

УДК 621.3.089

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ДІАГНОСТИКА БЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ДОПОМОГОЮ АКУСТИЧНОГО ІМПАКТ-МЕТОДУ

*О. Р. Кучер<sup>1</sup>, В. А. Ровінський<sup>2\*</sup>*

<sup>1</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу 76019, м.Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15. *olga\_sun@ukr.net*

<sup>2</sup>ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника» 76018, м.Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57. *x.audio.info@gmail.com*

*В роботі розглянуті особливості діагностування бетонних конструкцій за допомогою акустичних низькочастотних коливань. Експериментально було підтверджено наявність модальних резонансів в зразках паралелепіподібної форми. Запропоновано алгоритм виділення інформаційних складових для визначення швидкості поширення акустичних коливань та модуля Юнга, який дозволяє полегшити пошук резонансних частот в плоских структурах.*

*Ключові слова: швидкість звуку, бетон, імпакт-метод.*

*В работе рассмотрены особенности диагностики бетонных конструкций с помощью акустических низкочастотных колебаний. Подтверждено экспериментально наличие модальных резонансов в образцах паралелепипедной формы. Предложенный алгоритм выделения информационных составляющих для определения скорости распространения акустических колебаний и модуля Юнга, который позволяет облегчить поиск резонансных частот в плоских структурах.*

*Ключевые слова: скорость звука, бетон, импакт-метод.*

*In this paper the features of concrete structures diagnostic by using the audio low-frequency oscillations are described. The existence of modal resonances in samples of a parallelepiped form was confirmed experimentally. An algorithm for extracting information components for determining the propagation velocity of acoustic vibrations and Young's modulus is proposed, which makes it possible to facilitate the search for resonant frequencies in planar structures.*

*Keywords: speed of sound, concrete, the impact method.*

### **Вступ.**

Важливою науково-технічною задачею є діагностування стану бетонних конструкцій. Це пов'язано з тим, що існує велика кількість несучих конструкцій та виробів з бетону, граніту, кераміки, яка використовується в промисловості та в об'єктах житлового та технічного призначення (наприклад шляхопроводи, несучі конструкції ліній мережевого сполучення, високонавантажені опори компресорних установок і систем охолодження, тощо). Технічний стан цих споруд та виробів нерідко визначає їх безпеку експлуатації. Розміри цих об'єктів визначають і вибір методів діагностування.

При проведенні діагностування об'єктів великого розміру можуть застосовуватись ультразвукові методи, проте внаслідок затухання ультразвуку, такі методи не можуть бути використані для виявлення дефектів, які

розміщені на відстані декількох метрів від приймача акустичного сигналу. [1,2] Ультразвукові та акустико-емісійні засоби діагностики залишаються доволі дорогими і малопоширеними, тому є потреба вивчити можливість застосування активних акустичних методів, оскільки вони не потребують дорогого обладнання для своєї реалізації. Акустичні методи для діагностування промислових конструкцій, в Україні представлені переважно методом контролю акустичної емісії навантажених споруд, проте за кордоном набув широкого застосування метод контролю внутрішнього відлуння об'єкту– імпакт-метод. Масове впровадження цього методу у вітчизняну промисловість, гальмується тим, що переважно бетонні конструкції, які підлягають діагносуванню, мають значно неоднорідну структуру бетону

### Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій.

Імпакт-метод - це давно існуючий метод неруйнівного контролю, відомий ще із стародавніх часів. Він використовується для діагностування стану не тільки керамічних чи бетонних але й металевих конструкцій. Приймачем акустичних сигналів може бути людське вухо, (наприклад простукування підшипникових опор колісних пар залізничних вагонів після прибуття поїзду) - в такому разі якість визначення дефектів визначається фаховим рівнем діагноста. В останні часи, в зв'язку з розвитком сучасної цифрової техніки стало можливим автоматизувати вимірювальні процеси і знизити вимоги до професійних навичок персоналу, які провадять діагностичні роботи. Імпакт метод в новітній інтерпретації став відомий, починаючи з 1986р, коли з'явилась перша робота, присвячена особливостям використання імпакт-методу [3]. Для збурення коливань в об'єкті дослідження переважно використовують ручні імпактори, які являють собою кульки закріплені на гнучких пружинах, або механічні імпактори, які являють собою соленоїди з електронним керуванням сили удару. За допомогою кулькового ударного механізму здійснюється нанесення ударів по поверхні. Сферична поверхня забезпечує нечутливість до кута, під яким здійснюється удар. В роботі [4] доводиться, що правильний вибір діаметру кульки має великий вплив на якість контролю, оскільки ідея методу полягає в потребі збудження в досліджуваному об'єкті коливань на резонансній частоті. При цьому амплітуда збуджених коливань, при ручному ударі залишається непомітною, навіть у випадку, якщо удар здійснює досвідчений оператор.

**Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Виявлення дефектів у випадку використання імпакт-методу здійснюється по чергово для кожної із сторін об'єкту, який досліджується. Більше того, ефективно метод може бути застосованим у випадку тонкостінних конструкцій, на зразок несучих бетонних стін.

У випадку об'єктів простої форми, якими є більшість серійних бетонних виробів, потрібно мінімізувати час їх діагностування. Тому є потреба в модифікації імпакт-методу для діагностування найпоширеніших об'єктів. Для станції промислового охолодження газу таке діагностування є можливим оскільки форма бетонної опори, на який розташований вентилятор охолодження, є простою геометричною фігурою - паралелепіпедом.

Оскільки акустичний імпеданс опори відрізняється від акустичного імпедансу ґрунту, в який заглиблена опора, стає можливим розглядати опору як акустичний резонатор з заданими власними частотами. У більшості випадків нам відомі сторони паралелепіпеда, тому стає можливим наближено розрахувати його власні резонансні частоти. У випадку наявного дефекту кількість резонансних смуг, які можуть бути виміряні за допомогою технічної системи діагностування, буде відрізнитись від еталона. Такими дефектами можуть бути внутрішні тріщини, які призводять до зміни дійсної геометричної форми бетонної опори, а, отже, і до зміни її резонансних частот.

Для прямокутних резонаторів резонансні частоти можуть бути пораховані за заданою [7] формулою, яка враховує геометричні розміри цих резонаторів, а також порядкові номери акустичних мод. Ці порядкові номери можуть бути  $(l, m, n) = [0, 1, 2, 3..N]$ , проте не всі з них нульові одночасно:

$$f = \frac{v}{2} \sqrt{\left(\frac{l}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2} \quad (1)$$

Таким чином, за наявної мінімальної і максимальної швидкості поширення акустичних хвиль конвертовані згідно до заданої формули можемо отримати мінімальну і максимальну резонансну частоту для заданої моди коливання, яка описує смугу частот в якій можливий резонанс. Більш точним є пряме вимірювання швидкості акустичної хвилі для конкретного заданого зрізця бетонної опори, проте внаслідок того, що швидкість поширення акустичних хвиль бетонні є високою, пряме вимірювання такої швидкості за допомогою вібродіагностичної системи діагностування не може бути достатньо точним у випадку, якщо геометричні розміри досліджуваного зрізця є малими. Тому технологічно корисним є метод визначення смуг амплітудо-частотної характеристики (АЧХ) досліджуваного бетонного зразка на основі попереднього вимірювання швидкості акустичних коливань в ньому, та розрахунку можливих резонансних частот опори. Такий метод може бути використаний для визначення резонансних інформативних смуг в АЧХ зразка в першому наближенні. Подальше спостереження за усередненими значеннями амплітуди в заданій смузі дозволить зробити висновок про наявність тріщин в бетонному зразку.

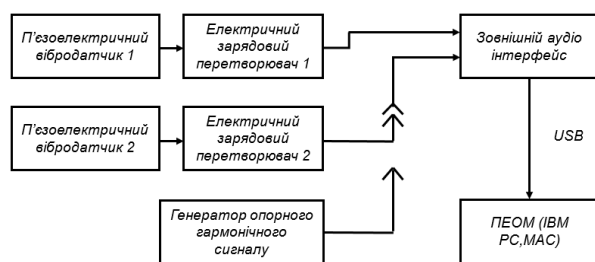
В залежності від технологічних особливостей виготовлення бетонної опори швидкість поширення акустичних хвиль в ній може значно відрізнитись. Відомо, що

мінімальна швидкість поширення акустичних хвиль у якісних бетонах складає 3000, а максимальна 5250 м/с. При цьому, чим більша поздовжня швидкість акустичних хвиль, тим вища міцність бетонних конструкцій. Область застосування даного методу визначається геометричними розмірами резонатора. Необхідно, щоб резонансні частоти потрапляли в частотний діапазон, який сприймається за допомогою аналого-цифрового перетворювача. У випадку застосування в якості аналого-цифрового перетворювача звукової плати комп'ютера, такий діапазон коливань, як правило, визначається в межах від 20 Гц до 96000 Гц. Причому у випадку, якщо геометричні розміри бетонної опори є достатньо малими, деякі резонансні частоти потрапляють поза межами робочого діапазону звукової плати.

Крім того, у випадку однакових геометричних розмірів бетонної опори (наприклад однакові ширина і довжина) модальні частоти такого резонатора накладаються. Таким чином, чим більша кількість незалежних резонансних смуг наявна в досліджуваній бетонній опорі, тим більш достовірними є результати діагностування.

Для одержання даних була розроблена експериментальна вимірювальна система. Система складається з наступних основних елементів (див. рис.1):

- П'єзоелектричних датчиків вібраційного сигналу;
- Електричних зарядових перетворювачів даних, які виконують функції буферних підсилювачів;
- Зовнішнього аудіоінтерфейсу, який під'єднується за допомогою шини USB до переносного персонального комп'ютера.



**Рисунок 1 – Структурна схема вимірювальної системи.**

Генератор опорного гармонічного сигналу служить для калібрування зовнішнього аудіоінтерфейсу в складі вимірювальної системи. Він генерує стабільний синусоїдальний сигнал амплітудою 0,775В і частотою 1кГц.

Перед початком вимірювання, аудіоінтерфейс під'єднується до генератора, після чого внутрішній мікшер комп'ютера встановлюється так, щоб загальний рівень вхідного сигналу становив 0 дБ. Таким чином стає можливим однозначно співвіднести величини віброприскорень зі значеннями відліків аналогово - цифрового перетворювача, і при цьому зміна моделі зовнішнього аудіоінтерфейсу незначно вплине на результати вимірювань.

В якості вібросенсора використовується перетворювач АВС 134-02 – високочастотний віброперетворювач, призначений для вимірювання віброприскорень і віброшвидкостей. Має кілька модифікацій, що утворюють уніфікований ряд [6].

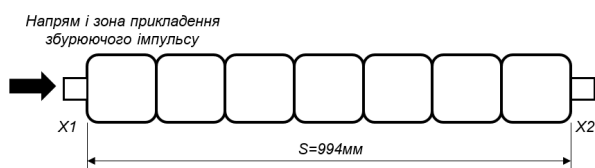
Дані, записані у вигляді аудіофайлів, обробляються за допомогою стороннього програмного забезпечення Octave [9]. Збурення імпульсних коливань може здійснюватись за допомогою вільного падіння сталевих кульок, або за допомогою імпактора. За допомогою експериментальної вібровимірювальної системи було проведено вимірювання вібрації тестового бетонного зразка розмірами 142x142x65мм.

Схема розташування сенсорів та дослідний взірець наведені на рис 2:



**Рисунок 2 – Розташування сенсорів на дослідному взірці.**

Для визначення швидкості поширення акустичних хвиль була складена пакетна схема вимірювань, яка складалась з 7 ідентичних бетонних блоків, взятих з однієї серії випуску і склеєних між собою тонким шаром ціаноакрилатного клею (див.рис.3). Таким чином невідомою швидкістю поширення акустичних коливань у клеєному шарі, товщиною меншою ніж 1мм кожен, можна знехтувати, оскільки основним матеріалом поширення акустичних хвиль в даному пакеті блоків є бетон.



**Рисунок 3 – схема експерименту для вимірювання швидкості акустичних хвиль в малогабаритних бетонних зразках.**

На торцях бетонного пакету наклеєні вібратори X1 та X2, які дозволяють проводити одночасний двоканальний запис сигналу із подальшим записом інформації в пам'ять ЕОМ. Таким чином утворений бетонний зразок містить 6 імітацій тріщин і дозволяє зменшувати їх кількість, шляхом від'єднання кінцевого блоку і переклеювання вібратора на торець пакету. Виміряні швидкості поширення акустичних коливань складають:  $v_{\min} = 2795$  [м/с],  $v_{\max} = 2970$  [м/с]. Розрахунок резонансних частот здійснюється згідно до програми написаної для виконання в середовищі Octave. Програма дозволяє розраховувати резонансні частоти для прямокутних резонаторів на основі залежності [1]. Вивід результатів здійснюється з прорідженням даних, тобто числові значення для однакових частотних смуг виводяться тільки один раз.

В результаті проведених дослідів здійснена перевірка співпадіння теоретично розрахованих частот для пакету з одного, двох та трьох блоків.

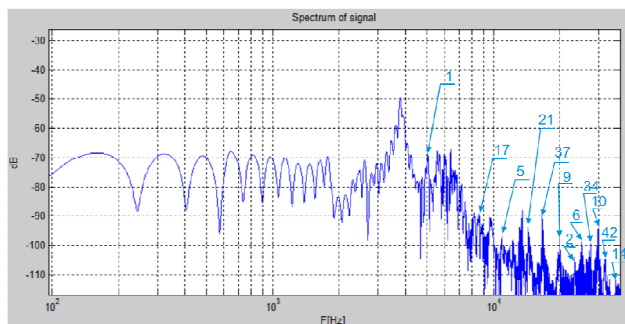
Результати розрахунку основних резонансних частот для випадку *двоблочного пакету*:

=====FINAL RESULT=====

(№)[i j k]	Fmin	Fmax
(1)[1 0 0]	4.903509e+03	5.210526e+03
(2)[1 0 1]	2.205208e+04	2.343280e+04
(3)[1 0 2]	4.327868e+04	4.598844e+04
(5)[1 1 0]	1.099548e+04	1.168392e+04
(6)[1 1 1]	2.414851e+04	2.566049e+04
(9)[1 2 0]	2.028469e+04	2.155475e+04
(10)[1 2 1]	2.955873e+04	3.140946e+04
(14)[1 3 1]	3.685104e+04	3.915835e+04
(17)[2 0 0]	9.807018e+03	1.042105e+04
(21)[2 1 0]	1.389366e+04	1.476356e+04
(34)[3 0 1]	2.605090e+04	2.768200e+04

(37)[3 1 0] Freq = <1.769903e+04 1.880720e+04>  
+  
(42)[3 2 1] Freq = <3.265079e+04 3.469511e+04>  
+  
(46)[3 3 1] Freq = <3.937454e+04 4.183985e+04>

Результати вимірювання ударного спектру наведені на рис.4. На рисунку 4 відмічені номери вершин резонансних частот, одержані в результаті розрахунку. Як можна бачити, на графіку наявні 12 з 14 теоретично розрахованих резонансних частот.



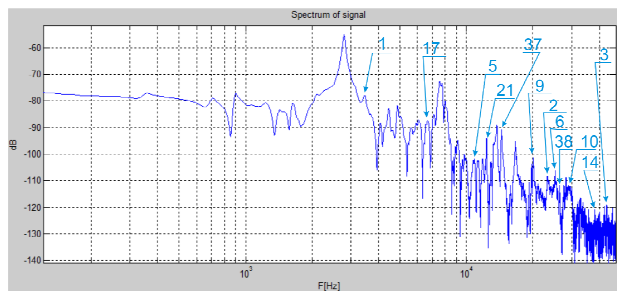
**Рисунок 4 –Спектр імпульсної характеристики двоблочного пакету.**

Результати розрахунку основних резонансних частот для випадку *триблочного пакету*:

=====FINAL RESULT=====

(№)[i j k]	Fmin	Fmax
(1)[1 0 0]	3.288235e+03	3.494118e+03
(2)[1 0 1]	2.175000e+04	2.311181e+04
(3)[1 0 2]	4.312554e+04	4.582571e+04
(5)[1 1 0]	1.037635e+04	1.102603e+04
(6)[1 1 1]	2.387297e+04	2.536770e+04
(9)[1 2 0]	1.995587e+04	2.120535e+04
(10)[1 2 1]	2.933406e+04	3.117071e+04
(14)[1 3 1]	3.667107e+04	3.896711e+04
(17)[2 0 0]	6.576471e+03	6.988235e+03
(21)[2 1 0]	1.183664e+04	1.257775e+04
(37)[3 1 0]	1.393444e+04	1.480690e+04
(38)[3 1 1]	2.562067e+04	2.722482e+04

Як видно на рисунку представлені всі можливі теоретично розраховані резонансні частоти. Деякі з них наближені по частоті з іншими резонансними піками, поява яких зумовлена іншими фізичними чинниками: неідеальністю форми зразка, наявністю паразитних включень, власними резонансами речовини, тощо.



**Рисунок 5 –Спектр імпульсної характеристики триблочного пакету.**

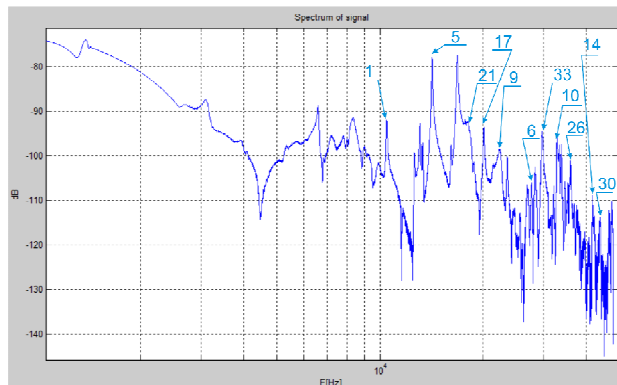
Тому аналіз наявності дефектів в бетонних конструкціях необхідно проводити на основі розгляду частотних смуг, де окремі резонансні піки відокремлені від інших за допомогою смугопропускних фільтрів. Необхідний порядок таких фільтрів можна визначити на основі аналізу рисунку 5.

Для одного елемента пакету будемо мати наступні теоретично розраховані резонансні частоти:

=====FINAL RESULT=====

(№)[i j k]	Fmin	Fmax
(1)[1 0 0]	Freq = <9.982143e+03	1.060714e+04>
(2)[1 0 1]	Freq = <2.534058e+04	2.692720e+04>
(5)[1 1 0]	Freq = <1.411688e+04	1.500077e+04>
(6)[1 1 1]	Freq = <2.723579e+04	2.894107e+04>
(9)[1 2 0]	Freq = <2.232075e+04	2.371829e+04>
(10)[1 2 1]	Freq = <3.226016e+04	3.428002e+04>
(14)[1 3 1]	Freq = <3.922924e+04	4.168546e+04>
(17)[2 0 0]	Freq = <1.996429e+04	2.121429e+04>
(26)[2 2 1]	Freq = <3.660119e+04	3.889286e+04>
(30)[2 3 1]	Freq = <4.287030e+04	4.555449e+04>
(33)[3 0 0]	Freq = <2.994643e+04	3.182143e+04>

Спектрограма виміряна для даного зразка наведена на рис.6

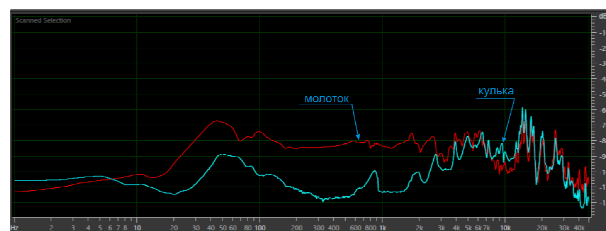


**Рисунок 6 –Спектрограма одноблочного пакету.**

Як видно, на рисунку представлені всі можливі 11 теоретично розрахованих резонансні частоти. Таким чином можемо зробити висновок, що оскільки на досліджуваних АЧХ присутні додаткові резонанси, викликані окрім власних резонансів іншими чинниками, для створення алгоритму діагностування для об'єктів з відомими резонансними частотами, доцільно при порівнянні з еталонними АЧХ розглядати тільки заздалегідь теоретично визначені резонансні зони.

**Вплив способу збудження коливань.**

Спосіб збудження коливань в досліджуваному об'єкті впливає на форму спектру, що визначає амплітудно-фазову характеристику об'єкту (АЧХ). Це пояснюється тим, що в залежності від того, яким предметом було викликане збурення хвиль, контактний час зіткнення ударного предмету і матеріалу об'єкта дослідження різний. Різна також форма ударних предметів і їх контактна форма. Для прикладу розглянемо АЧХ, одержані на одному бетонному зразку вагою 5,6кг при однаковому розташуванні вібраторів:



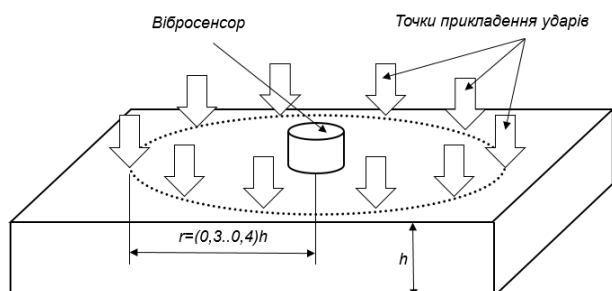
**Рисунок 7 –АЧХ бетонного зразка при різних способах збурення.**

Як видно, АЧХ одержана при збуренні хвиль молотком, вагою 430г, має більше низькочастотних складових, ніж при збуренні кулькою вагою 7,9г. Як встановлено експериментально, в деяких випадках, АЧХ одержані за допомогою молотка можуть мати більший загальний рівень амплітуди на низьких частотах, ніж на високих, що спричиняє неоднозначності в інтерпретації одержаних даних.

**Виділення інформативних складових з експериментальних даних.**

У випадках малогабаритних об'єктів, та у випадку низькоякісних бетонних структур з нерівномірним вмістом заповнювача, визначення товщини досліджуваного об'єкту на основі резонансних вимірювань може містити складності визначення резонансних частот. При наявності значних неоднорідностей в середині досліджуваної поверхні, значення глибини, одержане на основі частотного аналізу одного

імпульсу, може значно відрізнитися від реального, оскільки в межах контактних площ вібросенсора та імпактора існують шляхи поширення акустичних коливань які відрізняються від прямолінійних. Внаслідок цього, в більшості випадків мають місце незначні відхилення резонансних піків по частоті, та значні розкиди їх амплітуд. Оскільки фіксація вібросенсора може здійснюватись стаціонарно за допомогою клеєвих з'єднань, його переміщення по досліджуваній поверхні не завжди технологічно допустимо. Натомість зона контакту імпактора може бути довільно зміщена у відповідності до технологічних потреб.



**Рисунок 8 – Схема експерименту для визначення резонансної частоти.**

На основі експериментальних даних встановлено, що багатократне ударне зондування досліджуваного об'єкту в радіусі  $r \in (0,3..0,4)h$  де  $h$ - його товщина, дозволяє збільшити кількість достовірної інформації, на підставі якої можна визначити основні характеристики матеріалу: швидкість поширення акустичних коливань, модуль Юнга, та здійснювати прогноз щодо міцності досліджуваного зразка. Схема експерименту наведена на рис.8.

Такий спосіб може бути застосований у випадку неможливості прямого використання тінювого методу. При цьому швидкість акустичних хвиль в бетоні може бути визначена на основі аналізу його резонансних характеристик у відповідності до стандарту C1383-04 (США):

$$h = \frac{v_p}{2 \cdot f}, \quad (2)$$

де  $f$  – резонансна частота, утворена внаслідок багатократних відбивань на товщині матеріалу  $h$ . Якщо акустичний опір матеріалу, який дотикається до відбивної поверхні дослідного зразка суттєво вищий за акустичний опір бетону, (наприклад чавун або сталь), то формула набуває наступного вигляду [4]:

$$h = \frac{v_p}{4 \cdot f} \quad (3)$$

Дослідним шляхом встановлена кількість ударів, необхідних для чіткого встановлення резонансного максимуму. Для цього було проведено 5 дослідів з кількістю ударів по колу 31. Шляхом відкидання надлишкових експериментальних даних встановлено, що кількість ударів повинна бути не меншою ніж 16, причому удари необхідно наносити рівномірно по околу навколо вібросенсора. Для полегшення процесу автоматичного аналізу даних, необхідно забезпечити виділення максимуму робочої резонансної частоти. Для цього пропонується:

1) Зменшити недетерміновану складову розрахованих АЧХ, шляхом обчислення швидкого перетворення Фур'є  $S(\omega)$  від автокореляційної функції  $R(t)$  кожного  $i$ -го виміряного імпульсу  $x(t)$ :

$$S(t)_i = \frac{1}{2\pi} \int_0^T R(t)_i e^{-j\omega t} dt \quad (4),$$

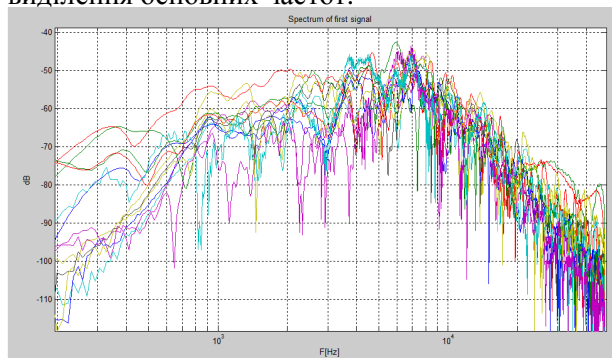
де АКФ визначається як:

$$R(t)_i = \frac{1}{2\pi} \int_0^T \dot{x}(t)x(t+\tau)dt \quad (5)$$

Одержані АЧХ від АКФ сигналу необхідно перетворити в модифікований спектр шляхом нелінійного об'єднання АЧХ за допомогою наступної залежності:

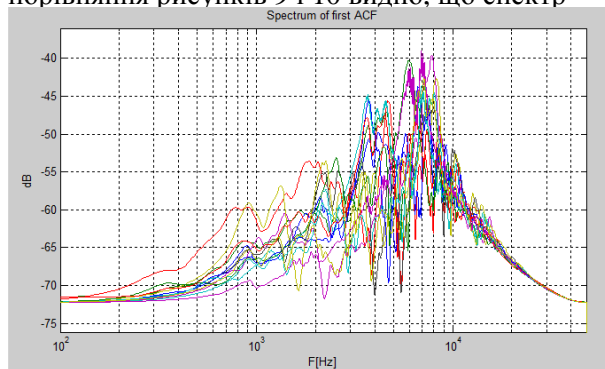
$$SE(\omega) = k^{\log_{10}|\Sigma S(\omega)|}, \quad (6)$$

Тут  $k \in [1,01..100]$  – коефіцієнт деформації, за допомогою якого здійснюється представлення модифікованого спектра в вигляді зручному для виділення основних частот.

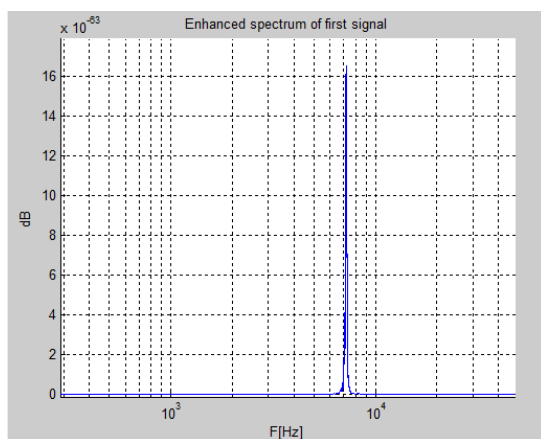


**Рисунок 9 – Спектри сигналів, одержані в результаті багаторазових ударів навколо приймального вібросенсора.**

Для ілюстрації функціонування запропонованого методу проведемо аналіз одних і тих самих даних одержаних при зондуванні дослідного зразка - залібетонної плити товщиною 330мм. На рисунку 9 наведені спектри досліджуваного зразка без застосування автокореляційної функції. З аналізу рисунку 9 видно, що спектри сигналів мають не чітко виражені резонансні максимуми, при цьому деякі з них мають стохастичний характер, тому застосування автокореляційної функції може їх послабити і виділити тільки ті, які мають детерміновану складову. Приклад застосування АКФ початкового сигналу перед операцією ШПФ шляхом послідовного застосування виразів (4) і (5) наведений на рис 10. З порівняння рисунків 9 і 10 видно, що спектр



**Рисунок 10 – Спектри АКФ сигналів, одержані в результаті багаторазових ударів навколо приймального вібросенсора.**



**Рисунок 11 – Модифікований спектр АКФ сигналу при k=8.**

АКФ сигналу має більш чітко виділені максимуми, проте аналіз розподілу амплітуд продовжує залишатись неоднозначним завданням.

Для усунення неоднозначностей і утворення діаграми зручної для аналізу, застосуємо

залежність (6). Результати розрахунків при значення k=8 наведені на рис.11:

Аналіз модифікованого спектру, наведеного на рис.11 є однозначним процесом. Для деталізації дрібніших складових спектру необхідно зменшувати коефіцієнт  $k$ .

## ВИСНОВКИ

Таким чином експериментально було підтверджено наявність модальних резонансів в зразках паралелепіпідної форми і визначено вплив джерела збудження коливань на характер одержаних спектрів. Крім того запропоновано алгоритм виділення інформаційних складових для визначення швидкості поширення акустичних коливань та модуля Юнга, який дозволяє полегшити пошук резонансних частот. Одержана інформація може бути використана для побудови систем автоматичного діагностування.

1.Кучер О.Р., Ровінський В.А., Модифікація методу вимірювання швидкості зсувних коливань у бетонних конструкціях. // Методи та прилади контролю якості.-2016.- № 2(37).- С. 72-78. 2.Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Козлов В.Н. Ультразвуковая дефектоскопия бетона эхо-методом: состояние и перспективы // В мире НК. 2002. № 2(16). С.6-10. 3.Sansalone M., Carino N.J.,1986, "Impact-Echo:A Method for Flaw Detection in Concrete Using Transient Stress Waves",NBSIR 86-3452,National Bureau of Standards,Sept.,222. 4.Carino N J. "The impact-echo method: an overview", Proceedings of the Structures Congress & Exposition, May 21-23, 2001, Washington, D.C.,American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, Peter C. Chang, Editor,2001.18 p. 5.Stultz G.R., Bono R.W., Schiefer M. I. Fundamentals of Resonant Acoustic Method NDT // Advances in powder metallurgy and particulate materials.2005. № 3. p. 1-11. 6.«ANS-114,» 26 1 2015. [Онлайновий]. <http://npoit.ru/products/item/low/ahc-114>. 7.«Acoustic\_resonance,» 24 1 2015. [Онлайновий]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Acoustic\\_resonance](http://en.wikipedia.org/wiki/Acoustic_resonance).

Поступила в редакцію 04.05.2017 р.

Рекомендували до друку: докт.техн.наук, проф. Юрчишин В.М., докт. техн. наук, проф. Олійник А.П.