

UDC 550.34:620.179

Vasyl Mostovyy¹, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1759-1893> **e-mail:** vasyl.mostovyy@gmail.com

Anton Korobenko², PhD Student
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-7099-6535> **e-mail:** anton.korobenko.off@gmail.com

¹Institute of Telecommunications and Global Information Space NASU, Kyiv, Ukraine

²Taras Shevchenko National University, Kyiv, Ukraine

ASSESSMENT OF THE DYNAMIC PARAMETERS OF COLUMN-TYPE BUILDING STRUCTURES UNDER SEISMOACOUSTIC MONITORING

Abstract. The paper considers an approach to assessing the dynamic parameters of column-type building structures under passive seismoacoustic monitoring. To describe the response of the object, a mathematical model in the form of a superposition of damped oscillators is proposed, and its parameters are determined by minimizing the agreement criterion between the model and the experimental data. Spectral analysis, the Levenberg–Marquardt method, and Monte Carlo trials are used to obtain the optimal solution. It is shown that the free parameters of the model, in particular the damping characteristics, are informative for identifying the technical state of the object and can be used for long-term monitoring. The results indicate that, at the time of observation, the object was in a stable stationary state.

Keywords: passive seismoacoustic monitoring, superposition of damped oscillators, nonlinear optimization, Levenberg–Marquardt method, damping characteristics.

В.С. Мостовий¹, А.П. Коробенко²

¹Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ, м. Київ, Україна

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна

ОЦІНЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ КОЛОННОГО ТИПУ В УМОВАХ СЕЙСМОАКУСТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Анотація. У статті розглянуто підхід до оцінювання динамічних параметрів будівельних конструкцій колонного типу в умовах пасивного сейсмоакустичного моніторингу. Для опису реакції об'єкта запропоновано математичну модель у вигляді суперпозиції затухаючих осциляторів, параметри якої визначаються шляхом мінімізації критерію узгодження між моделлю та експериментальними даними. Для пошуку оптимального розв'язку використано спектральний аналіз, метод Левенберга–Марквардта та випробування Монте–Карло. Показано, що вільні параметри моделі, зокрема демпфувальні характеристики, є інформативними для ідентифікації технічного стану об'єкта та можуть бути використані для довготривалого моніторингу. Результати дослідження засвідчили, що на момент спостережень об'єкт перебував у стійкому стаціонарному стані.

Ключові слова: пасивний сейсмоакустичний моніторинг, старіння матеріалу, вільні параметри моделі, нелінійна оптимізація, метод Левенберга–Марквардта, спектральний аналіз, демпфування.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.1.179-189>

© В.С. Мостовий, А.П. Коробенко, 2026

Вступ

Практичний досвід, накопичений авторами під час моніторингу низки промислових споруд, дає підстави стверджувати, що процес старіння конструкцій можна описати через певний простір ознак, який формується сукупністю параметрів, пов'язаних з пружними властивостями матеріалів досліджуваних об'єктів. Оскільки швидкість поширення, а також форма поздовжніх і поперечних хвиль у матеріалі визначаються його пружними характеристиками, зокрема модулем Юнга та коефіцієнтом Пуассона, зміна цих величин неминуче відбивається і на спектральних параметрах сигналів емісії, що виникають у матеріалі в процесі його старіння.

Власні частоти досліджених конструкцій перебували в сейсмічному діапазоні. Для об'єкта, який перебуває у стаціонарному стані, у режимі пасивного моніторингу спостерігалось стійке переміщення вектору стану в просторі ознак у межах відносно невеликого еліпсоїда обертання. Це пояснюється стохастичною природою самого процесу спостереження. Подібний характер поведінки зберігається доти, доки в матеріалі не починають розвиватися явища втоми. З позицій матеріалознавства втома розглядається як поступове накопичення локальних структурних пошкоджень, що виникають під дією циклічних навантажень. При цьому максимальні напруження в циклі залишаються нижчими як за граничне напруження, так і за межу міцності відповідного матеріалу.

Руйнування матеріалу як елемента конструкції полягає у втраті ним несучої здатності, а в граничному випадку – у втраті працездатності всієї конструкції. Такий процес починається тоді, коли напруження наближаються до критичних значень і спричиняють надмірні деформації, за яких матеріал після завершення циклу навантаження вже не повертається до початкового стану. Саме в цьому разі проявляється гістерезис. Будь-який перерозподіл енергії всередині матеріалу супроводжується появою сигналів емісії. Такі сигнали являють собою хвилі напружень, що виникають унаслідок раптової внутрішньої перебудови напруженого стану матеріалу, спричиненої змінами його мікроструктури.

Причинами таких внутрішніх змін можуть бути зародження та розвиток тріщин, фазові перетворення в суцільних матеріалах, а також послаблення зв'язків між складовими елементами структури. Зміна параметрів емісійних сигналів у часі відображає трансформацію пружних властивостей досліджуваного об'єкта. Це означає, що динаміка характеристик емісії пов'язана з динамічними властивостями самої конструкції. Однак через наявність стохастичного фоновому шуму під час моніторингу цю залежність доцільно розглядати як статистичну. У зв'язку з цим одним із ключових завдань є визначення найбільш інформативних параметрів для формування простору ознак, у межах якого можна аналізувати їхню поведінку в динаміці та на цій основі будувати вирішальне правило для прогнозування технічного стану об'єкта [1].

Таким чином постає проблема адекватного вибору простору ознак, що відображає старіння та втому конструкції. Оскільки фактична інформація про стан об'єкта доступна лише опосередковано – через характеристики зареєстрованих сигналів емісії, – оцінювання також має непрямий характер і базується на аналізі поширення хвиль емісії. Динамічні зміни цих хвиль проявляються через зміни їхніх спектральних параметрів. Відповідно, простір

спектральних характеристик формується на основі параметрів, статистично пов'язаних зі станом самого об'єкта. Стохастичні властивості такого складного випадкового процесу і відображають зміну пружних характеристик матеріалу. Тому задача оцінювання параметрів цього процесу фактично зводиться до визначення їхніх апостеріорних імовірностей, динаміка яких дає змогу судити про розвиток втомі та старіння конструкції.

Під пасивним сейсмоакустичним моніторингом будівельних об'єктів розуміють систематичне спостереження за параметрами природного фону досліджуваної конструкції. Такий природний фон є суперпозицією сигналів емісії, що виникають як унаслідок внутрішніх змін самого об'єкта, наприклад утворення мікротріщин, так і внаслідок його реакції на зовнішні збурення. До таких збурень належать вітрові навантаження, транспортні впливи, сейсмічні події, коливання ґрунту, а також вібрації, породжені іншими об'єктами різної природи, які також реагують на зовнішні чинники.

Отже, математична модель старіння конструкції повинна враховувати як характер зовнішніх впливів, так і специфіку реакції самого об'єкта на ці впливи. В основу запропонованого підходу покладено гіпотезу, згідно з якою будь-яке зовнішнє збурення формує реакцію конструкції у вигляді суперпозиції осциляторів, частина яких виникає в межах інтервалу спостереження, а частина – ще до його початку. Саме режимне відстеження динаміки параметрів цієї сукупності осциляторів і становить сутність пасивного сейсмоакустичного моніторингу, спрямованого на оцінювання ступеня старіння досліджуваного об'єкта.

Математична модель

Як динамічну модель досліджуваного об'єкта розглядаємо суперпозицію з $I + 1$ осциляторів, кожен з яких починає діяти у власний момент часу t_{0+i} , характеризується певною амплітудою l_{1+i} , параметром затухання коливань з постійною часу l_{2+i} і власною кутовою частотою l_{3+i} , $i = \overline{0, I}$ [2].

$$M(t, \lambda) = \sum_{i=0}^I \Phi(t - \lambda_{i \cdot S+0}) \lambda_{i \cdot S+1} [e^{-\lambda_{(i \cdot S+2)}(t - \lambda_{i \cdot S+0})} \sin[\lambda_{(i \cdot S+3)}(t - \lambda_{i \cdot S+0})]] \quad (1)$$

де λ – вектор вільних параметрів моделі, S – кількість вільних параметрів підмоделі, $I + 1$ – кількість підмоделей, які беруть участь в суперпозиції, $\Phi(t)$ – одинична функція Хевісайда. Кожна з підмоделей – це фізично здійсненна хвиля [3]. Як видно з (1), лише параметри l_i , *when* $\text{mod}(i, 4) = 1$ входять до моделі лінійно, тоді як решта параметрів мають нелінійний характер.

Оптимальне оцінювання параметрів сигналу полягає у визначенні такого вектору вільних параметрів моделі, за якого досягається найкраще узгодження між модельним описом і експериментально спостережуваними даними. У роботі розглянуто відносно простий випадок, коли мірою такої узгодженості обрано квадрат відхилення моделі від оброблених даних $y(t)$ у метриці L_2 . За цих умов критерій $F(\lambda)$ задається співвідношенням:

$$F(\lambda) = \int_T [y(t) - M(t, \lambda)]^2 dt, \quad (2)$$

а оптимальна оцінка вільних параметрів λ^* визначається як точка, яка мінімізує (2) в просторі параметрів [4]:

$$F(\lambda^*) = \min_{\lambda \in \Lambda} F(\lambda)$$

$y(t)$ – аналітична апроксимація вектору значень оброблених спостережуваних даних, Λ - множина можливих значень вектору λ .

Для знаходження мінімуму критерію необхідно обчислити частинні похідні $\frac{\partial F(\lambda)}{\partial \lambda_k}$, $k = \overline{0, K}$, тут $K+1$ – кількість всіх вільних параметрів моделі. Прирівнявши $\frac{\partial F(\lambda)}{\partial \lambda_k}$, $k = \overline{0, K}$ до нуля, отримаємо систему рівнянь, що має такий вигляд:

$$\frac{\partial F(\lambda)}{\partial \lambda_k} = \int_T [y(t) - M(t, \lambda)] \frac{\partial M(t, \lambda)}{\partial \lambda_k} dt = 0 \quad k = \overline{0, K}. \quad (3)$$

Система рівнянь зводиться до

$$\int_T [y(t) \cdot \mathbf{D}(M(t, \lambda))] dt = \int_T [M(t, \lambda) \cdot \mathbf{D}(M(t, \lambda))] dt. \quad (4)$$

Тут $\mathbf{D}(M(t, \lambda))$ – вектор функція, сформований з похідних моделі по всіх компонентах вектору λ . Для моделі (1) цей вектор має вигляд:

$$\mathbf{D}(M(t, \lambda)) = \frac{\partial M(t, \lambda)}{\partial \lambda_{s+i}}; \quad s = \overline{0, S}; \quad i = \overline{0, I}, \quad (5)$$

i – порядковий номер підмоделі в (1).

Для подальших обчислень доцільно подавати вектор вільних параметрів λ .

Оптимальну оцінку матриці вільних параметрів Λ визначають як таку оцінку, що забезпечує найменше значення критерію серед усіх локальних мінімумів. Кожний локальний мінімум знаходять як найближчий до випадково обраної точки у просторі параметрів, яка задається псевдовипадковим вектором відповідної розмірності. Практично процедура побудована так: для множини з M псевдовипадкових матриць Λ обчислюють найближчі локальні екстремуми, після чого серед усіх знайдених локальних мінімумів обирають глобальний. Саме точка, що забезпечує найменше значення критерію у $S \times I$ вимірному просторі параметрів, і приймається як оптимальна оцінка вільних параметрів моделі сигналу. Застосування такої процедури дає змогу забезпечити збіжність до оптимального розв'язку за ймовірністю зі збільшенням кількості випробувань, тобто зі зростанням числа використаних псевдовипадкових матриць параметрів Λ [5].

Приладне та програмне забезпечення дослідження

Під час проведення дослідження як чутливі елементи системи реєстрації та обробки даних було використано трикомпонентний велосиметр, який складається з трьох взаємно перпендикулярних сенсорів із вузькою діаграмою спрямованості. Один із напрямів орієнтовано вертикально. Попередній аналіз результатів вимірювань показав, що в цьому напрямі рівень коливань є приблизно на порядок меншим, ніж у горизонтальній площині, тому в подальших розрахунках вертикальну складову не враховували. Спектральна характеристика горизонтально орієнтованих датчиків приладу має двомодальний вигляд із максимумами поблизу 0.7 Гц і 13 Гц.

Апаратна частина системи спостереження побудована як послідовне з'єднання кількох функціональних блоків: сенсорів, каналу передавання сигналу, аналого-цифрового перетворювача та комп'ютера.

Досліджуваний об'єкт є інженерною спорудою, пов'язаною з великою кількістю пристроїв, що працюють на промисловій частоті. Через це фонові завади на цій частоті та на пов'язаних із нею гармоніках істотно перевищують рівень сигналів, зареєстрованих на власних частотах конструкції. Саме тому отримані експериментальні дані потребували ґрунтовної попередньої обробки.

У нашому випадку процес вимірювання до моменту надходження даних у комп'ютер можна подати у вигляді системи, що описується суперпозицією згорток сигналу $S(t)$, $h_1(t)$ – передатної функції прибору (для кожного з приборів вона індивідуальна), $h_2(t)$ – передатної функції каналів зв'язку, $h_3(t)$ – передатної функції аналогово-цифрового перетворювача [6]. В цій системі $S(t)$ – сигнал, який поступає в систему, $\tilde{S}(t)$ – перетворений системою сигнал. В лінійному приближенні математична модель вимірювання представляється у вигляді:

$$\tilde{S}(t) = S(t) * h_1(t) * h_2(t) * h_3(t) + n(t) = S(t) * H(t) + n(t), \quad (6)$$

де $n(t)$ – випадкова сумарна погрішність від збурень, що виникають у кожному елементі системи, а $H(t)$ – передатна функція системи вимірювання в цілому. Символ $*$ – це оператор згортки. Статистичний аналіз перешкод дає змогу припустити, що $n(t)$ можна моделювати білим шумом. Математична обробка зводиться до побудови оператора $H^{-1}(t)$, зворотного до оператора системи $H(t)$ та корекції сигналів їхньою згорткою з оператором $H^{-1}(t)$.

$$H(t) * H^{-1}(t) = \delta(t). \quad (7)$$

В цьому випадку модель системи вимірювань приймає вигляд:

$$\tilde{S}(t) = [S(t) * H(t) * n(t)] * H^{-1}(t) = S(t) + n(t) * H^{-1}(t). \quad (8)$$

З останнього виразу видно, що дія коригувального оператора, хоча й забезпечує відновлення сигналу, водночас може погіршувати співвідношення сигнал-перешкода.

Моніторинг будівельної конструкції колонного типу

Запропонований підхід було застосовано під час моніторингу будівельної конструкції колонного типу. Метою дослідження було відстеження динаміки вектору вільних параметрів моделі об'єкта в обраному просторі ознак, які описують поточний стан досліджуваної конструкції. Якщо спостерігаються істотні зміни цих параметрів, це може свідчити про наявність структурних перетворень в об'єкті.

Під істотною зміною слід розуміти вихід вектору вільних параметрів за межі області стаціонарності, яка в просторі ознак старіння моделі об'єкта задається певною обмежувальною поверхнею, наприклад еліпсоїдом обертання фіксованого об'єму ε . Така область стаціонарності є

індивідуальною для кожної конкретної конструкції й визначається дослідником з урахуванням умов проведення спостережень та особливостей самого об'єкта.

Як параметричний простір ознак старіння досліджуваного об'єкта доцільно використовувати простір вільних параметрів раніше запропонованої моделі, у якій об'єкт подано у вигляді суперпозиції осциляторів.

На рисунку 1 наведено аналітичну кусково-лінійну апроксимацію вектору значень попередньо оброблених експериментальних даних для однієї з горизонтальних компонент, зареєстрованих на димовій трубі.

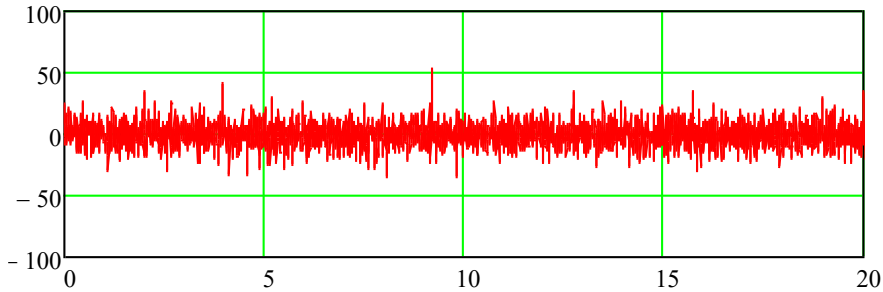


Рис. 1. Фрагмент тривалістю 20 с даних спостереження об'єкта клонового типу. На осі абсцис подано час у секундах, на осі ординат – амплітуди швидкості зареєстрованого сигналу у відносних одиницях

Подані на рисунку 1 дані попередньо пройшли обробку, зокрема було виконано фільтрацію зареєстрованих сигналів з урахуванням особливостей фоновому шуму [7].

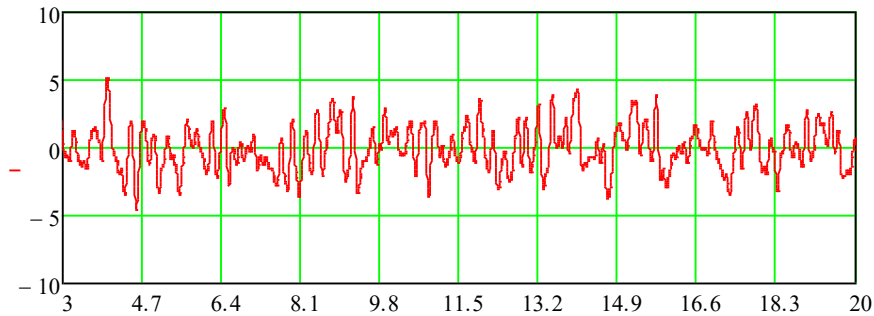


Рис. 2. Фрагмент тривалістю 20 с відфільтрованих даних спостереження об'єкта клонового типу. На осі абсцис подано час у секундах, на осі ординат – амплітуди швидкості зареєстрованого сигналу у відносних одиницях

На рисунку 3 наведено фрагмент Фур'є спектра на інтервалі $[0, 10 \text{ Hz}]$ з інтервалу $[0, 50 \text{ Hz}]$ аналітичної апроксимації вектору значень попередньо оброблених експериментальних даних. По осі абсцис подано частоту в герцах, а по осі ординат – модуль спектра у відносних одиницях.

Оцінки добротності власних частот, а також співвідношень між амплітудами власних частот, отримані на основі перетворення Фур'є, дають змогу визначити початкову точку в просторі ознак для подальшого пошуку

мінімуму критерію методом Левенберга–Марквардта [8] у межах серії випробувань Монте–Карло. Глобальний мінімум у цьому випадку відповідає оптимальному розв’язку задачі.

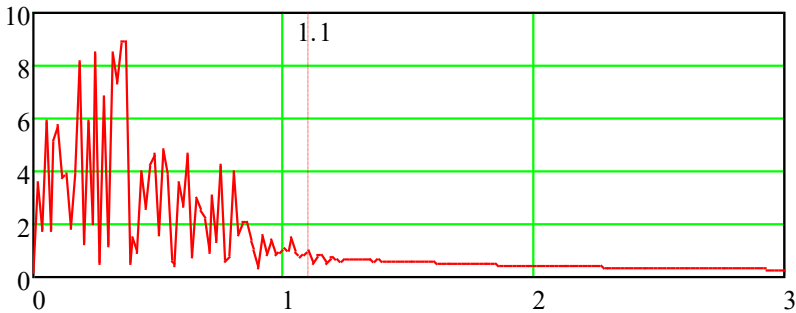


Рис. 3. Фур’є спектр даних, наведених на рис. 2. По осі абсцис відкладено частоту в герцах, по осі ординат – значення модуля спектра у відносних одиницях

У таблиці 1 наведено значення чотирьох основних мод спектра, поданого на рисунку 2. Параметри розміщено в порядку спадання амплітуд спектральних компонент. У першому стовпці подано частоти компонент у герцах, у другому – значення амплітуд відповідних спектральних складових у відносних одиницях, а в третьому – кратність частот.

Таблиця 1. Значення п’яти основних складових спектра, поданого на рис. 2

Частота в Гц	Амплітуда у відн. од.	Кратність частот
0.01667	224.95	1
0.11667	113.71	7
1.8	79.616	107.998
3.6	53.03	215.996

Дані наведено в порядку спадання амплітуд спектральних компонент. У лівому стовпці вказано частоти компонент у герцах, у правому – амплітуди відповідних спектральних компонент у відносних одиницях.

Із даних таблиці випливає, що спектральна структура сигналу формується основною гармонікою та низкою кратних їй складових, зокрема сьомою, сто восьмою та двісті шістнадцятю гармоніками.

Наведені в таблиці значення надалі використовуються в алгоритмі як початкові наближення в просторі ознак під час пошуку мінімуму критерію методом Левенберга–Марквардта в межах серії випробувань Монте–Карло.

У дослідженні було розглянуто дві моделі: першу – з дванадцятьма вільними параметрами, і другу – з шістнадцятьма. Інакше кажучи, йдеться про моделі, у яких сигнал описується суперпозицією відповідно трьох і чотирьох осциляторів. Як показник якості моделі обрано значення критерію в точці глобального мінімуму. Аналіз критерію оптимальності засвідчив, що друга модель узгоджується з експериментальними даними краще, ніж перша.

Для наочного пояснення особливостей процедури нелінійної оптимізації доцільно розглянути кілька фрагментів критерію (2) в околі глобального мінімуму. При цьому всі параметри моделі фіксуються на оптимальних значеннях, а змінюється лише одна вибрана пара параметрів у межах малої околиці глобального мінімуму. За таких умов критерій можна інтерпретувати як функцію двох змінних.

На рисунку 4 критерій подано як функцію параметрів $\lambda_{2,3}$ і $\lambda_{3,3}$ у моделі (6). Ці параметри відповідають частотам другої та третьої мод у спектрі модельного сигналу. На горизонтальній площині рисунка відображено топографію критерію, яку у вигляді карти подано на рисунку 5. Із наведених зображень видно, що навіть поблизу глобального мінімуму існує велика кількість локальних мінімумів, і саме це становить одну з головних труднощів нелінійної оптимізації. Водночас для параметрів, що входять до моделі лінійно, за обраного критерію локальні екстремуми не виникають, а існує лише один глобальний мінімум. Це ілюструють рисунки 6 і 7.

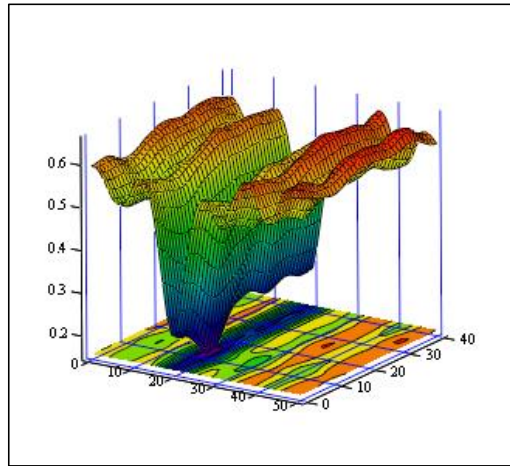


Рис. 4. Критерій як функція параметрів $\lambda_{2,3}$ і $\lambda_{3,3}$ у моделі (6)

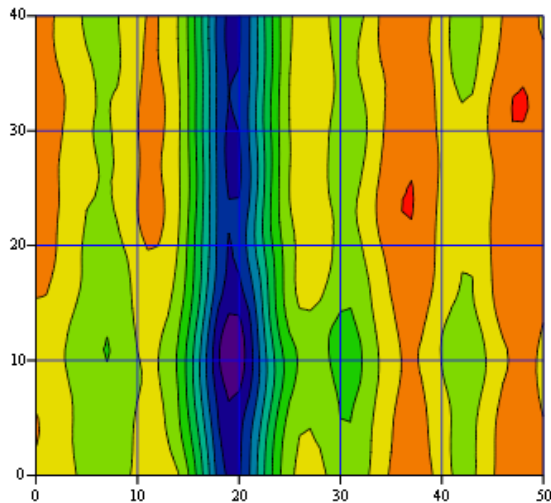


Рис. 5. Топографія критерію рисунка 3

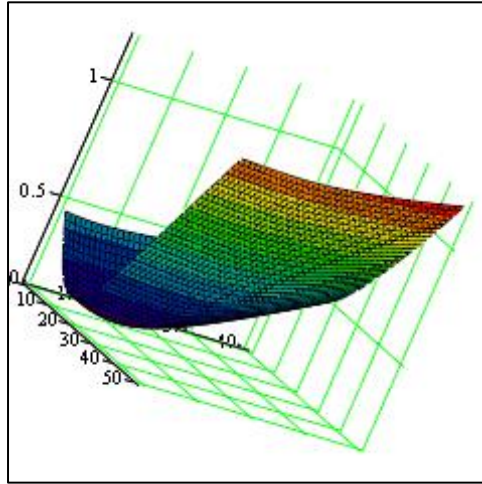


Рис. 6. Поведінка критерію в окрузі двох лінійно вхідних в модель параметрів $\lambda_{2,2}$ і $\lambda_{3,2}$

Рисунок 7 дозволяє побачити поведінку критерію в окрузі двох лінійно вхідних в модель параметрів $\lambda_{2,2}$ і $\lambda_{3,2}$. Ці параметри є амплітудами другої та третьої мод в спектрі моделі сигналу.

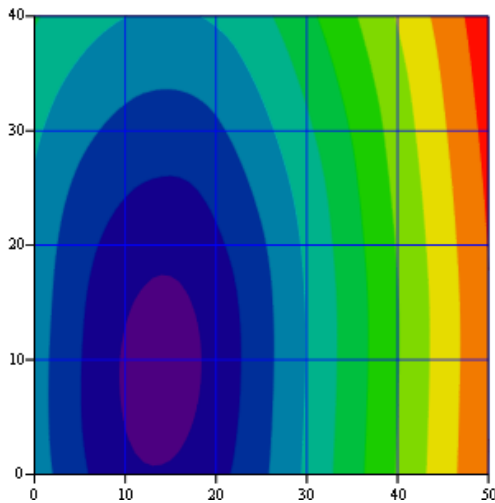


Рис. 7. Топографія критерію рисунка 5

Наведені вище розрахунки подано для того, щоб продемонструвати повну послідовність дій у комп'ютеризованій методиці оцінювання вільних параметрів моделей із використанням нелінійної оптимізації. При цьому вони виконані лише для однієї з компонент запису коливальних швидкостей. Для іншої компоненти обчислювальна процедура є аналогічною та здійснюється за тим самим технологічним алгоритмом.

Найбільшу фізичну значущість мають насамперед знайдені значення вільних параметрів моделі, які використовуються для ідентифікації стану досліджуваного об'єкта, тобто параметри, зафіксовані у співвідношенні (6).

Особливу увагу слід приділяти демпфувальним характеристикам, оскільки саме вони відображають добротність системи, тобто її здатність акумулювати енергію зовнішніх збурень і зберігати її протягом певного часу. Висока добротність, що відповідає малому декременту затухання на окремих частотах моделі, свідчить про підвищену чутливість конструкції до зовнішніх впливів саме в цих частотних діапазонах. Наприклад, зменшення декремента в динаміці може розглядатися як ознака того, що об'єкт наближається до стану, за якого навіть незначне зовнішнє навантаження здатне спричинити руйнування.

Для забезпечення надійності результатів кількість обчислювальних циклів має бути достатньо великою. Разом із тим зі зростанням розмірності моделі така вимога істотно ускладнює обчислювальний процес. Проте за наявності достатньо обґрунтованих апріорних уявлень про очікуваний результат кількість циклів можна скоротити без суттєвої втрати якості оцінювання [9].

Висновки

Порівняння результатів розрахунків для вимірювань, виконаних із часовим інтервалом у пів року, дає підстави стверджувати, що для об'єктів вибраного типу параметри, використані для ідентифікації їхнього стану, є достатньо стабільними й можуть бути надійною основою для довготривалого моніторингу. Для виявлення вираженого тренду зміни точки, що характеризує стан об'єкта в просторі параметрів, інтервал у шість місяців, очевидно, є недостатнім. Водночас такий часовий крок у режимних спостереженнях є практично доцільним, оскільки дає змогу своєчасно зафіксувати початок істотних структурних змін і не пропустити критичний момент. На теперішній час досліджуваний об'єкт перебуває у стійкому стаціонарному стані.

REFERENCES

1. Pitman, E. (1979). *Some basic theory for statistical inference*. Chapman and Hall.
2. Mostovyi, S. V., Mostovyi, V. S., & Panchenko, M. V. (2008). Seismic signal and microseismic background (mathematical models and estimates). *Geoinformatics*, (1), 28–38.
3. Mostovyi, V. S. (2013). *Modeli system monitorynhu heofizychnykh polei*. (Author's dissertation for the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences) [in Ukrainian].
4. Plessix, R.-E. (2006). A review of the adjoint-state method for computing the gradient of a functional with geophysical applications. *Geophysical Journal International*, 167, 495.
5. Mostovyi, V. S. (2008). Optimal detection of signals against the background of microseismic noise. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, (1), 106–110.
6. Mostovyi, V. S. (1996). *Models of detection and identification of signals in geophysical field monitoring systems* (Author's dissertation for the degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences).
7. Mostovyi, S. V., & Mostovyi, V. S. (2011). Problems of filtering in geophysical information processing. *Geoinformatics*, (2), 48–52.
8. Pujol, J. (2007). The solution of nonlinear inverse problems and the Levenberg-Marquardt method. *Geophysics*, 72(4), W1–W16.
9. Cherevko, I., Kril, T., Mostovyy, V., & Shcherbyna, S. (2025). Structural health monitoring of heritage buildings under military actions. *International Journal of Conservation Science*, 16(4), 1755–1774. <https://doi.org/10.36868/IJCS.2025.04.09>

Стаття надійшла до редакції 06.01.26, надійшла після рецензування 20.02.26, прийнята 06.03.26

The article was received 06.01.26, received after revision 20.02.26, accepted 06.03.26

Мостовий Василь Сергійович

доктор фіз.-мат наук, старший науковий співробітник, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ

Адреса робоча: бульв. Чоколівський, 13, Київ, Україна, 03186

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1759-1893> **e-mail:** vasyll.mostovyy@gmail.com

Коробенко Антон Петрович

аспірант, Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Адреса робоча: Україна, 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 64/13

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-7099-6535> **e-mail:**

anton.korobenko.off@gmail.com