, opening new opportunities for urban infrastructure. The functionality of a compact measuring complex capable of providing objective data on the condition and type of road surface has been investigated. It has been proven that this will enable municipal services to optimize repair planning and more efficiently utilize resources, contributing to increased budget efficiency. The scientific novelty, which lies in the synergistic combination of available technologies (ESP32 microcontroller, GY-91 module, Neo6M GPS module) to create a highly effective tool for obtaining detailed “vibration maps” and using machine learning methods for classification, has been considered. The practical value of the study, which lies in the possibility of widespread implementation of such a device for regular monitoring of the road network, contributing to improving road surface quality and proactive problem detection, ensuring the long-term sustainability of transport infrastructure, has been defined.

Key words: road surface, vibrations, accelerometer, GPS, portable device, electric scooter, vibration map, surface classification, pits, potholes, road monitoring.