

УДК 681.5.015; 681.518;681.513.7; 681.513.8

**А. В. Басько<sup>1</sup>**  
**О. А. Пономарьова<sup>1</sup>**

## **АВТОМАТИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПОШКОДЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРІВ, ПОБУДОВАНИХ НА ДЕШЕВІЙ ЕЛЕМЕНТНІЙ БАЗІ**

<sup>1</sup>Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, Дніпро

*Важливість досліджень, спрямованих на структурний моніторинг архітектурних споруд, зумовлена щільністю забудови, старінням та впливом агресивних умов середовища експлуатації. У роботі акцентовано на розробці Сенсорної збірки, з одного боку, економічно дешевої та доцільної до застосування у системах моніторингу, з іншого боку, сенсорний вузол не повинен поступатися за технічними характеристиками і обчислювальними можливостями існуючим рішенням. Першочергово проаналізовано наявні мікропроцесорні та мікроконтролерні сенсорні вузли щодо вибору найвживаніших архітектурних рішень для бездротових сенсорних вузлів. Таким чином, для прототипу сенсорного вузла вперше вибрано мікроконтролер ST Microelectronics STM32WB55CG із вбудованим ядром бездротового зв'язку. Вперше в одному сенсорному вузлі використано комбінацію з декількох акселерометрів ST Microelectronics LIS3DSH, а саме трьох з метою підвищення відмовостійкості прототипу. Відмінною рисою цієї роботи є пошук і застосування ефективних алгоритмів ідентифікації та моніторингу стану конструкції для недорогих сенсорних вузлів. Дослідження доводить, що використання нейромережових алгоритмів вимагає наявності великої бази даних в неушкодженому стані для навчання, а час, витрачений як на навчання, так і на ідентифікацію, потребує від мікроконтролера значних обчислювальних потужностей, що робить такі алгоритми недоцільними для використання в динамічних системах реального часу. Отже, зібрано прототип бездротового сенсора, що відповідно пройшов випробування на архітектурній споруді біля залізниці, щоб перевірити чутливість сенсорного вузла. Дослідження отримано результати порівняння двох статистичних алгоритмів ідентифікації пошкоджень, таких як евклідова норма та відстань Махаланобіса.*

**Ключові слова:** динамічні системи реального часу, дешевий бездротовий сенсор, акселерометр, система моніторингу стану, ідентифікація пошкоджень.

### **Вступ**

Наявні дротові системи моніторингу та ідентифікації пошкоджень будівельних конструкцій, у порівнянні з новітніми бездротовими системами, мають менш гнучке використання пристроїв з більшими витратами на технічне обслуговування та монтаж.

Наявні методи ідентифікації та контролю будівель і споруд використовують дані про стан будівлі, різні види її пошкоджень, які виникають як під час будівництва, так і в процесі експлуатації. Серед факторів, що впливають на стан конструкції, виділяють: сильний вітер, землетруси, повені, зсуви, внутрішня втома конструкції. Своєчасна ідентифікація пошкоджень дозволяє дізнатися термін служби конструкції, а також, за необхідності, надати перелік робіт для продовження терміну служби конструкції.

З боку апаратної частини розроблені системи моніторингу часто використовують міні персональні комп'ютери, а у більшості випадків як чутливий елемент вибирають високочутливий акселерометр разом з аналого-цифровим перетворювачем розрядністю 16, 24 або 32 біт.

Алгоритми ідентифікації пошкоджень загалом можна розділити на статистичні та нейромережові. Нейромережові алгоритми потребують велику кількість початкових даних про неушкодже-

ний стан, але для наявних будівель виникає невизначеність, тому що невідомий поточний стан конструкції. Статистичні підходи мають деяку перевагу, відсутня потреба у великому масиві даних, вони менш вимогливі до обчислювальних потужностей, це дозволяє використовувати їх у динамічних системах для недорогих мікроконтролерів.

*Метою роботи* є розробка прототипу бездротового сенсорного вузла з використанням сучасної дешевої елементної бази, а також тестування поширених статистичних алгоритмів на побудованому прототипі.

### Опис споріднених бездротових сенсорних вузлів

Для вибору компонентів прототипу бездротового сенсора необхідно виконати аналіз апаратної частини наявних систем моніторингу, які представлено у відповідних дослідженнях.

У роботі [1] описано прототип датчика, як ядро використано плату Raspberry Pi 3 Model B. Представлено дослідження недорогих акселерометрів, серед них MPU-6050 і MPU-9250, які протестовано та порівняно з комерційним високоточним датчиком CCLD 4507B. Порівняння показало, що запропоноване рішення можна використовувати замість традиційної дротової системи, що значно знижує вартість вимірювального вузла.

Платформа Xnode — це комерційне рішення для систем моніторингу яке функціонує на реальних об'єктах. Ця платформа поєднує в собі набір плат, таких як: плата датчиків, плата радіопротоколу та живлення, а також плата процесора. Сенсорна плата оснащена програмованим 24-розрядним АЦП ADS131E08 з можливістю обробки до 8 каналів з частотою дискретизацією до 16 кГц. Окрім того плата оснащена аналоговим акселерометром LIS344ALH. Радіоприймальна плата використовує сучасний протокол бездротового зв'язку Zigbee і працює на частоті 2,4 ГГц. Основна плата мікроконтролера виконана на основі мікросхеми LPC4357 [2], [3].

В роботі [4] описано експеримент з ідентифікації механічних коливань у часовій та частотній області на вібраційному стенді. Основою випробувального стенду є мікроконтролер Atmel ATmega2560, а чутливим елементом є трьохосьовий MEMS-акселерометр MPU-6050, який може вимірювати прискорення в діапазоні від 2g до 16g, зі швидкістю передачі даних від 4 до 1000 Гц.

Комбіноване рішення на базі мікроконтролера PIC32 та міні-комп'ютера ARM9 запропоновано науковцями у роботі [5]. Мікроконтролер PIC32 збирає дані та обмінюється даними з 24-бітним АЦП через шину SPI. АЦП використовує сигнал п'єзоелектричного датчика, а налаштована частота перетворення у 3906,25 Гц дозволяє отримувати досить великі вибірки даних. Мікроконтролер ARM9 працює на операційній системі Linux, його основа мета є зберігання та обробка отриманих даних, а також він керує бездротовою передачею даних.

Варіант системи моніторингу, побудованої з використанням дешевих компонентів а саме: мікроконтролера ATMEGA 328, бездротового модуля Wi-Fi Adafruit CC3000 та трьохосьового акселерометра MMA8452Q, подано у дослідженні [6]. Система моніторингу має веб-сайт, на який завантажуються дані, а користувач може отримати доступ до них у режимі реального часу.

У дослідницькій роботі [7] випробувано акселерометр з використанням концепції недорогого прототипу модуля, що складається з мікроконтролера Raspberry Pi 3 Model B та модуля GSM для віддаленої передачі даних. Акселерометр заснований на технології MEMS і використовується для розрахунку зміщення. Датчик може вимірювати зміщення по осях X, Y та Z.

Сучасні методи виявлення структурних пошкоджень загалом можна поділити за принципом дії на нейромережеві та статистичні. Кожна з груп цих методів має свої переваги та недоліки.

Насамперед досліджено нейромережеві методи, запропоновані науковцями до використання. Серед багатьох нейромережевих методів для систем моніторингу можна виділити такі: метод неконтрольованого навчання на основі аналізу часових рядів; автокодувальник типу нейронної мережі, суть якого полягає у спробі реконструювати вхідні дані таким чином, щоб мінімізувати різницю між вхідними і вихідними сигналами [8]; згорткова нейронна мережа разом з моделлю гістерезису Боуна дозволяє проаналізувати розсіяну енергію [9] (результати використання згорткової нейронної мережі показали, що швидкість розсіювання енергії зменшується, коли будівля знаходиться в пошкодженому стані. Метод є дуже перспективним для виявлення пошкоджень, але представлені математичні моделі вимагатимуть значної обчислювальної потужності пристрою).

Симбіоз статистичних та машинних методів навчання, задля точнішої ідентифікації пошкоджень, запропоновано автором роботи [10]. Слід зазначити, що для нейронних методів необхідно мати велику вибірку початкових даних про неушкоджений стан.

Дослідження впливу власних частот на пошкоджену та непошкоджену конструкцію зменшеної мо-

делі арки проведено з використанням регресійного аналізу для навчання авторегресійної моделі [11].

Широкомасштабне дослідження методів ідентифікації пошкоджень висвітлено автором [12]. Серед методів класифікації та прогнозування пошкоджень виділено такі: штучні нейронні мережі, нечітку логіку, класифікацію, машина опорних векторів, регресійний аналіз, аналіз головних компонент, байєсівський аналіз, кластеризація, дерево рішень. Для оптимізації необроблених даних автор визначив такі алгоритми: генетичний алгоритм, оптимізація рою частинок, оптимізація колонії мурах. Серед недоліків оптимізаційних підходів можна виділити їхні часові витрати, що ускладнює їхнє застосування для динамічних розрахунків.

Для розуміння сфери застосування систем моніторингу та характеру середовища вібрації необхідно навести приклади структур, для яких побудовані і досліджені системи моніторингу.

Вібраційне середовище досліджено з використанням 70 сенсорних вузлів на вантовому мості [13]. Також науковцями досліджено [14] вплив руху транспортних засобів на міст. У результаті експерименту встановлено нестационарний характер коливань мосту, а пік коливань припадає на центральну частину мосту. Дослідження деградації залізничних колій на мостах, а також побудови чисельної моделі мосту на основі генетичного алгоритму, виконано за допомогою впровадженої системи моніторингу. Перевірку отриманої моделі проведено у [15] шляхом порівняння параметрів моделі та даних, отриманих у результаті вимірювань коливань моста. Отримані результати показали хорошу узгодженість між даними прискорення моделі та вимірювань.

У роботі [16] вивчалися вібрації альтернативних джерел енергії, а саме вітрогенератора, дані з якого збиралися протягом одного року з частотою дискретизації 50 Гц. Для порівняння використовували як дорогі високоточні датчики, так і дешеві акселерометри. Використовуючи операційний модальний аналіз, безперервну обробку даних і враховуючи робочі фактори турбіни, автор показав, що автоматична ідентифікація може бути досягнута в режимі реального часу.

### **Запропонована архітектура бездротового сенсорного вузла**

Основна ідея полягає в побудові бездротового сенсорного вузла з використанням дешевої та доступної елементної бази, а саме: сенсорів, аналого-цифрових перетворювачів, мікроконтролерів тощо.

Аналіз наявних сенсорних вузлів показав, що вони мають високу вартість, що відповідно знижує їхній попит для застосування у різних галузях промисловості. Крім того, наявні системи завжди потребують налагодження системи, що зазвичай триває багато часу, в середньому від одного до двох років.

Для вдосконалення бездротових датчиків для завдань структурного моніторингу необхідний комплексний підхід. Поточні дослідження спрямовані на пошук оптимального рішення для вибору як компонентів сенсорного вузла, так і вибору алгоритмів ідентифікації пошкоджень.

Насамперед, необхідно вибрати елементну базу. Крім того, вартість буде основним фактором для вибору з наявних кінцевого сенсорного вузла. Дуже важливо побудувати сенсорний вузол на сучасних контролерах, які будуть підтримуватися і розвиватися розробниками в майбутньому.

По-друге, до поєднання вибраного мікроконтролера, датчика і алгоритмів потрібно підходити особливо ретельно. Алгоритми не повинні перевантажувати ядро сенсорного вузла і водночас повинні отримувати надійні дані, що будуть використані для ідентифікації пошкоджень.

По-третє, сенсорний вузол повинен підтримувати сучасні протоколи зв'язку на основі стандарту бездротового зв'язку: IEEE 802.15.4, такі як: Bluetooth, Zigbee, LoRaWAN. У загальному випадку достатньо буде використовувати протокол Zigbee, радіус дії якого становить до 75 метрів. У деяких випадках можна використовувати протокол Zigbee Pro з дальністю до 1500 метрів або LoRaWAN з дальністю до 15000 метрів.

Оскільки мікроконтролер є обчислювальним ядром будь-якого сучасного електронного пристрою, то вибір мікроконтролера для бездротового сенсорного вузла повинен відбуватися з урахуванням багатьох факторів. Оптимальним рішенням буде використання мікроконтролера, який буде поєднувати в собі як блок обробки даних, так і блок бездротового зв'язку за протоколом Zigbee. Це рішення також має на меті зменшення розміру друкованої плати пристрою. Мікроконтролери STMicroelectronics мають низку таких комбінованих кристалів у серії STM32WB.

Після аналізу всіх переваг і недоліків серії STM32WB, мікроконтролер серії STM32WB55, встановлений на платі розробки P-NUCLEO-WB55, вибрано для створення прототипу сенсорного вузла (рис. 1). Головною перевагою мікроконтролерів серії WB є поєднання в одному чіпі різних бездротових протоколів, таких як Bluetooth LE, Zigbee і Thread.

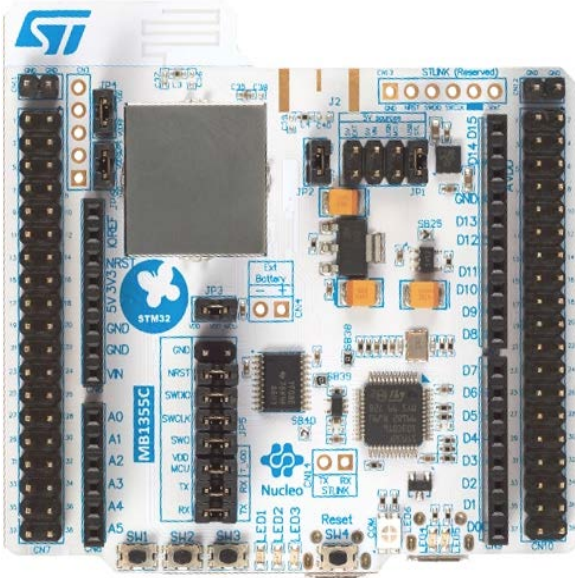


Рис. 1. Мікроконтролер STM32WB55CG

Безумовно, однією з важливих складових є вибір топології сенсорної мережі. Існує три основні топології мережі: зірка, дерево та сітка. Для цього прототипу вибрана сенсорна мережа з топологією «зірка», оскільки вона виявилася найвживанішою та стабільнішою топологією, яка ще й не викликає колізій даних. Хоча така топологія має набір недоліків, пов'язаних з обмеженням зіткнення переданих даних, через збільшення сенсорних вузлів, та, підібравши необхідний алгоритм оброблення даних, цей недолік можна звести до мінімуму.

Аналіз наявних системи моніторингу показав, що, на жаль, не існує датчика, який вимірює пошкодження, а отже, неможливо виконати процес ідентифікації пошкоджень без зондування об'єкта. Таким чином, для реалізації моніторингу загалом як чутливий елемент використовується акселерометр. При цьому сфера застосування може бути різною, це: будівлі, залізничні та автомобільні мости, вітрогенератори, атомні електростанції тощо.

Акселерометри як чутливі елементи вібрації мають обґрунтовані характеристики вибору, а саме:

1. Вони є найвикористовуванішими та дешевшими у порівнянні з інклінометрами, тензодатчиками, датчиками навантаження, п'єзоелектричними акселерометрами, LVDT датчиком, оскільки використовуються у цивільних сферах і у промисловості.
2. Компактний розмір акселерометра дозволяє створювати невеликі сенсорні вузли в закритому корпусі, які просто вмонтовуються в об'єкт моніторингу, не порушуючи його конструктивних характеристик.
3. Висока частота вибірки та можливість програмувати чутливість дозволяють використовувати акселерометри для моніторингу в режимі реального часу різних об'єктів моніторингу.
4. Акселерометри спроможні вимірювати прискорення по 3-х осях, а також в реальному масштабі часу визначати динамічні характеристики об'єкта моніторингу.

Хоча акселерометр вимірює проєкцію видимого прискорення, його фізичні властивості дозволяють виявити: деградацію структур, ідентифікацію пошкоджень і руйнувань. Можна було б сказати, що чим точніший датчик, тим більша вірогідність виявлення пошкоджень, але це не завжди так.

У більшості випадків високочутливі датчики є аналоговими, вони чутливіші до зовнішніх динамічних факторів, таких як зовнішня температура, швидкість вітру, додаткова вібрація зовнішньої інфраструктури (автотранспорт, трамваї, будівельні майданчики), а також набагато дорожчі у порівнянні з цифровими. Ідеальна чутливість — це коли датчик чутливий лише до пошкоджень і виключає інші зовнішні фактори, але цього неможливо досягти в системах моніторингу конструкцій. Таким чином, достатньо вибрати датчик не дуже чутливий, щоб не ідентифікувати зовнішні впливи як пошкодження, але з достатньою чутливістю для виявлення пошкоджень. Такі датчики будуть автоматично виключати зовнішній шум з сигналу.

Для прототипу вибрано акселерометр ST Microelectronics LIS3DSH MEMS. Акселерометр LIS3DSH є хорошим рішенням для вбудованих програм. Він має програмований динамічний діапазон вимірювань прискорення  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$ ,  $\pm 16g$ . Крім того, вихідні дані з роздільною здатністю 16 біт можна отримати з частотою перетворення від 3,125 Гц до 1,6 кГц. А розмір  $3 \times 3$  мм дозволяє значно заощадити місце на друкованій платі.

Щоб оцінити вибрану елементну базу для недорогого прототипу, корисно буде порівняти основні характеристики часто вживаних акселерометрів з вибраним, поданих в таблиці

Параметри найвживаніших цифрових акселерометрів

Характеристика акселерометра	LIS3DSH	MPU6050	ADXL362	ADXL367	MPU9255	KX023	SCA3300
Напруга живлення (В)	1,7...3,6	2,4...3,5	1,6...3,5	1,1...3,6	2,4...3,6	1,8...3,6	3,0...3,6
Споживання току (мкА)	225	500	13	1	450	150	120
Розмір даних (біт)	16	16	12	14	16	16	16



Характеристика акселерометра	LIS3DSH	MPU6050	ADXL362	ADXL367	MPU9255	KX023	SCA3300
Частота дискретизації (Гц)	3,125...1600	4...1000	12,5...400	12,5...400	4...4000	50...1600	10...80
Мін. діапазон вимірювання (g)	±2	±2	±2	±2	±2	±2	±1,5
Роздільна здатність (mg/LSB)	0,06	0,06	1	0,25	0,06	0,06	0,18
Спектральний шум (µg/√Hz)	150	400	175...350	170...370	300	300	37
Ціна, грн	50	40	120	160	180	250	1040

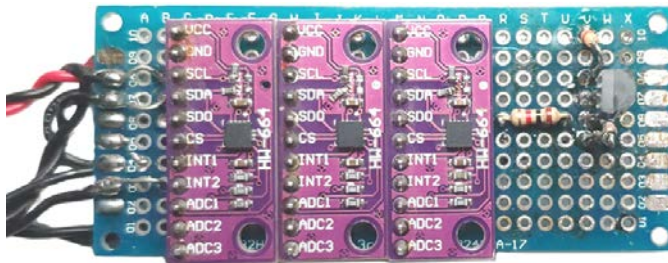


Рис. 2. Збірка акселерометрів LIS3DSH

Запропонований прототип має 3 акселерометри, які використовуються в одному сенсорному вузлі (рис. 2). Використання декількох датчиків в одному вузлі дає можливість підвищити відмовостійкість системи, та локалізувати дані навколо одного вузла. Відповідне рішення робить вузол самостійною одиницею, незалежною від інших пристроїв. До того ж, такий підхід дозволяє обробляти дані локально на сенсорному вузлі.

### Експеримент із застосуванням алгоритмів ідентифікації пошкоджень для прототипу

Розглядаючи наявні системи моніторингу, процес функціонування класичної системи моніторингу можна розділити на такі етапи: номер датчика, розташування у системі координат XYZ, збір даних з акселерометра, фільтрація та передача даних на центральний сервер. Сервер, отримавши

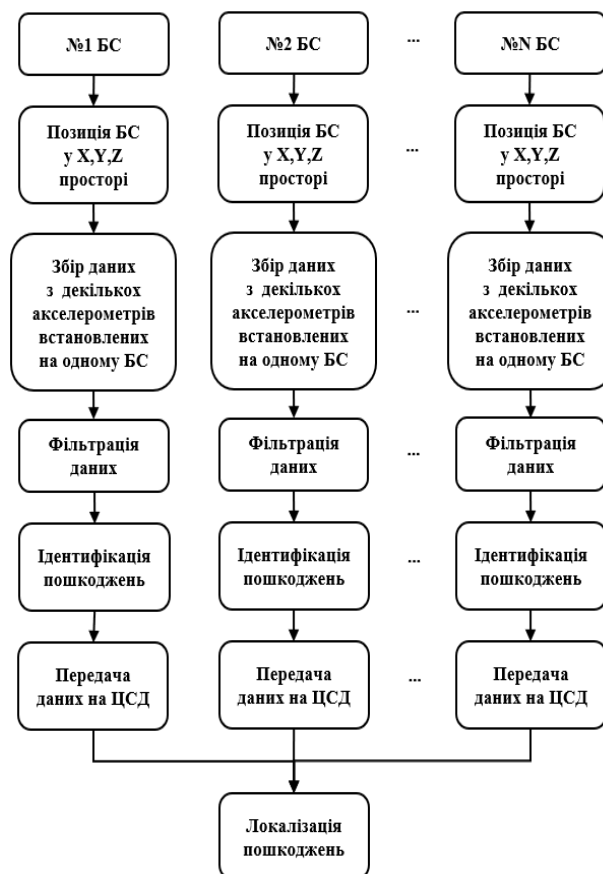


Рис. 3. Структура запропонованого процесу функціонування системи моніторингу

данні усіх сенсорів, буде слідувати вибраному алгоритму ідентифікації пошкоджень.

Запропонована структура процесу функціонування системи моніторингу (рис. 3), як і класична структура, використовує номер датчика, його розташування та передачу даних. Але збір даних з масиву локальних акселерометрів, фільтрація та ідентифікація пошкоджень виконується безпосередньо на сенсорному вузлі. На виході отримуємо результат 1 або 0, що відповідає пошкодженню або непошкодженню стану відповідно та, якщо алгоритм вміє оцінювати ступінь пошкодження, то — порядковий номер ступеня пошкодження.

Такий підхід дозволяє не тільки розвантажити сервер, а й перенаправити його ресурси на алгоритми ідентифікації та визначення рівнів пошкоджень. У цьому випадку сервер не виявляє пошкодження, а лише забезпечує інформаційну підтримку сенсорної мережі, оскільки вже працює з обробленими даними. Таким чином буде досягнута вища швидкість локалізації пошкоджень, а мінімізація обсягу переданих даних зменшує загальне навантаження на бездротову сенсорну мережу.

Застосування технологій машинного навчання наразі показало свої переваги та місце в обробленні даних. Машинне навчання можна розділити на нейромережеве — це штучні нейронні мережі, що можуть точно справлятися із завданнями розпізнавання зображень, тексту та мови, перекладу в мовних завданнях, а також побудови речень.

Такі алгоритми як: аналіз головних компонентів, аналіз основних компонентів, автоасоціативна нейронна мережа, біоінспіровані алгоритми, нечітка логіка, класифікація, регресійний аналіз, ана-

ліз головних компонент, дерево рішень, генетичний алгоритм, використовуються і для задач ідентифікації пошкоджень. Але для сенсорів, побудованих на дешевій елементній базі, вони є недоцільними для використання, оскільки вимагають великої кількості вибірки даних. Висока частота дискретизації даних знижує точність вимірювання сигналу вібрації, а також зменшує запас обчислювальної потужності мікроконтролера.

Існують додаткові перепони для використання алгоритмів машинного навчання, а саме: вони потребують великого обсягу початкової інформації, значна частина часу витрачається на навчання алгоритмів, як наслідок — чим складніший об'єкт, тим довше навчається система, а якщо початкові данні були надані вже з наявними пошкодженнями, то алгоритм навчиться неправильно. Отримати інформацію поточного стану об'єкту практично неможливо, тільки якщо використовувати математичні моделі об'єктів.

Інший підхід машинного навчання — це статистичні алгоритми, що дозволяють отримати чутливу до пошкодження ознаку (це певна величина, отримана з відгуку конструкції, яка корелюється з наявністю пошкодження конструкції). В ідеалі — це коли чутлива до пошкодження ознака, змінюватиметься послідовно зі збільшенням рівня пошкоджень. Отже, статистичні підходи ідентифікації пошкоджень полягають у виявленні функцій, які безпосередньо порівнюють форми сигналів датчика (наприклад, лінії впливу та/або ряди прискорення) або спектри цих форм сигналів, виміряні до та після пошкодження. На етапі вилучення ознак необхідно отримати ознаки, чутливі до ушкоджень та корельовані з серйозністю ушкоджень, присутніх у об'єктах моніторингу, щоб мінімізувати помилкові судження.

Таким чином, якщо розглядати об'єкт моніторингу, про який немає вхідної інформації про його стан, то розпізнавання стану пошкодження має насамперед встановлюватися за якістю сигналу та за допомогою алгоритмів динамічної обробки. У дослідженні використано евклідову норму та відстань Махаланобіса, тому що вони не вимогливі до ресурсів мікроконтролера, що найкраще підходить до сенсорних вузлів побудованих на дешевій елементній базі. Описані нижче алгоритми будуть використовуватися таким чином. Спочатку необхідно встановити умову, що об'єкт моніторингу знаходиться в непошкодженому стані, і отримати міру його нормального непошкодженого стану. Щоб визначити відхилення від нормалізованого значення, необхідно встановити одновимірну міру, засновану або на довірчому інтервалі або на експертному судженні.

Простим рішенням є використання евклідової норми, що дозволяє визначити одновимірне значення з певним довірчим інтервалом. Евклідова норма визначається так:

$$|DI| = \sqrt{\sum_{i=1}^n |z_i|^2}, \quad (1)$$

де  $n$  — розмір вектора даних,  $z$  — новий вектор даних.

Одним з альтернативних підходів до визначення пошкоджень є використання відстані Махаланобіса. Цей алгоритм добре працює у разі виявлення високочастотних викидів, і він не особливо вимогливий до обчислювальних ресурсів мікроконтролера, що дозволяє використовувати його з дешевими пристроями. Для обчислення відстані Махаланобіса використовується формула

$$DI(z) = (z - \mu) \Sigma^{-1} (z - \mu)^T, \quad (2)$$

де  $\mu$  — центрований досліджуваний вектор даних,  $z$  — вектор досліджуваних даних.

Відстань Махаланобіса показує відхилення даних від нуля. Чим ближче дані до центру, тобто до нуля, тим менше вони відхиляються від нього. В спокійному стані значення відстані Махаланобіса прагнуть до 0. Це дозволяє аналізувати дані з метрикою на проміжку від нуля до нескінченності, де нуль є неушкодженим станом, для відстані Махаланобіса також потрібно отримати метрику пошкоджень.

Для перевірки представлених алгоритмів на можливість оброблення даних в датчиках, побудованих на дешевій елементній базі, проведено експеримент. Тестовий стенд включав сервер і один сенсорний вузол. Основні завдання експерименту: перевірка працездатності прототипу сенсорного вузла, аналіз якості сигналу акселерометра, а також алгоритмів ідентифікації зовнішніх збуджень. Для експерименту з елементів, вибраних вище, створено прототип.

Датчик, що включає три акселерометри та мікроконтролер, прикріплено на фундаменті двоповерхового будинку на відстані 30 м від залізничної колії, щоб перевірити вплив вібрації на будинок, а також перевірити чутливість датчика.

Для програмування мікроконтролера використовувалося середовище розробки Cube IDE, а для зчитування даних, оброблених алгоритмами, використовувалася програма Cube Monitor. Датчики налаштовані на вимірювання прискорення в діапазоні  $\pm 2g$  з частотою дискретизації 400 Гц. Одне значення ADC відповідає прискоренню  $0,06 \text{ мм/с}^2$ .

Показники даних вібрації для збірки акселерометрів отримано в площині осі X (Accel\_1.X\_filVal\_m[0], Accel\_2.X\_filVal\_m[0], Accel\_3.X\_filVal\_m[0]) та осі Y (Accel\_1.Y\_filVal\_m[0], Accel\_2.Y\_filVal\_m[0], Accel\_3.Y\_filVal\_m[0]), що відповідно показано на рис. 4. Зміщення значень від 0 викликано невстановленим параметром зміщення.

Збільшення амплітудного значення сигналу, що складає 120 LSB на проміжку часу з 8 по 48 викликано проходженням швидкісного пасажирського потягу, після чого сигнал повертається до стабільної форми, амплітуда якої складає 30 LSB.

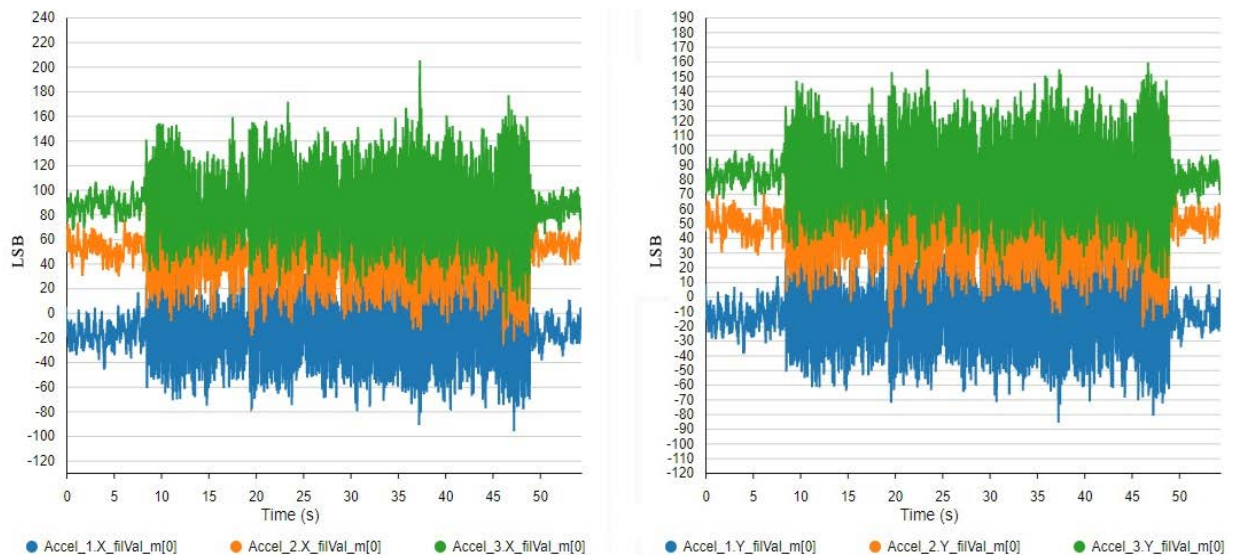


Рис. 4. Показання даних вібрації у площині осей X та Y

Отримані значення евклідової норми для осей X та Y показано на рис. 5 відповідно. Як бачимо, квадратична складова функції евклідової норми дозволяє виділити різку зміну сигналу.

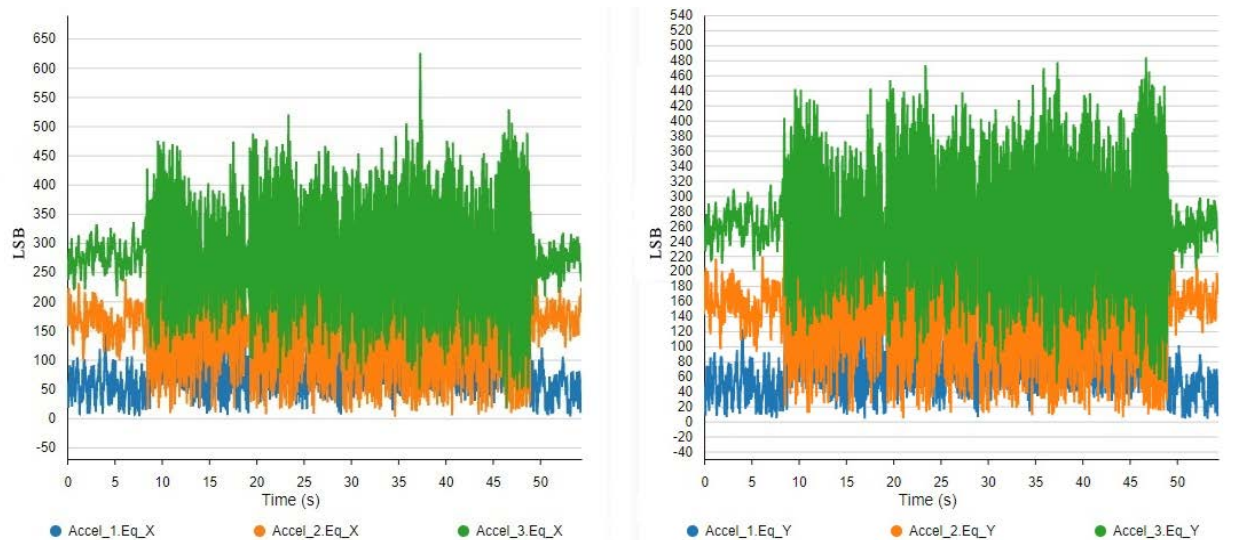


Рис. 5. Значення евклідової норми для осей X та Y

На завершальному етапі порівняння роботи алгоритмів отримано значення відстані Махалано-біса для осей X і Y (рис. 6). Особливістю алгоритму є те, що значення змінюються відносно нуля, і чим ближче значення до нуля, тим більше акселерометр знаходиться в спокійному стані, що свідчить про непошкоджений стан, і навпаки — чим далі значення від нуля, тим більша ймовірність пошкодження.

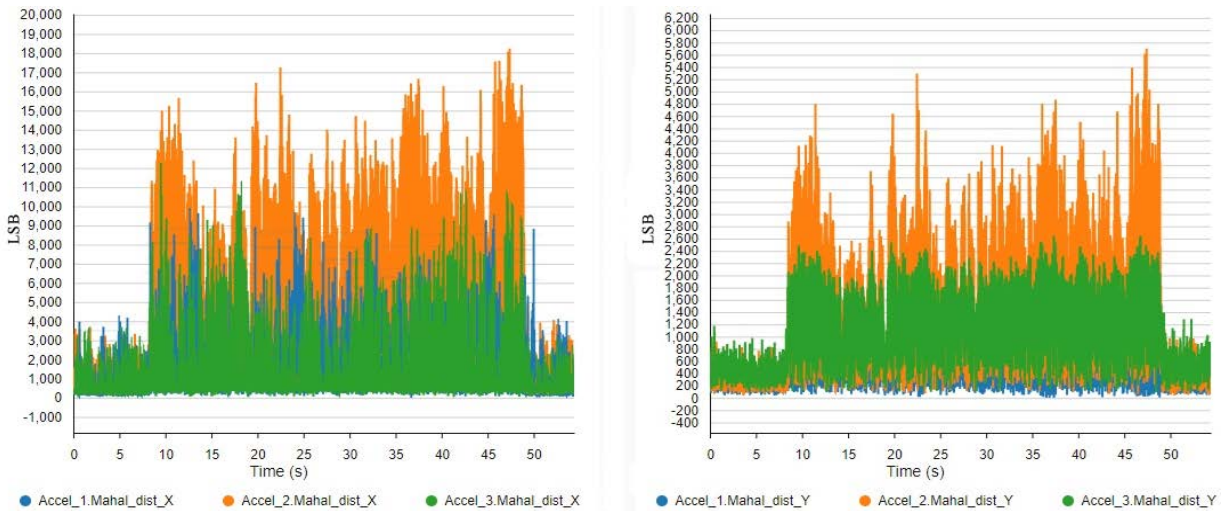


Рис. 6. Значення відстані Махаланобіса для осей X та Y

З отриманих результатів можна виділити такі характерні особливості кожного з алгоритмів. Обидва алгоритми можна використовувати в датчиках з низькою собівартістю для задач ідентифікації пошкоджень, хоча відстань Махаланобіса має переваги у точності ідентифікації високочастотних пошкоджень. Відстань Махаланобіса вимагає від інженера-програміста кращих навичок програмування для використання у вбудованих системах, оскільки алгоритм має складнішу структуру розрахунків у порівнянні з евклідовою нормою. На відміну від евклідової норми, відстань Махаланобіса не залежить від масштабу даних і враховує зв'язок між попереднім набором даних.

Задля оцінки ідентифікації пошкоджень використано один з загальноживаних підходів:

- експертне встановлення одно- або багатовимірної шкали;
- оцінка на основі встановлення балів;
- встановлення значення пошкодження, що знаходиться в певному довірчому інтервалі;
- використання гіпотез про ушкоджений та неушкоджений стан: максимальне наближення функції щільності вірогідності досліджуваного вектора до центральної граничної теореми буде свідчити про неушкоджений стан.

Встановимо шкалу пошкоджень для графіка рис. 5 евклідової норми Accel\_3.Eq\_X з такими нижніми (-175, -75, 25, 125) та верхніми (325, 425, 525, 625) рівнями пошкоджень. Оцінюючи збільшення амплітуди сигналу, бачимо, що функція оцінки спрацювала для нижніх (125,25) і для верхніх (325,425) рівнів, відповідно до цього висуваємо припущення про ушкоджений стан. Але, оскільки графік вимірювань після можливого ушкодження повернувся до номінальних значень, то деградації сигналу, а відповідно і структурних змін, не виявлено, і навпаки. Тоді можна стверджувати, що це був зовнішній збудник вібрації, наприклад, від потяга, вантажівки і та ін.

## Висновки

Використання систем ідентифікації пошкоджень є невід'ємною частиною сучасної системи контролю конструкцій і будівель, а структурний моніторинг стану може забезпечити як довгостроковий, так і короткостроковий моніторинг у реальному часі. Проведені дослідження спрямовані на комплексне вдосконалення технології ідентифікації та контролю моніторингу будівель і споруд. По-перше, це пошук найвдалішого апаратного рішення з економічного погляду. По-друге, це пошук та використання алгоритмів машинного навчання для автоматизації та обробки інформації ушкодженого стану. По-третє, це розгляд питання застосування таких систем в Україні, із використанням дешевих компонентів. Після аналізу та оцінки апаратної частини запропонованих сенсорних вузлів, що висвітлено у відповідних наукових дослідженнях, з урахуванням всіх переваг і недоліків запропоновано архітектуру сенсорного вузла на основі мікроконтролера STM32WB55 та збірки акселерометрів LIS3DSH.

Також виконано пошук алгоритмів машинного навчання для сенсорних вузлів, що не потребують значних обчислювальних потужностей пристрою й водночас дозволяють отримувати стабільний результат ідентифікації пошкоджень. Створено дослідний зразок запропонованого пристрою та проведено експеримент. Експеримент показав, що використовувані алгоритми: евклідова норма та відстані Махаланобіса дозволяють адекватно ідентифікувати вібрацію за допомогою недорогої



елементної бази. Таким чином, запропонований недорогий прототип показав його придатність для задач автоматичної ідентифікації пошкоджень будівель і споруд.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] E. Toledo Junior, A. Cury, and J. Landre Junior, "Assessment of low-cost wireless sensors for structural health monitoring applications," *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, vol. 14, no. 2, pp. 1-14, 2021. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952021000200013>.
- [2] M. Z. Sarwar, M. R. Saleem, J. W. Park, D. S. Moon, and D. J. Kim, "Multimetric Event-Driven System for Long-Term Wireless Sensor Operation for SHM Applications," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 10, pp. 5350-5359, 2020. <https://doi.org/10.1109/jsen.2020.2970710>.
- [3] B. Spencer, J. W. Park, K. Mechitov, H. Jo, and G. Agha, "Next Generation Wireless Smart Sensors Toward Sustainable Civil Infrastructure," *Procedia Engineering*, vol. 171, pp. 5-13, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.304>.
- [4] M. Varanis, A. L. Silva, P. H. A. Brunetto, and R. F. Gregolin, "Instrumentation for mechanical vibrations analysis in the time domain and frequency domain using the Arduino platform," *Revista Brasileira de Ensino de Fisica*, vol. 38, no. 1, pp. 1-10, 2016. <https://doi.org/10.1590/s1806-11173812063>.
- [5] A. Araujo, et al, "Wireless Measurement System for Structural Health Monitoring With High Time-Synchronization Accuracy," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 63, no. 3, pp. 801-810, 2012. <https://doi.org/10.1109/tim.2011.2170889>.
- [6] S. Pandey, M. Haider, and N. Uddin, "Design and implementation of a low-cost wireless platform for remote bridge health monitoring," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 6, no. 6, pp. 57-62, 2016.
- [7] A. A. Sana, A. S. Rasi, D. P. Pa, G. R. Veya, and M. D. Gesan, "Wireless Sensor Network Based Crack Detection on Concrete Bridges/Buildings," *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 57, no. 2, pp. 54-58, 2018. <https://doi.org/10.14445/22315381/ijett-v57p211>.
- [8] A. Entezami, H. Sarmadi, and S. Mariani, "An Unsupervised Learning Approach for Early Damage Detection by Time Series Analysis and Deep Neural Network to Deal with Output-Only (Big) Data," *Proceedings of 7th International Electronic Conference on Sensors and Applications*, 2020. <https://doi.org/10.3390/ecsa-7-08281>.
- [9] J. Morales-Valdez, M. A. Lopez, and W. Yu, "Damage detection of building structure based on vibration data and hysteretic model," *IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1109/coase.2019.8842996>.
- [10] R. P. Finotti, A. A. Cury, F. D. S. Barbosa, "An SHM approach using machine learning and statistical indicators extracted from raw dynamic measurements," *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 16, no. 2, pp. 1-17, 2019. <https://doi.org/10.1590/1679-78254942>.
- [11] S. Prabhu, and S. Atamturktur, "Feature Assimilation for Vibration Based Damage Detection," *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 41, no. 1, pp. 1-11, 2012. <https://doi.org/10.1520/jte20120170>.
- [12] M. Gordan, H. A. Razak, Z. Ismail, and K. Ghaedi, "Recent Developments in Damage Identification of Structures Using Data Mining," *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 14, no. 13, pp. 2373-2401, 2017. <https://doi.org/10.1590/1679-78254378>.
- [13] J. A. Rice, et al, "Flexible smart sensor framework for autonomous structural health monitoring," *Smart Structures and Systems*, vol. 6, no. 5\_6, pp. 423-438, 2010. [https://doi.org/10.12989/sss.2010.6.5\\_6.423](https://doi.org/10.12989/sss.2010.6.5_6.423).
- [14] E. Sazonov, Li. Haodong, D. Curry, and P. Pillay, "Self-Powered Sensors for Monitoring of Highway Bridges," *IEEE Sensors Journal*, vol. 9, no. 11, pp. 1422-1429, 2009. <https://doi.org/10.1109/jsen.2009.2019333>.
- [15] L. R. Ticona Melo, D. Ribeiro, R. Calçada, and T. N. Bittencourt, "Validation of a vertical train-track-bridge dynamic interaction model based on limited experimental data," *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 181-201, 2019. <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1605394>.
- [16] J. Pacheco, G. Oliveira, F. Magalhaes, C. Moutinho, and L. Cunha, "Evaluation of low cost vibration based damage detection systems," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1037, no. 052005, pp. 1-8, 2018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1037/5/052005>.

Рекомендована редколлегією журналу «Вісник Вінницького політехнічного інституту»

Стаття надійшла до редакції 11.07.2023

**Басько Артем Володимирович** — аспірант кафедри комп'ютерних наук, інформаційних технологій та прикладної математики, e-mail: basko.artem@pgasa.dp.ua ;

**Пономарьова Олена Анатоліївна** — канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри комп'ютерних наук, інформаційних технологій та прикладної математики, e-mail: pricmech@ukr.net .

Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, Дніпро

A. V. Basko<sup>1</sup>  
O. A. Ponomarova<sup>1</sup>

## Automatic Damage Identification Using Wireless Sensors Built on a Cheap Element Base

<sup>1</sup>Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnipro

*The importance of research aimed at structural monitoring of architectural constructions is determined by the density of buildings, aging and the influence of aggressive operating conditions of the environment. This work is aimed at developing of a sensor assembly, on the one hand, economically cheap and appropriate for use in monitoring systems. On the other hand, the sensor node should not be inferior to existing solutions in terms of technical characteristics and computing capabilities. First of all, the existing microprocessor and microcontroller sensor nodes were analyzed in order to select the most used architectural solutions for wireless sensor nodes. Thus, the ST Microelectronics STM32WB55CG microcontroller with a built-in wireless communication core was chosen for the sensor node prototype for the first time. A combination of three accelerometers ST Microelectronics LIS3DSH was used in one sensor node in order to increase the fault tolerance of the prototype. A distinctive feature of this work is the search and application of effective algorithms for the identification and monitoring of the state of the structure for inexpensive sensor nodes. The study proves that the use of neural network algorithms requires the presence of a large database in an intact state for training, and the time spent on both training and identification requires significant computing power from the microcontroller, which makes such algorithms unsuitable for the use in dynamic systems of real time. Therefore, a prototype of a wireless sensor was assembled, which was accordingly tested on an architectural structure near the railway to check the sensitivity of the sensor node. The research also provides comparison results of two statistical damage identification algorithms, such as Euclidean norm and Mahalanobis distance.*

**Keywords:** real time dynamic systems, cheap wireless sensor, accelerometer, monitoring system, damage identification.

**Basko Artem V.** — Post-Graduate Student of the Chair of Information Technology and Applied Mathematics, e-mail: basko.artem@pgasa.dp.ua ;

**Ponomarova Olena A.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Head of the Chair of Information Technology and Applied Mathematics, e-mail: pricmech@ukr.net