КІБЕРБЕЗПЕКА: освіта, наука, техніка
CYBERSECURITY: EDUCATION, SCIENCE, TECHNIQUE
№ 4 (24), 2024
ISSN 2663 - 4023
DOI 10.28925/2663-4023.2024.24.351362
УДК 621.396.967

Шевченко Анатолій
аспірант
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
ORCID ID: 0000-0003-2723-0378,
shevchenko@gmail.com

МЕТОДИКА СЕЙСМОАКУСТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ВПЛИВУ ВИБУХОВОЇ ХВИЛІ НА ОБ'ЄКТИ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Анотація. Сейсмоакустичний моніторинг об'єктів критичної інфраструктури являє собою множину режимних спостережень, причому режим самих спостережень і спектральних параметрів об'єкта, що досліджується, залежать від цілей, переслідуваних даним експериментом. Таких цілей може бути багато, але в роботі розглянуто основну мету для оцінки стану об'єктів критичної інфраструктури. Це динаміка, що відбуваються в об'єкті дослідження змін спектральних характеристик об'єкта та детальність оцінок параметрів, що характеризують об'єкт. Сейсмоакустичний моніторинг об'єктів критичної інфраструктури реалізується в ситсемах сейсмоакустичного моніторингу з метою прогноху динаміки стану об'єкту дослідження. В цій статті запропоновано нову ефективну модель аналізу впливу вибухових хвиль на стан об'єктів критичної інфраструктури, власні частоти яких лежать у сейсмічному та нижній частині акустичного діапазонів частот, заснований на моніторингу їх динаміки. Запропоновано новий метод для ідентифікації стану таких об'єктів. Запропоновано не традиційну модель природного фону об'єкта моніторингу у вигляді суперпозиції імпульсів Берлаге. Така модель дає можливість оцінити такий важливий в описі об'єкта параметр, як його добротність, динаміка якого може дати уявлення про його структурні зміни. Запропонована модель може використовуватись в автоматизованих системах моніторингу.

Ключові слова: об'єкт критичної інфраструктури; сейсмоакустичний моніторинг; математична модель; сигнал; суперпозиція; вибухова хвиля.

ВСТУП

Сейсмоакустичний моніторинг відрізняється тим, що має свій, специфічний, який охоплює сейсмічний (інфразвуковий та нижню частину звукового діапазону) та акустичний діапазон частот. Для кожного з об'єктів моніторингу його характеристики змінюються повільно в часі, і в той же час іноді процеси проходять дуже швидко (інколи катастрофічно). Він має справу з великими розмірами об'єктів, спектральні характеристики яких лежать у вказаному діапазоні частот.

Сейсмоакустичний моніторинг ОКІ являє собою множину режимних спостережень, причому режим самих спостережень і спектральних параметрів об'єкта, що досліджується, залежать від цілей, переслідуваних даним експериментом [1]. Таких цілей може бути багато, але в роботі розглянуто основну мету для оцінки стану об'єктів критичної інфраструктури. Це динаміка, що відбуваються в об'єкті дослідження змін спектральних характеристик об'єкта та детальність оцінок параметрів, що характеризують об'єкт. Сейсмоакустичний моніторинг ОКІ реалізується в ситсемах сейсмоакустичного моніторингу [2] з метою прогноху динаміки стану об'єкту дослідження.

Постановка проблеми. Таким чином виникає необхідність у спеціальній організації дослідження ОКІ та застосуванні спеціальних, іноді дуже складних процедур обробки даних впостережень. Слова «режимні спостереження», що використовуються

© А. Шевченко, 2024

вище, припускають жорстку стабільність у виконанні режиму. Це означає стабільність часових характеристик моніторингу та стабільність спектральних параметрів об'єкта, що досліджується, останнє означає незмінність його спектральних характеристик.

Перш за все, необхідно побудувати математичну модель дослідження, в якій відображалися б найбільш суттєві моменти процесу моніторингу, включаючи як сам процес, так і супутні цьому процесу завади й природний фоновий шум, що накладається на дослідження. Апріорне знання випадкового процесу фонового шуму дозволить значною мірою послабити його вплив на отримання оцінок параметрів процесу, що сприймається як корисний сигнал. Це ослаблення досягається оптимізацією процедур обробки, що враховують апріорні статистики випадкового процесу перешкод.

Моніторинг стану об'єкта це процес режимного спостереження за параметрами, що характеризують стан об'єктів, таких, що істотна їх зміна є показником відходу, що розвивається, від стаціонарної поведінки об'єкта [3], [4].

Таке визначення з множини існуючих найближче до визначення моніторингу деформацій.

Під моніторингом ОКІ розумітимемо режимні спостереження за мікросейсмічними полями та їх аналіз для вивчення динаміки досліджуваного ОКІ та його фрагментів з метою прогнозу їх розвитку.

Процес спостереження зводиться до оцінки подій, пов'язаних з об'єктом моніторингу, безпосередньо в момент, коли вони відбуваються або одразу після. Це вимагає перегляду результатів вимірювань параметрів, що характеризують об'єкт, виявлення цих параметрів і передбачає реакцію на ці зміни.

Під автоматизованою системою моніторингу ОКІ розумітимемо наступне: автоматизована система моніторингу ОКІ це групи, які впливають один на одного, взаємодіючих або взаємозалежних елементів програмного забезпечення та обладнання, що формують складне ціле для контролю стану параметрів об'єкта дослідження, яка після встановлення не потребує людського втручання [2]. Оскільки у роботі будуються суттєво різні математичні моделі для моніторингу ОКИ, то визначимо ці відмінності фізично.

Наукове обґрунтування методології сейсмоакустичного моніторингу впливу вибухової хвилі на об'єкти критичної інфраструктури

У цій роботі представлено нову методологію моніторингу ОКІ, в рамках якої розроблено математичні моделі, методи та методики моніторингу ОКІ. Суть даної методології полягає у відображенні структурних складових (структурні складові це елементи конструкцій ОКІ, які мають свої специфічні фізичні параметри, відмінні від характеристик всього об'єкта, зміна стану яких може призвести до руйнування всього об'єкта) ОКІ у вектор інформативних параметрів математичної моделі, яка описує дані об'єкти, з метою оцінки їхньої динаміки, що характеризує структурні зміни, як самого ОКІ, так і його структурних складових [5].

В основу запропонованої методології моніторингу ОКІ лягли такі фізичні принципи. Оскільки швидкості поширення і форма поздовжніх і поперечних хвиль у матеріалі залежать від пружних параметрів цих матеріалів, то зміна цих параметрів призводить до змін та спектральних характеристик емісійних сигналів, які виникають у старіючому матеріалі [6]. Під емісією мається на увазі всяке перерозподіл енергії у матеріалі, що супроводжується виникненням сигналів, що емітуються. Емісія сигналів — це хвилі напруги, породжені раптовим внутрішнім перерозподілом напруги у матеріалі, викликаним змінами у внутрішній структурі, тобто втомою матеріалу. Емісія викликана перерозподілом енергії у матеріалі. Будь-який перерозподіл енергії у матеріалі

супроводжується виникненням сигналів, що емітуються. Суперпозиція сигналів, що емітуються, генерує емісійне поле.

Зміна стану будівельних конструкцій в процесі їх експлуатації може привести до небажаних, а іноді навіть катастрофічних наслідків. Причиною руйнувань інженерних споруд та їх складових, найчастіше є структурні зміни композиційних матеріалів, під впливом, яких в процесі, як експлуатаційних навантажень, так і природного старіння, виникає руйнування. Для дослідження динаміки параметрів, що характеризують параметри міцності об'єкту, що досліджується пропонується нова методологія сейсмоакустичного моніторингу ОКІ з метою оцінки динаміки його стану у рамках якої об'єкт, що досліджується, відображається в n-вимірний вектор Евклідового простору інформативних параметрів за допомогою фізично доцільної параметричної моделі. Для проведення натурних робіт при застосуванні сейсмоакустичного моніторингу ОКІ, в рамках методології сейсмоакустичного моніторингу ОКІ з метою оцінки динаміки його стану застосовувалася математична модель, з метою оцінки динаміки параметрів об'єкта, що характеризують його міцність.

В основі методології сейсмоакустичного моніторингу ОКІ з метою оцінки динаміки його стану такі фізичні принципи. Оскільки швидкості поширення і форма поздовжніх і поперечних хвиль у матеріалі залежать від пружних параметрів цих матеріалів, то зміна цих параметрів призводить до змін та спектральних характеристик емісійних сигналів, які виникають у старіючому матеріалі. Під емісією мається на увазі перерозподіл енергії у матеріалі, що супроводжується виникненням сигналів, що емітуються. Емісія сигналів — це хвилі напруги, породжені раптовим внутрішнім перерозподілом напруги у матеріалі, викликаним змінами у внутрішній структурі, тобто втомою матеріалу. Емісія викликана перерозподілом енергії у матеріалі. Будь-який перерозподіл енергії у матеріалі супроводжується виникненням сигналів, що емітуються. Суперпозиція таких сигналів генерує емісійне поле.

З погляду матеріалознавства, втома — це розвиваються та локальні структурні ушкодження, що виникають при циклічних навантаженнях на матеріал. Циклічна напруга повинна призводити до втоми матеріалу. Втома призводить до незворотних деформацій матеріалу, тобто до його старіння. Процес старіння у запропонованих моделях — це зміни параметрів матеріалу, які знаходять відображення у просторі ознак. Параметризація аналізованого процесу відбувається за допомогою його апроксимації параметричної моделі з вільними параметрами. Таким чином, процес сейсмоакустичного моніторингу природних та будівельних конструкцій зводиться до режимних спостережень за вільними параметрами обраної моделі.

Представлені вище фізичні принципи сейсмоакустичного моніторингу у реальному втіленні вимагає від дослідника розв'язання складних математичних завдань. Від реєстрації реалізації емісійного поля до оцінки вільних параметрів моделі використовується складний математичний апарат, що базується на таких математичних дисциплінах, як теорія випадкових процесів, функціональний аналіз, теорія функції комплексної змінної, лінійна алгебра, методи оптимізації та теорія прийняття рішення [5], що представлено в роботі по дослідженню динаміки стану.

Оскільки швидкість розповсюдження повздовжніх та поперечних хвиль є функціями характеристик міцності середовища, а саме модуля Юнга і модуля зсуву відповідно [6], то фізично доцільно використовувати в якості інформативних параметрів математичної моделі об'єкту, що досліджується, його спектральні характеристики. Таким чином динаміка розповсюдження хвиль характеризую динаміку характеристик

міцності, і відхід від стаціонарності спектральних характеристик викликан зміною стану самого об'єкта дослідження.

Математична модель сейсмоакустичного моніторингу впливу вибухової хвилі на ОКІ

Розглянемо модель динаміки впливу ударної хвилі, на стан об'єкту, що досліджується, як суперпозицію ударної хвилі, та стаціонарного мікросейсмічного фону, який буде генерувати об'єкт дослідження після впливу ударної хвилі.

$$M(t,\mathbf{P},\boldsymbol{\gamma},\boldsymbol{\sigma}) = M(t,\mathbf{P}) + M(t,\boldsymbol{\gamma}) + M(t,\boldsymbol{\sigma}), \quad (1)$$

де $\mathbf{P}$ — матриця вільних параметрів стаціонарного мікросейсмічного фону, який генерував об'єкт дослідження до впливу ударної хвилі,

$\boldsymbol{\gamma}$ — матриця вільних параметрів ударної хвилі,

$\boldsymbol{\sigma}$ — матриця вільних параметрів стаціонарного мікросейсмічного фону. Матриці $\mathbf{P}$, $\boldsymbol{\gamma}$ та $\boldsymbol{\sigma}$ мають форму:

$$M(t,\mathbf{P}) = \sum_{k=1}^{K} A_k \eta(t-\tau_k)(t-\tau_k)^{\beta_k} \exp\{-\alpha_k(t-\tau_k)\}\sin\left[\omega_k(t-\tau_k)\right] + n(t) \quad (2)$$

Тут введена матриця вільних параметрів моделі $\mathbf{P}$. Вектор-рядок $\mathbf{P}_{\langle k\rangle}$ цієї матриці повністю визначає k-ю підмодель, а вектор-стовпець $\mathbf{P}^{\langle s\rangle}$ якої визначає споріднені параметри підмоделей, $n(t)$ — адитивна перешкода. У цій моделі таких споріднених параметрах п'ять, асаме:

$$\mathbf{P}_{\langle k\rangle} = \{A_k, \tau_k, \alpha_k, \omega_k, \beta_k\}$$

де A_k — амплітуда k-ї підмоделі, τ_k — час вступу k-ї підмоделі, α_k — коефіцієнт затухання k-ї підмоделі, ω_k — частота k-ї підмоделі, β_k — коефіцієнт коректировки вступу k-ї підмоделі.

В цій роботі ми будемо розглядати модель, в якій матриці $\mathbf{P}$, $\boldsymbol{\gamma}$ та $\boldsymbol{\sigma}$ мають однаковий розмір.

Для вирішення задачі оцінки стану об'єкта до та після впливу ударної хвилі сама форма ударної хвилі $M(t,\boldsymbol{\gamma})$, важливої інформації не несе, тому в даній задачі моделлю $M(t,\boldsymbol{\gamma})$ можна знехтувати. Таким чином модель (1) можна представити у вигляді:

$$M(t,\mathbf{P},\boldsymbol{\sigma}) = M(t,\mathbf{P}) + M(t,\boldsymbol{\sigma}) \quad (3)$$

Для моделі стаціонарного мікросейсмічного фону, який генерував об'єкт дослідження до впливу ударної хвилі:

$$M(\mathbf{P},t);\ t \in (t_{s1_0}, t_{s1_0} + T_p); \quad (4)$$

Для моделі ударної хвилі:

$$M(t,\boldsymbol{\gamma}) + n(t),,\ t \in (t_{s1_1}, t_{s1_1} + T_\gamma) \quad (4а)$$

Для моделі стаціонарного мікросейсмічного фону, який генерував об'єкт дослідження після впливу ударної хвилі:

$$M(\boldsymbol{\sigma},t);\ t \in (t_{s1_1}, t_{s1_1} + T_\sigma). \quad (4б)$$

Тут $(t_{s1_0}, t_{s1_0} + T_p)$ — інтервал передісторії стаціонарного мікросейсмічного фону, який генерував об'єкт дослідження до впливу ударної хвилі, $(t_{s1_1}, t_{s1_1} + T_\gamma)$ - інтервал дії

ударної хвилі, а $(t_{s1_1}, t_{s1_1}+T_\sigma)$ — інтервал на якому розглядається стаціонарний мікросейсмічний фон, який генерував об'єкт дослідження до впливу ударної хвилі.

Польові спостереження позначимо як $V(t)$, тоді:

$$V(t)=M(t,\mathbf{P},\boldsymbol{\sigma})+n(t) \tag{5}$$

$$V(t)=\begin{array}{l} M(\mathbf{P},t)+n(t),\ t\in(t_{s1_0},t_{s1_1}); \\ M(t,\boldsymbol{\gamma})+n(t),\ t\in(t_{s1_1},t_{s1_1}+T_\gamma) \\ M(t,\boldsymbol{\sigma})+n(t),\ t\in(t_{s1_1}+T_\gamma,t_{s1_1}+T_\sigma) \end{array} \tag{5a}$$

$n(t)$ — це природний мікросейсмічний фон.

Проаналізуємо отримані вирази на інтервалах:

1. При $t\in(t_{s1_0},t_{s1_1})$ оцінюємо за передісторією до моменту t_{s1_1} параметри стаціонарного мікросейсмічного фону, який генерував об'єкт дослідження до впливу ударної хвилі, тобто знаходимо значення елементів матриці $\mathbf{P}$ (оптимальна оцінка $\hat{\mathbf{P}}$ за передісторією (t_{s1_0},t_{s1_1})).
2. При $t\in(t_{s1_1},t_{s1_1}+T_\gamma)$ оцінюємо параметри «чистої» ударної хвилі, тобто знаходимо значення елементів матриці $\boldsymbol{\gamma}$ (оптимальна оцінка $\hat{\boldsymbol{\gamma}}$ на інтервалі $t\in(t_{s1_1},t_{s1_1}+T_\gamma)$)
3. На інтервалі $(t_{s1_1}+T_\gamma,t_{s1_1}+T_\sigma)$ оцінюємо параметри стаціонарного мікросейсмічного фону, який генерував об'єкт дослідження після впливу ударної хвилі, тобто знаходимо значення елементів матриці $\boldsymbol{\sigma}$ (оптимальна оцінка $\hat{\boldsymbol{\sigma}}$ за передісторією (t_{s1_0},t_{s1_1})).
4. Оцінюємо динаміку вільних параметрів моделі (2) до і після дії ударної хвилі, в рамках вибраного критерію, наприклад: $\left\|M(\hat{\mathbf{P}},t)-M(\hat{\boldsymbol{\sigma}},t)\right\|$ у вибраній метриці, наприклад $L_2(0,T)$ тобто $\left\|M(\hat{\mathbf{P}},t)-M(\hat{\boldsymbol{\sigma}},t)\right\|_{L_2(0,T)}$. Тут T — довжина інтервалу, на якому проводять порівняльну оцінку параметрів моделі до і після впливу ударної хвилі.
5. Якщо $\left\|M(\mathbf{P},t)-M(\hat{\boldsymbol{\sigma}},t)\right\|_{L_2(0,T)}<\varepsilon$, то вважаємо, що об'єкт знаходиться в стаціонарному стані. В іншому випадку приймається рішення, що об'єкт знаходиться в критичному стані. Тут величина порога ε вибирається суб'єктивно, індивідуально в кожній задачі, враховуючи як специфіку об'єкта, так і відношення дослідників до помилок двох родів при прийнятті рішення, а саме «пропуск цілі» та «хибна тривога».

Слід зауважити, що вектор вільних параметрів вступу сигналу $\boldsymbol{\tau}$ параметр суттєвий лише для моделі ударної хвилі, $M(t,\boldsymbol{\gamma})$. Для моделей $M(\mathbf{P},t)$ стаціонарного мікросейсмічного фону, який генерував об'єкт дослідження до впливу ударної хвилі, та $M(t,\boldsymbol{\sigma})$ стаціонарного мікросейсмічного фону, який генерував об'єкт дослідження після впливу ударної хвилі, цей параметр не є інформативним, таким чином для цих моделей задачу можна не вирішувати відносно вектору вільних параметрів $\boldsymbol{\tau}$, розглядати його як

початок запису в моделях. Тобто розглянути вектор, як початок інтервалу спостереження відповідно кожної моделі, для всіх гармонік, які входять обидві моделі $M(\mathbf{P},t)$, $t \in (t_{s1_0}, t_{s1_0} + T_p)$ та $M(t,\boldsymbol{\sigma})$.

Практична реалізація математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу впливу вибухової хвилі на ОКІ

Пропонується реалізація моделі , яка оцінює динаміку характеристик, об'єкту, що досліджується, отриманих при обробці сейсмічних даних (акселерограми), які знаходяться в області сейсмоакустичного діапазону частот. На рис. 1 представлений фрагмент запису акселерограми до реакції будівельної конструкції на вибух.

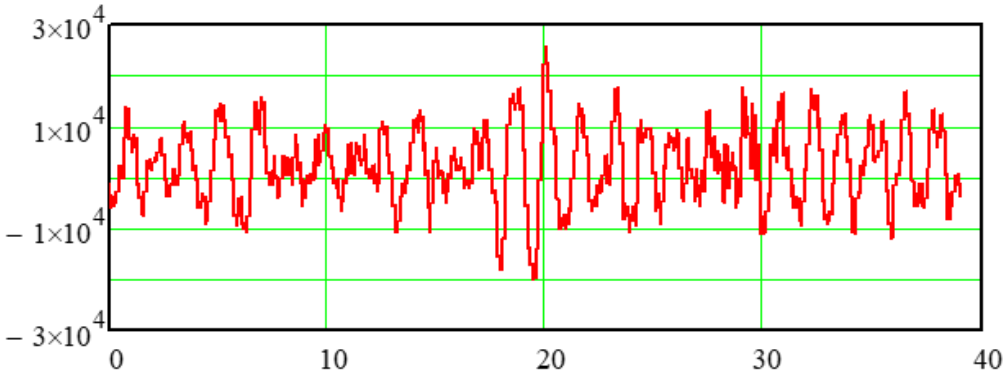

Рис. 1. Фрагмент запису акселерограми тривалістю 40 сек. до реакції будівельної конструкції на вибух на тлі шуму фону. По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда швидкості коливань у відносних одиницях

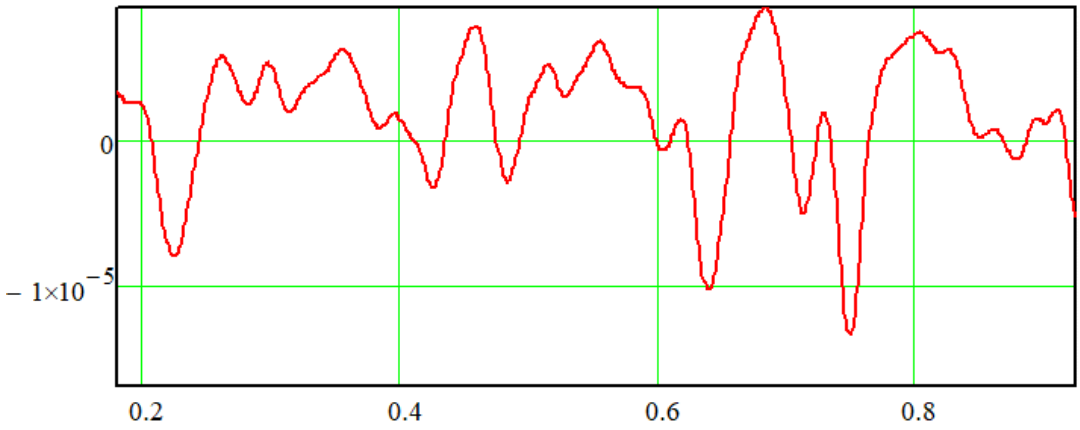

Рис. 2. Фільтрований фрагмент запису акселерограми тривалістю 0.9 сек. до реакції будівельної конструкції на вибух. По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда швидкості коливань у відносних одиницях

ISSN 2663 - 4023

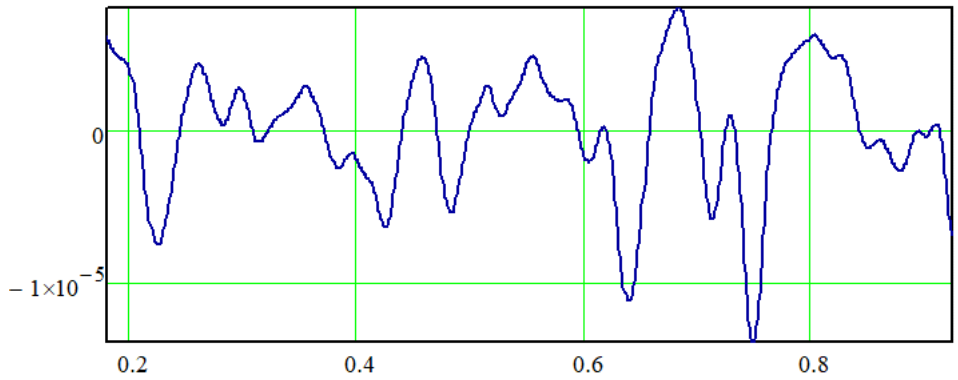

Рис. 3. Модель $M(t,\mathbf{P})$ *(9) фрагмент запису акселерограми тривалістю 0.9 сек. наданог на Рис. 2. По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда швидкості коливань у відносних одиницях*

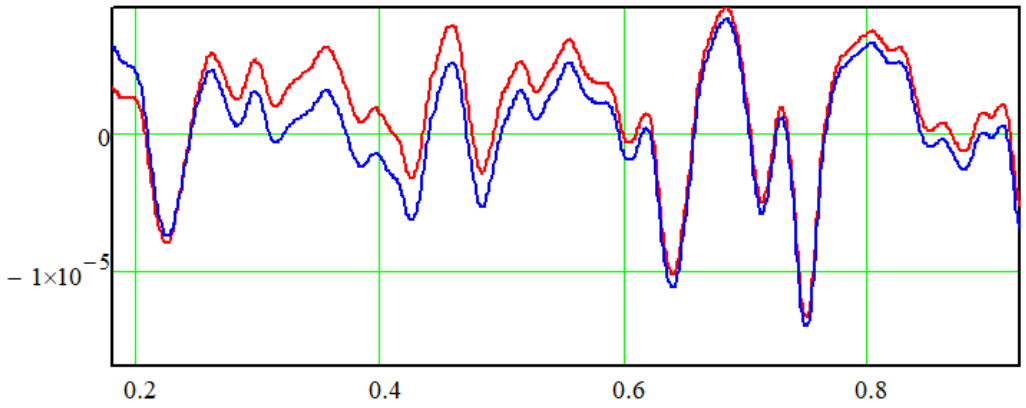

Рис. 4. Модель $M(t,\mathbf{P})$ *фрагмент запису акселерограми тривалістю 0.9 сек. наданог на Рис. 2 (синя крива), та фільтрований фрагмент запису акселерограми тривалістю 0.9 сек. до реакції будівельної конструкції на вибух (червона крива) По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда швидкості коливань у відносних одиницях.*

Таблиця 1

Інформативні параметри моделі акселерограми до реакції будівельної конструкції на вибух, яка складається з п'яти підмоделей осцилятора, а саме частот та добротності

Частота гармоніки в Гц.	Добротність гармоніки.
0.7325	9.8724
3.1832	14.4175
5.6373	10.3523
2.4729	8.2542
4.2837	7.5315

ISSN 2663 - 4023

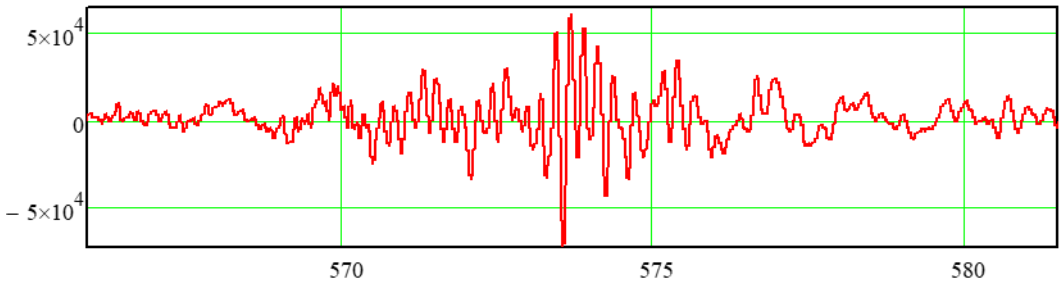

Рис. 5. Фрагмент запису акселерограми тривалістю 16 сек. реакції будівельної конструкції на вибух на тлі шуму фону. По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда швидкості коливань у відносних одиницях

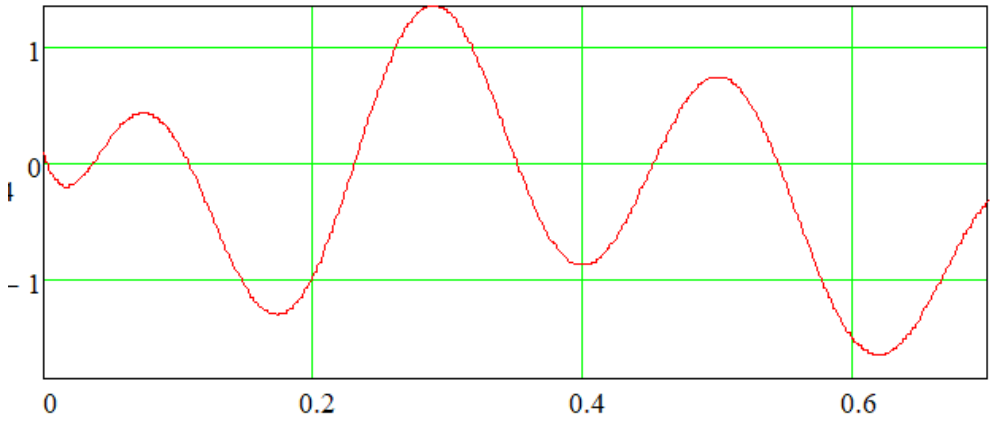

Рис. 6. Фільтрований фрагмент запису акселерограми тривалістю 0.7 сек. реакції будівельної конструкції на вибух. По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда швидкості коливань у відносних одиницях

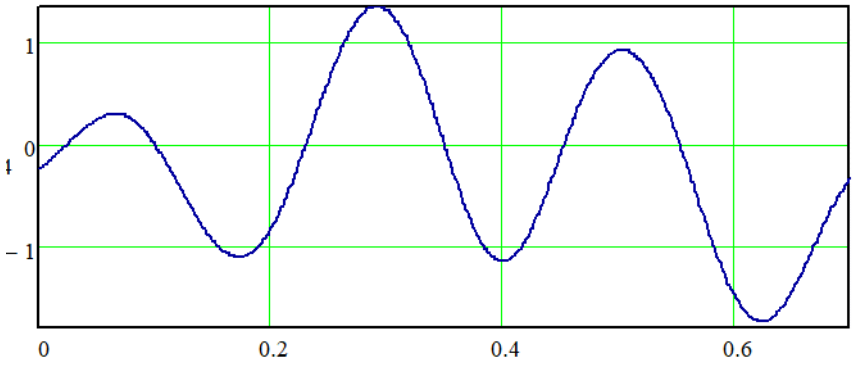

Рис. 7. Модель $M(t,\gamma)$ *(9) фрагмент запису акселерограми тривалістю 0.7 сек. наданог на Рис. 6. По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда швидкості коливань у відносних одиницях*

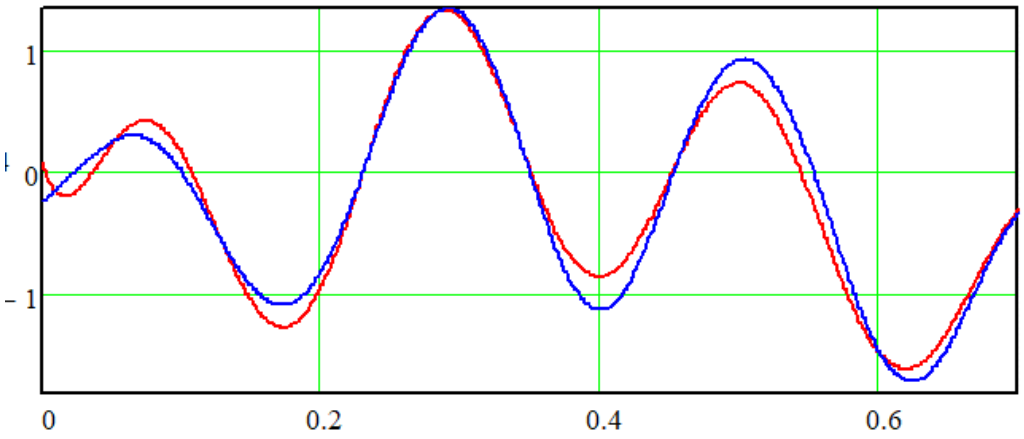

Рис. 8. Модель $M(t,\gamma)$ *фрагмент запису акселерограми тривалістю 0.7 сек. наданого на Рис. 6 (синя крива), та фільтрований фрагмент запису акселерограми тривалістю 0.7 сек. реакції будівельної конструкції на вибух (червона крива) По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда швидкості коливань у відносних одиницях*

Таблиця 2

Інформативні параметри моделі акселерограми реакції будівельної конструкції на вибух, яка складається з п'яти підмоделей осцилятора, а саме частот та добротності

Частота гармоніки в Гц.	Добротність гармоніки.
0.8257	7.2573
2.2519	12.3724
4.5358	11.4737
2.1595	7.1524
3.8517	8.1242

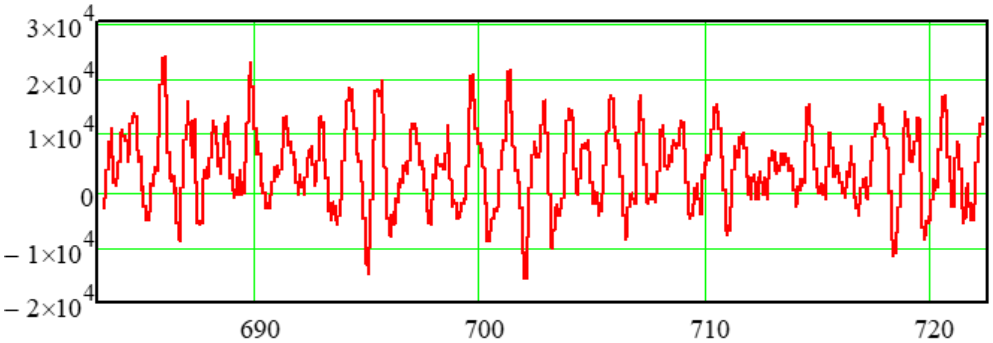

Рис. 9. Фрагмент запису акселерограми тривалістю 40 сек. після реакції будівельної конструкції на вибух на тлі шуму фону. По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда швидкості коливань у відносних одиницях

ISSN 2663 - 4023

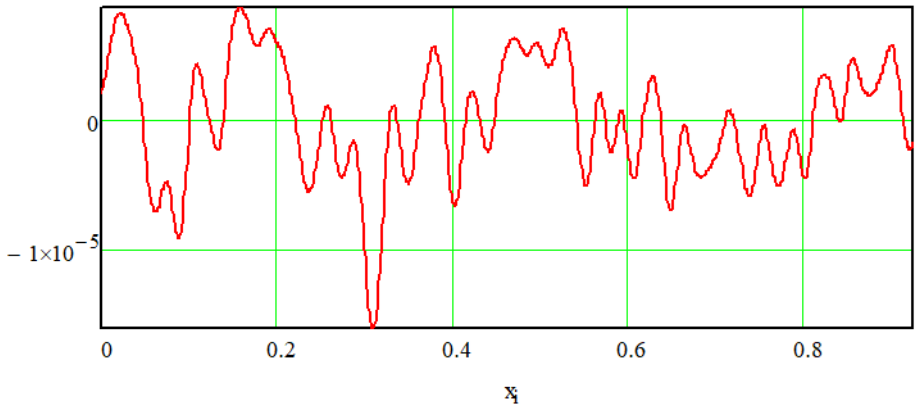

Рис. 10. Фільтрований фрагмент запису акселерограми тривалістю 0.9 сек. сля реакції будівельної конструкції на вибух. По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда швидкості коливань у відносних одиницях

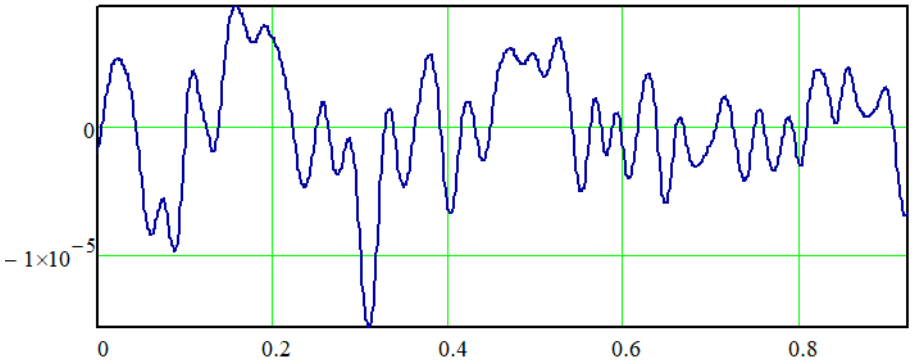

Рис. 11. Модель $M(t,\sigma)$ *(9) фрагменту запису акселерограми тривалістю 0.9 сек. після реакції будівельної конструкції на вибух По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда швидкості коливань у відносних одиницях*

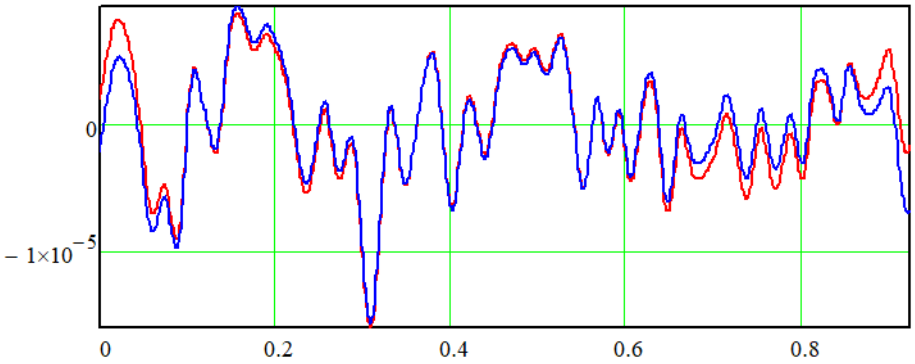

Рис. 12. Модель фрагмент запису акселерограми тривалістю 0.9 сек. після реакції будівельної конструкції на вибух (синя крива), та фільтрований фрагмент запису акселерограми тривалістю 0.9 сек. після реакції будівельної конструкції на вибух (червона крива) По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда швидкості коливань у відносних одиницях

Таблиця 3

Інформативні параметри моделі акселерограми після реакції будівельної конструкції на вибух, яка складається з п'яти підмоделей осцилятора, а саме частот та добротності

Частота гармоніки в Гц.	Добротність гармоніки.
0.7357	9.8775
3.1820	14.4118
5.6331	10.35
2.4738	8.2551
4.2826	7.5339

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Запропоновано нову ефективну модель аналізу впливу вибухових хвиль на стан ОКІ, власні частоти яких лежать у сейсмічному та нижній частині акустичного діапазонів частот, заснований на моніторингу їх динаміки. Запропоновано новий метод для ідентифікації стану таких об'єктів. Запропоновано не традиційну модель природного фону об'єкта моніторингу у вигляді суперпозиції імпульсів Берлаге. Така модель дає можливість оцінити такий важливий в описі об'єкта параметр, як його добротність, динаміка якого може дати уявлення про його структурні зміни. Запропонована модель може використовуватись в автоматизованих системах моніторингу [7].

Для вирішення задачі оцінки стану об'єкта до та після впливу ударної хвилі сама форма ударної хвилі $M(t,\boldsymbol{\gamma})$, важливої інформації не несе, тому в даній задачі моделлю $M(t,\boldsymbol{\gamma})$ можна знехтувати. Таким чином модель можна представити у вигляді: $M(t,\mathbf{P},\boldsymbol{\sigma})=M(t,\mathbf{P})+M(t,\boldsymbol{\sigma})$. Форма хвилі $M(t,\boldsymbol{\gamma})$ має сенс , як елемент статистики. Динаміка параметрів моделі $M(t,\boldsymbol{\gamma})$ реакції конструкції на вибух, на мрожині досліджень дає інформацію про стан обкату. Інформативні параметри ло реакції будівельної конструкції при проведенні натурних робіт з застосуванням сейсмоакустичного моніторингу ОКІ, в рамках методології сейсмоакустичного моніторингу ОКІ з метою оцінки динаміки його стану на вибух, та після реакції будівельної конструкції на вибух не змінились. Таким чином можна зробити висновок, що удавлений вибух не вплинув на міцності характеристики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Dunnicliff, J. (1993). *Geotechnical Instrumentation For Monitoring Field Performance*. Wiley.
2. Robinson, M. (2011). *Dangerous dams*. Rhode Island Canoe/Kayak Association (Rhode Island).
3. *Seismological Grand Challenges in Understanding Earth's Dynamic Systems [long -range science plan for seismology workshop]*. (2009). Report to the Natinal Science Foundation, IRIS consortium.
4. Allaby, A. (2003). *Oxford Dictionary of Earth Sciences, Second Edition, Reissued with corrections and new covers*. Oxford University.
5. Mostovoy, V. S. (2013). *Models of geophysical field monitoring systems.* Thesis for the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences.
6. Timoshenko, S. (1934, 1951). *Theory of Elasticity McGraw-Hill Book Company, 1st Ed., 2nd Ed*.
7. Zelinsky, V. A., et al. (2022). Determination of vibration Object Coordinate on Surface of Earth. Control Systems and Computers, 2(298), 32–46.

КІБЕРБЕЗПЕКА: освіта, наука, техніка
CYBERSECURITY: EDUCATION, SCIENCE, TECHNIQUE
№ 4 (24), 2024
ISSN 2663 - 4023

Anatolii Shevchenko
graduate student
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-2723-0378,
shevchenko@gmail.com

THE METHOD OF SEISMOACOUSTIC MONITORING OF THE INFLUENCE OF THE EXPLOSIVE WAVE ON CRITICAL INFRASTRUCTURE OBJECTS

Abstract. Seismoacoustic monitoring of critical infrastructure objects is a set of mode observations, and the mode of the observations themselves and the spectral parameters of the object under investigation depend on the goals pursued by this experiment. There can be many such goals, but the main goal for assessing the state of critical infrastructure objects is considered in the work. These are the dynamics of changes in the spectral characteristics of the object taking place in the research object and the detailed evaluation of the parameters characterizing the object. Seismoacoustic monitoring of critical infrastructure objects is implemented in seismoacoustic monitoring systems with the aim of predicting the dynamics of the state of the research object. This article proposes a new effective model for analyzing the impact of blast waves on the condition of critical infrastructure objects, the natural frequencies of which lie in the seismic and lower part of the acoustic frequency ranges, based on monitoring their dynamics. A new method for identifying the state of such objects is proposed. A non-traditional model of the natural background of the monitoring object in the form of a superposition of Berlage pulses is proposed. Such a model makes it possible to estimate such an important parameter in the description of the object as its quality factor, the dynamics of which can give an idea of its structural changes. The proposed model can be used in automated monitoring systems.

Keywords: critical infrastructure object; seismoacoustic monitoring; mathematical model; signal; superposition; blast wave.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Dunnicliff, J. (1993). *Geotechnical Instrumentation For Monitoring Field Performance*. Wiley.
2. Robinson, M. (2011). *Dangerous dams*. Rhode Island Canoe/Kayak Association (Rhode Island).
3. *Seismological Grand Challenges in Understanding Earth's Dynamic Systems [long -range science plan for seismology workshop]*. (2009). Report to the Natinal Science Foundation, IRIS consortium.
4. Allaby, A. (2003). *Oxford Dictionary of Earth Sciences, Second Edition, Reissued with corrections and new covers*. Oxford University.
5. Mostovoy, V. S. (2013). *Models of geophysical field monitoring systems.* Thesis for the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences.
6. Timoshenko, S. (1934, 1951). *Theory of Elasticity McGraw-Hill Book Company, 1st Ed., 2nd Ed*.
7. Zelinsky, V. A., et al. (2022). Determination of vibration Object Coordinate on Surface of Earth. Control Systems and Computers, 2(298), 32–46.

(cc) BY-NC-SA

This work is licensed under Creative Commons Attribution-noncommercial-sharealike 4.0 International License.