

УДК 004.67

DOI: 10.18372/2073-4751.73.17644

Нікольський С.С.,  
orcid.org/0000-0003-4893-3339,

Клименко І.А., д.т.н.,  
orcid.org/0000-0001-5345-8806

## РОЗРОБКА ЗАСОБІВ ДЛЯ АНАЛІЗУ ДАНИХ ДЛЯ СИСТЕМ ІОТ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ

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

nikolskiy.serhiy@111.kpi.ua

### **Вступ**

По мірі розвитку сучасних технологій з'єднання пристроїв, обробки великих даних, інтелектуальної аналітики розвивається технологія Інтернет речей (ІоТ) все більше впливає на життя суспільства втілюючись повсюдно в усі сфери діяльності людства. Зокрема під впливом можливостей ІоТ розумні міста реалізують велику кількість завдань в галузях міської мобільності, безпеки, технічного обслуговування, охорони здоров'я, управління.

Моніторинг стану дорожнього покриття одне із актуальних завдань технічного обслуговування розумного міста [1-3]. Ефективна система моніторингу дозволить підвищити комфорт водіїв та завчасно реагувати на проблемні ділянки дороги, підвищити загалом якість життя та зменшити використання людських та матеріальних ресурсів, які можна витратити на ремонт та розвиток [2]. В той же час це надзвичайно складна задача, яка потребує одночасного контролювання тисяч кілометрів дорожнього полотна, яке пошкоджується під впливом різноманітних природних та техногенних факторів.

Традиційно системи моніторингу базуються на великій кількості ІоТ датчиків, які генерують величезну кількість вимірів і спілкуються між собою та серверами аналітики [4]. В результаті аналітика величезних обсягів даних стає критичним інструментом, який потребує пошуку нових методів та засобів вдосконалення. Актуальні проблеми сучасної аналітики ІоТ даних полягають не тільки в їх частих аномаліях і величезному обсязі, а й в необхідності

реалізації обчислень високої складності в наближеному до реального режимі часу [4]. Це актуально й для систем моніторингу стану дорожнього покриття, які є чутливими до часу обробки даних.

Одним з напрямків вдосконалення засобів аналітики є розвиток інтелектуальних можливостей аналітики ІоТ даних. Нейронні мережі та інші інтелектуальні засоби оброблення великих обсягів даних розширюють можливості застосунків ІоТ і обговорюються в сучасних джерелах, як найбільш актуальний та перспективний шлях підвищення ефективності аналітики даних ІоТ [2].

Стаття присвячена актуальним задачам розроблення засобів аналітики ІоТ даних на базі нейронних мереж для систем моніторингу стану дорожнього покриття, які базуються на використанні технологій ІоТ і можуть бути легко інтегровані в системи технічного обслуговування розумними містами.

### **Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

В умовах повсюдного розповсюдження систем ІоТ все більшої актуальності набувають способи автоматичного збирання інформації, які покликані забезпечити ефективну обробку зібраних даних в режимі реального часу [2,5].

Широко розповсюдженим способом є використання відзнятих камерами водіїв відеоматеріалів для автоматичної фіксації ям на дорогах [3,6]. Ще одним розповсюдженим рішенням є клієнтські мобільні застосунки та сервіси для моніторингу пошкоджень на дорогах, які використовують

встановлені в сучасних смартфонах різноманітні датчики, такі, як камера, акселерометр, GPS [7,8]. Найбільш перспективним класом, є системи моніторингу, які вбудовані в автомобілі [9]. Така концепція для моніторингу дорожнього покриття, базується на використанні розміщених під автомобілями сенсорів та датчиків, які комунікують з бортовим комп'ютером та віддаленими сховищами та сервісами оброблення даних [9].

Для виявлення проблемних ділянок на дорогах як вбудовані в автомобілі системи діагностики так і мобільні пристрої зазвичай використовують виміри показників лінійного прискорення акселерометра [2,7,8]. Основна проблематика, яка супроводжує використання акселерометрів для визначення показників лінійного прискорення полягає в тому, що неможливо достовірно оцінити стан дорожнього покриття шляхом лише вимірюванням показників акселерометра. Ця проблема була описана в роботі [10]. Виникає необхідність класифікації показників акселерометра для визначення характеру нерівностей дорожнього покриття. Ця проблема вирішується шляхом реалізації різноманітних алгоритмів та методів аналізу комплексу показників та факторів. В статті [8] описані комплексні алгоритми визначення ям на дорогах, які реалізують класифікацію дорожніх нерівностей, таких як: рівна дорога, дорожні компенсатори, дорожні «рельси», ями, каналізаційні люки, лежачі поліцейські. В ході досліджень приймали участь працівники таксі з різною манерою керування на різних автомобілях різного року випуску, які були обладнані комп'ютером з підключеним трьохосьовим акселерометром. Класифікація базується на показниках акселерометра, отриманих за осями X та Z, а також швидкості автомобіля. Запропоновані засоби не працюють в режимі реального часу, що є певним недоліком, натомість, автори анонсують дуже гарні результати – лише 2 % похибки при виявленні ям. Серед традиційних недоліків, також слід зазначити чутливість датчиків до розташування в автомобілі.

Для рішення складних задач аналізу великої кількості вимірів та класифікації показників акселерометра сучасні літературні джерела описують інтелектуальні методи обробки даних.

В роботі [6] реалізований сучасний підхід до аналізу відеоматеріалів з використанням штучного інтелекту. Сучасні технології розпізнавання відео та використання нейронних мереж дозволили отримати 92,8 % успіху під час виявлення дефектів дорожнього покриття. Загальною проблемою отримання якісних даних з відеокамер є необхідність їх однотипного розміщення на всіх автомобілях. Також слід згадати високу вартість відео устаткування і використовуваних платних аналітичних сервісів.

Використання штучного інтелекту, в тому числі на базі навчених нейронних мереж, забезпечує значне прискорення обробки даних в реальному часі [6]. В роботі [11] авторами розглядається інтелектуальний класифікатор на базі вимірів з вбудованого в мобільний телефон акселерометра. Для класифікації нерівностей автори пропонують аналізувати показники прискорення з використанням алгоритмів машинного навчання. В якості класифікатора був використаний наївний баєсів класифікатор. Нейронна мережа натренована на показниках прискорення по осі Z. Датасет складається з коротких відрізків замірів на різних ділянках дороги. Загальний принцип полягає в тому, що під час руху показники акселерометра розбиваються на невеликі частини і перевіряються за допомогою класифікатора. В результаті автори отримують набір ділянок, кожна з яких відповідає або рівній дорозі або дорозі з ямами. Натренована нейронна мережа показала точність на рівні 82,857 %.

Сучасні інтелектуальні систем моніторингу використовують згорткові нейронні мережі (CNN). Система описана в роботі [6] в якості основного датчика використовує камеру для збирання відео даних в реальному часі. В роботі [12] запропоновано реалізацію моделі легкої згорткової нейронної мережі (CNN) на

мобільному пристрої для дорожнього моніторингу. Авторами оглянутих робіт зазначено, що мережі CNN поєднують собі високу продуктивність і низьку обчислювальну складність. Оцінки авторів довели її ефективність. У дослідженні [6] було отримано відсоток успіху 92,8 % при виявленні ям з використанням згорткової нейронної мережі CNN.

Таким чином, серед проблем ефективності функціонування систем моніторингу стану дорожнього покриття, значними є проблеми швидкодії обробки великих обсягів даних в реальному часі, точності та достовірності отриманих результатів. Виходячи з вищесказанного, проведення досліджень в області розроблення та вдосконалення систем моніторингу стану дорожнього покриття з можливістю інтеграції в системи технологічного обслуговування розумними містами на базі IoT актуально та доцільно. Доцільно підвищувати точність та достовірність результатів моніторингу шляхом покращення ідентифікації нерівностей, а також впроваджувати інтелектуальні методи аналізу IoT даних для підвищення ефективності їх обробки в реальному часі.

### **Мета**

Метою дослідження є розроблення засобів та підходів до аналізу даних з IoT пристроїв з використанням навчених нейронних мереж для систем моніторингу стану дорожнього покриття. Реалізація мети дослідження дозволить підвищити точність та достовірність отриманих даних про стан дорожнього покриття та збільшити швидкість реалізації складних аналітичних алгоритмів оброблення IoT даних. Це дасть можливість вдосконалення систем розумного міста на базі технологій IoT.

Для досягнення мети була поставлені задачі:

- розробити спосіб класифікації показників лінійного прискорення акселерометра з використанням згорткових нейронних мереж;

- розробити комплекс програмно-апаратних засобів для збирання та інтелектуального аналізу IoT даних.

### **Обґрунтування програмно-апаратних рішень для автоматичного збирання показників лінійного прискорення**

Рішення поставлених задач базуються на виборі програмного та апаратного забезпечення, яке відповідає умовам точності показників, високої продуктивності, простоти конфігурації та програмування, невисокої вартості, серійності виробництва та доступності на ринку електроніки.

Для отримання показників лінійного прискорення використано трьохосьовий високопродуктивний MEMS акселерометр [13,14] акселерометр LIS3DSH компанії STMicroelectronics (Європейська інтернаціональна компанія, Франція, Італія). Використаний пристрій має режими роботи з наднизьким енергоспоживанням, розширеним енергозбереженням та розумні вбудовані функції. Специфічною перевагою для дослідження є вимірювальні шкали, що надають можливість динамічної конфігурації на різні діапазони граничних значень, а також наявність послідовного периферійного інтерфейсу SPI для підключення великої кількості периферійних пристроїв.

Для рішення задач реального часу для процесорів обробки даних критичними є ефективність засобів обробки переривань від великої кількості периферійних пристроїв та швидкісні засоби комунікації [16]. Для агрегації та попередньої обробки IoT даних отриманих з акселерометра використано контролер сімейства STM32F407vg. В контролер сімейства STM32F407vg вже вмонтований цифровий акселерометр LIS3DSH. Також цей контролер містить необхідні інтерфейси для обміну даних, на ньому розміщено велику кількість портів вводу/виводу загального користування.

Для конфігурації контролера STM32F407vg використано середовище розробки STM32CubeMX. Середовище

розробки STM32CubeMX це інструмент з графічним інтерфейсом від компанії STMicroelectronics, який призначено саме для автоматичного конфігурування пристроїв STM32, а також для генерації вихідного коду на мові C для ядра ARM Cortex M. Для розроблення драйверів апаратної частини використано середовище розробки Keil uVision та мова низькорівневого програмування C.

### **Модифікований спосіб пошуку нерівностей на дорогах**

Алгоритми, що реалізовані для аналізу показників прискорення базуються на модифікації алгоритмів пошуку ям на дорозі, що описані в роботі [8,16]. Алгоритми, представлені в [8,16] були модифіковані і на їх основі був створений модифікований спосіб виявлення нерівностей на дорогах, який детально описаний в роботі [10]. Основні положення модифікованого способу, які полягли в основу досліджень наведені далі.

Модифікований спосіб базується на вимірюванні горизонтального положення осей акселерометра. Це класичний підхід, який базується на аналізі показників прискорення отриманих з акселерометра. Основна характеристика для визначення ями – це прискорення по осі Z і пристрій повинен бути розміщений паралельно дорозі. Таким чином, правильне розташування пристрою для отримання достовірних результатів є важливою умовою використання запропонованого способу.

Модифікований спосіб виконує дворівневий тест. Перший тест виявляє ями на дорозі і називається пороговим тестом (Threshold test). Пороговий тест базується на визначенні, що машина істотно змінює своє прискорення вздовж вертикальної осі коли потрапляє в яму. Пороговий тест порівнює значення прискорення з пороговим значенням. Оскільки входження в яму прискорення приймає форму синусоїди – різко прискорюється, а потім так само різко уповільнюється, як показано на рис.1. Верхній і нижній поріг прискорення встановлено експериментально [10].

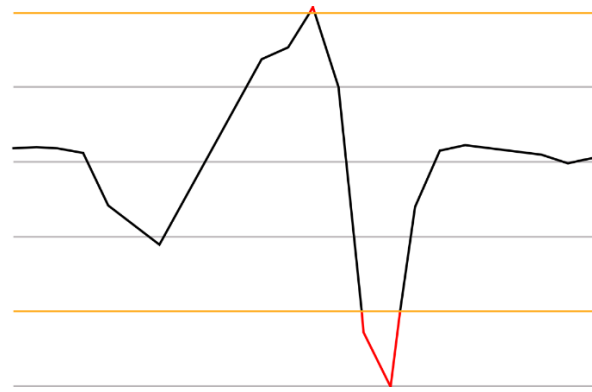


Рис. 1. Пороговий тест

Другий тест – тест різниці (Difference test) базується на визначенні, що показник вертикального прискорення при потрапленні в яму різко зростає. Це визначає вірогідні нерівності, навіть якщо показники не подолали порогових значень, як зображено на рис.2. Тест різниці виявляє, наприклад, тріщини, які можуть не приводити до значної зміни показника вертикального прискорення по осі Z, але зміна між послідовними вимірюваннями показника буде значною, щоб припустити наявність дефекту на дорозі. Другий тест базується на порівнянні сусідніх значень у буфері вимірів – індикаторів різниці.

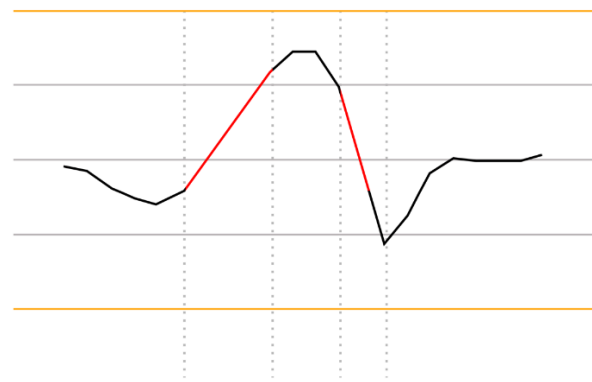


Рис. 2. Тест різниці

Проведено послідовність експериментів на різних ділянках дороги, яка має різні типи нерівностей (великі вибоїни, дрібні вибоїни, групи вибоїн, розриви, тротуари та залізничні переїзди) [10]. Була використана методика описана в авторських дослідженнях [8,10,11,16]. Зроблені порівняльні оцінки обох тестів і визначені порогові значення показників прискорення та індикатори різниці вимірів, які дозволяють ідентифікувати найбільший відсоток

справжніх нерівностей. Модифіковані алгоритми показали наступні результати: пороговий тест показує найкращі результати з пороговим значенням 0,4 g – 76 % знайдених нерівностей ідентифіковано, як справжні ями. Тест різниці, визначає 92 % різноманітних вибоїв та нерівностей з ідентифікатором 0,2 g та включає значну кількість різноманітних результатів, наприклад, тріщини, незначні пошкодження. Також модифікованим методом було

ідентифіковано тротуари та залізничні переїзди [10].

Приклад дворівневого тестування зображено на рис.3. Дві статичні лінії розташовані паралельно осі X і вказують максимально допустимі значення відхилення вертикального прискорення, яке можна вважати нерівностями. Третя крива зображує узагальнені за двома тестами показники вертикального прискорення по осі Z.

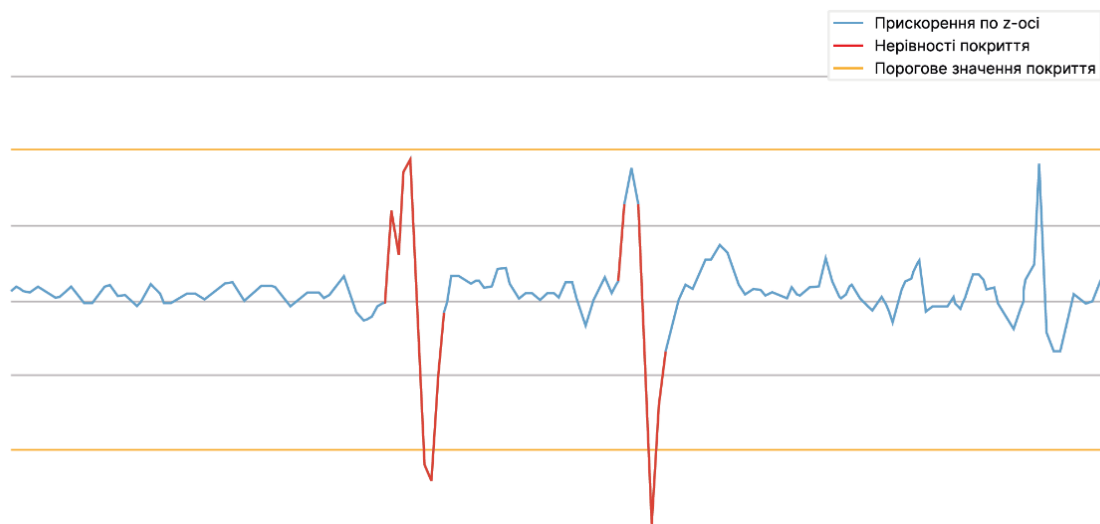


Рис. 3. Виявлення нерівностей за двома тестами

На відміну від авторського методу, який ідентифікує ділянки дороги, кожна з яких відповідає або рівній дорозі або дорозі з ямами. Модифікований метод виявляє сукупність нерівностей на підставі аналізу показника вертикального прискорення і різкої зміни вертикального прискорення. На графіку (рис.3) підсвічені видимі зміни вертикального прискорення, які не виходять за порогові значення, але ідентифікуються алгоритмом, як нерівності.

### **Спосіб класифікації стану дорожнього покриття на основі нейронної мережі**

В якості базового використано модифікований спосіб визначення нерівностей [10]. Запропоновано впровадити класифікацію отриманих вимірів для ідентифікації нерівностей з метою уточнення інформації про стан покриття. При цьому виникає проблема значного ускладнення

обчислювальних алгоритмів для додаткової обробки показників акселерометра. Складність обчислень пов'язана з необхідністю узагальнення результатів вимірів акселерометра за двома запропонованими тестами [10], уточнення вимірів шляхом багаторазових повторень, класифікації отриманих даних, а також врахування перспективного розширення функціоналу. Для вирішення цієї проблеми запропоновано використання нейронних мереж та машинного навчання.

Для тренування нейронної мережі створено датасет. Дані для датасету збиралися під час експериментів. Методика проведення експериментів описана в [8,10,11,16], для чого виконувалися заїзди по ділянкам дороги різної якості. Дані збиралися з послідовного COM порту і зберігалися у файлі csv. Отримані під час експериментів дані датасету були поділені на тестову та тренувальну вибірку. На основі

датасету створено нейронну мережу для класифікації стану дорожнього покриття. Нейронна мережа реалізована у вигляді модуля серверного програмного забезпечення – класифікатора.

Під час експериментів данні збиралися в реальному часі і нерівності класифікувалися вручну, ці виміри полягли в основу створення датасету. Датасет представляє собою файл, в якому зберігаються по три параметри для кожного виміру, кожен з параметрів є показником лінійного прискорення за однією із осей акселерометра. Загальний розмір тренувального датасету складає 16000 записів. Показники датасету в результаті експериментів було класифіковано за чотирма рівнями:

- I – рівна дорога;
- II – бордюр, лежачий поліцейський, залізничний переїзд;
- III – дрібні ями;
- IV – великі ями (глибше 2 см, більше 20 см в діаметрі).

Як базову технологію для інтелектуального аналізу використано технологію аналізу та прогнозування часових рядів. Часові ряди створено на основі даних датасету. Традиційно для побудови нейронних мереж на основі часових рядів використовуються рекурентні нейронні мережі RNN. На відміну від них, згорткові нейронні мережі CNN (Convolutional Neural Network) – це сучасні штучні нейронні мережі, які на одному або декількох шарах використовують операцію математичної згортки замість операції множення матриць [6,12]. Найчастіше згорткові нейронні мережі використовуються для обробки зображень. Модифікація CNN, яка називається часовою загортковою нейронною мережею TCN призначена для роботи з часовими рядами, але цей підхід потребує одразу дві натреновані моделі, у зв'язку з чим, має більшу обчислювальну складність і як результат меншу швидкодію обчислень. В даному проєкті досліджено можливість використання CNN, для рішення задачі класифікації нерівностей дорожнього полотна.

Для класифікації визначено набір послідовних показників прискорення, що перетворює створений набір векторів в колекцію матриць (кадрів). На основі чого розроблено модель згорткової нейронної мережі, яка складається з наступного набору шарів: згортковий шар Conv2D розмірністю 16 з функцією активації ReLu; шар Dropout для пониження ймовірності перетренування; згортковий шар Conv2D розмірністю 32 з функцією активації ReLu; – другий шар Dropout для пониження ймовірності перетренування; шар Flatten, для пом'якшення входу даних; шар Dense розмірністю 64 з функцією активації ReLu; третій шар Dropout для пониження ймовірності перетренування мережі; шар Dense на 4 виходи рівних кількості варіантів відповідей, з функцією активації softmax.

Нейронна мережа тренувалася протягом 50 епох з оптимайзером Adam. Для розробки було використано бібліотеку keras з набору бібліотек мови Python. В результаті було отримано нейронну мережу, яка визначає нерівності дорожнього покриття і класифікує їх за запропонованим методом. Графік залежності точності отриманих показників в від кількості епох зображено на рис.4.

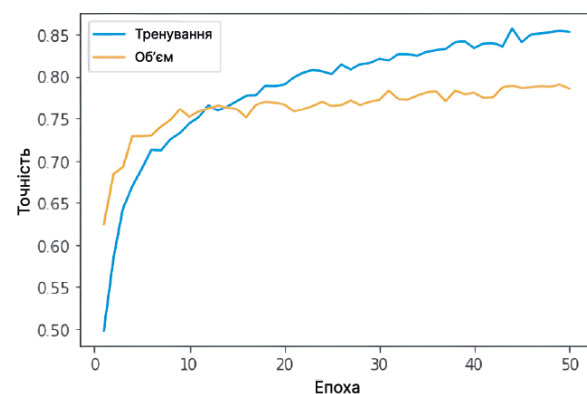


Рис. 4. Графік точності нейронної мережі в залежності від кількості епох тренування

Таким чином, розроблена нейронної мережі дозволяє ідентифікувати нерівності з точністю 85,2 %. Експерименти показали, що помилки вимірювань усуваються повторними тестуваннями, а багаторазові перевірки однієї і той самої ділянки дороги щоразу підвищують точність тестування. Точність роботи нейронної мережі

можливо підвищити при збільшенні розміру датасету.

### **Комплекс програмно-апаратних засобів для аналізу IoT даних та візуалізації результатів**

На рівні збирання та обробки даних знаходиться сукупність мобільних об'єктів, кожен з яких містить датчик, який вимірює показник лінійного прискорення [10]. Роль мобільного об'єкта виконує автомобіль, який містить відповідну апаратуру та переміщуються в довільному напрямку в межах певної області дослідження.

Контролер зчитує з трьохосового акселерометра показники лінійного прискорення і передає пакети даних по шині SPI через порт мікро USB на сервер аналітики даних в режимі послідовного COM порту. На сервері відбувається приведення даних до стандартних одиниць вимірювання. Дані на COM порт надходять у шістнадцатковому форматі, після чого перетворюються на десяткові значення в одиницях вимірювання  $g=9.8$  м/с<sup>2</sup>. Далі формуються кадри послідовних вимірів акселерометра відповідного розміру, які є вихідними для аналізу нейронною мережею. Один кадр даних представляє собою виміри протягом 2,5 секунд. Отримані кадри даних класифікуються натренованою нейронною мережею, зберігаються на сервері.

В рамках реалізації комплексу програмно-апаратного забезпечення для обробки IoT даних розроблено – сервер аналітики та керування системою моніторингу, навчена нейронна мережа для виявлення та класифікації стану дорожнього покриття (класифікатор), датасет; – серверне програмне забезпечення для тестування та візуалізації результатів з графічним інтерфейсом користувача.

Серверне програмне забезпечення складається з класифікатора і програмних модулів для візуального відображення даних, що зчитуються з COM-порту та виводу її в зручному графічному вигляді.

Класифікатор є основним модулем розробленого серверного програмного забезпечення для інтелектуальної аналітики на основі нейронної мережі. Кадри даних, що зберігаються на сервері, класифікуються натренованою нейронною мережею на предмет наявності та класифікації нерівностей. Класифікатор формує аналітичні результати, які зберігаються на сервері та передаються в хмари для подальшого використання та аналітики.

Серверне програмне забезпечення реалізоване з використанням бібліотеки графічного інтерфейсу PyQt на мові програмування Python, використана бібліотека для роботи COM-портом pySerial та бібліотека для графічного представлення даних matplotlib. Для налаштування візуального зображення результатів роботи класифікатора було використано програму Qt Designer, яка включає широкий набір опцій для налаштування графічного інтерфейсу.

Графічний інтерфейс представляє з себе меню для вибору COM порту, шкали для відображення показників лінійного прискорення на різних осях координат, динамічний графік показників прискорення по осі Z та цифрові показники зверху над ним. Дані демонструються в реальному часі в різних відображеннях. Загальний вигляд графічного інтерфейсу модуля Accelerometer Port Monitor для відображення стану та класифікації дорожнього покриття представлено на рис.5. Праворуч розміщено чотири індикатора стану дорожнього покриття: зелений – рівна дорога; жовтий – лежачий поліцейський, залізничний переїзд, вибоїна; оранжевий – невелика яма, бруківка; червоний – аварійна ділянка, велика яма. Ліворуч відображуються результати вимірів за трьома осями акселерометра та будуються графіки за трьома проекціями в реальному часі. Індикатори підсвічуються відповідно до визначених класифікатором типів нерівностей.



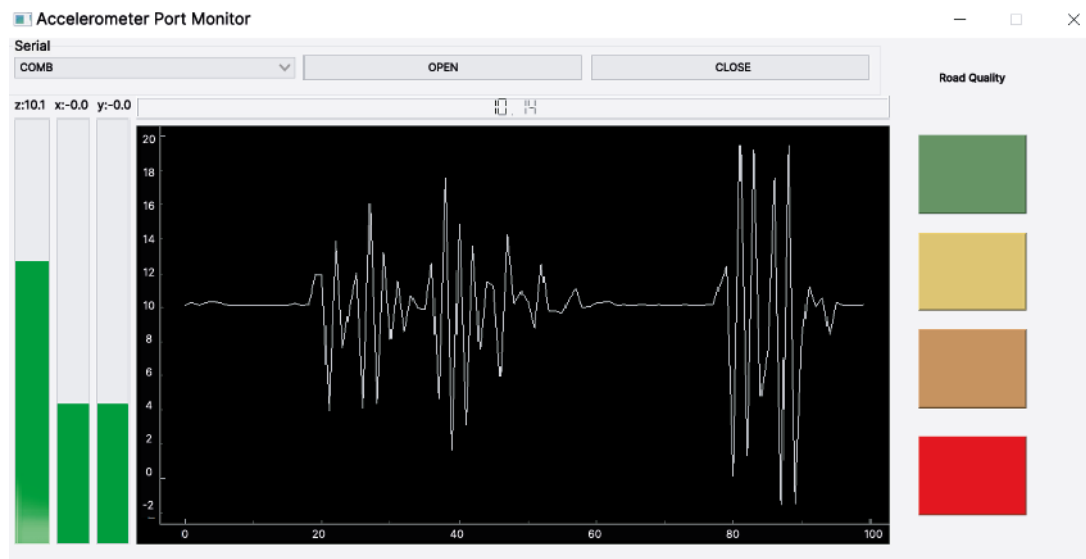


Рис. 5. Приклад роботи графічного інтерфейсу

Для візуалізації результатів в користувацьких додатках розроблено модуль для візуалізації стану дорожнього покриття на Google картах. Програма визначає положення пристрою за допомогою GPS навігації та встановлює відповідну позначку на Google карті. Після встановлення класифікатором стану дорожнього

покриття на сервері визначається положення датчика та встановлюється відмітка спеціального кольору на Google Карті. Інформація про стан дорожнього покриття виводиться трьома рівнями: хороша дорога – зеленого кольору, незначні пошкодження – жовтого кольору, та значні пошкодження – червоного кольору (рис.6).

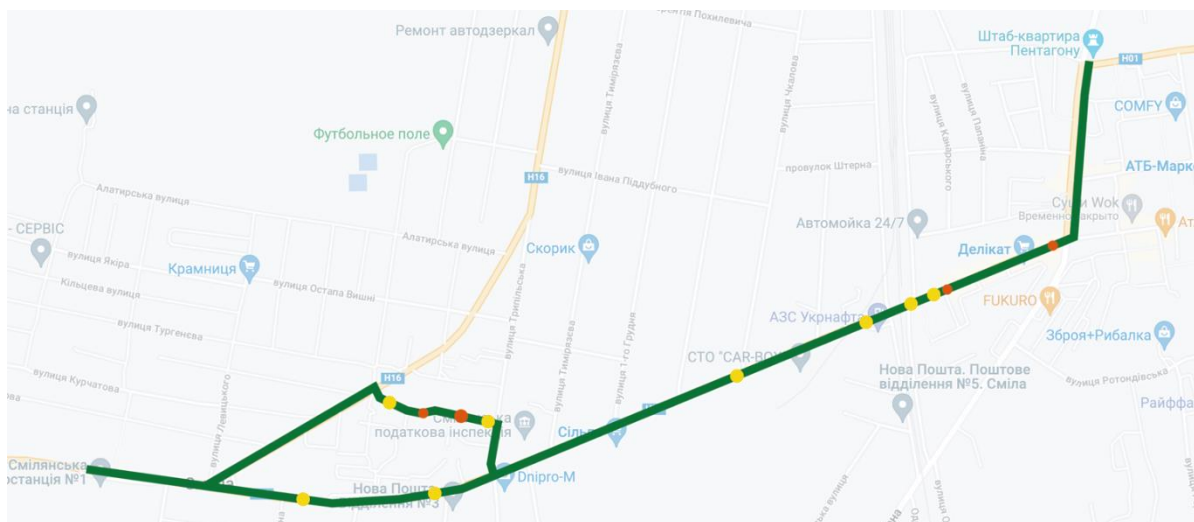


Рис. 6. Вигляд відображення стану дорожнього покриття на карті

### **Обговорення результатів дослідження засобів збирання та інтелектуальної аналітики IoT даних**

Парадигмою запропонованих рішень є інтеграція в масштабну систему технічного обслуговування розумного міста на базі технологій IoT та підвищення ефективності обробки даних з великої кількості IoT пристроїв в режимі реального часу.

Рівень інтернет забезпечує комунікацію апаратної та серверної частини, а також зв'язок з хмарними сервісами та технологіями. Сучасні технології IoT тяжіють до реалізації граничних обчислень, тому реалізація серверної частини для інтелектуальної аналітики даних розглядається на границі мережі IoT.



Пристрої збирання даних встановлюються на користувацьких автомобілях або на громадському транспорті з метою збирання та відправлення даних на сервер для подальшої аналітики. На відміну від локальних систем моніторингу [6-9], мобільні вузли рухаючись по різних регіонах вирішують задачу динамічного та масштабованого моніторингу великих і, загалом, технічно необмежених обсягів дорожніх покриттів. Дані про стан дорожнього покриття разом з координатами автомобіля передаються на сервер для формування аналітичних даних. Аналітична інформація зберігаються на сервері та в розподілених хмарних базах даних для подальшого використання. База даних дорожнього покриття може використовуватися як дорожніми службами для визначення стану доріг, так і в користувацьких застосунках для завчасного упередження водіїв.

Для вирішення проблеми підвищення точності ідентифікації отриманих даних про стан дорожнього покриття та збільшення швидкодії обчислень в реальному часі, розроблений спосіб класифікації показників лінійного прискорення акселерометра. Для аналізу часових рядів запропонований спосіб, на відміну від традиційно використовуваних рекурентних нейронних мереж (RNN) базується на використанні згорткових нейронних мереж CNN. Використання CNN дозволило зменшити складність обчислювальних алгоритмів, чим підвищити швидкість обробки даних. На основі способу класифікації показників лінійного прискорення розроблений класифікатор нерівностей дорожнього покриття з використанням навченої згорткової нейронної мережі.

Результати складних розрахунків покладені на розроблену нейронну мережу отримувалися оперативно в режимі часу візуально наближеному до реального без значущих затримок, це було доведено експериментами. За аналізом точності виявлення нерівностей, результати якого наведені на графіку на рис. 5, отримано, що точність виявлення дефектів дорожнього покриття з використанням розробленої

згорткової нейронної мережі CNN дорівнює 85,2 %. У порівнянні з попередніми дослідженнями, що описані в роботах [10], отримано збільшення точності виявлення дефектів на 6 %, що обумовлене впровадженням класифікації нерівностей дорожнього покриття. У порівнянні з результатами, описаними в роботах [8] отримано підвищення точності приблизно на 3 % за рахунок використання CNN для інтелектуального аналізу та використання класифікатора. Отримано приблизно на 6 % менше точності у порівнянні з дослідженнями, що описані в роботі [6], але в цьому випадку досягнуто здешевлення реалізації у порівнянні з використанням дорогих відеокамер. Збільшення точності виявлення дефектів можливо шляхом збільшення розмірів датасету, що є однією з цілей продовження досліджень.

Комплекс апаратного та програмного забезпечення був реалізований у вигляді експериментального прототипу системи для моніторингу стану дорожнього покриття. Програмне забезпечення складається з серверних програм обробки даних на основі нейронної мережі, до складу якої входить модуль класифікатора; модуль керування системою; модуль візуалізації результатів з графічним інтерфейсом; модуль навігації та користувацький застосунок. Були виконані експерименти по налаштуванню апаратного та програмного забезпечення та тестування запропонованих засобів інтелектуальної аналітики. Експерименти показали, що розроблений прототип працездатний та оперативно реагує на дорожні нерівності в реальному часі. Розроблена система моніторингу здатна достовірно виявляти та класифікувати нерівності дорожнього покриття за наступними класами: рівна дорога; лежачий поліцейський, залізничний переїзд; вибоїна; невелика яма, бруківка; аварійна ділянка, велика яма. Це підтверджено за допомогою спеціально розробленого програмного забезпечення для візуалізації результатів вимірювань та аналізу. Графіки на рис. 5 відображують криву нерівностей під час руху автомобіля, класифікатор виявляє

тип нерівностей і відображує їх за допомогою індикаторів на графічному інтерфейсі. Під час тестування доведено, що підсвічування індикаторів класифікатора відображається на карті відмічанням відповідного кольору (рис. 6).

Виходячи з отриманих результатів дослідження показників лінійного прискорення та тестування дослідного зразку, можна стверджувати, що запропоновані засоби показує гарні результати в порівнянні з аналогами. Точність роботи системи моніторингу досить висока, а збільшення бази даних лінійних показників дозволить розширити тренувальний датасет, що підвищить в свою чергу точність інтелектуальної аналітики. З недоліків можна зазначити необхідність правильного розміщення пристрою для отримання релевантних результатів, ця проблема вирішувалася шляхом фіксації пристрою. Результати досліджень показали необхідність врахування інерційних сил для підвищення точності класифікатора та зменшення залежності від розташування пристрою в автомобілі. Метою подальших досліджень є запровадження механізмів корекції вимірів шляхом перерахунку показників прискорення відносно статичної системи координат.

### **Висновки**

1. Запропонований спосіб класифікації нерівностей дорожнього покриття, який базується на аналізі показників лінійного прискорення. Для аналізу часових рядів запропоновано використання загорткових нейронних мереж, що на відміну від використання загальноприйнятої регресійної моделі дозволяє спростити отримання достовірних результатів щодо класів нерівностей дорожнього покриття, прискорити обчислення та зменшити їх складність. Точність виявлення дефектів дорожнього покриття з використанням розробленої згорткової нейронної мережі CNN дорівнює 85,2 %. Запропонований спосіб реалізовано і вигляді класифікатора стану дорожнього покриття на основі інтелектуального аналізу показників лінійного прискорення з використанням навченої нейронної

мережі. Використання нейронної мережі для класифікації даних з акселерометра за розробленим класифікатором дозволило підвищити точність визначення стану дорожнього покриття на 6 % у порівнянні з відомими способами. Інтелектуальний аналіз на основі нейронних мереж забезпечив можливість реалізації складних аналітичних алгоритмів оброблення IoT даних в реальному часі.

2. Реалізовано комплекс програмно-апаратних засобів для аналізу IoT даних і візуалізації результатів для системи IoT моніторингу стану дорожнього покриття. Реалізація розроблених програмно-апаратних засобів на рівні експериментального прототипу системи моніторингу дозволила експериментально довести, що запропонована система IoT моніторингу здатна оперативно виявляти дефекти дорожнього покриття, що може бути використано для здійснення ремонтних робіт, а також планування маршрутів руху автомобільного транспорту та упередження критичних ситуацій з врахуванням неякісної дороги в системах розумного міста.

### **Література**

1. Nkoro A.B., Vershinin Y.A. Current and future trends in applications of Intelligent Transport Systems on cars and infrastructure / A.B. Nkoro, Y.A. Vershinin // Proceeding of 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) (Qingdao, China, 08-11 October 2014) – 2014. – P. 514-519.
2. Bhamare L. Study Of Types of Road Abnormalities and Techniques Used for Their Detection / L. Bhamare, N. Mitra, G. Varade, H. Mehta // Proceeding of 7th International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering (ICEEIE) (Malang, Indonesia, 02-02 October 2021). – 2021. – P. 472-477.
3. Bishop R. A survey of intelligent vehicle applications worldwide / R. Bishop // Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000 (Cat. No.00TH8511) (Dearborn, MI, USA, 05-05 October 2000). – 2000. – P. 25-30.

4. Wang C. Leveraging ICN With Network Sensing for Intelligent Transportation Systems: A Dynamic Naming Approach / C. Wang, J. Wu, X. Zheng, B. Pei and all // IEEE Sensors Journal. – 2021. – Vol. 21. – Iss. 14. – P. 15875-15884.
5. Toth C. Using Road Pavement Markings as Ground Control for Lidar Data / C. Toth, E. Paska , D. Brzezinska // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. (Beijing, China, 3-11 Jul). – 2008–Vol. XXXVII, Part B1. URL: <https://www.researchgate.net/publication/228545976>
6. Wiratmoko A.D. Design of Potholes Detection as Road's Feasibility Data Information Using Convolutional Neural Network (CNN) / A.D. Wiratmoko, A.W. Syauqi, M.S. Handika, D.B. Nurriszki and all // Proceeding of 2019 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD) (Badung, Indonesia, 2019). – 2019. – P. 1-5.
7. Agrawal H. Road Pothole Detection Mechanism using Mobile Sensors / H. Agrawal, A. Gupta, A. Sharma, P. Singh // 2021 International Conference on Technological Advancements and Innovations (ICTAI) (Tashkent, Uzbekistan, 10-12 November 2021). – 2021. – P. 26-31.
8. Eriksson J., Girod L., Hull B., Newton R., Madden S., Balakrishnan H. The Pothole Patrol: Using a Mobile Sensor Network for Road Surface Monitoring. Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys '08). – ACM, New York, NY, USA, 2008. – P. 29-39
9. Williams M. Volvo cars to start talking to each other. URL: <https://www.computerworld.com/article/2892095/volvo-cars-to-start-talking-to-each-other.html>
10. Kopiika A., Piskun R., Tkachenko V., Klymenko I. Road monitoring system based on IoT technology for SmartCity / Anton Kopiika, Roman Piskun, Valentyna Tkachenko, Iryna Klymenko // Information, Computing and Intelligent systems. – 2020. – No. 1. – P. 60-67.
11. Hoffmann M. Road-quality classification and bump detection with bicycle-mounted smartphones / M. Hoffmann, M. Mock, M. May // Proceedings of the 3rd International Conference on Ubiquitous Data Mining. – 2013. – Vol. 1088. – P. 39-43.
12. Ayachi R. Traffic Sign recognition for smart vehicles based on lightweight CNN implementation on mobile devices / R. Ayachi, M. Afif, Y. Said, A.B.Abdelali // Proceeding of 2022 IEEE 9th International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT) (Hammamet, Tunisia, 28-30 May 2022). – 2022. – P. 12-18.
13. Landi E. High Performance Analog MEMS for IoT Based Condition Monitoring, Characterization with a Bearing Failure Emulation Test Bench / E. Landi, L. Parri, R. Moretti, A. Fort and all // 2022 IEEE International Workshop on Metrology for Automotive (MetroAutomotive) (Modena, Italy, 2022). – 2022. – P. 1-5.
14. LIS3DH - 3-axis MEMS accelerometer, ultra-low-power,  $\pm 2g/4g/8g/16g$  full scale, high-speed I2C/SPI digital output, embedded FIFO, high-performance acceleration sensor, LGA 16 3x3x1.0 package – STMicroelectronics. URL: <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/lis3dh.html>.
15. Chen K., Lu M., Fan X., Wei M., Wu J. Road condition monitoring using on-board three-axis accelerometer and GPS sensor. In Proceedings of the 2011 6th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM), Harbin, China, 17-19 August 2011. – 2011. – P. 1032-1037
16. Lanjewar B. Survey of Road Bump and Intensity Detection algorithms using Smartphone Sensors / B. Lanjewar, J. Khedkar, R. Sagar, R. Pawar et al // (IJCSIT) International Journal of Computer Science and Information Technologies. – 2015. – Vol. 6(6). – P. 5133-5136.

**Нікольський С.С., Клименко І.А.**

## **РОЗРОБКА ЗАСОБІВ ДЛЯ АНАЛІЗУ ДАНИХ ДЛЯ СИСТЕМ ІОТ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ**

*Стаття присвячена розробці засобів для обробки даних в системах моніторингу стану дорожнього покриття та їх технічного обслуговування що базуються на технологіях Інтернет речей (IoT). Процеси обробки даних ускладнені необхідністю збирання надвеликої кількості даних з IoT пристроїв та реалізації алгоритмів їх оброблення з високою обчислювальною складністю в реальному часі.*

*Для ідентифікації дорожніх нерівностей запропоновано спосіб класифікації показників лінійного прискорення акселерометра з використанням згорткових нейронних мереж CNN. Використання навченої нейронної мережі для класифікації дорожніх нерівностей дозволило на 6% підвищити точність інформації про стан дорожнього покриття та забезпечити реалізацію аналітичних алгоритмів оброблення IoT даних в реальному часі. Експерименти показали, що розроблені засоби дозволяють оперативно виявляти та достовірно ідентифікувати нерівності дорожнього покриття на довільній місцевості. Запропоновані засоби можуть бути використані в системах технічного обслуговування розумними містами а також для покращення якості життя водіїв і упередження критичних ситуацій, пов'язаних з неякісними дорожнім покриттям.*

**Ключові слова:** IoT, SmartCity, система моніторингу, дорожнє покриття, STM32, Convolutional Neural Network.

**Nikolskiy S.S., Klymenko I.A.**

## **DESIGN OF DATA ANALYSIS MEANS FOR IOT MONITORING SYSTEMS OF THE ROAD SURFACE CONDITION**

*The article is devoted to the development of data processing tools for road surface condition monitoring and maintenance systems based on Internet of Things (IoT) technologies. Data processing processes are complicated by the need to collect an excessive amount of data from IoT devices and implement algorithms for their processing with high computational complexity in real time.*

*The method of classifying indicators of linear acceleration of the accelerometer using CNN convolutional neural networks To identify road irregularities is proposed. The use of a trained neural network for the classification of road irregularities made it possible to increase the accuracy of information about the condition of the road surface by 6% and ensure the implementation of analytical algorithms for processing IoT data in real time. Experiments shown that the developed tools allow quick detection and reliable identification of road surface irregularities on arbitrary terrain. The proposed tools can be used in maintenance systems by smart cities, as well as to improve the quality of life of drivers and prevent critical situations related to poor road surfaces.*

**Keywords:** IoT, SmartCity, monitoring system, road surface, STM32, Convolutional Neural Network.