

УДК 681.5.015; 681.518;681.513.7; 681.513.8

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

## **МЕТОДОЛОГІЯ ПРОЕКТУВАННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ СТРУКТУРНОГО МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД**

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

*Розвиток smart-систем у різноманітних архітектурних спорудах, приводить до того, що якщо раніше інформація про структурний стан була не завжди важливою, то нині, говорячи про безпеку населення, це є дуже пріоритетною інформацією та напрямком досліджень. Загалом системи моніторингу за станом конструкцій, дозволяють ідентифікувати, локалізувати та оцінювати пошкодження. Така інформація про об'єкт дозволяє завчасно прийняти відповідні рішення для усунення можливих аварійних ситуацій. Для виконання завдання з розробки методології щодо проектування автоматичної системи структурного моніторингу для різноманітних архітектурних споруд запропоновано перелік етапів, які дозволяють спроектувати необхідну систему. Дослідження загалом поділено на три основні етапи. На першому етапі, розглядаються топології сенсорних мереж, питання щодо вибору топології для бездротової сенсорної мережі, а також головні переваги та недоліки кожної топології. Це відповідно дозволить правильно вибрати топологію для системи. На другому етапі, розглядаються рівні ідентифікації пошкоджень, які є обов'язковими для використання у системах моніторингу стану будівель та споруд. Проаналізовано найвикористовуваніші алгоритми, які застосовуються для ідентифікації пошкоджень, зазначено їх недоліки та переваги. На третьому етапі вибрано елементну базу сенсорного вузла, подано порівняльну характеристику цифрового та аналогового акселерометрів. Також розглянуто популярні цифрові акселерометри та виконано аналіз їхніх характеристик. Підсумовано на які характеристики необхідно звернути увагу під час вибору мікроконтролера. В процесі проектування необхідно враховувати і розташування сенсорних вузлів, що впливає на відстань для передачі даних.*

**Ключові слова:** автоматична система моніторингу, сенсорна мережа, бездротовий сенсор, ідентифікація пошкоджень.

### **Вступ**

На сьогодні поширене використання автоматизації у будь-яких системах загалом позитивно відображається на багатьох аспектах життєдіяльності людини. Розглядаючи різноманітні архітектурні споруди та комунікації, зокрема, мости та дороги, будівлі, торгові центри, атомні електростанції тощо, можна виділити низку загроз, які виникають в кожній із споруд [1]—[5]. Але будь-які загрози, незалежно від ступеня пошкоджень, можуть у підсумку призвести до руйнівних наслідків як об'єкта, так і міста або країни.

Узагальнивши вищезгадане, якщо можна було б передбачити збої та наслідки, які можуть виникнути або виявити вже існуючі відхилення, то це потенційно допомогло б не лише скоротити прямі і непрямі економічні витрати на збереження експлуатаційних властивостей споруди, а й запобігти людським жертвам. Ключем до вирішення цієї проблеми є своєчасне виявлення пошкоджень у конструкціях.

Під ушкодженням розуміють негативні зміни у характеристиках матеріалу, геометрії конструкції, деградація динамічних властивостей чи реакцію конструкції, що негативно впливає на поточні чи майбутні характеристики системи [6].

На заміну застарілих способів візуального огляду та інтервального локального, використовують спосіб моніторингу стану конструкції, що впроваджується на весь термін експлуатації.

Перші розвинутіші напівавтоматичні системи відносилися до інтервальних систем. Вони склалися з дротових сенсорів, що з'єднуються з блоком аналого-цифрового перетворення та цифрового оброблення та збору даних.

Сучасні системи моніторингу використовують бездротові технології для комунікації з основним сервером. Блок сенсора разом з приймачем та передавачем сигналу називають сенсорним вузлом. А сукупність вузлів, об'єднаних в одну мережу, називають сенсорною мережею. Бездротові сенсори мають низку переваг, пов'язаних з гнучкістю під час монтажу, а економія на дротах дозволяє здешевити датчики.

*Метою роботи є розробка методології проектування автоматичної системи структурного моніторингу технічного стану будівель та споруд, з урахуванням сучасних технологій та напрямів розвитку.*

### Результати дослідження

Питання структурного моніторингу конструкцій розглядається вже протягом трьох десятиліть, за цей час виконано багато досліджень та побудовано прототипи систем та реальні робочі рішення, які виконують задачу моніторингу. Але досі ще не запропоновано методології проектування таких систем моніторингу. Яким чином вибрати топологію сенсорної мережі? Який метод обробки даних найвдаліше підійде до задачі ідентифікації? Якими характеристиками мають бути у сенсорного вузла? Саме ці питання і розглянуто у цій роботі.

Отже, беручи до уваги основні переваги бездротових технологій, можна виділити кілька напрямків вибору топології сенсорної мережі. Кожна з них має свої переваги та недоліки. Серед багатьох топологій сенсорних мереж найпопулярнішими є: зіркова, деревоподібна та сітчаста.

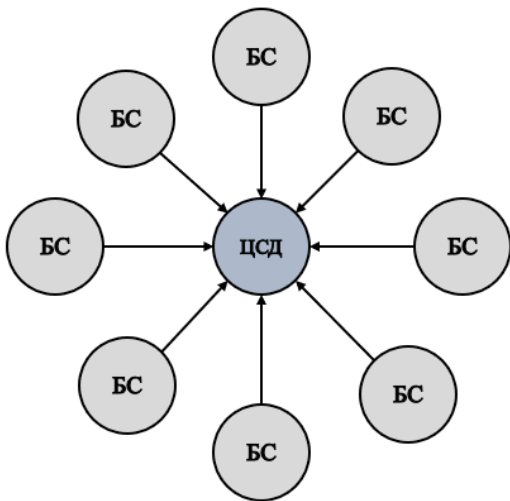


Рис. 1. Зіркова топологія

Найпростіша топологія є зіркоподібною (рис. 1). У такій топології кожен датчик підключений до сервера, а дані з датчика передаються безпосередньо на нього. Така топологія є найнадійнішою, тому що відмова будь-якого датчика ніяк не впливає на роботу мережі в цілому.

Недоліками такої мережі є те, що зі збільшенням кількості сенсорних вузлів, значно збільшується навантаження на сервер, оскільки кількість даних, що надходять, може перевищити пропускну здатність сервера. Цю проблему можна вирішити за рахунок збільшення енергоресурсів та збільшення швидкостей передачі даних. Крім того, така мережа накладає обмеження по діапазону бездротового зв'язку, тому що сенсори повинні розташовуватись в певному діапазоні від сервера [7].

Інші ієрархії відносяться до багатоканальної маршрутизації, основна складність яких полягає у пошуку найкоротшого шляху для передачі пакетів даних на центральний сервер. За таких типів з'єднання необхідно контролювати вузол маршрутизації та вміння реконфігурувати мережу для забезпечення стійкості, якщо вузол виходить з ладу та не працює.

Особливістю будови деревоподібної мережі (рис. 2) є те, що датчики поділяються на групи, які під'єднані до свого вузла маршрутизації. А кожний вузол маршрутизації відповідає за організацію зв'язку та оброблення даних усередині своєї групи. Спочатку дані передаються з датчиків на вузол маршрутизації, а той, у свою чергу, передає дані на сервер збору даних. Але вузол маршрутизації потребує потужнішого джерела живлення та вищих обчислювальних можливостей для подолання значних навантажень під час передачі та обробки даних.

У мережі сітчастого типу (рис. 3) немає заздалегідь визначеного центрального сервера. Будь-який вузол може бути тимчасово призначений центральним сервером відповідно до потреб передачі та обробки даних. Вузол може передавати дані будь-яким іншим вузлом у межах діапазону передачі.

Цей тип мережі дозволяє повністю реалізувати автоматичну діагностику пошкоджень без зовнішнього втручання, якщо спроектовано належне вбудоване програмне забезпечення. Але маршрутизація дуже складна для виконання, тому вона застосовується не часто в системах моніторингу стану будівель та споруд [8].

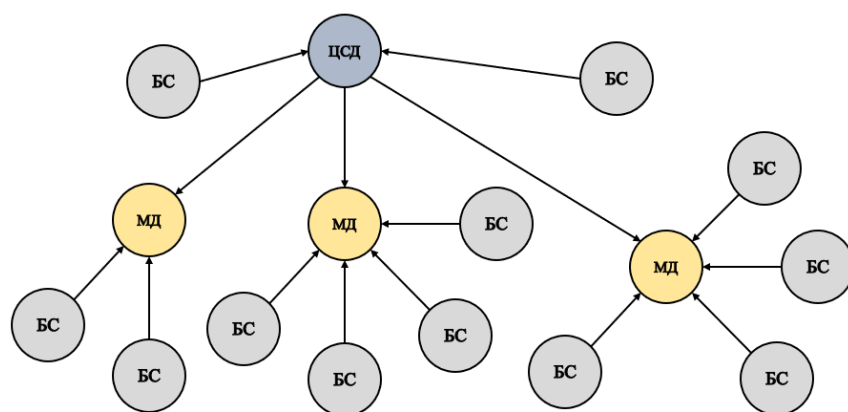


Рис. 2. Деревоподібна топологія

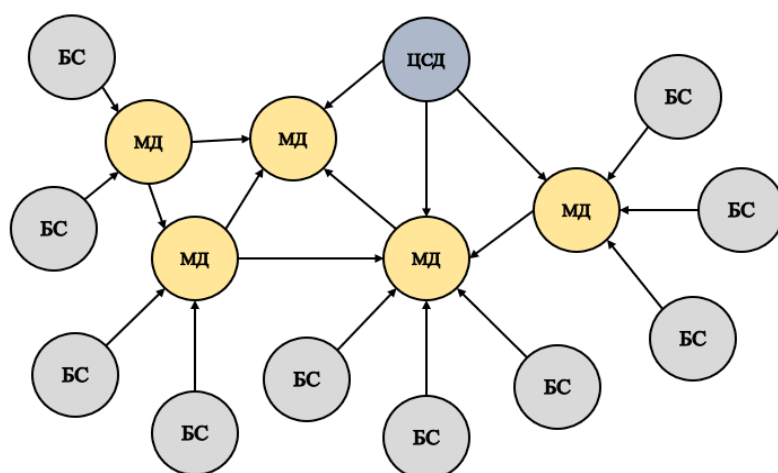


Рис. 3. Сітчаста топологія

сенсорного вузла для ідентифікації його у сенсорній мережі та коефіцієнт агресивності зовнішнього середовища.

Якщо розглядати сервер оброблення даних і прийняття рішень, то для нього вхідною інформацією є розміри об'єкта моніторингу, креслення плану або конструкції, 3D модель будівлі. На основі цього система отримує карту розміщення сенсорних вузлів у тривимірній системі координат з позначками номерів станцій.

Стосовно питання вибору алгоритму обробки даних, то можна зазначити, що це є досить проблематичним, оскільки вибір алгоритму залежить від багатьох факторів. Основна складність полягає в тому, що у більшості випадків невідомим є попередній стан об'єкта. Саме тому визначити чи оцінити кількісно рівень пошкодженості практично неможливо. Тому всі алгоритми ідентифікації пошкоджень можна поділити на два типи.

Суть першого полягає в початковому припущенні, що об'єкт непошкоджений, у наслідок чого можна стежити за його поведінкою. А суть другого підходу — в намаганні розвинути припущення про непошкоджений стан конструкції. Таким чином, все зводиться до розуміння отриманої інформації та характеру її змін, яким вона піддається протягом певного часу вимірювань.

Модельний метод — зазвичай полягає у побудові моделі об'єкта чи використанні методу скінченних елементів (МСЕ) конструкції. Таким чином, подальше оновлення моделі на основі нових даних може виявити пошкодження з урахуванням структурних змін [9], [10].

Для створення моделі потрібна наявність кваліфікованих спеціалістів, спроможних побудувати точну аналітичну модель конструкції. Але найчастіше через складність об'єкта моніторингу для побудови моделі допускаються спрощення, що знижує точність моделі ідентифікації. Також дуже важливо наголосити, що фізичні моделі вимагають великих обчислювальних ресурсів та перевірки експериментальними результатами, що забирає багато часу.

У процесі ідентифікації пошкоджень, виходячи з простої вертикальної ієрархії, можна виділити такі рівні ідентифікації [11]:

Отримані дані через систему збору даних передаються в блок обробки, зберігаються та керуються в системі бази даних. Оцінювання зібраних даних та стану системи здійснюється за допомогою кількох методів та алгоритмів.

Отже, залежно від місця розташування та серйозності виявлених пошкоджень та того, як вони можуть поширюватися в майбутньому, у процесі прийняття рішення будуть вирішуватися та виконуватися огляд та технічне обслуговування.

Перед вибором алгоритму обробки даних необхідно визначити, що буде вхідною інформацією для системи. Насамперед вся вхідна інформація оброблюється на етапі проектування автоматичної системи, що виконується кваліфікованим спеціалістом, який врахує особливості системи.

Якщо розглядати сенсорний вузол, то для нього вхідною інформацією буде номер

1. Виявлення — дозволяє отримати інформацію про наявність пошкодження конструкції.
2. Локалізація — отримання місця розташування пошкодження у структурі.
3. Ступінь — отримання певної метрики ступеня небезпеки пошкоджень.
4. Прогноз — можливість спрогнозувати ймовірно можливі збитки.

Як можна помітити, ієрархія показує, що кожен новий рівень знань залежить від попереднього. Відповідно, чим вище точність нижнього рівня, тим вище точність наступного.

Важливо підкреслити, що для досягнення всіх підрівнів ідентифікації пошкоджень, використовуючи контрольоване навчання, необхідно мати інформацію про об'єкт як у пошкодженому, так і в непошкодженому стані.

Але здебільшого поточна інформація про стан об'єкта не доступна, тоді використовують методи неконтрольованого навчання. Таким чином на заміну вивчення моделей та навчання на основі даних, практичніше застосовувати підхід на основі нових даних та викидів [12]. Тому модельний підхід не буде розглянутий через вищеописані недоліки, хоча для архітектурно нескладних об'єктів може бути застосований зазначений метод.

У порівнянні з контрольованим навчанням метод неконтрольованого навчання забезпечує явну перевагу, оскільки він більше не вимагає наявності попередньої інформації про пошкоджений стан конструкції, що дозволяє виявити викиди на основі вихідних залишкових помилок або будь-якої метрики відстані. Однак цю модель навчання можна використовувати тільки для виявлення, але не завжди для локалізації пошкоджень.

Починаючи з 1990-х років, у великій кількості літератури описано використання статистичних алгоритмів розпізнавання образів, які зазвичай називають методами машинного навчання. З кожним днем складність архітектурних споруд зростає, відповідно і обсяг даних, що збирається, збільшується. Таким чином важливим є дослідження автоматичних систем, а також подальше використання автоматизованих систем виявлення закономірностей конструктивних пошкоджень споруд та будівель з використанням обчислювальної техніки.

Новітні методи машинного навчання відображені у багатьох галузях промисловості як основний інструмент для розпізнавання та класифікації інформації на основі вивченого шаблону з використанням різних алгоритмів.

Загалом алгоритми машинного навчання засновані на таких підходах: статистичний, нейронний, синтетичний.

Статистичний та нейронний підходи зазвичай вважаються основними класифікаторами шаблонів для задач структурного моніторингу стану об'єкта. В процесі виконання одного з підходів, обов'язково виконуються такі кроки:

- зондування та збір даних, необхідних для визначення структури;
- попередня обробка виконується з метою видалення будь-яких шумів та викидів для зменшення розмірів векторів пошкоджень;
- вилучення ознак. Цей етап передбачає виявлення частин споруд, які найбільше можуть бути пошкоджені. Такий пошук виконується з використанням інженерної оцінки або на основі математичних методів та алгоритмів перетворення;
- постобробка даних. Застосовується для детальнішого оброблення даних, їх стиснення, нормалізації або об'єднання даних, якщо це необхідно.

Таким чином, виконавши усі необхідні кроки, можна визначити стан пошкоджень з використанням таких методів:

1. Класифікація. Це дискретна міра (ушкоджений/неушкоджений);
2. Регресія (місце ушкодження, розмір втомної тріщини тощо);
3. Виявлення новизни/викиду.

Вилучення ознак є найресурсо-вимогливішим кроком. Для вилучення ознак, можна виділити безліч алгоритмів ідентифікації пошкоджень. Якщо узагальнити, то процес отримання ознак заснований на підборі будь-якої моделі до вимірних даних, основаної на фізиці процесу або даних. Параметри моделі або пов'язані з ними помилки прогнозування стають характеристиками, які є чутливими до пошкоджень. Крім того, на етапі отримання ознак необхідно отримати такі ознаки, які корелюватимуться з серйозними пошкодженнями, щоб звести до мінімуму помилкові судження на наступному етапі класифікації. Залежно від обчислювальних можливостей сервера обробки даних, розташуємо найпопулярніші алгоритми отримання ознак спочатку менш вимогливі [13]— [15], а далі — ресурсо-вимогливі [16], [17].

До менш вимогливих алгоритмів відносять: Критерій ХІ квадрат; Евклідова норма; Відстань Махаланобіса.

До вимогливіших алгоритмів відносять: К-середні; гауссова суміш.

Прогнозування можливих збитків виконується за рахунок довготривалого спостереження за об'єктом, та оцінка динаміки змін середнього значення коливань конструкції.

При проектуванні автоматизованої системи ідентифікації пошкоджень необхідно велику частину часу приділити вибору елементної бази. Позаяк вибір елементної бази — це заключний етап в проектуванні автоматичної системи ідентифікації, то він залежить від усіх попередніх етапів.

Під час проектування сенсорного вузла не обійтись без застосування кваліфікованого спеціаліста, який може оцінити систему, що проектується, і виконати підбір необхідних комплектуючих, відповідно до:

- топології сенсорної мережі;
- вибраного алгоритму;
- необхідного рівня ідентифікації пошкоджень;
- необхідної точності ідентифікації;
- необхідної гнучкості системи;
- відмовостійкості системи;
- необхідної енергоефективності;
- економічних затрат на систему.

Виходячи із загальної концепції структурного моніторингу стану конструкцій, сучасні тенденції розвитку цих систем зводяться до того, що чутливі елементи мають забезпечити можливість спостерігати за конструкцією протягом тривалого періоду. Обов'язковим є застосування сітчастих мереж з використанням достатньої кількості вимірювальних пристроїв. Такий підхід дає можливість контролювати поточні та майбутні характеристики конструкцій.

Головним компонентом сенсорного вузла є чутливий елемент, який реагує на впливи, що виникають. Як чутливий елемент найчастіше вибирають акселерометр. Також використовують датчики, основані на п'єзоелектричному ефекті.

Сучасні акселерометри виробляються різними компаніями (STMicroelectronics, Analog Devices, Freescale Semiconductor, Hitachi Metals, PCB Piezotronics, Kionix та інші) у всьому світі. Під час проектування сенсорного вузла спочатку визначаються, який акселерометр використовуватиметься — аналоговий чи цифровий. Порівнюючи аналогові та цифрові акселерометри, можна виділити переваги та недоліки, що відображено в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика аналогових та цифрових акселерометрів

Характеристика	Аналогові	Цифрові
АЦП	Потрібен зовнішній	Вбудований
Роздільна здатність	В залежності від вибраного АЦП (але буде менша ніж в цифровому)	Зазвичай більша ніж у аналогових акселерометрів
Частота дискретизації, Гц	2...10000	4...4000
Розмір, мм	25×25×25 і більше	3×3×1
Напруга живлення, В	10...30	1,6...3,6
Споживання току, мА	> 4	0,01... 1,0
Мінімальна ціна, \$	250	5

Можна зробити висновок, що хоч цифрові акселерометри і програють у роздільній здатності аналоговим, але вони є кращими для використання, оскільки цифрові акселерометри енергоефективніші, економічно-вигідніші, а також мають менший розмір. Але не варто повністю відкидати аналогові акселерометри, позаяк для тих рішень, де потрібна велика точність і здатність витримувати великі навантаження, вони вже будуть пріоритетнішими до використання.

У табл. 2 подані найважливіші параметри популярних цифрових акселерометрів, які слід враховувати під час проектування сенсорного вузла.

Знаючи основні характеристики акселерометра, розглянемо кожен з них та проаналізуємо на що і як вони впливають.

Напругу живлення акселерометра потрібно враховувати під час проектування мережі. Варто зазначити, що джерело живлення повинно мати сталу напругу.

Параметри найвикористовуваніших цифрових акселерометрів

Характеристика акселерометра	ADXL362	LIS3DSH	MPU6050	MPU9255	KX023
Напруга живлення, В	1,6...3,5	1,7...3,6	2,4...3,5	2,4...3,6	1,8...3,6
Споживання струму, мкА	13	225	500	450	150
Розмір даних, біт	12	16	16	16	16
Частота дискретизації, Гц	12,5...400	3,125...1600	4...1000	4...4000	50...1600
Мін. діапазон вимірювань, g	±2	±2	±2	±2	±2
Роздільна здатність, mg	1	0,06	0,06	0,06	0,06
Спектральний шум, ug/√Hz	175...350	150	400	300	300
Ціна, грн	120	50	40	180	250

Споживання електричного струму є одним із важливих параметрів, що напряму впливає на енергоефективність системи, крім того елементна база, що споживає мізерну його кількість є пріоритетною для вибору в мобільних системах, які працюють від акумуляторів.

Розмір даних — це величина яка впливає на точність вимірювання, чим це значення вище, тим точніше буде отримано фінальне значення від внутрішнього аналого-цифрового перетворювача.

Частота дискретизації — це значення, що показує кількість сигналів за 1 секунду. Тобто якщо акселерометр дискретизує дані з частотою 200 Гц, то це означає, що за 1 с буде отримано 200 значень прискорення. Очевидно, що чим більша частота дискретизації, тим більше даних буде отримано, але й збільшиться шум.

Мінімальний діапазон вимірювань — це значення, що показує в якому мінімальному діапазоні може вимірювати акселерометр.

Роздільна здатність — це те мінімальне значення, яке акселерометр спроможний розрізнити. Тобто якщо роздільна здатність дорівнює 0,06 mg, то на одне дискретне значення буде припадати 0,06 mg прискорення.

Спектральний шум показує значення небажаного сигналу, який присутній в отриманому значенні. Чим це значення менше, тим значення сигналу буде вірогіднішим. Вартість акселерометра є значущим фактором для його вибору.

Мікроконтролер є ядром будь-якого бездротового сенсорного вузла. Для його вибору необхідно враховувати низку вимог. Мікроконтролери виконують первинну обробку, а іноді — і алгоритм ідентифікації ушкоджень, що є значно ресурсозатратним. Тобто алгоритми не повинні перевантажувати ядро сенсорного вузла і водночас давати достовірні дані ідентифікації ушкоджень. Обов'язковою умовою є те, що сенсорний вузол повинен підтримувати сучасні протоколи зв'язку на основі стандарту бездротового зв'язку: IEEE 802.15.4, такі як: Bluetooth, Zigbee, LoRaWAN. Під час побудови системи з низькою вартістю сенсорного вузла найкраще використовувати мікроконтролери з суміщеним бездротовим контролером.

Під час проектування система повинна мати відповідні протоколи для з'єднання з системою сповіщення об'єкта моніторингу, з метою збереження безпеки населення у разі виникнення можливих критичних пошкоджень.

Для кожного типу конструкції характеристики встановлення мережі датчиків будуть відрізнятися. На це впливатимуть такі фактори: стандарт передачі даних, тип розміщення датчика (внутрішнє або зовнішнє кріплення в конструкцію) та вібраційне середовище. Для досягнення стабільного сигналу між бездротовими датчиками необхідно розміщувати їх на певній відстані.

Установку сенсорних вузлів необхідно виконувати таким чином, щоб можна було визначити контур об'єкта, тобто по крайнім точкам, в місцях заокруглень та структурних переходів. Контур об'єкта визначається в об'ємі, як в ширину так і в висоту (рис. 4). Для вирішення питання локалізації пошкоджень потрібно збільшити кількість датчиків між датчиками, що були встановлені по контуру об'єкта. Чим більше датчиків буде встановлено тим точніше можна локалізувати місце пошкоджень.

Безумовно, в процесі проектування таких систем необхідно враховувати технічний стан інженерних мереж та розташовувати у місцях проходження лінії електроенергії.

Зазвичай, для датчиків, встановлених всередині конструкції, потрібна середня відстань між датчиками до 8 метрів або ближче. Але для датчиків із зовнішньою установкою відстань розміщення можна збільшити до 30 метрів.



Агресивний характер вібрації передбачає наявність додаткової зовнішньої вібрації (у разі дорожніх мостів вібрація постійно створюється рухом автомобілів, на неї також можуть впливати річки або моря). Такі умови призводять до вибору достатньо чутливих датчиків і відповідно обробки даних у програмному забезпеченні.

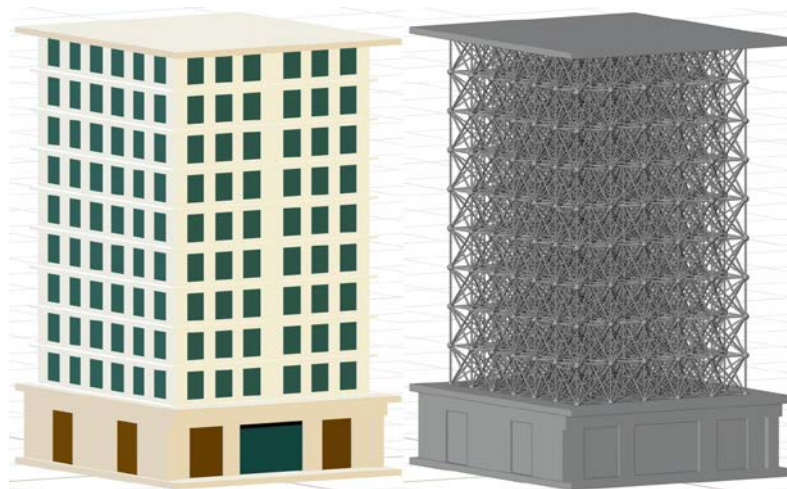


Рис. 4. Розміщення сенсорних вузлів у будинку

### Висновки

Під час розробки методології проектування автоматичної системи структурного моніторингу технічного стану будівель та споруд, проаналізовано найвикористовуваніші рішення, описані у наукових публікаціях.

У роботі розглянуто та проаналізовано наявні топології сенсорних мереж їхній вибір для об'єкта моніторингу. Також описано процес ідентифікації пошкоджень та основні етапи, які необхідно виконати для її успішної реалізації. Описано вибір найефективніших алгоритмів ідентифікації пошкоджень. Для розуміння повної картини проектування системи моніторингу відображено підбір елементної бази для побудови сенсорного вузла.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] 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>.
- [2] 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/jnsen.2009.2019333>.
- [3] 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).
- [4] H. Fu, Z. Sharif Khodaei, and M. H. F. Aliabadi, "An Event-Triggered Energy-Efficient Wireless Structural Health Monitoring System for Impact Detection in Composite Airframes," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 1183-1192, 2019. <https://doi.org/10.1109/jiot.2018.2867722>.
- [5] 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>.
- [6] S. W. Doebling, *Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics*. Los Alamos, United States: Los Alamos National Laboratory, 1996, 127 p.
- [7] G. D. Zhou, and T. H. Yi, "Recent Developments on Wireless Sensor Networks Technology for Bridge Health Monitoring," *Mathematical Problems in Engineering*, pp. 1-33, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/947867>.
- [8] B. F. Spencer, T. Nagayama, and J. A. Rice, "Decentralized structural health monitoring using smart sensors," *SPIE Proceedings*, vol. 6932, pp. 1-14, 2008. <https://doi.org/10.1117/12.791077>.
- [9] H. Sohn et al., *A Review of Structural Health Review of Structural Health Monitoring Literature 1996–2001*. Los Alamos, United States: Los Alamos National Laboratory, 2002, 301 p.
- [10] P. Cao, S. Qi, and J. Tang, "Structural damage identification using piezoelectric impedance measurement with sparse inverse analysis," *Smart Materials and Structures*, vol. 27, no. 3, pp. 1-33, 2018. <https://doi.org/10.1088/1361-665x/aaacba>.
- [11] A. Rytter, *Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures*. Aalborg, Denmark: Aalborg university, 1993, 193 p.
- [12] P. Rizzo, M. Cammarata, D. Dutta, and H. Sohn, "An unsupervised learning algorithm for fatigue crack detection in waveguides," *Smart Materials and Structures*, vol. 18, no. 2, pp. 1-11, 2009. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/18/2/025016>.
- [13] M. L. McHugh, "The Chi-square test of independence," *Biochemia Medica*, vol. 23, no. 2, pp. 143-149, 2013. <https://doi.org/10.11613/bm.2013.018>.

- [14] B. E. Rapp, *Microfluidics: Modeling, Mechanics and Mathematics*. Boston, United States: Elsevier, 2016, 766 p.
- [15] R. G. Brereton, "The Mahalanobis distance and its relationship to principal component scores," *Journal of Chemometrics*, vol. 29, no. 3, pp. 143-145, 2015. <https://doi.org/10.1002/cem.2692>.
- [16] Y. Li, and H. Wu, "A Clustering Method Based on K-Means Algorithm," *Physics Procedia*, vol. 25, pp. 1104-1109, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.03.206>.
- [17] N. A. Alqahtani, and Z. I. Kalantan, "Gaussian Mixture Models Based on Principal Components and Applications," *Mathematical Problems in Engineering*, pp. 1-13, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/1202307>.

Рекомендована кафедрою інженерних систем у будівництві ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 12.07.2022

**Басько Артем Володимирович** — аспірант кафедри комп'ютерних наук, інформаційних технологій та прикладної математики, e-mail: [basko.artem@pgasa.dp.ua](mailto: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](mailto:pricmech@ukr.net) .

Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, Дніпро

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

## **Methodology of the Design Automatic System of Structural Monitoring of the Technical Health of Buildings and Structures**

<sup>1</sup>Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture

*The development of smart systems in various architectural structures leads to the fact that if earlier information about the structural condition was not always important, now when talking about the safety of the population, it is a very high-priority information and direction of research. In general, systems for monitoring the condition of structures allow identification, localization and assessment of damage. Such information about the object allows making appropriate decisions in advance to eliminate possible emergency situations. To solve the task of developing a methodology for the design of an automatic structural monitoring system for various architectural structures, a list of stages that allow designing the necessary system was proposed. So, the research is generally divided into three main stages. At the first stage, topologies of sensor networks are considered. Questions regarding the choice of topology for a wireless sensor network are discussed, and the main advantages and disadvantages of each topology are presented. This will allow to choose the right topology for the system. At the second stage, the levels of damage identification that must be performed, which approaches are based on the used algorithms for damage detection are considered. The most popular algorithms used for damage identification are also listed, their disadvantages and advantages were displayed. The third stage is devoted to the selection of the element base of the sensor node, the comparative characteristics of digital and analog accelerometers are highlighted. Also in this section, popular digital accelerometers are presented and an analysis of the characteristics of how and what is affected by each of them is performed. It was described what characteristics should be taken into account when choosing a microcontroller. When designing, it is necessary to take into account the location of sensor nodes and how this affects the distance of data transmission.*

**Keywords:** automatic monitoring system, sensor network, wireless sensor, damage identification.

**Basko Artem V.** — Post-Graduate Student of the Chair of Information Technology and Applied Mathematics, e-mail: [basko.artem@pgasa.dp.ua](mailto: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](mailto:pricmech@ukr.net)