DOI: 10.20535/2523-4455.mea.265031

УДК 621.396.967

П’єзоелектричний датчик механічних коливань

Конструкція, ідентифікація джерела коливань, можливості застосування

Кульський О. Л., к.т.н. с.н.с., ORCID 0000-0002-1987-1696
Лисоченко С. В., к.ф.-м. н. с.н.с., ORCID 0000-0002-5283-4336
Ільченко В. В., д.ф.-м. н. проф., ORCID 0000-0001-5844-2248
Мостовий В. С., д.ф.-м.н. проф., ORCID 0000-0002-1759-1893
Інститут високих технологій http://iht.univ.kiev.ua/
Київський національний університет імені Тараса Шевченка ROR 02aaqv166
Київ, Україна

Нікіфоров М. М., к.військ.н., пров.н.с., ORCID 0000-0002-2849-5688
Військовий інститут http://mil.univ.kiev.ua/
Київський національний університет імені Тараса Шевченка ROR 02aaqv166
Київ, Україна

Орлов А. Т., к.т.н. доц., ORCID 0000-0001-9426-6317
Кафедра мікроелектроніки me.kpi.ua
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» ROR 00syn5v21
Київ, Україна

Зелінський В. А., пров. інж., ORCID 0000-0001-6464-1702
Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України ROR 05xmg2z40
Київ, Україна

***Анотація*—Представлена розробка п’єзоелектричного датчика, призначеного для перетворення механічних коливань на електричний сигнал в аналоговій або цифровій формі. Особливостями датчика являються його високі чутливість і лінійність перетворення в широкому динамічному діапазоні. Робота датчика перевірена в лабораторних і польових умовах в складі макету комплексу накопичення і обробки інформації на основі міні комп’ютера, а також з віддаленим сервером. Розроблені алгоритми ідентифікації динамічних параметрів структур на основі структурного аналізу в пасивному моніторингу, а також розпізнавання джерел механічних коливань з застосуванням представлення сигналів у вигляді вейвлетів. Показані можливості застосування датчика в системах охорони і для аналізу стану великогабаритних споруд.**

Ключові слова — п’єзоелектричний датчик; механічні коливання; цифрова обробка сигналів; динамічна ідентифікація; моніторинг механічних коливань різної природи.

I. Вступ

Механічними коливними рухами або вібраціями супроводжується функціонування багатьох машин і механізмів, пересування людей і тварин, процеси в живій і неживій природі та інше. Наприклад, в разі коли джерела цих рухів (коливань) знаходяться на поверхні землі, під її поверхнею або пов’язані з землею механічними зв’язками, то коливання, що виникають, розповсюджуються в земній корі. Так само і коливання викликанні биттям серця, протіканням крові та інших біологічних рідин в організмі людини розповсюджуються по тканинах людського тіла. Параметри таких коливань, наприклад їх частоту чи амплітуду, можна виміряти на досліді за допомогою спеціальних датчиків. Ці параметри несуть в собі інформацію про характеристики джерела коливань, а також про ті шари Землі або живих тканин, які лежать на шляху їх розповсюдження. Також, в ряді випадків, механічні коливання в досліджуваному середовищі створюються штучно, наприклад при

Copyright (c) 2021 Кульський О. Л., Лисоченко С. В., Ільченко В. В., Мостовий В. С., Нікіфоров М. М., Орлов А. Т., Зелінський В. А.
За матеріалами конференції STEE-2021

DOI: 10.20535/2523-4455.mea.265031

зондуванні земної кори, ультразвукових дослідженнях і пальпації в медицині, дефектоскопії конструкційних матеріалів та багато ін.

Спостереження механічних коливань і зондування за їх допомогою давно і плідно застосовуються в різноманітних областях науки і техніки. Наведемо декілька прикладів таких застосувань. Сейсмічні охоронні системи периметру. Їх принцип дії заснований на реєстрації коливань ґрунту, що викликаються рухомим порушником або технікою за допомогою високочутливих сейсмічних датчиків. Сейсмічні датчики перетворюють коливання ґрунту в електричні сигнали, які в аналоговому або в цифровому вигляді надходять в електронний блок, а потім обробляються за спеціальним алгоритмом, відповідно до якого приймається рішення [1]. Перспективним застосуванням є і діагностика стану великогабаритних інженерних споруд. Структурний аналіз та ідентифікація динамічних параметрів таких об'єктів, спектральні характеристики яких лежать в області сейсмічного та нижньої частини акустичного діапазонів — надзвичайно важливі для їх моніторингу і дозволяє передбачити зміни в їх динамічних характеристиках. Метод динамічної ідентифікації забезпечує можливість визначити динаміку даної інженерної або природньої структури (наприклад будівлі або особливості структури Землі) за допомогою неруйнівних випробувань і тим самим оцінити її стан, а також можливу потребу в більш детальному моніторингу. Застосовується методологія ідентифікації основних параметрів об'єкта, таких як головні власні частоти і добротність структури на цих частотах. При проведенні експертизи аналізується відгук структури на динамічне навантаження, яке може викликатися як природніми чинниками (вітер, морські хвилі, рух транспорту та ін.) так і штучно викликаними імпульсами [2]. Можна назвати і низку важливих медичних застосувань спостережень механічних коливань в людському організмі. Перш за все, прикладом можуть бути дослідження різновидів пульсу: артеріального, венозного і капілярного. Це дозволяє проведення діагностики ряду захворювань людського організму [3]. Зауважимо, що пульсова діагностика має багатовікову історію і застосовувалась ще в древньому Китаї, а також в Середній Азії, коли Авіце́нна створив свій «Трактат про пульс» [4].

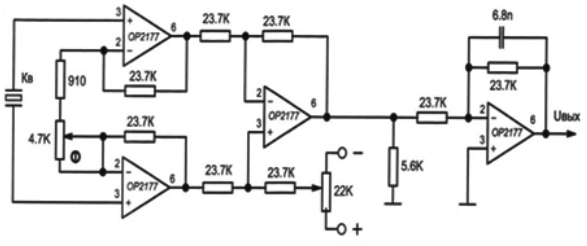

Рис. 1. Варіант принципової схеми інструментального високоімпедансного селективного підсилювача

З аналізу наведених літературних джерел випливає, що для практичного використання явища розповсюдження механічних коливань в різноманітних середовищах і вивчення як самих джерел коливань, так і шарів, що лежать на шляху їх розповсюдження необхідно вирішення двох основних задач. Перша це створення датчика механічних коливань високої чутливості і здатного практично без спотворень перетворювати механічну енергію джерела коливань в електричний сигнал в широкому динамічному діапазоні. Другим завданням є створення програмних алгоритмів обробки сигналу датчика, здатних виокремлювати сигнал кожного джерела з сумарного сигналу, що реєструється і ідентифікувати тип джерела коливань. Звичайно для цього порівнюють отримані сигнатури з набором шаблонів, записаним в електронну бібліотеку. В наступних розділах роботи описані особливості конструкції п'єзоелектричного датчика механічних коливань і алгоритми обробки його сигналів, що в значній мірі відповідають названим вимогам.

II. П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИЙ ДАТЧИК МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ

Розробка датчика механічних коливань з покращеними характеристиками включала в себе проведення досліджень, розробок, наступне виготовлення макетів та їх випробовування. В якості чутливого елемента датчика було вибрано п'єзоелектричний акселерометр, що має наступні переваги: широкий робочий діапазон частот, лінійність амплітудної характеристики в широкому динамічному діапазоні, високу надійність і довговічність, малі габарити [5]. Такі характеристики давали можливість реалізації конструкції датчика для найрізноманітніших застосувань, зокрема в медицині.

Було проведено відпрацювання варіантів інструментальних електронних підсилювачів, що узгоджувались з чутливим п'єзоелементом по цілому ряду параметрів. Зокрема, він повинен був мати: високий вхідний імпеданс, селективно-адаптивну характеристику, стабільно працювати в широкому діапазоні температур, базуватися на основі сучасної елементної бази, споживати мінімум електроенергії та ін. (рис. 1).

Смуга частот підсилювального тракту датчика обмежувалась смугою від 0,5 Гц до 1 КГц. В цьому випадку частотні характеристики інструментального підсилювача були оптимально погоджені з частотними характеристиками використовуваних п'єзокерамічних чутливих елементів. В разі необхідності смуга частот може бути суттєво розширена для найбільш точної ідентифікації джерела коливань.

З інструментального підсилювача сигнал поступав на комплекс обробки сигналів. Спочатку на адаптивний підсилювач, основною задачею якого є керування рівнем вхідного сигналу, підсиленням його до рівня достатнього для реєстрації АЦП, та зменшення сигналу у разі перевищення сигналом діапазону реєстрації. Підсилювач виконано на базі мікросхеми

Copyright (c) 2021 Кульський О. Л., Лисоченко С. В., Ільченко В. В., Мостовий В. С., Нікіфоров М. М., Орлов А. Т., Зелінський В. А.
За матеріалами конференції STEE-2021

DOI: 10.20535/2523-4455.mea.265031

OPA277P. Після підсилення аналоговий сигнал поступає на систему швидкісного перетворення аналогового сигналу в цифровий на базі мікросхеми ADC 1262. АЦП дозволяло одразу виконувати фільтрацію шумів підсилювача та блоку джерела сигналів. Фільтрація відбувалась цифровими методами, зокрема застосовано метод дискретної «вейвлет» фільтрації. В залежності від поставлених задач підбирався варіант оптимальної системи аналого-цифрової фільтрації. Діапазон частот аналізованих сейсмічних сигналів в залежності від області дослідження та методів що застосовуються складав від 0.01 Гц до 1000 Гц. Схема підключення АЦП була адаптована для платформи збереження даних, що розміщувалась поза датчиком.

Зв'язок датчика з віддаленим сервером здійснюється по дротовій лінії (для забезпечення непомітності на радіочастотах). В залежності від загальної блок-схеми побудови охоронної системи, на сервер передається аналоговий або цифровий сигнал за протоколом TCP/IP. Можливо також здійснення зв’язку в радіодіапазоні. Для цього в структурі датчика передбачена можливість використання спеціального модуля.

Конструктивно датчик виконано в металевому герметичному корпусі виготовленому з алюмінієвого сплаву. Просторово орієнтовані чутливі до механічних коливань елементи датчика механічно з’єднані з корпусом через спеціальні елементи кріплення, які дозволяли передавати коливання, що приходили з зовні в широкому діапазоні частот.

Для проведення випробовувань датчика механічних коливань було створено макет системи збереження і обробки даних на базі міні комп'ютера “latteranda” який на сьогоднішній день являється одним з найпотужніших серед малогабаритної техніки. Розроблена методика передачі та збереження інформації включала передачу даних до системи збереження за допомогою модуля «CAN» зв’язку SPI. Швидкість передачі даних становила 30 kb/ps, що в ряді випадків може бути недостатнім для повного збереження даних у режимі реального часу. В перспективі планується збільшення швидкості передачі даних до 120 kb/ps для найбільш достовірної ідентифікації отриманих сигнатур. Дані отримані з АЦП датчика зберігались в системі з інтервалом часу накопичення 1 хвилина. Після цього створювався новий файл з даними, а старий завантажувався на зовнішній сервер, на якому в подальшому і відбувалась обробка даних. Також існує можливість зберігання даних локально, на зовнішньому носії інформації. Для неперервної роботи системи в автономному режимі протягом доби потрібен зовнішній носій достатньо великої ємності. Так для збереження інформації, що надходить протягом однієї доби потрібно приблизно 128Гб пам’яті.

Проведені попередні випробовування датчика в складі системи збереження і обробки даних в лабораторних і польових умовах показали відповідність розробленого датчика основним висунутим вимогам. Швидкість передачі даних з АЦП до системи збереження складала 30 kb/ps. Було встановлено, що при наближенні людини до датчика, заглибленого в землю, надійний сигнал (перевищення сигналу над рівнем шумів в три рази) реєструється на відстані не менше 30 метрів. В цих дослідах надійно розрізнялись такі джерела коливань як людина, що пересувається і рухомі транспортні засоби. Також, в лабораторних умовах проводились спостереження коливань тиску в серцево-судинній системі людини. В цих дослідах перевищення сигналу над рівнем шумів становило більш ніж сто разів. Поглиблені дослідження медичних застосувань датчика планується проводити у співробітництві з фахівцями в області медицини.

III. Структурний аналіз та ідентифікація динамічних параметрів структур в пасивному моніторингу

Для ідентифікації стану природних та інженерних об’єктів застосовані головні структурні параметри, такі як головні власні частоти і добротність структур на цих частотах. Аналізується методологія експертизи відгуку структури на динамічне навантаження, яке може бути природнім (наприклад вітер) або штучним за допомогою тестових імпульсів. Особливий інтерес являє пасивний моніторинг об'єктів з джерелами емісійних сигналів, параметри, яких підлягають визначенню і є характеристикою структури. Емісія може мати як нерегулярний, так і регулярний характер. В останньому випадку вона може моделюватися у вигляді потоку з ймовірними характеристиками, такими, що підлягають визначенню [6-8]. Така поведінка типова для об’єктів різної природи, таких як джерела емісії механічних сигналів. Дисперсія розподілу моментів старту емісії окремих сигналів істотно більше ніж в разі активного моніторингу. На цьому суттєві відмінності двох типів моніторингу не закінчуються. В активному моніторингу дослідник в своєму розпорядженні має ще і зондуючий сигнал. Це означає, що результат аналізу даних, отриманих в пасивному моніторингу такого типу сигналів, зводиться до оцінки параметрів сигналу емісії, які флуктуюють від сигналу до сигналу, і розподіл флуктуацій параметрів апріорі невідомо. Важливий окремий випадок моделювання емісії — це випадок «коротких», тобто дозволених сигналів.

Першим кроком в ідентифікації стану споруд є створення математичної моделі. При оцінці параметрів моделі в динамічному моніторингу інженерних та природніх об’єктів при дослідженнях в загальному випадку, ми стикаємося з таким поданням моделі спостережуваних геофізичних полів $y(t,x)$, коли спостереження ускладнені адитивною перешкодою $n(t,x)$ *(t* – часова, а x – просторова координати, остання в залежності від організації системи спостережень може

Copyright (c) 2021 Кульський О. Л., Лисоченко С. В., Ільченко В. В., Мостовий В. С., Нікіфоров М. М., Орлов А. Т., Зелінський В. А.
За матеріалами конференції STEE-2021

DOI: 10.20535/2523-4455.mea.265031

бути одновимірною (профільні спостереження), двовимірною і тривимірною, або приймати єдине значення). Власне модель процесу формування поля $M(\mathbf{h},\boldsymbol{\alpha},t,x)$ визначається двома векторами вільних параметрів моделі $\mathbf{h}$ і $\boldsymbol{\alpha}$, а сама модель є гіпотезою дослідника в модельованому процесі. причому ми поділяємо вектори параметрів по тому як вони входять в модель, $\mathbf{h}$ входить в модель лінійно, а $\boldsymbol{\alpha}$ — нелінійно. Ця різниця істотна при оцінці вільних параметрів тому, що вимагає різних за складністю процедур [9].

Модель:

$$y(t,x) = M(\mathbf{h},\boldsymbol{\alpha},t,x) + n(t,x) \qquad (1)$$

Тут вільними параметрами моделі, що підлягають оцінці, є: вектор параметрів $\mathbf{h}$, що лінійно входить в модель, вектор $\boldsymbol{\alpha}$, що також лінійно входить в модель, а також $n(t,x)$ - адитивна перешкода. Розмірності векторів в загальному випадку теж підлягають визначенню. У цьому випадку модель $M(\mathbf{h},\boldsymbol{\alpha},t,x)$ розпадається на лінійну комбінацію з n моделей, де n розмірність вектора $\mathbf{h}$ набирає вигляду:

$$M(\mathbf{h},\boldsymbol{\alpha},t,x) = \sum_{k=1}^{n} h_k M_k(\boldsymbol{\alpha},t,x) \qquad (2)$$

Повністю вирішити задачу означає визначити для обраної моделі $M(\mathbf{h},\boldsymbol{\alpha},t,x)$ два вектора вільних параметрів моделі $\mathbf{h}$ і $\boldsymbol{\alpha}$. Для обчислених $\mathbf{h}$ і $\boldsymbol{\alpha}$ оцінюється норма нев'язки $n(t,x)$. Якщо вона не перевищує встановлений дослідником поріг, то приймається рішення про адекватність гіпотетичної моделі $M(\mathbf{h},\boldsymbol{\alpha},t,x)$ процесу. У загальному випадку розмірності цих векторів вільних параметрів моделі також підлягають визначенню. Надалі будемо завжди мати на увазі роздільне процедуру оцінки векторів $\mathbf{h}$ і $\boldsymbol{\alpha}$, припускаючи, що $\mathbf{h}$, може належати лише множині H, а $\boldsymbol{\alpha}$ – множині A, де H множина параметрів, що входить в модель лінійно, а A не лінійно.

Як шлях вирішення можна запропонувати метод підбору [10], тобто ми шукаємо такі значення векторів параметрів $\mathbf{h}$ і $\boldsymbol{\alpha}$, які, для вибраного скалярного добутку в Гільбертовому просторі, дають мінімальне відхилення моделі $M(\mathbf{h},\boldsymbol{\alpha},t,x)$ від даних $y(t,x)$, що спостерігаються. Гільбертовий простір вибирається, перш за все, через те, що нев'язка $n(t,x)$ нами розглядається завжди як випадковий процес, для якого задані статистичні характеристики і є можливість обчислення коваріацій, які і є скалярним добутком. Отже, ми приходимо до необхідності вирішення такого завдання: знайти

$$\min_{\substack{\mathbf{h}\in H\\ \boldsymbol{\alpha}\in A}} \left[\left(y(t,x) - M(\mathbf{h},\boldsymbol{\alpha},t,x), y - M(\mathbf{h},\boldsymbol{\alpha},t,x) \right) \right] \qquad (3)$$

Тут $\left(n(t,x),n(t,x)\right)$ - квадрат норми шуму в точці x, а ε - квадрат норми апріорі очікуваної нев'язки недосконалою моделі з природним процесом, який моделюється. Величина ε визначається суб'єктивно як відношення дослідника до якості моделі. Такому підходу присвячено багато робіт в минулому [11] він актуальний в геофізики і в даний час [12]

В (3) ми визначили ставлення до оптимальних оцінок параметрів моделі по-перше як точку в просторі параметрів, що мінімізує обраний критерій і по-друге оцінка приймається лише в разі, коли значення критерію не перевищує деякий, обраний апріорі поріг. В іншому випадку модель відкидається.

Оскільки в правій частині критерію наявна норма шумовий складової, то природно виникає шлях вибору скалярного добутку. Його потрібно вибрати таким, щоб норма шумової перешкоди була мінімальна. Цією нормою є дисперсія випадкового процесу в точці t.

$$\left(n(t,x_1),n(t,x_2)\right) = E\left(n(t,x_1)n(t,x_2)\right) \qquad (4)$$

Тут E – оператор обчислення математичного очікування випадкового процесу з нульовим математичним очікуванням в точці. Для обраного таким чином скалярного добутку мінімум в (3) відносно всіх вільних параметрів моделі (1).

Аналіз модулів спектра Фур'є для функцій разом з фізичними уявленнями про природу і характер осциляцій об'єкта і багатомодовість його спектра, дозволяють висунути гіпотезу про можливість моделювати його суперпозицією осциляторів з демпфуванням.

Надалі проводиться оптимальна оцінка параметрів моделі. Розглядається модель для спостережених даних в польовому експерименті, який полягав в тому, що вимірювався природний фон об'єкта колонного типу в сейсмічному діапазоні частот.

$$\mathbf{y}(t) = \{y_k(t)\};\ k = \overline{1,K} \qquad (5)$$

$$y_k(t) = \sum_{s=1}^{S} A_{ks} \exp\{-\alpha_{ks} t\} \sin\left(\omega_{ks} t + \Psi_{ks}\right) + n_k(t) \qquad (6)$$

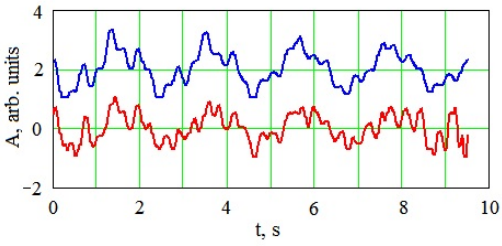

Рис. 2. Фільтровані [13] фрагменти записів польових спостережень довжиною 9,6 секунди. По осі абсцис час в секундах, по осі ординат — амплітуди швидкостей в відносних одиницях (в двох точках реєстрації). Для зручності читання рисунка криві рознесені по осі ординат на дві одиниці.

Copyright (c) 2021 Кульський О. Л., Лисоченко С. В., Ільченко В. В., Мостовий В. С., Нікіфоров М. М., Орлов А. Т., Зелінський В. А.
За матеріалами конференції STEE-2021

DOI: 10.20535/2523-4455.mea.265031

де k номер датчика, що реєструє коливання, K – кількість датчиків, в нашому випадку K=2, (k=1 у вертикальній площині і k= 2 у горизонтальній площині).

Розглядається S – безліч однотипних підмоделей, суперпозиція яких моделює процес, $y_k(t)$, $s \in S$. Завдання полягає в оптимальному визначенні вільних параметрів моделі. Критерієм оптимальності вибирається ступінь близькості моделі до Даних, що спостерігаються в обраній метриці.

В результаті аналізу ми приходимо до висновку, що цілком задовільний згоду спостережених даних з моделлю дає модель при $S = 3$. Модель при $S = 4$ збільшує узгодження всього на 1%, але при цьому розмірність завдання збільшується істотно: простір оцінюваних параметрів змінюється з 12-и мірного до 16-и мірного. І ми бачимо, що подальше збільшення розмірності моделі в цьому конкретному випадку не має сенсу. Якщо врахувати, що кожен параметр моделі повинен розглядатися як і привносить в модель шум (це явище в статистиці носить назву «прокляття розмірності»), то для даного випадку модель з 14-ю вільними параметрами є граничною по складності для моделей обраного типу для отриманих в цьому експерименті даних. Методом Монте-Карло, по апріорним розподілом, ми отримуємо точку в 16-вимірному просторі, в околиці якої відшукується локальний екстремум, відшукуємо глобальний, що дає мінімум визначеного критерію [2].

Переходячи до аналізу якості оптимальної моделі. будемо розглядати дві моделі з дванадцятьма і шістнадцятьма вільними параметрами. Оцінкою якості моделі служить значення критерію в точці глобального мінімуму. Фізично змістовну цінність мають перш за все значення частот і логарифмічного декремента затухання об'єкта дослідження. Особливо важливі останні, оскільки дають уявлення про добротності системи, її здатності накопичувати і утримувати деякий час енергію зовнішніх збурень. Висока добротність (малий декремент затухання) на деяких частотах в моделі характеризує особливу чутливість об'єкта до зовнішніх збурень на цих частотах. Наприклад, динамічні зміни декремента затухання в сторону зменшення — це ознака готовності об'єкта до руйнування від слабкого зовнішнього впливу. На жаль, використовуваний в роботі метод Монте-Карло дає збіжність до вирішення лише за ймовірністю. Кількість циклів обчислень має бути досить великим для впевненості в правильності результату, що стає скрутним при великій розмірності моделі. Або потрібно володіти хорошими апріорними уявленнями про очікуваний результат.

На закінчення наведемо оптимальні параметри по даним дослідженого об'єкта по рис. 2 [2].

Транспонований вектор власних кутових частот

$$\boldsymbol{\omega}^T = \{2{,}963 \quad 9{,}025 \quad 20{,}298 \quad 26{,}063\} \text{ рад/с}$$

Транспонований вектор амплітуд власних частот віднесених до найнижчої гармоніці

$$\mathbf{A}^T = \{1 \quad 0{,}638 \quad 0{,}324 \quad 0{,}037\}$$

Транспонований вектор декрементів затухання на власних частотах

$$\boldsymbol{\alpha}^T = \{0{,}016 \quad 2{,}063 \quad -0{,}216 \quad 0{,}738\}$$

Транспонований вектор зрушень по фазі в радіанах

$$\boldsymbol{\psi}^T = \{3{,}062 \quad -0{,}204 \quad 2{,}944 \quad -8{,}112\text{E-}3\} \text{ рад}$$

Транспонований вектор власних частот

$$\mathbf{f}^T = \{0{,}472 \quad 1{,}436 \quad 3{,}231 \quad 4{,}148\} \text{ Гц}$$

IV. АЛГОРИТМ РОЗПІЗНАВАННЯ НА ОСНОВІ ПРЕДСТАВЛЕННЯ СИГНАЛІВ У ВИГЛЯДІ ВЕЙВЛЕТІВ

Система збереження і обробки даних на базі віддаленого сервера працює у режимі реального часу. Швидкість реакції системи на зміну сигналу, що спостерігається, є одним із важливих її параметрів. Тому, для реалізації алгоритму розпізнавання, спочатку на сервері проходить потокова обробка даних, яка полягає в наступному. Прийом даних вимірів від датчика механічних коливань та їх обробка відбувається у послідовності пов’язаних буферів фіксованого розміру, організованих у циклічній послідовності. Нові дані вимірів з датчика заносяться у черговий вільний буфер серверу. Заповнений буфер добавляється в кінець ще не оброблених буферів. Оброблений буфер (з інтерпретованими даними) записується на диск (архів), звільняється і приєднується в кінець вільних буферів. За аналогічною схемою обробляються дані від усіх датчиків, що передаються на сервер.

Надалі дані вимірів, отриманих від датчиків розподіляються по каналам – для кожного датчикаокремо, обробка даних в яких проходить аналогічно і паралельно. Перший етап алгоритму розпізнавання полягає в розподілі даних вимірів по полосам частот – використовуються алгоритми цифрової фільтрації (ковзне усереднення даних вимірів) [14]. Утворені нові канали з даними вимірів кожної полоси частот також обробляються аналогічно і паралельно. Таким чином забезпечується декомпозиція а також враховується те, що різні частоти зазнають різного згасання та поширюються в середовищі з різною швидкістю. На другому етапі відбувається представлення даних вимірів кожного із утворених каналів у вигляді вейвлетів [15].

Вейвлети можуть бути різної форми і мати різну структуру параметрів. В даній роботі ця структура обрана таким чином, щоб представлення сукупності вимірів коливального процесу з однією частотою (можливо незначними змінами фази), наростанням та спадом амплітуди було найбільш компактним. Форма

Copyright (c) 2021 Кульський О. Л., Лисоченко С. В., Ільченко В. В., Мостовий В. С., Нікіфоров М. М., Орлов А. Т., Зелінський В. А.
За матеріалами конференції STEE-2021

DOI: 10.20535/2523-4455.mea.265031

вейвлета вибирається за спостереженнями сигналів типових джерел механічних коливань. Такими для сейсмічних коливань являються хода людини, переміщення транспортних засобів, робота виробничого обладнання та інше. На рис. 3 для прикладу представлено модельний сигнал в цифровій формі від падіння гирі на ґрунт на віддалі 10 метрів від датчика. З рисунка проглядається форма вейвлета — наростання і спад амплітуди, частота сигналу. З подібних елементів складаються «портрети» вказаних типових джерел коливань.

В сумарному сигналі, вимірюваному датчиком, присутні вейвлети від багатьох джерел і тому постає наступна задача — розділити сумарний сигнал на складові. Для цього спочатку знаходяться регулярності у сигналі, які можуть бути інтерпретовані як вейвлет. Перелік вейвлетів визначається з надлишком, а їх параметри допускають уточнення. Далі алгоритм використовує правила, за якими уточняється перелік та параметри вейвлетів, а також їх належність до певних джерел коливань. Перелік і параметри цих правил можуть бути уточнені оператором без зміни самого алгоритма розпізнавання. Серед правил можуть бути наступні. Вейвлет повинен бути присутнім у каналах різних датчиків одного блоку обробки сигналів із можливою затримкою по часу (за затримкою визначається відстань до джерела); вейвлет звичайно належить до одного з класів джерел; по мірі встановлення належності вейвлетів до певного джерела (підтвердження наявності джерела) шукати інші вейвлети, які можуть бути у складі такого джерела. Присутність певних джерел може бути оцінена за попередніми результатами отриманими при обробці вимірів одного з блоків обробки сигналів або навіть результатів сторонніх засобів спостереження. По мірі підтвердження присутності вейвлетів у сумарному сигналі та уточненні їх параметрів, із сумарного сигналу віднімаються визначені вейвлети і запускається новий цикл його аналізу до вичерпання — весь сигнал з усіх датчиків повинен бути інтерпретований (встановлюється допустимий рівень завад як параметр алгоритма). По мірі віднесення вейвлетів до відомого класу, проходить ідентифікація джерела коливань і відображення його в списку або на карті в разі контролю зони спостереження. Серед вейвлетів можуть бути такі, що не можна віднести до визначених класів джерел – їх відносимо до абстрактного класу, які відображаються особливим чином. Джерела, що віднесені до абстрактного класу аналізують і уточнюють в умовах без обмежень часу для їх конкретизації – віднесення до існуючих класів або створення нових.

Крім алгоритму, який розпізнає джерела коливань у режимі реального часу, необхідне також використання алгоритму створення нових класів джерел коливань, який виконує наступне. Створюється еталонний перелік вейвлетів, їх параметри, залежності між параметрами та їх можливі модифікації для кожного класу коливань. З еталона шляхом певних трансформацій просто отримати «портрети» представників даного класу і значно складніше представників інших класів. Ступінь належності конкретного набору вейвлетів кожного нового джерела коливань, встановлюється за сумарною вагою тих трансформацій, які потрібні для забезпечення його ідентичності з відповідним еталоном. Вага кожної з трансформацій залежить від умов зони спостереження – розміщення датчиків, властивостей грунту, наявності особливостей в поверхневих шарах грунту, погодних умов та інші. Калібровка алгоритма проводиться за результатами вимірювань сейсмічних сигналів від джерел з відомими характеристиками та розташуванням. Їх характеристики отримуються від інших засобів спостереження.

Висновки

Створені високочутливі п’єзоелектричні датчики механічних коливань нового покоління з рекордними характеристиками на основі оптимального вибору характеристик п'єзокерамічних матеріалів і оптимізації будови селективних електронних підсилювачів.

Створено макет системи збору, аналізу і цифрової обробки масивів вихідних даних датчика механічних коливань. Визначена оптимальна архітектура мікропроцесорного ядра системи і типи мікроконтролерів.

Запропоновано ефективний метод аналізу стану природних і штучних об'єктів, власні частоти яких лежать в сейсмічному і нижній частині акустичного діапазонів частот, заснований на моніторингу їх динаміки. Запропоновано новий підхід для ідентифікації стану таких об'єктів. Запропонована нетрадиційна модель природного фону об'єкта моніторингу у вигляді суперпозиції згасаючих, або зростаючих гармонік.

Розроблено алгоритм ідентифікації типу джерела механічних коливань на основі представлення сигналів у вигляді вейвлетів

Проведені успішні випробовування щодо визначення технічних характеристик датчика механічних коливань в системі пасивної розвідки стаціонарної системи охорони

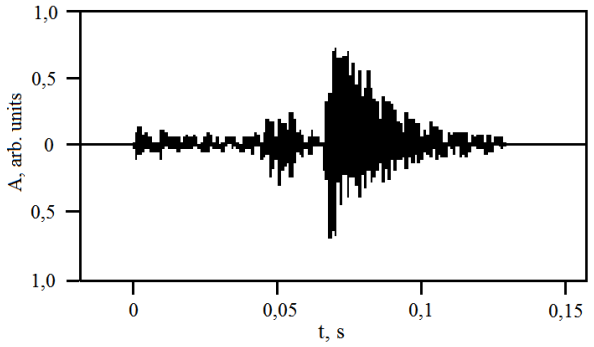

Рис. 3. Залежність амплітуди сигналу A у відносних одиницях від часу t.

Copyright (c) 2021 Кульський О. Л., Лисоченко С. В., Ільченко В. В., Мостовий В. С., Нікіфоров М. М., Орлов А. Т., Зелінський В. А.
За матеріалами конференції STEE-2021

DOI: 10.20535/2523-4455.mea.265031

Отримані характеристики п'єзоелектричного датчика механічних коливань дають можливість передбачати широке застосування технічних рішень, закладених в його основу в різноманітних сферах науки і техніки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

[1] I. V. Tolok, B. O. Popkov, and V. V. Il'chenko, *Kompleks pasyvnoyi rozvidky na osnovi seysmoakustychnykh datchykiv [Complex of passive reconnaissance based on seismoacoustic sensors]*, Kyiv: Printto, 2020, p. 140.

[2] S. Mostovoy and V. S. Mostovoy, "Active Monitoring and decision making problem", *International Journal INFORMATION THEORIES & APPLICATIONS*, vol. 12, no. 2, pp. 186–192, Jan. 2005. **URL:** http://www.foibg.com/ijita/vol12/ijita12-2-p11.pdf

[3] M. Yakushkyn, *Dyahnostyka po Radyal'nym pul'sam y Mu-tochkam [Diagnostics by Radial pulses and Mu-points]*, Moskow: Profyt Stay, 2016, p. 270. **ISBN:** 5-98857-476-9.
URL: https://bizness13.ucoz.com/news/diagnostika_po_radialnym_pulsam_i_mu_tochkam_po_zh_sule_de_moranu_m_jakushkin/2016-03-16-89

[4] S. P. Glyantsev and S. M. Magomedova, "Ucheniye o pul'se Avitsenny: vzglyad iz nastoyashchego [Avicenna's Pulse Doctrine: A View from the Present]", *Annaly aritmologii*, vol. 9, no. 4, pp. 45–50, 2012. **URL:** http://arrhythmology.pro/2012-4-045-050

[5] M. Nikiforov, I. Pampukha, V. Ilchenko, and O. Kulskyy, "Obgruntuvannya vyboru materialiv p″yezodatchykiv dlya vykonannya zavdannya zakhystu terytoriyi okhoronyayemykh ob″yektiv [Justification of the choice of materials of piezo sensors for the task of protecting the territory of protected objects]", *soivt*, no. 2(62), pp. 83–92, Jun. 2020. **DOI:** 10.30748/soivt.2020.62.11

[6] X.-P. Li, "Comparison of fourier and wavelet power spectral analysis of heterogeneities", in *58th EAEG Meeting*, Amsterdam, Netherlands, 1996. **DOI:** 10.3997/2214-4609.201408909

[7] X. Li, "On-line detection of the breakage of small diameter drills using current signature wavelet transform", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 39, no. 1, pp. 157–164, Jan. 1999. **DOI:** 10.1016/S0890-6955(97)00066-7

[8] M. T. Kalcic, D. N. Lambert, and Martinez A. B., "Time-frequency analysis of shallow seismic imagery", Sea Technology, vol. 40(8), no. 7, pp. 55–60, 1999.

[9] V. S. Mostovoy and S. V. Mostovyi, "Mathematical model of seismic signal, as a flow of physically non realizable single seismic waves", *Geophysical journal*, vol. 38, no. 5, pp. 166–169, 2016. **URL:** http://www.igph.kiev.ua/FullVersion/2016/gj5/art51416.pdf

[10] H. Hiroyuki, A. Yukinori, "Acoustic Imaging for Archaeological Investigations Using Wavelet Transform," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 35, N. 5S, pp. 3101-3104, 1996. **URL:** https://iopscience.iop.org/article/10.1143/JJAP.35.3101

[11] S. Y. Bergeron, A. P. Vincent, D. A. Yuen, B. J. S. Tranchant, and C. Tchong, "Viewing seismic velocity anomalies with 3-D continuous Gaussian wavelets", *Geophysical Research Letters*, vol. 26, no. 15, pp. 2311–2314, Aug. 1999. **DOI:** https://doi.org/10.1029/1999GL900466

[12] Wavelet explorer documentation. **URL:** http://documents.wolfram.com/applications/wavelet/FundamentalsofWavelets/1.4.5.html/ .

[13] A. Chakraborty and D. Okaya, "Frequency-time decomposition of seismic data using wavelet-based methods", *GEOPHYSICS*, vol. 60, no. 6, pp. 1906–1916, Nov. 1995. **DOI:** 10.1190/1.1443922

[14] R. Layons, *Tsifrovaya obrabotka signalov [Digital Signal Processing]*, 2nd ed. Moskow: «Binom-Press» ltd, 2006, p. 656.

[15] V. P. Dyakonov, *Veyvlety. Ot teorii k praktike. (Seriya «Polnoye rukovodstvo pol'zovatelya») [Wavelets. From theory to practice. (Series "Complete User's Guide")]*, 2nd ed. Moskow: SOLON-Press, 2010, p. 400.

Надійшла до редакції 20 серпня 2021 року
Прийнята до друку 02 серпня 2022 року

UDC 621.396.967

Piezoelectric Sensor of Mechanical Vibrations

Design, Identification of the Source of Oscillations, Application Possibilities

O. l. Kulskyi, PhD Senior Researcher, ORCID 0000-0002-1987-1696
S. V. Lysochenko, PhD Senior Researcher, ORCID 0000-0002-5283-4336
V. V. Ilchenko, Dr.Sc.(Phys.-Math.) Prof., ORCID 0000-0001-5844-2248
V. S. Mostovyi, Dr.Sc.(Phys.-Math.) Prof., ORCID 0000-0002-1759-1893
Institute of High Technologies http://iht.univ.kiev.ua/
Taras Shevchenko National University of Kyiv ROR 02aaqv166
Kyiv, Ukraine

M. M. Nikiforov, PhD Leading Researcher, ORCID 0000-0002-2849-5688
Military Institute http://mil.univ.kiev.ua/
Taras Shevchenko National University of Kyiv ROR 02aaqv166
Kyiv, Ukraine

Copyright (c) 2021 Кульський О. Л., Лисоченко С. В., Ільченко В. В., Мостовий В. С., Нікіфоров М. М., Орлов А. Т., Зелінський В. А.
За матеріалами конференції STEE-2021

DOI: 10.20535/2523-4455.mea.265031

A. T. Orlov, PhD Assoc.Prof., ORCID 0000-0001-9426-6317
Department of microelectronics me.kpi.ua
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" ROR 00syn5v21
Kyiv, Ukraine

V. A. Zelinskyi, Senior Engineer,ORCID 0000-0001-6464-1702
V. M. Glushkov Institute of Cybernetics ROR 05xmg2z40
Kyiv, Ukraine

***Abstract*— Creation of high-sensitive sensor of mechanical vibrations, capable of non-distorted transformation of the vibrations source energy into electric signal within a wide dynamic range, is necessary for determination of characteristics of the source as well as for obtaining the information on parameters of medium in which the vibrations propagate. Fast and successful usage of obtained data can be achieved with employment of programming algorithms of identification of type of a source of vibrations and finding their fundamental Eigen frequencies and quality factors of the structures at these frequencies.**

Calculations of the schematic-and-technical decisions, selection of elements, making of mock-ups, and working-out of variants of the sensor. Mathematical modeling, analysis and identification of dynamical parameters of the structures in which there are used the fundamental eigenfrequencies and the structures' quality factors at these frequencies. The Fourier and wavelet analyses of the spectra. Algorythms of digital filtering (moving average of measured data).

Sensors of mechanical vibrations and a system for collection, analysis, and digital processing of the output data arrays are created. New effective method for analysis of conditions of natural and artificial objects is suggested. Algorythm for identification of type of mechanical vibrations source is developed.

Transducers of mechanical vibrations are developed using film-based piezoelectric sensors of new generation. System for storing and processing of the sensors' output data arrays is developed and a technique for transferring and saving the information is formulated.

Structural parameters such as fundamental eigenfrequencies and the structures' quality factors at corresponding frequencies are applied for identification of conditions of natural and engineering objects. Methodology for expertise of both the natural-based (wind) and the test-pulses-assisted dynamical loading is developed. Sets of single-type sub-models suitable for modeling, by their superposition, of the whole process are considered, and optimal sets of the model's free parameters are determined. Degree of the model's closeness to data obtained within a selected metrics serves as a criterion of optimality.

Algorithm for identification of type of a mechanical vibrations' source is developed basing on the signals representation as wavelets. The sensor-measured total signal includes wavelets from multiple sources and, because of this, the task of separation of the aggregated signal into constituents is accomplished. To achieve this, regularities within the signal should be found which might be interpreted as wavelet. Enumeration of the wavelets is determined with excess; the algorithm employs rules in accordance with which the enumeration and wavelets parameters are selected with more accuracy, and connection of wavelets with certain vibration sources is specified.

Performance of the proposed sensor is fully confirmed by experimental data. Successful tests targeted at determination of technical characteristics of the sensor of mechanical vibrations are conducted within a passive survey system of stationary security installation. Seismograms of an approaching pedestrian are obtained for the distance of 30 m.

Characteristics of the piezoelectric sensor of mechanical vibrations make it possible a plenty of applications of technical decisions, laid into its basis, in various spheres of science and technology.

Keywords — piezoelectric sensor; mechanical vibrations; digital signal processing; dynamical identification; mechanical vibrations monitoring.components.

Copyright (c) 2021 Кульський О. Л., Лисоченко С. В., Ільченко В. В., Мостовий В. С., Нікіфоров М. М., Орлов А. Т., Зелінський В. А.
За матеріалами конференції STEE-2021