

БОДНАРУК ВАСИЛЬ

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

<https://orcid.org/0009-0008-4418-2359>e-mail: vasylbodnaruk@gmail.com**МЕЛЬНИЧУК СТЕПАН**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

<https://orcid.org/0000-0002-6973-4235>e-mail: stenni@ukr.net

ОГЛЯД РЕАЛІЗАЦІЙ ЦИФРОВИХ ЗАСОБІВ ОПЕРАТИВНОГО МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНИХ ТА ІНЖЕНЕРНИХ ОБ'ЄКТІВ

Основну увагу приділено функціоналу та аспектам реалізації засобів, що призначені для оперативного моніторингу динамічного стану технічних та інженерних об'єктів, зокрема промислового обладнання (електродвигуни, насоси, компресори) та будівельних конструкцій (мости, опорні елементи, висотні споруди). Описано особливості застосування сучасних пристроїв для аналізу вібраційних характеристик, що дозволяє своєчасно виявляти відхилення, які можуть свідчити про технічні несправності або процеси зношування конструкцій.

Розглянуто популярні типи таких пристроїв, що відрізняються діапазоном вимірювання, наявністю або відсутністю інтегрованого реєстратора даних, типом сенсора, способом передачі інформації на комп'ютер чи в хмарне середовище. Проведено аналіз пристроїв залежно від їхнього призначення: моделі без пам'яті та цифрових інтерфейсів ефективні для точкових вимірювань і швидких перевірок, тоді як пристрої з функцією запису на SD-карту чи з USB-інтерфейсом забезпечують збереження отриманих даних для подальшого аналізу. Особливу увагу приділено пристроям, що підтримують інтеграцію з мобільними застосунками, що значно прискорює обмін інформацією та робить моніторинг доступним для кількох користувачів одночасно. Крім того, розглянуто переваги використання бездротових технологій у таких пристроях, що сприяє більшій мобільності та спрощенню їх експлуатації в умовах обмеженого доступу до об'єкта.

Означено критерії вибору засобів моніторингу відповідно до характеру коливань контролюваного об'єкта (середні чи високі частоти), потреби у постобробці даних та рівня підготовки персоналу. Показано, що такі пристрої є не лише вимірювальними інструментами, а й важливою складовою комп'ютерних систем технічного обслуговування, сприяючи підвищенню надійності та ефективності експлуатації технологічних об'єктів. Розглянуто перспективи розвитку засобів моніторингу та їхнього подальшого застосування в різних галузях, враховуючи ефективність у контролі технічного стану об'єктів. Крім того, акцентовано увагу на можливості використання таких пристроїв у реальному часі для оперативного реагування на зміни стану обладнання та запобігання можливим аварійним ситуаціям.

BODNARUK VASYL, MELNYCHUK STEPAN

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

OVERVIEW OF DIGITAL TOOLS IMPLEMENTATION FOR OPERATIVE MONITORING OF TECHNICAL AND ENGINEERING OBJECTS

The main attention is paid to the functionality and aspects of the implementation of tools intended for operational monitoring of the dynamic state of technical and engineering facilities, in particular industrial equipment (electric motors, pumps, compressors) and building structures (bridges, supporting elements, high-rise structures). The features of the use of modern devices for analyzing vibration characteristics are described, which allows timely detection of deviations that may indicate technical malfunctions or structural wear processes.

The popular types of such devices are considered, which differ in the measurement range, the presence or absence of an integrated data logger, the type of sensor, and the method of transferring information to a computer or cloud environment. The devices are analyzed depending on their purpose: models without memory and digital interfaces are effective for spot measurements and quick checks, while devices with the function of recording to an SD card or with a USB interface ensure that the obtained data is saved for further analysis. Particular attention is paid to devices that support integration with mobile applications, which significantly speeds up the exchange of information and makes monitoring available to multiple users at the same time. In addition, the advantages of using wireless technologies in such devices are considered, which contributes to greater mobility and simplifies their operation in conditions of limited access to the object.

The criteria for selecting monitoring devices are defined according to the nature of the oscillations of the monitored object (medium or high frequencies), the need for data post-processing, and the level of personnel training. It is shown that such devices are not only measuring instruments, but also an important component of computerized maintenance systems, contributing to the reliability and efficiency of technological facilities. The article considers the prospects for the development of monitoring devices and their further application in various industries, taking into account their effectiveness in controlling the technical condition of facilities. In addition, the author emphasizes the possibility of using such devices in real time to promptly respond to changes in the condition of equipment and prevent possible emergencies.

Keywords: monitoring devices, geosensors, characteristics, geosignals.

Вступ

Оперативний моніторинг стану різних технічних та інженерних об'єктів стає невід'ємною складовою комп'ютерних систем контролю та діагностування в різних галузях промисловості, будівництва, сільського господарства та геотехніки. Вібраційні та коливальні процеси можуть суттєво впливати на роботу механічних систем, стан будівельних конструкцій, безпеку працівників та ефективність виробничих процесів. Своєчасне виявлення та аналіз таких впливів дозволяє запобігти

аваріям, знизити витрати на обслуговування та підвищити загальну ефективність систем. Крім того, забезпечення безпеки та надійності технічних систем і конструкцій є пріоритетним завданням для багатьох галузей. Віб्राції та коливання, що виникають під час експлуатації обладнання та інфраструктурних об'єктів, можуть призводити до зниження їх працездатності, прискореного зношування а також до аварійних ситуацій [1 – 4].

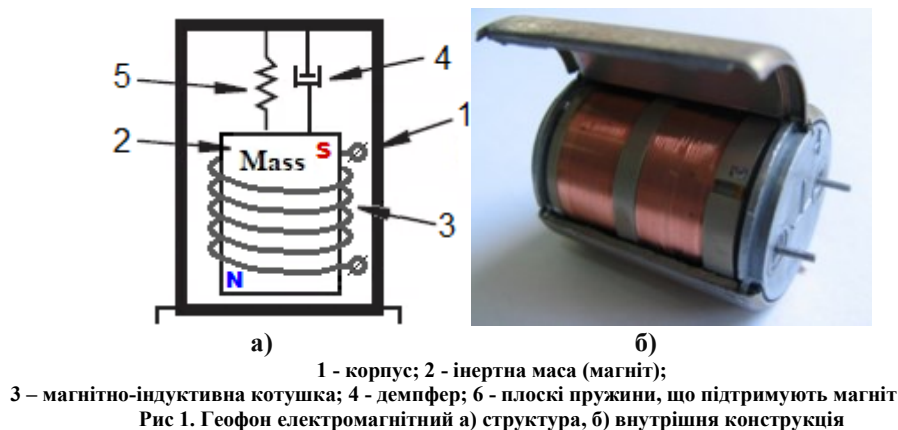
У будівельній галузі геомоніторинг важливим для оцінки стану споруд, мостів, тунелів та інших конструкцій, зокрема він дозволяє виявити структурні дефекти, відстежувати зміни в стані матеріалів та запобігати руйнуванню. Віб्राції промислового обладнання можуть свідчити про дисбаланс, неправильний монтаж чи зношення компонентів. Регулярний моніторинг дозволяє своєчасно виявляти проблеми та проводити превентивне обслуговування. Моніторинг вібрацій ґрунту та навколишнього середовища допомагає виявляти зсуви, землетруси та інші геологічні явища, що дозволяє своєчасно реагувати на потенційні небезпеки та проводити попереджувальні заходи.

Розвиток сучасних технологій вимірювання та цифрових засобів опрацювання і аналізу геосигналів, включаючи використання п'єзоелектричних, п'єзорезистивних, магніторезистивних акселерометрів та акселерометрів на основі теплопередачі, відкриває нові можливості для точного та оперативного моніторингу. Застосування мобільних та бездротових систем дозволяє проводити вимірювання в реальному часі, що є особливо важливим в умовах підвищених вимог до безпеки та надійності. Доцільно зазначити, що ефективний геомоніторинг може ефективно сприяти зниженню витрат на ремонт та обслуговування обладнання, підвищенню його довговічності та зменшенню ризиків аварій, що є важливим фактором для підприємств, де простої обладнання можуть призвести до значних фінансових втрат. Таким чином, згадані аспекти підкреслюють актуальність теми геомоніторингу та необхідність постійного вдосконалення методів і засобів для його реалізації, зокрема в частині реалізації методів та засобів цифрового опрацювання сигналів у інформаційно-вимірювальних каналах комп'ютерних систем моніторингу.

Метою роботи є: огляд сучасних методів та засобів оперативного моніторингу динамічного стану різноманітних технічних та інженерних об'єктів, які ґрунтуються на опрацюванні геосигналів.

Результат дослідження

Найбільш поширеним джерелом інформації у багатьох системах геомоніторингу слугують геофони – електромеханічні пристрої, що перетворюють механічні коливання ґрунту чи інших поверхонь у пропорційні електричні сигнали. Конструктивно геофони зазвичай складаються з електромагнітної котушки та інерційного осердя (найчастіше використовують магнітні матеріали), підвішеного за допомогою пружин чи мембран, див.рис. 1 [5]. За наявності коливань чи вібрацій відбувається переміщення корпусу сенсора разом з поверхнею на якій він закріплений в той час як підпружинене осердя, в наслідок інерції, залишається нерухомим, в результаті в полі постійного магніту в котушці індукується електричний струм, що дозволяє отримати слабкий сигнал для подальшого опрацювання.



Промислові реалізації засобів моніторингу на основі геофонів використовують для контролю низькочастотних коливальних процесів у спорудах, технічних конструкціях чи будівлях. Нішкове використання таких пристроїв спостерігається у системах сервісного обслуговування, зокрема трубопровідних. Одним з прикладів може бути портативна система SoniTrack Geophone, що задіяна для детектування переміщення спеціальних очищуючих поршнів – пігів (pig/pusher) у трубопровідних системах в ході їх експлуатації, див.рис.2,а.

Головна особливість SoniTrack Geophone [6] полягає у підсиленні хвиль, які генеруються очищуючим поршнем під час руху всередині трубопровідної системи. Система дозволяє дистанційно відстежувати переміщення піга за допомогою бездротової передачі звуку через FM-радіоканал або дротового підключення через AUX. До ключових переваг можна віднести: автоматичне налаштування комунікаційного FM-каналу, портативність, можливість роботи у бездротовому режимі, що дозволяє оперативно контролювати необхідні параметри. Однак, через відсутність функцій тривалого збору та

збереження даних, пристрій придатний для місцевих сервісних операцій, які потребують простого і ефективного контролю.



Рис 2. Реалізації засобів моніторингу на основі геофонів: а) SoniTrack Geophone, б) Wireless Geophone model VHFWG, в) SeniMax™ 3D Wireless

Іншим прикладом застосування геофонів може бути бездротова система Wireless Geophone model VHFWG [7], див.рис.2,б, яка призначена для моніторингу об'єктів, що в ході функціонування формують геоколивання, які перетворюються у акустичні коливання доступні для прослуховування. Основною особливістю цього пристрою є відсутність дротового з'єднання, що спрощує встановлення та роботу в польових умовах. Wireless Geophonemodel VHFWG працює на двох частотних діапазонах, що дає змогу отримувати сигнали на відстані до $\approx 22,8$ м. від джерела, а також оснащений водонепроникним корпусом, живлення забезпечує понад 150 годин автономної роботи. Однак, згаданий пристрій не призначений для безперервного моніторингу, оскільки сигнали відразу передаються через комунікаційний канал а не зберігаються для подальшого аналізу. Таким чином, Wireless Geophone придатний для оперативного контролю процесів у режимі динамічного моніторингу (прослуховування) або залучення додаткового обладнання, що реалізує функції збереження даних та їх аналізу.

Спільною особливістю розглянутих вище систем є те, що вони орієнтовані на фіксацію геоколивань в одній площині. Як варіант розширення такого функціоналу на три площини може бути система SeniMax™ 3D Wireless Geophone [8], див. рис.2в, який застосовується у сфері сейсмічного моніторингу для виявлення землетрусів, сейсмічних подій, а також техногенних вібрацій зумовлених функціонування масивного обладнання. Пристрій оснащений трьома геофонами HS-1 або GS-One від Geospace Technologies, що дозволяє реєструвати коливання у трьох просторових напрямках (X, Y, Z) і це значно розширює його функціональні можливості. Завдяки унікальній технології Active RF Technology система забезпечує ефективну бездротову комунікацію з мінімальним споживанням енергії. Для передачі даних використовується інтегрований модуль бездротового зв'язку, що забезпечує стабільну передачу вимірювальних сигналів у реальному масштабі часу на центральний сервер або локальну станцію збору даних. Живлення від літій-іонного акумулятора, який дозаряджається через сонячну панель, що суттєво збільшує автономність системи. Попри свої переваги, пристрій має певні обмеження, зокрема орієнтований на структурний та сейсмічний моніторинг, тому може бути менш ефективним у застосуваннях, де потрібне виявлення високочастотних короткочасних імпульсів. Використання постійної передачі даних створює проблеми щодо забезпечення відповідної якості комунікаційного каналу особливо для значних відстаней.

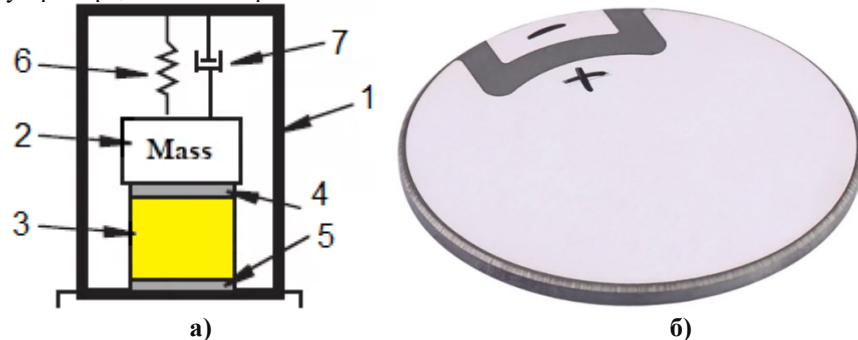
Огляд, для порівняння, основних характеристик розглянутих систем моніторингу, що ґрунтуються на використанні геосенсорів подано в таблиці 1.

Таблиці 1.

Характеристик засобів оперативного моніторингу на основі геосенсорів

Назва	Сенсор	Діапазон частот	Чутливість	Зберігання даних	Інтерфейс	Живлення (бат./акум.)
SoniTrack Geophone	Геофон SG-10	$\approx 4 - 28$ Гц	$\approx 20 - 50$ v/m/s	-	AUX / FM	6×AA до 35 год.
Wireless Geophonem odel VHFWG	Геофон	≈ 2 Гц – 10кГц	$\approx 0,12 - 0,45$ v/m/s	-	Wireless	до 150 год.
SeniMax™ 3D Wireless Geophone	Геофон HS-1	$\approx 4,5 - 10$ Гц	$\approx 0,2 - 0,473$ v/sm/s	-	Wireless	до 10 років

Іншим поширеним джерелом інформації у системах геомоніторингу слугують п'єзоелектричні сенсори – пристрої, що перетворюють механічний вплив, прикладене механічне навантаження (деформація), у пропорційні електричні сигнали. Конструктивно такі сенсори зазвичай включають, див.рис.3 [9]: п'єзоелемент – диск або пластина з п'єзоелектричного матеріалу (PZT або ін.), яка генерує електричний заряд; верхній електрод – металевий контакт, що прилягає до верхньої поверхні п'єзоелемента; нижній електрод – контактна пластина, що розташована під п'єзоелементом (разом із верхнім електродом формує пару, між якими виникає різниця потенціалів при деформації); корпус та проводів лінії передачі сигналу на коротку відстань, оскільки сенсор потребує залучення схем перетворення у пропорційний електричний сигнал.



1 - корпус; 2 - інертна маса; 3 - п'єзоелектрик; 4, 5 – верхній та нижній електроди відповідно; 6 - плоскі пружини, що підтримують інертну масу; 7 - демпфер

Рис 3. П'єзоелектричний сенсор: а) структура, б) зовнішній вигляд сенсорного елемента

Промислові реалізації засобів моніторингу на основі п'єзоелектричних сенсорів найчастіше використовують для контролю вібраційних процесів високої частоти у спорудах, технічних конструкціях чи будівлях. Одним з прикладів реалізації засобів моніторингу та контролю згаданого типу може бути Walcom VM-6380 [10], див.рис.4а., що належить до базових портативних моделей, призначених для діагностики стану машин і механізмів. Конструкція базується на п'єзоелектричному акселерометрі з магнітним кріпленням. Оптимальний частотний діапазон від 8 Гц до 10 кГц для вимірювання прискорення. Підвищена чутливість на високих частотах дає змогу детектувати характерні для зношення рухомих частин (підшипників, роторів тощо) "шиплячі" чи "свистячі" сигнали. Як і більшість портативних Walcom, модель VM-6380 не оснащена ні внутрішнім реєстратором, ні цифровим інтерфейсом (USB, Bluetooth тощо), що зумовлює необхідність фіксувати результати вручну або фотографувати екран пристрою.

Lutron PVB-820 [11], див.рис.4б, належить до портативних віброметрів з розширеними можливості у сфері аналізу й зберігання даних порівняно з найпростішими моделями, який орієнтований на промислову та лабораторну діагностику верстатів, підшипників і механічних вузлів, для яких типова робоча частота коливань не перевищує 1–2 кГц. Ключова особливість цього засобу полягає в можливості підключення опціонального реєстратора або ж використання інтегрованого, а також у наявності зовнішнього інтерфейсу (RS-232 чи USB). Функціонал передбачає записи виміряних величин (прискорення, швидкість, переміщення) у вигляді коротких серій даних та передавати ці файли на комп'ютер для подальшого аналізу. Робочий діапазон частот при вимірюванні швидкості вібрації переважно складає 10 Гц – 1 кГц, а для прискорення може розширюватися приблизно до 5 кГц. Щодо опрацювання низькочастотних коливань (нижче ~10 Гц), LUTRON PVB-820 не надто підходить для виявлення повільних зміщень у великих конструкціях, однак для оперативної перевірки стану промислових об'єктів він забезпечує прийнятний функціонал та часткове документування результатів.



Рис 4. – Реалізації засобів моніторингу на основі п'єзоелектричних сенсорів а) Walcom VM-6380, б) Lutron PVB-820, в) Walcom HT-1201, г) Fluke 805 FC

Walcom HT-1201 [12], див.рис.4в, слід віднести до о моделей середнього рівня, що поєднують базову простоту з розширеними можливостями контролю та аналізу. Головна перевага — вбудований реєстратор даних, що дає змогу автоматично зберігати результати вимірювань із прив'язкою до часу, а також опція встановлення порогових значень, за яких прилад може сигналізувати про перевищення допустимих норм. Часто використовується при налагодженні чи ремонті обертового обладнання: від електромоторів і вентиляторів до насосів і верстатів. Заміри можна запускати в різних точках або через певні інтервали, а потім підсумовувати результати й переглядати їх у самому приладі або вивантажувати через спеціальний інтерфейс (зокрема, USB). Частотний лишається в межах 10 Гц – 1 кГц для швидкості, тоді як для прискорення може бути дещо ширший (до 5 кГц). Умови застосування, як і в інших засобах такого типу, не дуже придатні для фіксації коливань з частотою нижче ~ 10 Гц. Як і у попередньо розглянутих моделях, HT-1201 залишає поза увагою "хмарний" чи "мережевий" рівень моніторингу. Цей пристрій розглядають як компромісний варіант і обирають як інструмент для "періодичного моніторингу" обладнання, коли важливо простежити тренд параметру безпосередньо на місці, перенести дані на комп'ютер і провести детальний аналіз.

Fluke 805 FC [13], див.рис.4г, орієнтований на експрес-діагностику обертових вузлів, зокрема підшипників, електродвигунів та іншого роторного обладнання, у якому стан і рівень зношення часто визначаються саме через вібраційні показники. Реалізований на основі п'єзоелектричного акселерометра, забезпечує вимірювання у діапазоні частот від 10 Гц до 1–2 кГц. Головною особливістю Fluke 805 FC є інтеграція з мобільним застосунком FlukeConnect, що дозволяє передавати результати вимірювань в режимі реального часу через Bluetooth, а також зберігати їх у "хмарі" або в пам'яті мобільного пристрою. Найчастіше пристрої такого типу використовують в якості швидкого діагностичного тестера стану обладнання. Для випадків, коли потрібна більш глибока спектральна обробка або контроль на нижчих/вищих частотах, все одно доведеться звернутися до інших, більш спеціалізованих рішень. Проте для місцевої експрес-діагностики обладнання Fluke 805 FC є одним із найпопулярніших приладів, орієнтованим на мобільність, ергономічність та організацію колективного доступу (використання) до даних.

Доцільно також згадати про WALCOM HT-520 [14], що має розширений функціонал, зокрема режим Max/Min: прилад фіксує максимальні та мінімальні значення під час реєстрації, тож зручно відстежувати пікові та "найспокійніші" моменти вібраційного процесу. Крім того, в середньочастотному і високочастотному діапазоні він дає змогу аналізувати спектр, особливо якщо інтерфейс (USB або спеціальний кабель) дозволяє вивантажувати дані в програму для подальшої обробки. HT-520 може зберігати кілька сотень чи тисяч точок вимірювань, чого зазвичай достатньо для коротко- або середньострокових сесій контролю. Крім того, HT-520 здатний працювати як портативний "спот-чекер" (разові вимірювання на кількох точках), так і в обмеженому "моніторинговому" режимі, якщо прилад залишається біля обладнання на певний період. Як і інші портативні рішення, він не передбачає бездротового підключення (Wi-Fi або GSM) чи "хмарного" сервісу.

Огляд, для порівняння, основних характеристик розглянутих систем моніторингу, що ґрунтуються на використанні п'єзоелектричних сенсорів подано в таблиці 2.

Таблиця 2.

Характеристик засобів оперативного моніторингу на основі п'єзоелектричних сенсорів

Назва	Сенсор	Діапазон частот	Чутливість	Зберігання даних	Інтерфейс	Живлення (бат./акум)
Walcom VM-6380	П'єзоелектричний акселерометр	≈ 10 Гц – 10 кГц (прискорення)	Прискорення: 0,10–199,9 м/с ² Швидкість: 0,01–199,9 мм/с Переміщення: 0,001–1,999 мм	-	-	4×AA до 25 год.
LUTRON PVB-820	П'єзоелектричний акселерометр	≈ 10 Гц – 1 кГц (швидкість) до 5 кГц (прискорення)	Прискорення: $\sim 0,5$ –199,9 м/с ² Швидкість: $\sim 0,5$ –199,9 мм/с Переміщення: $\sim 0,005$ мм	-	RS-232 / USB	6×AA до 30 год.
WALCOM HT-1201	П'єзоелектричний акселерометр	≈ 10 Гц – 1 кГц (швидкість) до 5 кГц (прискорення)	Прискорення: до 199,9 м/с ² Швидкість: до 199,9 мм/с Переміщення: до 1,999 мм	Внутрішня пам'ять	USB	Внутрішній акумулятор 8–10 год.

Продовження таблиці 2

HT-520	П'єзоелектричний акселерометр	$\approx 10\text{Гц} - 1\text{кГц}$ (швидкість) до 5 кГц (прискорення)	Прискорення: до 199,9 м/с ² Швидкість: до 199,9 мм/с Переміщення: до 1,999 мм	Внутрішня пам'ять	USB	Внутрішній акумулятор 8–10 год.
LUTRON VB-8205SD	П'єзоелектричний акселерометр	$\approx 10\text{Гц} - 1\text{кГц}$ (швидкість) до 5 кГц (прискорення)	Прискорення: до 199,9 м/с ² Швидкість: до 199,9 мм/с Переміщення: до 1,999 мм	SD-карта	USB / Ethernet	6×AA до 30 год.
Fluke 805 FC	П'єзоелектричний акселерометр	$\approx 10\text{Гц} - 2\text{кГц}$ (швидкість) до 2 кГц (заг.вібрація)	Прискорення: до $\sim 50\text{ g}$ швидкість: залежить від режиму	Внутрішня пам'ять	Bluetooth / USB	Внутрішній акумулятор 8–10 год.

Доцільно зазначити, що альтернативою портативних засобів є комплексні комп'ютерні системи моніторингу, в яких різноманітні сенсори (включно з акселерометрами) інтегруються із спеціалізованим програмним забезпеченням. Такі рішення призначені для довготривалого контролю стану споруд чи промислового устаткування й надають змогу не лише знімати дані безперервно, а й глибоко їх аналізувати, візуалізувати та обробляти за допомогою аналітичних алгоритмів.

Прикладом може бути комп'ютерна система Geocomp Bridge Monitoring [15], орієнтована на транспортну інфраструктуру (мости, тунелі, дорожні споруди). Ця система дає змогу контролювати вібрації й деформації, відстежувати зміну динамічних характеристик у реальному часі та завчасно виявляти ознаки пошкоджень чи надмірних навантажень. Для будівельного сектору та моніторингу великих інженерних споруд існують програмні рішення на зразок SVIBS ARTeMISModal [16], що пропонують операційний модальний аналіз, комплексну візуалізацію форм коливань і виявлення змін у динамічній структурі будівлі. Ці інструменти використовують широкий спектр сенсорів (акселерометрів, тензодатчиків, інклінометрів тощо) і часто доповнюються функцією дистанційного доступу до даних.

Для випадків моніторингу сейсмоактивних ділянок чи контролю потужних коливань (наприклад, вибухові роботи або сейсмічні явища), використовують складні комп'ютерні системи, зокрема акселерографи типу Tilia T130 [17]. Такі комплекси спрямовано на енергетику, гірничу промисловість або структурний моніторинг великих виробничих вузлів, де важливо фіксувати й аналізувати коливання як низької, так і високочастотної області.

Згадані програмно-апаратні системи характеризуються ширшою аналітикою (спектральні та кореляційні методи, побудова трендів, GIS-відображення), можливістю безперервного моніторингу великих обсягів вимірювальних даних і розвинутою системою оповіщень щодо перевищення встановлених порогів і найчастіше потрібні для ситуацій, коли відчасної оцінки технічного стану залежить безпека об'єкта або стабільність контрольованих об'єктів і обслуговуючого персоналу.

Висновок

Незважаючи на широку доступність сучасних засобів геомоніторингу, більшість із них демонструють низку спільних проблем і обмежень, зокрема: обмежений частотний діапазон (виробники часто вказують теоретичний діапазон, однак на його краях точність відчутно знижується); недостатня чутливість в області низьких частот, зокрема для п'єзоелектричних сенсорів, які фактично не здатні ефективно вимірювати коливання частотою нижче 1...2 Гц.; чутливість до впливу зовнішніх шумів (промислове середовище характеризується наявністю інтенсивних електромагнітних полів, паразитних вібрацій обладнання та інших об'єктів, що розташовані поряд тощо, що зумовлює додаткові затрати на спеціальні фільтри, екрановані кабелі, пошук прийнятного місця кріплення); чутливість до умов монтажу (якість кріплення, стан поверхні, контакт із віброметричною базою – усе це впливає на точність даних, якщо сенсор нещільно прилягає до поверхні об'єкту то з'являються додаткові резонанси, флуктуації човання, що спотворює амплітудно-частотні характеристики сигналу і робить дані малопридатними для використання); обмежена автономність (портативні прилади живляться від батарейок чи акумуляторів, це 8...10 годин роботи, що у складних/віддалених умовах (відсутність електромережі) або при тривалих тестах зумовлює затрати на додаткові автономні джерела живлення чи зарядки); Складнощі з низькочастотними сигналами при віддалених вимірюваннях (вібрації на великих відстанях від джерела затухають, що актуально громіздких конструкцій, тобто виникає можливість втрати інформативної складової сигналу); значна вартість багатofункціональних систем (комплексні рішення з дистанційним моніторингом, зокрема з функціоналом GSM, оповіщеннями, великим обсягом пам'яті тощо, а також спеціалізоване програмне забезпечення суттєво підвищують загальну ціну системи), що не дозволяє їх імплементувати в проектах моніторингу дрібного та середнього рівня. Таким чином актуальною

залишається задача пошуку нових технічних рішень у сфері реалізації компактних, автономних та відносно недорогих засобів геомоніторингу, які б забезпечували достатній функціонал як при унітарному використанні так і можливість інтегрування в склад комп'ютерних систем моніторингу як інформаційно-вимірвальні канали.

Література

1. Harris, C. M. (2010). *Shock and vibration handbook* (6th ed.). McGraw-Hill.
2. Rao, S. S. (2017). *Mechanical vibrations* (6th ed.). Pearson.
3. Collet, T., & Hope, A. (2019). *Vibration monitoring and analysis in rotating machinery*. IET Publishing.
4. Bently, D. E., & Hatch, C. T. (2020). *Fundamentals of rotating machinery diagnostics*. ASME Press.
5. Delgado, M. T., & Ferrer, J. M. (2019). A comprehensive overview of portable vibration measuring instruments. *Measurement*, 148, 106–117.
6. Inline Services. (n.d.). *SoniTrack Geophone: Система геофонного відстеження руху пізів у трубопроводах*. Retrieved February 12, 2024, from <https://www.pigging.com/product/sonitrack-geophone/>
7. Inline Services. (n.d.). *Wireless Geophone: Бездротовий геофон для моніторингу вібрацій та акустичних сигналів*. Retrieved February 12, 2024, from <https://www.inlineservices.com/product/wireless-geophone/>
8. Resensys. (2020, November 30). *Resensys Geophone: Бездротовий сейсмічний моніторинг та аналіз вібрацій*. Retrieved February 12, 2024, from https://resensys.com/documents/Resensys-Geophone_11302020-v6..pdf
9. Поплавко, Ю. М., & Якименко, Ю. І. (2013). *П'єзоелектрики: Монографія*. НТУУ «КПІ».
10. Simvolt. (n.d.). *Walcom VM-6380 (Віброметр)*. Retrieved August 10, 2023, from <https://simvolt.ua/vibrometr-walcom-vm-6380-ua.html/>
11. Simvolt. (n.d.). *LUTRON PVB-820 (Віброметр)*. Retrieved August 10, 2023, from <https://simvolt.ua/vibrometr-lutron-pvb-820/>
12. Simvolt. (n.d.). *WALCOM HT-1201 (Віброметр)*. Retrieved August 10, 2023, from <https://simvolt.ua/vibrometr-walcom-ht-1201/>
13. Hantek. (n.d.). *Fluke 805 FC*. Retrieved August 10, 2023, from <https://hantek.com.ua/fluke805fc>
14. Simvolt. (n.d.). *HT-520 (Віброметр)*. Retrieved August 10, 2023, from <https://simvolt.ua/vibrometr-ht-520-ua.html/>
15. Geocomp. (n.d.). *Bridge monitoring*. Retrieved August 10, 2023, from <https://www.geocomp.com/bridge-monitoring/>
16. Structural Vibration Solutions. (n.d.). *SVIBS ARTeMIS Modal*. Retrieved August 10, 2023, from <https://www.svibs.com/structural-health-monitoring/>
17. Seisodin. (n.d.). *Tilia T130 Strong Motion Accelerograph*. Retrieved August 10, 2023, from <https://www.seisodin.com/project/t130/>

References

1. Harris, C. M. (2010). *Shock and vibration handbook* (6th ed.). McGraw-Hill.
2. Rao, S. S. (2017). *Mechanical vibrations* (6th ed.). Pearson.
3. Collet, T., & Hope, A. (2019). *Vibration monitoring and analysis in rotating machinery*. IET Publishing.
4. Bently, D. E., & Hatch, C. T. (2020). *Fundamentals of rotating machinery diagnostics*. ASME Press.
5. Delgado, M. T., & Ferrer, J. M. (2019). A comprehensive overview of portable vibration measuring instruments. *Measurement*, 148, 106–117.
6. Inline Services. (n.d.). *SoniTrack Geophone: Systema heofonnoho vidstezhennia rukhu pihiv u truboprovodakh*. Retrieved February 12, 2024, from <https://www.pigging.com/product/sonitrack-geophone/>
7. Inline Services. (n.d.). *Wireless Geophone: Bezdrotovyi heofon dlia monitorynhu vibratsii ta akustychnykh syhnaliv*. Retrieved February 12, 2024, from <https://www.inlineservices.com/product/wireless-geophone/>
8. Resensys. (2020, November 30). *Resensys Geophone: Bezdrotovyi seismichnyi monitorynh ta analiz vibratsii*. Retrieved February 12, 2024, from https://resensys.com/documents/Resensys-Geophone_11302020-v6.pdf
9. Poplavko, Yu. M., & Yakymenko, Yu. I. (2013). *Piezoelektryky: Monohrafiia*. NTUU «KPI».
10. Simvolt. (n.d.). *Walcom VM-6380 (Vibrometr)*. Retrieved August 10, 2023, from <https://simvolt.ua/vibrometr-walcom-vm-6380-ua.html/>
11. Simvolt. (n.d.). *LUTRON PVB-820 (Vibrometr)*. Retrieved August 10, 2023, from <https://simvolt.ua/vibrometr-lutron-pvb-820/>
12. Simvolt. (n.d.). *WALCOM HT-1201 (Vibrometr)*. Retrieved August 10, 2023, from <https://simvolt.ua/vibrometr-walcom-ht-1201/>
13. Hantek. (n.d.). *Fluke 805 FC*. Retrieved August 10, 2023, from <https://hantek.com.ua/fluke805fc>
14. Simvolt. (n.d.). *HT-520 (Vibrometr)*. Retrieved August 10, 2023, from <https://simvolt.ua/vibrometr-ht-520-ua.html/>
15. Geocomp. (n.d.). *Bridge monitoring*. Retrieved August 10, 2023, from <https://www.geocomp.com/bridge-monitoring/>
16. Structural Vibration Solutions. (n.d.). *SVIBS ARTeMIS Modal*. Retrieved August 10, 2023, from <https://www.svibs.com/structural-health-monitoring/>
17. Seisodin. (n.d.). *Tilia T130 Strong Motion Accelerograph*. Retrieved August 10, 2023, from <https://www.seisodin.com/project/t130/>