

УДК 622.834.5:614.8.01

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270225.117.1136

ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДУ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ОБРОБКИ ДАНИХ ВІБРОАКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ

ЯЛАНСЬКИЙ О. А.¹, канд. техн. наук, доц.,
КИРИЧЕНКО О. В.², докт. техн. наук, проф.,
СЛАЩОВА О. А.^{3*}, канд. техн. наук, с. н. с.,
БАРАБАНОВ С. С.⁴, канд. техн. наук, ас.,
БРИЖЕНЮК В. С.⁵, магістр, асп.

¹ Кафедра електропривода, НТУ «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 744-62-19, e-mail: yalanskiy.o.a@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8761-275X

² Кафедра пожежно-профілактичної роботи, Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, вул. Онопрієнка, 8, 18034, Черкаси, Україна, тел. +38 (093) 225-07-78, e-mail: okskir@meta.ua, ORCID ID: 0000-0002-0240-1807

^{3*} Відділ проблем розробки родовищ на великих глибинах, Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України, вул. Сімферопольська 2-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 746-01-51, e-mail: OASlashchova@nas.gov.ua, ORCID ID: 0000-0002-7161-1410

⁴ Кафедра охорони праці та цивільної безпеки, НТУ «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 744-62-19, e-mail: stanislavbarabanov5@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-9236-022X

⁵ Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: volodimirbrizenuk@gmail.com, ORCID ID: 0009-0003-9690-1056

Анотація. Постановка проблеми. Основна тенденція розвитку технології віброакустичного контролю геотехнічних об'єктів спрямована на автоматизацію отримання, передачі, збирання та обробки інформації. Однак, потребують подальшого розвитку математичний апарат та алгоритми для цифрової обробки віброакустичних сигналів. **Мета дослідження.** Визначення особливостей та розробка алгоритмів реалізації методу спектрального аналізу даних для віброакустичного контролю безпеки функціонування геотехнічної системи. **Методика.** Аналіз та узагальнення даних, аналітичні та лабораторні дослідження осцилограм акустичних сигналів, методи побудови цифрових систем контролю середовища. **Результати.** Досліджено методи і алгоритми, що використовуються в системах контролю стану порід, гірничих виробок, заглиблених і наземних споруд. Алгоритми цифрової обробки сигналів, як правило, включають фільтрацію та спектральний аналіз вхідних даних. Визначені особливості реалізації методу спектрального аналізу для обробки даних віброакустичного контролю функціонування геотехнічної системи. Встановлено, що загасаючий аперіодичний сигнал можна розглядати як суперпозицію добутків уявних періодичних сигналів та зміщених одиничних прямокутних імпульсів з тривалостями, що дорівнюють періодам відповідних періодичних сигналів. При цьому, частота першої моди коливань обернено пропорційна подвійній товщині досліджуваних елементів геотехнічної системи. Для контролю характеристик імпульсних акустичних сигналів, на відміну від відомого раніше методу, де використовується одне вимірювання протягом інтервалу розбиття та ручна побудова полів точок, пропонується використовувати серії точок на кожному з інтервалів часу зміни сигналу та проводити аналіз співвідношень між спектром реального аперіодичного сигналу та спектрами його уявних періодичних складових. Розроблено алгоритми автоматичного аналізу спектрограм віброакустичного відгуку для обчислень параметрів контролю методом дискретних ординат. Реалізація методу виконується шляхом послідовної циклічної обробки сигналу від високих частот до низьких з подальшим розбиттям на часові інтервали, в межах кожного з яких зміна значення відхилення приймається за період мнимого незагасаючого коливального процесу. **Наукова новизна.** Подальший розвиток отримав метод цифрової обробки одиничних акустичних імпульсів, що відрізняється розробленими алгоритмами автоматичного спектрального аналізу віброакустичного відгуку які оптимізовані для обчислень параметрів контролю методом дискретних ординат. **Практична значимість.** Результати досліджень дозволяють автоматизувати моніторинг складових геотехнічної системи на основі спектрів виділених періодичних складових віброакустичного відгуку досліджуваного об'єкта.

Ключові слова: безпека геотехнічних об'єктів; віброакустичний контроль; спектральний аналіз сигналу; алгоритми цифрової обробки

FEATURES OF IMPLEMENTATION OF THE SPECTRAL ANALYSIS METHOD FOR PROCESSING VIBROACOUSTIC CONTROL DATA

YALANSKYI O.A.¹, *Ph. D. (Tech), Assoc. Prof.*,
KYRYCHENKO O.V.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
SLASHCHOVA O.A.^{3*}, *Ph. D. (Tech.), Sen. Res.*,
BARABANOV S.S.⁴, *Ph. D. (Tech.), Ass. Prof.*,
BRIZHENIUK V.S.², *Master of Sc., Postgrad. Stud.*

¹ Department of Electric Drive, Dnipro University of Technology, 19, Dmytra Yavornytskoho Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 744-62-19, e-mail: yalanskiy.o.a@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8761-275X

² Department of Fire Prevention, Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes National University of Civil Defense of Ukraine, 8, Onopriyenko St., Cherkasy, 18034, Ukraine, tel. +38 (093) 225-07-78, e-mail: okskir@meta.ua, ORCID ID: 0000-0002-0240-1807

^{3*} Department of Mining at Great Depths, the M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Sympheropolska Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 746-01-51, e-mail: OASlashchova@nas.gov.ua, ORCID ID: 0000-0002-7161-1410

⁴ Department of Labour Protection and Civil Safety, Dnipro University of Technology, 19, D. Yavornytskyi Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 744-62-19, e-mail: stanislavbarabanov5@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-9236-022X

⁵ Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: volodimirbrizenuk@gmail.com, ORCID ID: 0009-0003-9690-1056

Abstract. Problem statement. The main trend in the development of vibroacoustic technology for monitoring geotechnical objects is aimed at automating the receipt, transmission, collection and processing of information. However, the mathematical apparatus and algorithms for digital processing of vibroacoustic signals require further development. **Purpose of the study.** Definition of features and development of algorithms for the implementation of the spectral analysis method for vibroacoustic monitoring of the geotechnical system functioning safety. **Methods.** Analysis and generalization of data, analytical and laboratory studies of acoustic signals oscillograms, methods for constructing digital environmental control systems. **Research results.** The methods and algorithms used in systems for monitoring the state of rocks, mine workings, underground and surface structures are investigated. Digital signal processing algorithms usually include filtering and spectral analysis of input data. The features of the spectral analysis method implementation for processing vibroacoustic monitoring data of a geotechnical system are determined. It is established that a decaying aperiodic signal can be considered as a superposition of multiplications of imaginary periodic signals and shifted single rectangular pulses. In this case, the frequency of the first oscillation mode is inversely proportional to the double thickness of the studied elements of the geotechnical system. To control the characteristics of pulsed acoustic signals, in contrast to the previously known method, which uses one measurement during the partition interval and manual construction of point fields, it is proposed to use a series of points at each of the time intervals of signal change and analyze the relationships between the spectrum of the real aperiodic signal and the spectra of its imaginary periodic components. Algorithms for automatic analysis of vibroacoustic response spectrograms and calculating control parameters using the discrete ordinate method are developed. The method is implemented by sequential cyclic processing of the signal from high frequencies to low frequencies, followed by division into time intervals, within each of which the change in the deviation value is taken as the period of the unquenchable oscillatory process. **Scientific novelty.** The methodology for identifying hidden damage in structural elements of buildings and structures has been further developed, which is distinguished by taking into account the parameters of vibroacoustic control of the destruction consequences and assessing the risks of the structures stability loss. **Practical significance.** The research results make it possible to improve the method for assessing changes in the structure of the medium as a result of the occurrence of observed and hidden systems of cracks using vibroacoustic monitoring.

Keywords: *geotechnical facilities safety; vibroacoustic monitoring; spectral signal analysis; digital processing algorithms*

Постановка проблеми.

Сучасні наукові та інженерні задачі вимагають високої точності, швидкості і надійності обробки даних, що особливо актуально для віброакустичного методу [1–3]. Цей метод використовується для неруйнівного контролю та діагностики

стану конструкцій, матеріалів і гірських порід [4; 5]. Необхідність автоматизації віброакустичного методу полягає в тому, що акустичні сигнали дуже складні, мають багатокомпонентний характер і схильні до впливу шуму, перешкод та нелінійних ефектів, що потребує застосування складних

математичних методів обробки. Складність обробки даних, в свою чергу, вимагає мінімізації помилок та виключення людського фактора (некомпетентності, втоми, неуважності) при інтерпретації результатів [6]. Автоматизовані системи забезпечують стандартизований підхід, який знижує ймовірність суб'єктивних чи випадкових помилок.

Використання віброакустичного методу для моніторингу стійкості споруд передбачає збільшення кількості досліджень, що неминуче призводить до зростання об'єму даних. Ручна обробка таких масивів даних стає неможливою, особливо з урахуванням вимог до часу і якості виконання робіт. При цьому слід зазначити, що вітчизняні прилади розраховані переважно на ручну обробку результатів.

Таким чином, основна тенденція розвитку технології контролю і моніторингу геотехнічних об'єктів спрямована на автоматизацію отримання, передачі, збирання та обробки інформації. Разом із тим, потребують подальшого розвитку математичний апарат та алгоритмічне забезпечення для цифрової обробки віброакустичних сигналів.

Мета дослідження – визначення особливостей та розробка алгоритмів реалізації методу спектрального аналізу даних для віброакустичного контролю безпеки функціонування геотехнічної системи.

Результати досліджень.

Алгоритми цифрової обробки сигналів, що використовуються в системах автоматизованого контролю стану порід, гірничих виробок, заглиблених і наземних споруд, як правило, включають фільтрацію та спектральний аналіз. При цьому досліджують сигнали $\varphi(t)$, які, по-перше, задовольняють умовам Діріхле, і, по-друге, мають обмежену енергію, тобто

$\int_{-\infty}^{\infty} |\varphi(t)|^2 dt \neq \infty$. Для функцій, що визначають

такі сигнали, існують пряме та зворотне перетворення Фур'є [7; 8], отже, можливе визначення їх спектра. Однак для автоматизації контролю стану підземних

споруд і породного масиву найчастіше використовується не безпосередньо спектр, а його похідні параметри, наприклад, такі як: відношення амплітуд або енергій сигналу у двох певних частотних смугах, коефіцієнт загасання конкретних гармонійних складових та ін. Це пов'язано в першу чергу з тим, що розмір вектора коефіцієнтів дискретного перетворення Фур'є збігається з розміром вектора миттєвих значень аналізованого сигналу.

Для приладів оперативного контролю та контролерів нижнього рівня автоматизованих систем необхідні методи та алгоритми цифрового перетворення сигналу з часової області на частотну, що забезпечує зменшення розміру вихідного вектора перетворення по відношенню до вхідного. Компактність вектора коефіцієнтів такого перетворення спрощує вибір параметрів, критеріїв контролю і оцінку вихідного сигналу на відповідність цим критеріям. Врахування особливостей імпульсних акустичних сигналів відгуку на ударний вплив дозволить підвищити точність та інформативність методів.

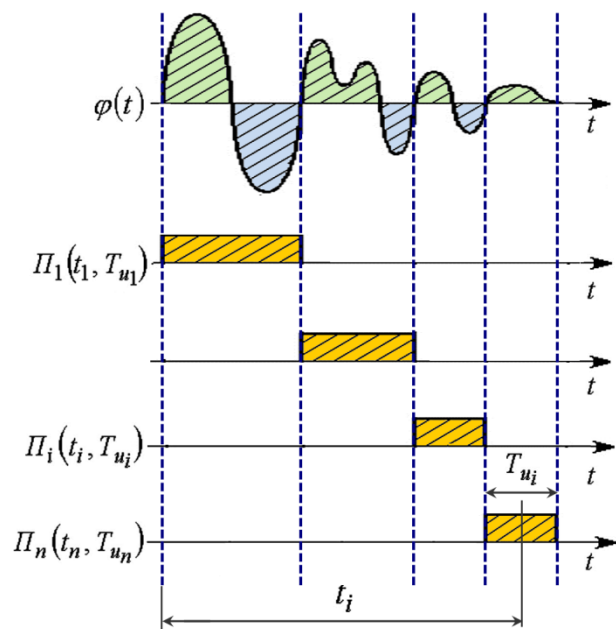


Рис. 1. Приклад розбиття віброакустичного сигналу на інтервали точками перетину з віссю абсцис для автоматизації контролю пошкодженості об'єкта в режимі реального часу

Загасаючий аперіодичний сигнал $\varphi(t)$ представимо як суперпозицію добутоків

періодичних сигналів $\varphi_{pi}(t)$ на одиничні прямокутні імпульси $\Pi_i(t_i, T_{ui})$ (рис. 1):

$$\varphi(t) = \sum_i \varphi_{pi}(t) \cdot \Pi_i(t_i, T_{ui}), \quad (1)$$

де t_i – момент часу, що відповідає середині i -го прямокутного імпульсу, T_{ui} – його тривалість.

Оскільки перетворення Фур'є (ПФ) є лінійним перетворенням, то ПФ для лінійної комбінації деяких функцій $\varphi_i(t)$ дорівнює аналогічній лінійній комбінації перетворень Фур'є цих функцій:

якщо $\varphi_i(t) \leftrightarrow \Phi_i(f)$,

то $\sum_{i=1}^n a_i \varphi_i(t) \leftrightarrow \sum_{i=1}^n a_i \Phi_i(f)$, (2)

де $\varphi_i(t)$ – функція, що задовольняє умовам Діріхле, $\Phi_i(f)$ – її перетворення Фур'є, a_i – постійний коефіцієнт.

Відповідно до (2) для формули (1) буде справедливим такий вираз:

$$\varphi(t) \leftrightarrow \Phi(f) = \sum_i \Phi_{(p\Pi)_i}(f), \quad (3)$$

де $\Phi_{(p\Pi)_i}$ – перетворення Фур'є добутку, що стоїть під знаком суми (3) i -ої періодичної функції, помноженої на прямокутний імпульс:

$$\varphi_{pi}(t) \cdot \Pi_i(t_i, T_{ui}) \leftrightarrow \Phi_{(p\Pi)_i}(f).$$

Відома властивість перетворення Фур'є, згідно з якою ПФ добутку двох функцій $\varphi_1(t) \cdot \varphi_2(t)$ дорівнює їх згортці:

$$\begin{aligned} \varphi_1(t) \cdot \varphi_2(t) &\leftrightarrow \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_1(f') \Phi_2(f - f') df' = \\ &= \Phi_1(f) * \Phi_2(f). \end{aligned} \quad (4)$$

Якщо

$$\varphi_{pi}(t) \leftrightarrow \Phi_{pi}(f), \quad \Pi_i(t_i, T_{ui}) \leftrightarrow \Phi_{\Pi_i}(f),$$

то відповідно до (1) і (4) формулу (3) можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} \varphi(t) \leftrightarrow \Phi(f) &= \sum_i \Phi_{(p\Pi)_i}(f) = \\ &= \sum_i \Phi_{pi}(f) * \Phi_{\Pi_i}(f). \end{aligned} \quad (5)$$

Оскільки для кожного i -го прямокутного імпульсу справедливий вираз

$$\begin{aligned} \Phi_{\Pi_i}(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} \Pi_i(t_i, T_{ui}) e^{-j2\pi ft} dt = \\ &= \int_{\frac{-T_{ui}-t_i}{2}}^{\frac{T_{ui}-t_i}{2}} e^{-j2\pi ft} dt = e^{j2\pi ft_i} \frac{\pi T_{ui}}{\pi f} \end{aligned}$$

то формулу (5) можна представити як:

$$\begin{aligned} \varphi(t) \leftrightarrow \Phi(f) &= \sum_i \Phi_{(p\Pi)_i}(f) = \\ &= \sum_i \Phi_{pi}(f) * e^{j2\pi ft_i} \frac{\pi T_{ui}}{\pi f}. \end{aligned} \quad (6)$$

Таким чином, спектр вихідного аперіодичного сигналу однозначно пов'язаний зі спектрами уявних періодичних коливань $\varphi_{pi}(t)$. Можна зробити висновок, що спектр імпульсного сигналу реакції блокової або плоскопаралельної структури контрольованого підземного об'єкта на збуджуючий ударний вплив, є сумою кінцевого числа згортки прямих перетворень Фур'є уявних періодичних сигналів і зміщених одиничних прямокутних імпульсів. При цьому, критична частота першої моди коливань обернено пропорційна подвійній товщині структури, що дозволяє автоматизувати контроль об'єкта в режимі реального часу з урахуванням спектрів виділених періодичних сигналів.

Розглянувши коливання будь-якої частинки пород або споруди, що віддалена на певну відстань x від точки впливу імпульсної сили при ударнохвильовому контролі, можна констатувати – до того, як передній фронт надійде, частинка знаходиться в спокої. У момент часу t_1 , визначений швидкістю розповсюдження хвилі в масиві, частинка входить у вібраційний рух [9], який характеризується наступними параметрами:

- амплітудами коливань $A_1, A_2, \dots, A_i, \dots$ у моменти часу $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots$ відповідно;
- періодом T_i частотою $f = 1/T$ коливань;

– ослабленням хвилі (зменшенням амплітуди A_i) за час t_i або вздовж лінії просування по області, рівній довжині хвилі λ .

Поширення хвиль у тілі споруд і породах відбувається відповідно до законів геометричної оптики, тобто на межах розділу та неоднорідностей, хвилі відбиваються, заломлюються і розсіюються. Таким чином, амплітудні характеристики акустичних імпульсів несуть інформацію

про стан підземного об'єкту, просторову структуру та напружено-деформований стан породного масиву.

Відомі методи аналізу отриманих осцилограм акустичних сигналів [9; 10] представляють собою визначення максимальної амплітуди A (рис. 2) та коефіцієнта затухання коливань, обчислення співвідношення максимальних амплітуд у заданих інтервалах частот або в різних вимірювальних каналах.

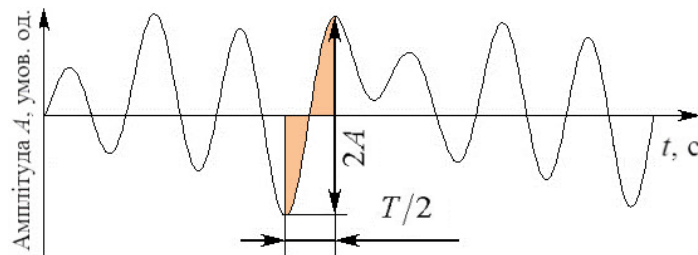


Рис. 2. Визначення максимального значення подвійної амплітуди та відповідного періоду

Для більш детального контролю характеристик імпульсних акустичних сигналів у мікропроцесорних пристроях оперативного контролю та нижчого рівня автоматизованих систем пропонується застосувати метод на основі аналізу візуальних або умовних спектрів. Для їх отримання виконують дискретні

вимірювання амплітуд та періодів умовних коливань з інтервалами часу, що дорівнюють відповідним періодам. Далі, визначають частоти цих коливань, і поле точок, що є основою для побудови умовного спектру. Як правило використовується одне вимірювання протягом інтервалу розбиття та ручна побудова полів точок (рис. 3).

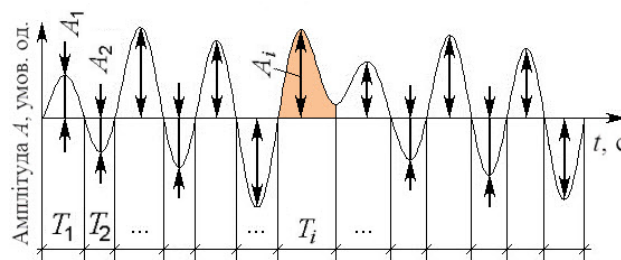


Рисунок 3. Дискретна обробка амплітуд та періодів (апроксимація напівхвилями синусоїд)

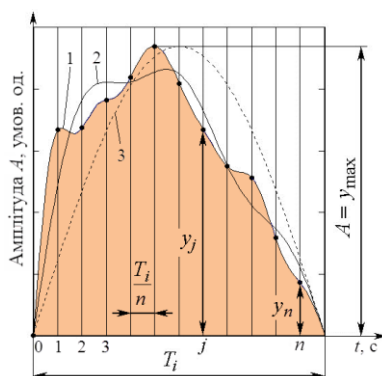


Рис. 4. Визначення n коефіцієнтів ряду на кожному i -му інтервалі амплітуд та частот хвильового процесу (уточнена апроксимація n -ятьма гармоніками)

На відміну від відомого раніше методу пропонується метод, в якому зміна сигналу на кожному з інтервалів часу виражається серією точок (рис. 4). Якщо відомий спосіб базується на кореляційному зв'язку між реальним та апроксимованим ділянками синусоїд сигналів, то в запропонованому методі використовується співвідношення між спектром реального аперіодичного сигналу та спектрами його умовних періодичних складових (6). Таким чином, контрольований сигнал (графік 1, рис. 4) апроксимується не напівхвилями синусоїд (графік 3, рис. 4), а ділянками кривих

(графік 2, рис. 4), що містять по п'ять гармонійних складових, що дає більш високу точність наближення.

Для розбиття сигналу на ділянки та виділення уявних періодичних складових запропоновано порівнювати поточне миттєве значення сигналу зі значеннями

зони нечутливості $A_0 - \Delta TG$ (нижня уставка) та $A_0 + \Delta TG$ (верхня уставка), де A_0 – постійна складова оцифрованого сигналу (як правило, дорівнює величині зміщення аналого-цифрового перетворювача), $2\Delta TG$ – ширина зони нечутливості (рис. 5).

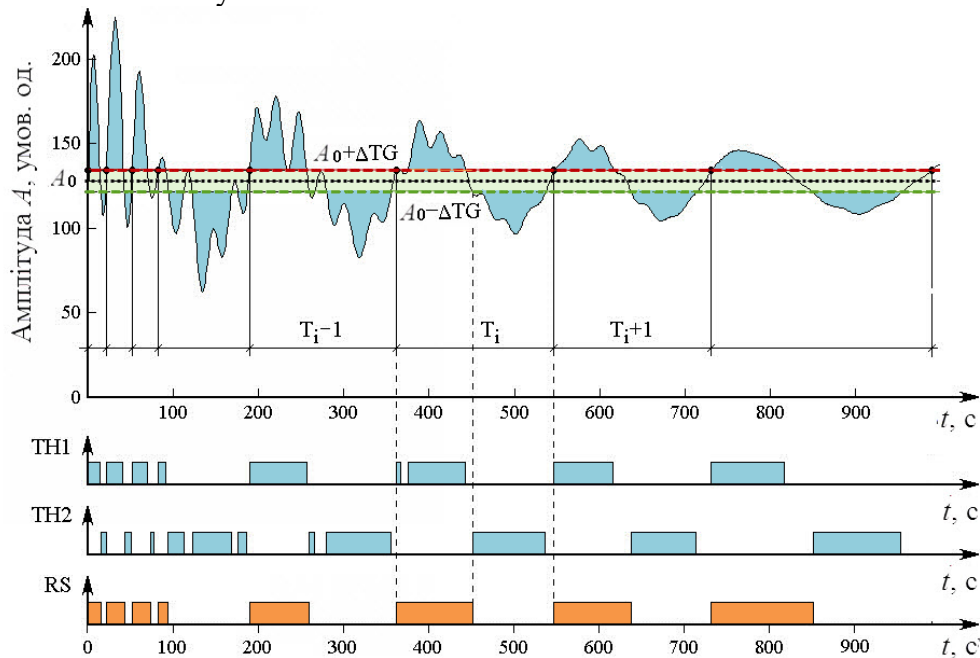


Рис. 5. Реалізація методу перетворення та цифрової обробки аперіодичного віброакустичного відгуку на ударний вплив за допомогою мікроконтролерів

Якщо в систему автоматизації інтегрувати програмні компаратори (ТН1 і ТН2, рис. 5), то вони встановлюються в одиничний стан у разі перевищення чи зниження уставки. Компаратор ТН2 встановлюється в одиничний стан, якщо значення цифрового коду менше від нижньої уставки. Якщо виходить компараторів підключаються до входів програмного тригера, то початок кожного нового i -го інтервалу, рівного періоду виділеної періодичної складової, визначається фронтом вихідного сигналу тригера.

Якщо розглянути гармонічний склад виділених періодичних складових сигналу відповідно до співвідношення (6), у ряді випадків можна спростити алгоритми цифрової обробки акустичних імпульсів відгуку на ударний вплив і тим самим здешевити автоматизацію контролю, зменшивши вимоги до продуктивності

елементної бази контролерів нижнього рівня автоматизованих систем.

Зокрема, можна відмовитись від застосування сигнальних процесорів на користь мікроконтролерів загального призначення. Таке рішення особливо ефективно у цифрових приладах оперативного контролю.

Сформульований висновок та розроблений на його основі метод дозволяють окремо послідовно розглядати гармонічний склад поздовжньої передхвилі, поперечних резонансних мод та згинальних низькочастотних коливань (рис. 6). Для спектрального розкладання уявних періодичних складових коливань застосовується метод дискретних ординат, що в сукупності із запропонованим методом дозволяє уникнути операцій над комплексними числами та звести обчислення в основному до цілісночисельного підсумовування.

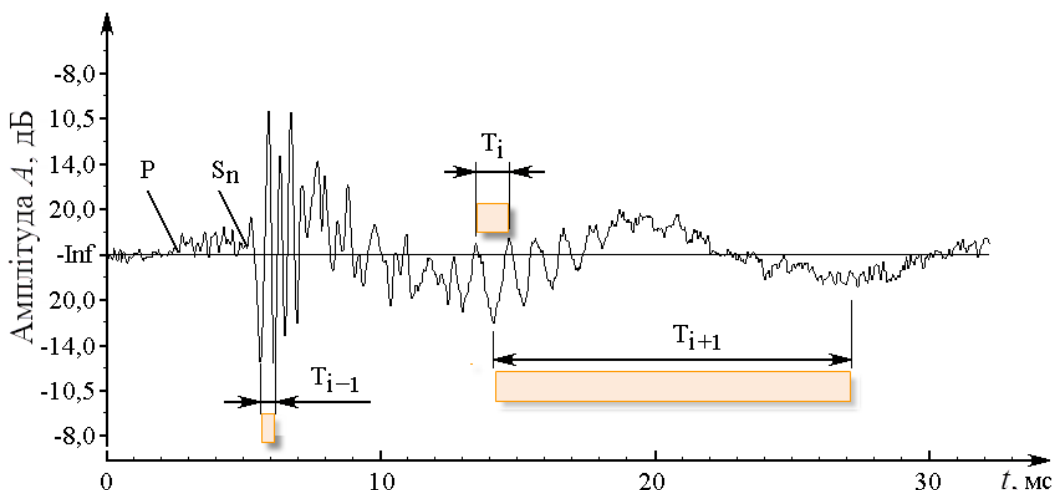


Рис. 6. Визначення інформативних частот $f_i = 1/T$ в одиничних акустичних імпульсах при ударному впливі

Розглянемо особливості реалізації швидкого перетворення Фур'є методом дискретних ординат для обробки даних автоматизованого віброакустичного контролю в двійковому коді.

При використанні методу дискретних ординат функцію $f(x)$ представимо у вигляді кінцевого ряду:

$$y = f(x) = a_0 + \sum_{i=1}^6 a_i \cos ix + \sum_{i=1}^5 b_i \sin ix, \quad (3.7)$$

де a_0 постійна складова, i – номер гармонійної складової; a_i, b_i – коефіцієнти ряду Фур'є.

Оскільки у цифрових приладах оперативного контролю та контролерів нижнього рівня автоматизованих систем обробка даних виконується мікропроцесорними засобами [11; 12], то раніше відомий метод перероблено для обчислень у двійковому коді.

Значення коефіцієнтів ряду визначаються за формулами:

$$a_0 = \frac{1}{12}(r_0 + l); \quad a_1 = \frac{1}{6} \left(v_0 + \frac{\sqrt{3}}{2} s_1 + \frac{1}{2} s_2 \right);$$

$$a_2 = \frac{1}{6} \left(s_0 + \frac{1}{2} m \right); \quad a_3 = \frac{1}{6} (v_0 - s_2);$$

$$a_4 = \frac{1}{6} \left(r_0 - \frac{1}{2} l \right); \quad a_5 = \frac{1}{6} \left(v_0 - \frac{\sqrt{3}}{2} s_1 + \frac{1}{2} s_2 \right);$$

$$a_6 = \frac{1}{12} (s_0 - m);$$

$$b_1 = \frac{1}{6} \left(v_3 + \frac{1}{2} p_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} p_2 \right); \quad b_2 = \frac{\sqrt{3}}{12} d;$$

$$b_3 = \frac{1}{6} (p_1 - v_3); \quad b_4 = \frac{\sqrt{3}}{12} h;$$

$$b_5 = \frac{1}{6} \left(v_3 + \frac{1}{2} p_1 - \frac{\sqrt{3}}{2} p_2 \right), \quad (7)$$

де проміжні змінні $u_0, u_1, \dots, u_5; v_0, v_1, \dots, v_5; r_0, r_1, r_2; s_0, s_1, s_2; p_1, p_2; q_1, q_2; l, d, m, h$ розраховуються за наступною обчислювальною схемою:

u_0	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	Суми (u)
v_0	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	Різниці (v)
u_0	u_1	u_2		v_1	v_2	[9, 11, 13 розрядів]
u_3	u_5	u_4		v_5	v_4	[10, 12, 14 розрядів]
r_0	r_1	r_2		p_1	p_2	Суми (r, p)
s_0	s_1	s_2		q_1	q_2	Різниці (s, q)
r_1	q_1					[10, 12, 14 розрядів]
r_2	q_2					
l	d					Суми (l, d)
m	h					Різниці (m, h)

Величини, які входять до остаточних формул, у цій схемі виділені напівжирним шрифтом. У квадратних дужках наведені розрядності абсолютних величин проміжних змінних при використанні 8-, 10- та

12-розрядних вхідних даних. Таким чином, максимальна розрядність цілочисельних змінних становить 15 біт, що дозволяє проводити проміжні обчислення над двобайтними операндами з використанням старшого 16-го розряду як знакового. Від’ємні числа подаються у додатковому коді.

Як видно з (7), у процесі обчислення деяких коефіцієнтів доводиться множити значення проміжних величин, розрахованих відповідно до наведеної обчислювальної схеми, на множник $\sqrt{3}/2$. При виконанні цієї дії цілочисельні проміжні величини перетворюються на ірраціональний дріб. Для обчислень у двійковому коді множник $\sqrt{3}/2$ замінимо числом обмеженої точності 0,8671875. При цьому відносна помилка

становитиме 0,134 %. Усі подальші обчислення проводяться у двійковій формі без округлення чи відкидання значущих біт, тобто без втрати точності. Дробова частина множника $\sqrt{3}/2$ у цьому наближенні виражається одним байтом (0,8671875d = ,DEh), тому розрядність дробової частини добутку також становить 8 бітів. При цьому молодший значущий біт добутку буде завжди нульовим, тому що нулю дорівнює молодший біт множника DEh = 1101110b.

У зв'язку з вищесказаним обчислення за формулами (7) слід виконувати в трибайтному знаковому форматі (рис. 7, а), причому молодший байт повинен виражати дробову частину числа.

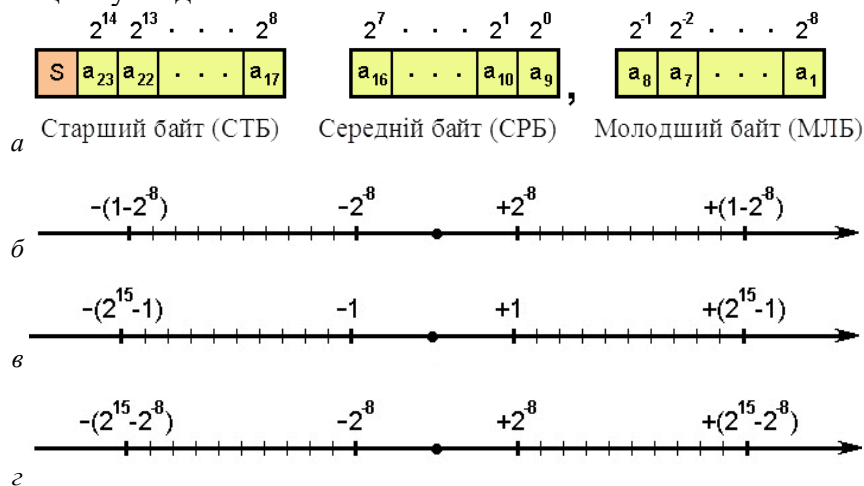


Рис. 7. Реалізація методу дискретних ординат для обробки даних віброакустичного контролю: а – трибайтний формат з фіксованою комою; б, в, г – діапазон дробової, цілої та суміщеної частин, відповідно

Таблиця 1

Діапазони зміни добутків коефіцієнтів ряду (6) на масштабний коефіцієнт $m_k = 6$

Коефіцієнт	$m_k \cdot a_0$	$m_k \cdot a_1$	$m_k \cdot a_2$	$m_k \cdot a_3$	$m_k \cdot a_4$	$m_k \cdot a_5$
Діапазон зміни	0... +5FFA'00h	±3BBC'44h	±3FFC'00h	±2FFD'00h	±3FFC'00h	±3BBC'44h
Коефіцієнт	$m_k \cdot b_5$	$m_k \cdot b_1$	$m_k \cdot b_2$	$m_k \cdot b_3$	$m_k \cdot b_4$	$m_k \cdot a_6$
Діапазон зміни	±3BBC'44h	±3BBC'44h	±377C'88h	±2FFD'00h	±377C'88h	±2FFD'00h

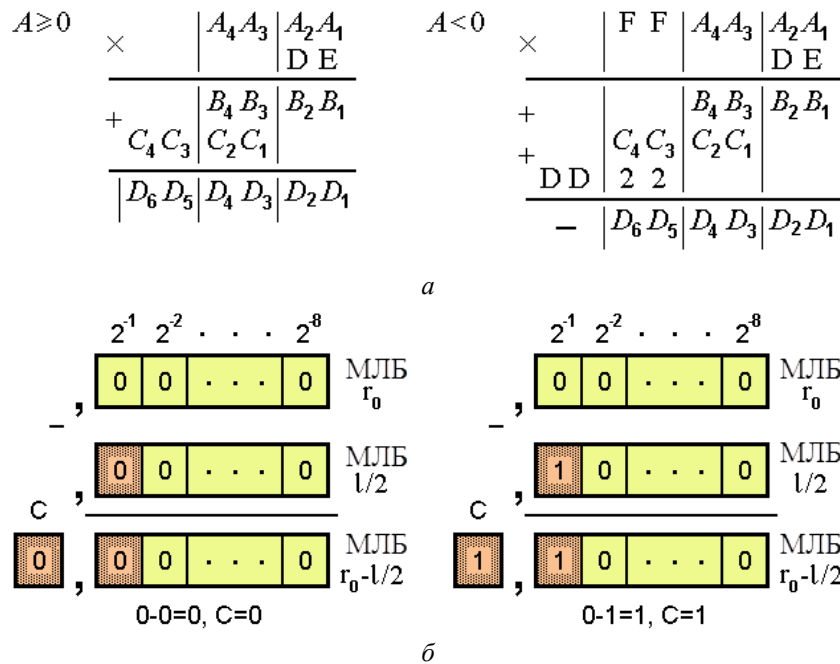
Розміщення чисел, що входять у діапазон, який визначається цим форматом, на числовій осі показано на рисунку 7, б. З метою прискорення обробки даних у режимі реального часу слід обчислювати значення коефіцієнтів ряду (6), помножених на масштабний коефіцієнт $m_k = 6$.

У таблиці 1 наведено діапазони зміни величин $m_k \cdot a_0, m_k \cdot a_1, \dots, m_k \cdot a_6; m_k \cdot b_1, m_k \cdot b_2, \dots, m_k \cdot b_5$ при максимальній розрядності зміщених вихідних даних. Як видно з таблиці, будь-які можливі значення коефіцієнтів ряду (6) входять до діапазону чисел, який визначається прийнятим

трибайтним знаковим форматом (рис. 7). Знаком апострофа (‘) у таблиці відокремлені молодші байти, що виражають дробову частину чисел.

Перший етап операції множення двобайтного знакового числа на одnobайтний позитивний множник $0,8671875d$ виконується за стандартним алгоритмом побайтним перемноженням, причому при роботі над старшим байтом

його знак зберігається в біті користувача. Після отримання модуля добутку у разі від’ємного множника до старшого байта результату додається $022h$ (рис. 8, а) і тим самим формується додатковий код результату в прийнятому трибайтному форматі [13]. Таким чином, стандартний алгоритм множення оптимізований для конкретного значення множника, форматів операндів та результату.



X_i – тетрада числа X ; $X_{i+1}X_i$ – байт числа X ; $A_4A_3A_2A_1$ – множинне; $0DEh = .8671875d$ – множник; $B_4B_3B_2B_1 = A_2A_1 \times 0DEh$; $D_6D_5D_4D_3D_2D_1$ – добуток у додатковому коді (МЛБ – дробова частина).

Рис. 8. Формування додаткового коду результату в прийнятому трибайтному форматі: а – множення двобайтного множника; б – формування молодшого байта результату

Наприклад, при використанні 12-розрядних вихідних даних модуль величини r_0+l виражається двома байтами, тобто відбувається заповнення біта знака. Тому, залежно від використовуваної розрядності N вихідних даних, змінюється алгоритм розрахунку коефіцієнта a_0 :

- при $N < 12$ заповнення знакового біта не відбувається і розрахунок проводиться за формулою $m_k a_0 = 0,5(r_0 + l)$;

- при $N = 12$ застосовується формула $m_k a_0 = 0,5r_0 + 0,5l$.

Обидві формули дають однаковий результат, але в останньому випадку перед додаванням проводиться зменшення розрядності цілої частини кожного з

доданків на один біт, що запобігає заповненню біта знака.

Дане рішення застосовується і для обчислення коефіцієнта a_6 :

- при $N < 12$ $m_k a_6 = 0,5(s_0 - m)$;

- при $N = 12$ $m_k a_6 = 0,5s_0 - 0,5m$.

Таким чином, подальший розвиток отримав метод цифрової обробки одиничних акустичних імпульсів, що відрізняється алгоритмами автоматичного аналізу спектрограм віброакустичного відгуку методом дискретних ординат шляхом циклічної обробки сигналу, розбиттям на часові інтервали, в межах кожного з яких зміна значення відхилення приймається за

період уявного незагасаючого коливального процесу.

Висновки

1. Визначені особливості реалізації методу спектрального аналізу для обробки даних віброакустичного контролю функціонування геотехнічної системи. Встановлено, що загасаючий аперіодичний сигнал можна розглядати як суперпозицію добутків уявних періодичних сигналів на зміщені одиничні прямокутні імпульси з тривалостями, рівними періодам відповідних періодичних сигналів. Спектр такого сигналу є сумою згорток прямих перетворень Фур'є уявних періодичних сигналів і прямокутних імпульсів. При цьому, критична частота першої моди коливань обернено пропорційна подвійній товщині досліджуваних елементів геотехнічної системи, що дозволяє автоматизувати контроль на основі спектрів виділених періодичних складових.

2. Для контролю характеристик імпульсних акустичних сигналів пропонується застосувати аналіз візуальних або умовних спектрів. На відміну від відомого раніше методу, де використовується одне вимірювання

протягом інтервалу розбиття та ручна побудова полів точок (базується на кореляційному зв'язку між реальним та апроксимованим ділянками синусоїд сигналів), пропонується використовувати серії точок на кожному з інтервалів часу зміни сигналу та проводити аналіз співвідношень між спектром реального аперіодичного сигналу та спектрами його уявних періодичних складових.

3. Подальший розвиток отримав метод цифрової обробки одиничних акустичних імпульсів, що призначений для автоматизації віброакустичного контролю за допомогою мікропроцесорних засобів. Метод відрізняється розробленими алгоритмами автоматичного аналізу спектрограм віброакустичного відгуку які оптимізовані для обчислень параметрів контролю методом дискретних ординат. Реалізація методу виконується шляхом послідовної циклічної обробки сигналу від високих частот до низьких з подальшим розбиттям на часові інтервали, в межах кожного з яких зміна значення відхилення приймається за період мнимого незагасаючого коливального процесу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Yalanskyi O. A., Bielikov A. S., Varabanov S. S., Slashchova O. A., Ikonnikov M. Yu. Identification of geomechanical and geotechnical structures using the vibroacoustic method for automated stability monitoring systems of ground buildings and mine workings. *Journal of Donetsk Mining Institute*. 2023. № 2 (53). Pp. 101–109.
2. Беліков А. С., Яланський О. А., Барабанов С. С., Слащова О. А., Іконніков М. Ю. Розробка моделей складних коливань для систем автоматизації віброакустичного контролю безпеки експлуатації будівель і споруд. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. № 3 (021). С. 7–18.
3. Slashchova O., Yalanskyi O., Slashchov I., Kurinnyi V. and Kulbach A. Fuzzy logic methods for risk management at mining enterprises. *IOP Conf. Ser. : Earth Environ. Sci.* 2023. Vol. 1156. P. 012015.
4. Slashchov I., Bielikov A., Kulbach A., Slashchova O. Forecasting the risks of the mine roadway destruction by the radiometric control method. *IOP Conf. Ser. : Earth Environ. Sci.* 2023. Vol. 1156. P. 012033.
5. Булат А. Ф., Слащова О. А., Слащов І. М., Стаднійчук М. М. Обґрунтування методів контролю геомеханічної безпеки на гірничих підприємствах. *Геотехнічна механіка*. 2020. № 150. С. 176–187.
6. Slashchov A., Yalanskyi O., Slashchov I., Siromaschenko I. Development of methods and software algorithms for state forecast of the ultimate stressed rock massif. *IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 970. P. 012010.
7. Walker J. S. *Fast Fourier Transforms*, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press. 1996. 464 p. ISBN 978-0849371639.
8. Wilson R. G. *Fourier Series and Optical Transform Techniques in Contemporary Optics*. New York : Wiley, 1995. 344 p. ISBN 978-0-471-30357-2.
9. Bajic Branko Methods for vibro-acoustic diagnostics of turbine cavitation. *Journal of Hydraulic Research*. 2003. № 41. Pp. 87–96.
10. Мандзій Б. А., Желяк Р. І. Основи теорії сигналів : навч. посіб. За ред. Б. А. Мандзія. Львів : ЛДКФ "АТЛАС", 2003. 152 с.
11. Gabriele D'Antona, Alessandro Ferrero. Digital signal processing for measurement systems: theory and applications. *Springer Science & Business Media*. 2006. Pp. 33–55.

12. Mishra S. C., Roy H. K., Misra N. Discrete ordinate method with a new and a simple quadrature scheme. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2006. № 101 (2). Pp. 249–262.

13. Ткачов В. В., Яланський О. А. Реалізація швидкого перетворення Фур'є методом дванадцяти ординат за допомогою однокристальних мікроконтролерів. *Гірнича електромеханіка та автоматика*. 1999. № 3 (62). С. 61–67.

REFERENCES

1. Yalanskyi O.A., Bielikov A.S., Barabanov S.S., Slashchova O.A. and Ikonnikov M.Yu. Identification of geomechanical and geotechnical structures using the vibroacoustic method for automated stability monitoring systems of ground buildings and mine workings. *Journal of Donetsk Mining Institute*. 2023, no. 2 (53), pp. 101–109. URL: <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2023-2-101-109>

2. Bielikov A.S., Yalanskyi O.A., Barabanov S.S., Slashchova O.A. and Ikonnikov M.Yu. *Rozrobka modeley skladnykh kolyvan' dlya system avtomatyzatsiyi vibroakustychnoho kontrolyu bezpeky ekspluatatsiyi budivel' i sporud* [Development of models complex oscillations for automation systems of vibroacoustic operational safety control of buildings and structures]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2024, no. 3 (021), pp. 62–72. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.040624.7.1055> (in Ukrainian).

3. Slashchova O., Yalanskyi O., Slashchov I., Kurinnyi V. and Kulbach A. Fuzzy logic methods for risk management at mining enterprises. *IOP Conf. Ser. : Earth Environ. Sci.* 2023, vol. 1156, p. 012015. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012015>

4. Slashchov I., Bielikov A., Kulbach A. and Slashchova O. Forecasting the risks of the mine roadway destruction by the radiometric control method. *IOP Conf. Ser. : Earth Environ. Sci.* 2023, vol. 1156, p. 012033. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012033>

5. Bulat A.F., Slashchova O.A., Slashchov I.M. and Stadnychuk M.M. *Obgruntuvannya metodiv kontrolyu heomekhanichnoyi bezpeky na hirnychyykh pidpryyemstvakh* [Substantiation of methods of geomechanical safety control in the mining enterprises]. *Heotekhnichna mekhanika* [Geotechnical Mechanics]. 2020, no. 150, pp. 176–187. URL: <https://doi.org/10.15407/geotm2020.150.176> (in Ukrainian).

6. Slashchov A., Yalanskyi O., Slashchov I. and Siromaschenko I. Development of methods and software algorithms for state forecast of the ultimate stressed rock massif. *IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science*. 2022, vol. 970, p. 012010. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012010>

7. Walker J.S. *Fast Fourier Transforms*, 2nd ed. Boca Raton, FL : CRC Press, 1996, 464 p. ISBN 978-0849371639.

8. Wilson R.G. *Fourier Series and Optical Transform Techniques in Contemporary Optics*. New York : Wiley, 1995, 344 p. ISBN 978-0-471-30357-2.

9. Bajic Branko. Methods for vibro-acoustic diagnostics of turbine cavitation. *Journal of Hydraulic Research*. 2003, no. 41, pp. 87–96. URL: <https://doi.org/10.1080/00221680309499932>

10. Mandziy B.A. and Zhelyak R.I. *Osnovy teorii syhnaliv : navch. posibnyk; za red. B.A. Mandziya* [Fundamentals of Signal Theory. Ed. by B.A. Mandziy]. Lviv : “ATLAS” Publ., 2003, 152 p. URL: https://antibotan.com/file.html?work_id=111190 (in Ukrainian).

11. Gabriele D'Antona and Alessandro Ferrero. *Digital signal processing for measurement systems : theory and applications*. Springer Science & Business Media. 2006, pp. 33–55. URL: <https://doi.org/10.1007/0-387-28666-7>

12. Mishra S.C., Roy H.K. and Misra N. Discrete ordinate method with a new and a simple quadrature scheme. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2006, no. 101 (2), pp. 249–262. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2005.11.018>

13. Tkachev V.V. and Yalanskyi O.A. *Realizatsiya shvydkoho peretvorennya Fur'ye metodom dvanadtsyaty ordynat za dopomohoyu odnokystal'nykh mikrokontroleriv* [Implementation of fast Fourier transform by the method of twelve ordinates using single-chip microcontrollers]. *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka* [Mining Electromechanics and Automation]. 1999, no. 3 (62), pp. 61–67. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 10.12.2024.