

УДК 519.876.5:550.34.16]:699.841

DOI: 10.31673/2412-9070.2024.051397

А. М. ШЕВЧЕНКО, аспірант;

ORCID 0000-0003-2723-0378

І. О. ЯРМОЛАЙ, аспірант,

ORCID 0009-0001-7013-5790

Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка

ОПТИМІЗАЦІЯ ІНФОРМАТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СЕЙСМОАКУСТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ПРИРОДНИХ ТА ІНЖЕНЕРНИХ ОБ'ЄКТІВ

Враховуючи те, що Україна заходиться у стані війни з російською федерацією, проведення сейсмоакустичного моніторингу з метою оцінки динаміки змін фізично доцільних параметрів об'єкту інформаційної діяльності для прогнозу його стану в майбутньому є необхідним чинником для розробки математичної моделі з інформативними параметрами процесу спостереження. Такий підхід дає можливість досліджувати динаміку структури об'єкта при використанні неруйнівних досліджень, тобто дає оцінку динаміки стану об'єкту дослідження та при необхідності проведення більш детального моніторингу. У роботі розглядається методологія побудови параметричної моделі та вибору фізично доцільних інформативних параметрів цієї моделі, таких як основні власні частоти і добротність структури цих частот. Проводиться аналіз методології оцінки відгуку структури на зовнішнє збудження системи, таке як вітер, морські хвилі, рух транспорту тощо або реакція об'єкта на вибухову хвилю. Для створення універсальної моделі сейсмічного сигналу були враховані фундаментальні емпіричні дослідження сейсмічного сигналу та використані математичні моделі для їх апроксимації. Також було враховано потокову природу сейсмічного процесу і той факт, що сейсмічний сигнал має бути хвилею. Така модель дає змогу оцінити такий суттєвий параметр в описі об'єкта, як його добротність, динаміка якої може дати уявлення про його структурні зміни. Для прогнозування поведінки природних та інженерних об'єктів з метою запобігання небажаним наслідкам поведінки досліджуваного об'єкта використовуються системи сейсмоакустичного моніторингу. Запропоновані авторами математична модель і алгоритм можуть бути інтегровані у систему сейсмоакустичного моніторингу природних і техногенних об'єктів.

Ключові слова: сейсмоакустичний моніторинг, ударна хвиля, сейсмічний сигнал, математична модель, інформативні параметри, добротність, частота.

Вступ

При проведенні сейсмоакустичного моніторингу з метою оцінки динаміки змін фізично доцільних параметрів об'єкту дослідження для прогнозу його стану необхідним чинником є розробка математичної моделі з інформативними параметрами процесу спостереження, тобто параметрів, які характеризують процес спостереження за об'єктом. Об'єктом сейсмоакустичного моніторингу є природні та інженерні об'єкти. Такий підхід дає можливість досліджувати динаміку такої структури при використанні неруйнівних досліджень, тобто дає оцінку динаміки стану об'єкту дослідження та при необхідності проведення більш детального моніторингу.

У роботі пропонується методологія побудови параметричної моделі та вибору фізично доцільних інформативних параметрів цієї моделі, таких як основні власні частоти і добротність структури цих частот. Проводиться аналіз методології оцінки відгуку структури на зовнішнє збудження системи, таке як вітер, морські хвилі, рух транспорту, тощо або реакція об'єкту на

© А. М. Шевченко, І. О. Ярмолай, 2024

вибух. Для створення універсальної моделі сейсмічного сигналу були враховані фундаментальні емпіричні дослідження сейсмічного сигналу та використані математичні моделі для їх апроксимації [1,2]. Також було враховано потокову природу сейсмічного процесу і той факт, що сейсмічний сигнал має бути хвилею, як це було зазначено у [3].

Особливий інтерес представляє пасивний моніторинг [4] об'єктів з джерелами емісійних сигналів, параметри яких характеризують динаміку стану об'єкту дослідження та підлягають визначенню. Емісія може мати як нерегулярний, так і регулярний характер. В останньому випадку вона може моделюватись у вигляді потоку з імовірнісними характеристиками, що підлягають визначенню [4-6]. Така поведінка є типовою для процесу руйнування об'єкту дослідження, як джерела емісії сейсмічних сигналів. Такий потік, якщо він моделюється біноміальним, може мати велику ймовірність не спрацьовування джерела, тобто інтеграл від парціальної щільності ймовірності появи сигналу в даний момент на множині моментів може бути менше одиниці на інтервалі спостереження.

Аналіз даних пасивного моніторингу сигналів емісії зводиться до оцінки параметрів емісійних сигналів, кожен з яких флюктує не залежно від інших емісійних сигналів. Розподіл флуктуацій параметрів цих сигналів априорі невідомо. «Короткі», тобто окремі емісійні сигнали представляють собою важливий окремий випадок моделювання емісії. Фізична здійсненність сигналу обумовлена двома факторами. Це причинність і стійкість [7].

Обробка польових спостережень

Фізично здійснений сигнал добре апроксимується суперпозицією осциляторів, але для реальних фізичних систем з обмеженим спектральним діапазоном і, відповідно, затягуванням фронту хвилі природно моделювати суперпозицією імпульсів Берлаге [1], як узагальнення осцилятора:

$$y(t) = \eta(t)te^{-\alpha t} \sin(\omega t). \quad (1)$$

Для моделі (1) природно наступне узагальнення для імпульсу Берлаге, який почався в момент часу τ :

$$y(t) = A\eta(t-\tau)(t-\tau) \exp\{-\alpha(t-\tau)\} \sin[\omega(t-\tau)]. \quad (2)$$

У (2) $\eta(t-\tau)$ - це функція Гевісайда.

Наступне узагальнення моделі (узагальнений імпульс Берлаге):

$$y(t) = A\eta(t-\tau)(t-\tau)^\beta \exp\{-\alpha(t-\tau)\} \sin[\omega(t-\tau)]. \quad (3)$$

У формулах (1-3) $y(t)$ - дані спостереження, $\{A, \tau, \alpha, \omega, \beta\}$ - вектор вільних параметрів моделі, тут A - амплітуда коливаль, τ - час вступу сигналу, α - параметр, який характеризує згасання сигналу (декремент згасання), ω - частота сигналу, β - параметр, який характеризує крутість фронту.

При $\beta=1$ модель (3) приходить до вигляду (1), тобто приймає вигляд імпульсу Берлаге, при $\beta = 0$ модель (3) приймає вигляд осцилятора, при $\beta \neq 0 \vee \beta \neq 1$ модель (3) приймає вигляд узагальненого імпульсу Берлаге (2).

Далі будемо розглядати загальний випадок і, фіксуючи вільні параметри α і β , переходити до окремих випадків узагальненого імпульсу Берлаге (3). Модель, що складається з K підмоделей і представле собою суперпозицію імпульсів, кожен з яких задається формулою (3), і входить у модель вектором-рядком фізично здійснених вільних параметрів узагальненого імпульсу Берлаге, кожен імпульс повністю визначається вектор-рядком:

$$\mathbf{P}_{(k)} = \{A_k, \tau_k, \alpha_k, \omega_k, \beta_k\}. \quad (4)$$

А модель приймає вигляд:

$$M(t, \mathbf{P}) = \sum_{k=1}^K A_k \eta(t-\tau_k)(t-\tau_k)^{\beta_k} \exp\{-\alpha_k(t-\tau_k)\} \sin[\omega_k(t-\tau_k)] + n(t). \quad (5)$$

У (5) введена матриця вільних параметрів моделі \mathbf{P} . Вектор-рядок $\mathbf{P}_{(k)}$ цієї матриці повністю визначає k -у підмодель, а вектор-стовпець $\mathbf{P}^{(s)}$ якої визначає споріднені параметри підмоделей - адитивна завада.

$$\mathbf{P} = \{P_{k,s}\}, \quad k = \overline{1, K}, \quad s = \overline{1, S}, \quad (5-a)$$

де S – кількість вільних параметрів у підмоделі (кількість стовпців у матриці \mathbf{P}), K – кількість підмоделей (кількість рядків у матриці \mathbf{P}). Таким чином, прямокутна матриця вільних параметрів моделі розмірністю $K \times S$ в (4) визначає модель (5). Якщо поєднати родинні вектори в матрицю, то:

$$\mathbf{P} = \left\{ \mathbf{P}^{(1)}, \mathbf{P}^{(2)}, \mathbf{P}^{(3)}, \mathbf{P}^{(4)}, \mathbf{P}^{(5)} \right\}. \quad (6)$$

У (6) поєднані вектори виду:

$$\mathbf{P}^{(1)} = \mathbf{A} = \begin{Bmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_k \\ \vdots \\ A_K \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{P}^{(2)} = \boldsymbol{\tau} = \begin{Bmatrix} \tau_1 \\ \vdots \\ \tau_k \\ \vdots \\ \tau_K \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{P}^{(3)} = \boldsymbol{\alpha} = \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_k \\ \vdots \\ \alpha_K \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{P}^{(4)} = \boldsymbol{\omega} = \begin{Bmatrix} \omega_1 \\ \vdots \\ \omega_k \\ \vdots \\ \omega_K \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{P}^{(5)} = \boldsymbol{\beta} = \begin{Bmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \\ \vdots \\ \beta_K \end{Bmatrix}. \quad (6-a)$$

Таким чином, модель у термінах матриці вільних параметрів \mathbf{P} набуває вигляду:

$$M(t, \mathbf{P}) = \sum_{k=1}^K \mathbf{P}_k^{(1)} \eta(t - \mathbf{P}_k^{(2)}) (t - \mathbf{P}_k^{(2)})^{\mathbf{P}_k^{(3)}} \exp \left\{ -\mathbf{P}_k^{(3)} (t - \mathbf{P}_k^{(2)}) \right\} \sin \left[\mathbf{P}_k^{(4)} (t - \mathbf{P}_k^{(2)}) \right]. \quad (6-b)$$

Тут вектори $\mathbf{A}, \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\beta}$ – це вектор-стовпці, що складаються з K рядків, K – кількість підмоделей. Матриця \mathbf{P} формується як поєднання векторів (6) $P_{k,s} = P_k^{(s)}$. У наведеній моделі $s = \overline{1, S}; S = 5$.

Для моделі (6) та даних спостереження $V(t)$ на інтервалі $(0, T)$ будемо цільову функцію $Q(\mathbf{P})$ у метриці $L_2(0, T)$. $T = \Delta t \cdot S1$, де Δt – квант часу, $S1$ – кількість точок вибірки на інтервалі:

$$Q(\mathbf{P}) = \|V_{s1} - M(t_{s1}, \mathbf{P})\|_{L_2}; \quad k = \overline{1, K}. \quad (7)$$

$$Q(\mathbf{P}) = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{s1=0}^{S1} (V_{s1} - M(t_{s1}, \mathbf{P}))^2}; \quad t_{s1} = s1 \cdot \Delta t; \quad T = t_S \cdot \Delta t, \quad (7-a)$$

де V_{s1} – вектор даних спостереження.

Щоб знайти екстремуми функції $Q(\mathbf{P})$, потрібно вирішити систему рівнянь щодо всіх елементів матриці \mathbf{P} :

$$\frac{\partial Q(\mathbf{P})}{\partial P_{s,k}} = 0, \quad k = \overline{1, K}; \quad s = \overline{1, S}. \quad (8)$$

Враховуючи подібність споріднених підмоделей, можна послідовно розглядати похідні у напрямку векторів $\mathbf{P}^{(k)}$, споріднених параметрів різних підмоделей.

$$\frac{\partial Q(\mathbf{P})}{\partial \mathbf{P}^{(k)}} = \left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial Q(\mathbf{P})}{\partial \mathbf{P}_1^{(k)}} \\ \dots \\ \frac{\partial Q(\mathbf{P})}{\partial \mathbf{P}_s^{(k)}} \end{array} \right\} = \mathbf{0} = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ \dots \\ 0 \end{array} \right\}, \quad k = \overline{1, K}. \quad (8-a)$$

Але робота з такою моделлю потоку сигналів пов'язана з труднощами використання варіаційного підходу [8] до задачі оцінки параметрів потоку. Враховуючи, що процес супроводжується мікросейсмічним фоном [9], ми не можемо точно оцінити параметри сигналу у потоці.

Оптимальна оцінка вектору вільних параметрів моделі

Для вирішення задачі (5) необхідно знайти глобальний мінімум функціоналу $Q(\mathbf{P}_k)$ на множині допустимих, з відомим апріорі розподілом, векторів з множини A_k [10]:

$$\min_{\mathbf{P}_k} \{Q(\mathbf{P}_k)\}; \quad k = \overline{1, K}; \quad \mathbf{P}_k \in A_k.$$

Обробка даних спостереження

Результати розрахунків для моделі із трьох підмоделей у моделі (5). Розглянемо оптимізовану процедуру оцінки динамічних параметрів сигналів мінометних вибухів з характеристиками в області сейсмоакустичного діапазону частот на прикладі даних, отриманих при моніторинговому дослідженні роздільних сигналів мінометних вибухів.

На рис. 1 представлений фрагмент запису сигналу мінометного вибуху і натомість фонового шуму.

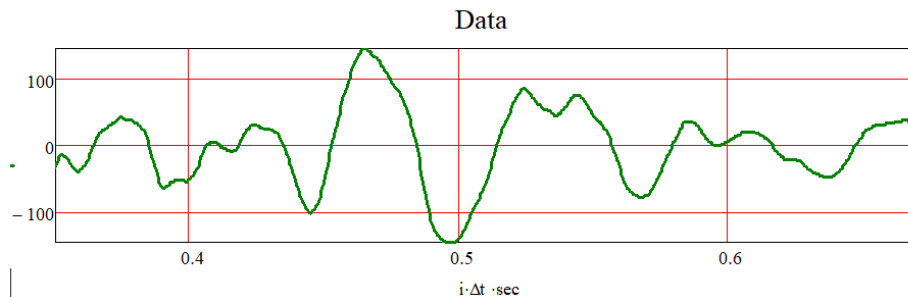


Рис. 1. Фрагмент запису сигналу мінометного вибуху на тлі фонового шуму. По осі абсцис представлено час у мілісекундах, по осі ординат - амплітуда швидкості коливань у відносних одиницях

На рис. 2 дана модель, що апроксимує сигнал, представлений на рис. 1, вільні параметри якої отримані в результаті оцінки оптимальних параметрів критерію (7-а).

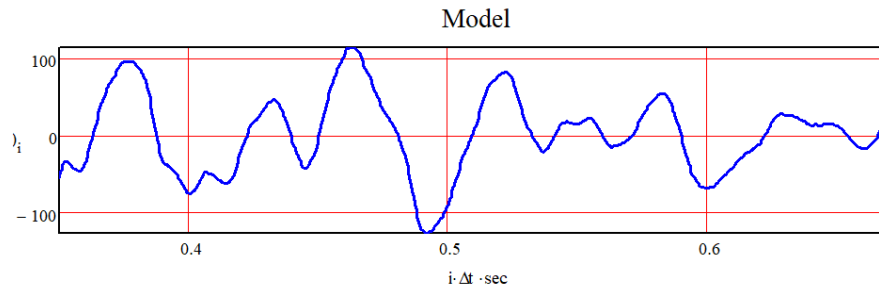


Рис. 2. Модель, що апроксимує сигнал, представлений на рис. 1, вільні параметри якої отримані в результаті оцінки оптимальних параметрів критерію (7-а). По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда швидкості коливань у відносних одиницях

Розглянемо модель із дванадцятьма вільними параметрами. Оцінкою якості моделі є значення критерію у точці глобального мінімуму. Рис. 3 представляє дуже важливі характеристики об'єкта, а саме добротності системи на частотах. Рис 3 – це експоненти загасання процесу роз-

сіювання енергії на власних частотах для 12-ти параметричної моделі (тут розглянуто три власні частоти). Початок кожної кривої по осі ординат - це оцінка амплітуди кожної гармоніки.

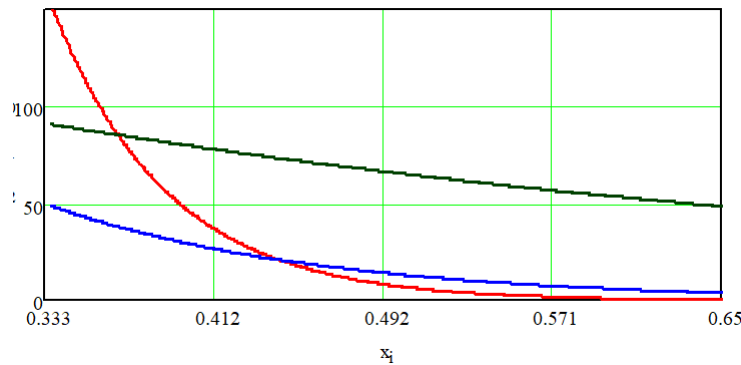


Рис. 3. Експоненти згасання процесу розсіювання енергії на власних частотах для 12-ти параметричної моделі

На рис. 4 представлено кожну з 3-х підмоделей 12-ти параметричної моделі (5). Перетин кожної гармоніки осі ординат дає уявлення про оцінку зсуву її фази. Ми бачимо суттєву різницю стану об'єкта в енергетичному сенсі на різних гармоніках.

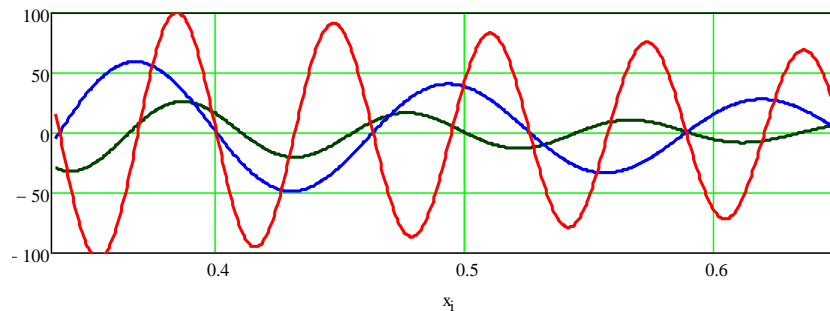


Рис. 4. Кожна з 3-х підмоделей 12-ти параметричної моделі (5). По осі абсцис – час у секундах, по осі ординат – значення експонент, що модулюють відповідні гармоніки (у відносних одиницях)

Рис. 5 представле собою модель (синя крива) та дані спостереження (зелена крива).

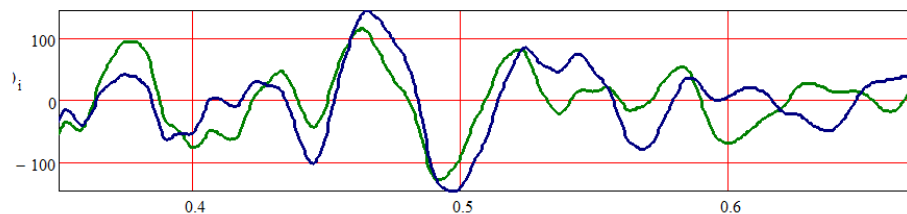


Рис. 5. Модель (5) (синя крива) та дані, отримані в результаті експерименту (сигнал зелена крива)

Вище наведені розрахунки даних з метою показати весь ланцюжок у комп'ютеризованій технології оцінки вільних параметрів у моделях і дані лише для однієї з компонентів запису швидкостей, що осцилюють. Розрахунки для іншої складової мають такий самий технологічний цикл [11].

Фізично доцільно звернути особливу увагу на такі параметри, як величини власних частот та коефіцієнт згасання експоненти (логарифмічний декремент). Дані параметри характеризують добротність системи, тобто характеризують здатність системи передавати енергію, яка викликана результатом зовнішніх збурень. Низький декремент на основних частотах характеризує здатність об'єкта переносити велику енергію, яка викликана зовнішніми збуреннями на цих частотах, що приводить до сильних за амплітудою і довгих за часом коливань, що приводить до прискореного руйнування об'єкту. Тобто, якщо декремент зменшується з часом, то енергія від зовнішніх збурень гаситься гірше, що пришвидшує руйнування об'єкту від слабого зовнішнього впливу. Запропонований у даній роботі метод Монте-Карло дає збіжність до

рішення лише за ймовірністю [4]. Тому, необхідно використовувати значну кількість ітерацій обчислень для отримання результату, що ускладнює задачу при великій розмірності моделі. Хороші апріорні уявлення про очікуваний результат суттєво покращують розв'язання даної задачі.

Представимо оптимальні параметри для об'єкту дослідження при вирішенні даної задачі. Транспонований вектор власних кутових частот:

$$\omega^T = \{3.024 \quad 8.734 \quad 19.985\} \frac{rad}{sec}.$$

Транспонований вектор амплітуд моделі (5):

$$\mathbf{A}^T = \{9.850 \quad 0.598 \quad 0.319\}.$$

Транспонований вектор декрементів на власних частотах:

$$\alpha^T = \{0.019 \quad 2.124 \quad 0.197\}.$$

Транспонований вектор зсувів фаз в радіанах:

$$\psi^T = \{3.138 \quad 3.035 \quad 7.851E-3\} rad.$$

Висновки

Запропоновано практичний метод аналізу динаміки стану природних та техногенних об'єктів, спектральні характеристики яких лежать у сейсмічному та нижній частині акустичного діапазонів частот. Цей метод засновано на дослідженні динаміки фізично доцільних параметрів об'єкту спостереження. Запропоновано новий підхід до визначення стану таких об'єктів. Запропоновано нову модель природного фону об'єкта моніторингу, яка представляє собою суперпозицію імпульсів Берлаге. Така модель дає змогу оцінити такий суттєвий параметр в описі об'єкта, як його добротність, динаміка якої може дати уявлення про його структурні зміни. Для прогнозування поведінки природних та інженерних об'єктів з метою запобігання небажаним наслідкам поведінки досліджуваного об'єкта використовуються системи сейсмоакустичного моніторингу. Запропоновані авторами математична модель і алгоритм можуть бути інтегровані в систему сейсмоакустичного моніторингу природних і техногенних об'єктів.

Список літератури

1. Mostovyy V., Mostovyy S. Estimation of parameters of seismic waves. *Transactions of NAS of Ukraine*. 2014, Vol. 2, pp. 118-123).
2. Ricker N. The form and laws of propagation of seismic wavelets // *Ibid.* – 1953. – 18. – P. 10–40.
3. Addison Paul S. *The illustrated wavelet transform handbook* // IOP Publishing Ltd 2002. – 353 p.
4. Мостовий В.С. *Моделі систем моніторингу геофізичних полів* // дисертація на здобуття наукового ступеня доктор фізико-математичних наук, Київ 2013.
5. S. Mostovoy, V. Mostovoi Active Monitoring and decision making problem. *IJ ITA Vol.12, Number 4, Sofia, 2005, p 127-135.*
6. Лебедич И.Н., Мостовой С.В., Мостовой В.С. Современные подходы к анализу динамической стабильности природных и техногенных объектов на примере мониторинга мону-мента колонного типа. // *Гефиз. журн.* - 2004.-, 24, № 6. -С. 132-138.
7. Robinson E. Predictive decomposition of time series with application to seismic exploration // *Ibid.* – 1967. – 32, No 3. – P. 418–484.
8. Kirkpatrick S., Gelatt C., Vecchi M. Optimization by simulated annealing // *Science.* – 1983. – 220. – P. 671–680.
9. Mostovoy V.S., Mostovyi S.V., Panchenko M.V. Seismic signal and microseismic background phone (mathematical models and estimations) // *Geoinformatic* –2008. No 1, P. 28-38.
10. Plessix R.-E. A review of the adjoint-state method for computing the gradient of a functional with geophysical applications - *Geophys. J. Int.* (2006) 167, 495.

11. V.A. Zelinsky, S.V. Lysochenko, V.V. Ilchenko, M.M. Nikiforov, O.L. Kulsky, V.V. Krichta, *Determination of vibration Object Coordinate on Surface of Earth Control Systems and Computers* № 2 (298), 2022 p32-46.

A. Shevchenko, I. Yarmolai

OPTIMIZATION OF INFORMATIONAL PARAMETERS OF THE MATHEMATICAL MODEL OF SEISMOACOUSTIC MONITORING OF NATURAL AND ENGINEERING OBJECT

Considering the fact that Ukraine is at war with the Russian Federation, conducting seismoacoustic monitoring in order to assess the dynamics of changes in the physically appropriate parameters of the object of information activity for forecasting its state, the necessary factor is the development of a mathematical model with informative parameters of the observation process. This approach makes it possible to study the dynamics of the structure of the object when using non-destructive research, that is, it provides an assessment of the dynamics of the state of the research object and, if necessary, more detailed monitoring. The work considers the methodology of building a parametric model and the selection of physically appropriate informative parameters of this model, such as the main natural frequencies and the Q-factor of the structure of these frequencies. An analysis of the methodology for assessing the structure's response to external excitation of the system, such as wind, sea waves, traffic, etc., or artificially induced, for example, the object's response to an explosion, is carried out.

To create a universal model of the seismic signal, fundamental empirical studies of the seismic signal were taken into account and mathematical models were used for their approximation. The flow nature of the seismic process and the fact that the seismic signal must be a wave were also taken into account. Thus, the paper proposes a new model of the natural background of the monitoring object, which is a superposition of Berlage impulses. Such a model makes it possible to estimate such an essential parameter in the description of the object as its quality factor, the dynamics of which can give an idea of its structural changes. Seismoacoustic monitoring systems are used to predict the behavior of natural and engineering objects in order to prevent undesirable consequences of the behavior of the object under study. The mathematical model and algorithm proposed by the authors can be integrated into the system of seismoacoustic monitoring of natural and man-made objects.

Keywords: seismoacoustic monitoring, shock wave, seismic signal, mathematical model, informative parameters, quality factor, frequency.