

## МЕТОДИ І ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

УДК 621.3.089

### МОДИФІКАЦІЯ МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ПОШИРЕННЯ ЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ В БЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЯХ

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 вимірювання швидкості акустичних низькочастотних коливань в бетонних конструкціях поверхневим методом з використанням аналогово-цифрових перетворювачів звукового діапазону. Запропоновано використовувати апроксимацію Гауса гістограми серії вимірювань з метою підвищення точності визначення затримки поширення звукового сигналу між двома вібраторами. Розглянутий метод дозволяє підвищити точність вимірювання відстані до дефекту у випадку використання імпакт-методу, як основного методу діагностування. Це дозволить будувати дешеві системи діагностування за рахунок використання аналого-цифрових перетворювачів звукового діапазону. Одержані дані про швидкість поширення акустичних коливань можуть бути використані також і в резонансному методі діагностування бетонних об'єктів.*

*Ключові слова: швидкість звуку, бетон, аналого-цифровий перетворювач, імпакт-метод, резонансний метод.*

*В работе рассмотрены особенности измерения скорости акустических низкочастотных колебаний в бетонных конструкциях поверхностным методом с использованием аналогово-цифровых преобразователей звукового диапазона. Предложено использовать аппроксимацию Гаусса гистограммы серии измерений с целью повышения точности определения задержки распространения звукового сигнала между двумя вибраторами. Рассмотрен метод позволяет повысить точность измерения расстояния до дефекта в случае использования импакт-метода, как основного метода диагностики. Это позволит строить дешевые системы диагностирования за счет использования аналого-цифровых преобразователей звукового диапазона. Полученные данные о скорости распространения акустических колебаний могут быть использованы также и в резонансном методе диагностирования бетонных объектов.*

*Ключевые слова: скорость звука, бетон, аналого-цифровой преобразователь, импакт-метод, резонансный метод.*

*In this paper the features of acoustic vibration speed measurement in concrete structures by using the audio analog-to-digital converters are described. A Gaussian histogram approximation of series measurements was proposed to improve the accuracy of the propagation delay between the two vibrosensors. The considered method can improve the accuracy of measuring the distance to a defect when using impact method as the main method of diagnosis. This allows to build a cheap diagnostic system using analog to digital converters in sound frequency range. The data on the speed of propagation of acoustic oscillations can also be used in the resonance method of diagnosing concrete objects.*

*Keywords: speed of sound, concrete, analog-to-digital converter, the impact method, resonance method.*

**Вступ.** Діагностування стану бетонних конструкцій а також виробів із природного та штучного каменю є важливою науково-технічною задачею. Це пов'язано з тим, що існує велика кількість виробів та несучих конструкцій із бетону, граніту, мармуру, кераміки, яка використовується в спорудах житлового та технічного призначення (наприклад: мости, опори ліній електропередач, електричні ізолятори, тощо). Стан цих споруд та виробів нерідко визначає безпеку технічних об'єктів, а значить і безпеку суспільства. Розміри їх теж можуть суттєво відрізнятись – від декількох сантиметрів, до декількох десятків метрів, що накладає свої особливості на вибір методів діагностування. Методи діагностування бетонних об'єктів залежать від розмірів цих об'єктів і від їх нормальної однорідності. Для дігностування таких об'єктів, можуть застосовуватись ультразвукові методи, проте внаслідок значного затухання ультразвуку, такі методи не можуть бути використані для виявлення дефектів, які розміщені на відстані декількох метрів в глибині досліджуваної конструкції. [1,2] Крім того, ультразвукове обладнання все ще залишається доволі високоартісним, тому є потреба дослідити можливість застосування та вдосконалення активних акустичних методів діагностування, оскільки такі методи не потребують складного і дорогого обладнання для своєї реалізації. Неультразвукові акустичні методи для діагностування бетонних конструкцій, у вітчизняній практиці, представлені переважно методом контролю акустичної емісії навантажених конструкцій. За кордоном набули широкого застосування метод контролю внутрішнього відлуння об'єкту на основі ударного збурення – імпакт-метод (impact-echo method), та резонансний метод. Відсутність масового впровадження цього методу у вітчизняну промисловість, як і у промисловість країн СНД, зумовлена переважно відсутністю конструкцій із однорідною структурою бетону. Бетони, які застосовуються при виробництві будинків і промислових споруд переважно містять значну кількість різносортних наповнювачів: камінь, щебінь, тощо, що призводить до розсіювання та затухання акустичних коливань і спричиняє значні труднощі для процесу діагностування. Компенсація втрати міцності бетонних виробів, здійснюється, в основному, за рахунок збільшення їх геометричних розмірів.

**Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій** Акустичний імпакт-метод, це найбільш давній

метод неруйнівного контролю. В стародавні часи за чистотою звучання визначали якість скляних і керамічних виробів. Приймачем акустичних сигналів було людське вухо, а якість визначення дефектів, було суб'єктивним. З появою в широкому вжитку аналогово-цифрових перетворювачів, та з розвитком сучасної цифрової техніки стало можливим автоматизувати вимірювальні процеси і знизити суб'єктивність постановки діагнозу. В 1986р з'явилась перша робота, присвячена особливості використання імпакт-методу [3]. В 1998 році, імпакт-метод був прийнятий в якості стандарту в США для контролю якості бетонних споруд. Для збурення коливань в об'єкті дослідження переважно використовують кулькові імпаکتори, які являють собою кульки закріплені на гнучких пружинах. За допомогою кульки здійснюється нанесення ударів по поверхні. Сферична поверхня забезпечує нечутливість до кута, під яким здійснюється удар. В роботі [4] доведено, що правильний вибір діаметру кульки має великий вплив на якість контролю, оскільки основа ідея методу полягає в тому, щоб збудити в досліджуваному об'єкті коливання на резонансній частоті. При цьому амплітуда збуджених коливань, при ручному ударі залишається непостійною, навіть у випадку, якщо удар здійснює досвідчений оператор, тому в більш точних установках використовуються механічні імпаکتори. Резонансний метод відрізняється від імпакт-методу тим, що в досліджуваному об'єкті збуджуються незатухаючі коливання на основній частоті. Це дозволяє збільшити відношення сигнал/шум, і покращити виділення інформації про можливий дефект, проте значно ускладнює діагностичне обладнання, яке потребує потужного керованого генератора коливань. Крім того, використання резонансного методу вимагає мінімум 30-50сек, для проведення вимірювального процесу.

**Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Аналіз на предмет наявних 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 (циліндр, паралелепіпед), якими є більшість серійних бетонних виробів, потрібно мінімізувати час їх діагностування. Тому є потреба в модифікації імпакт методу для діагностування найпоширеніших паралелепіпедних об'єктів.

Дана проблема передбачає розв'язання

допоміжного завдання – точного вимірювання швидкості поширення акустичних хвиль в бетоні. Це зумовлено тим, що швидкість поширення коливань в бетоні значно залежить від його механічних характеристик, (в першу чергу від його міцності) і має значний розкид результуючих значень, внаслідок анізотропних властивостей самого середовища. Таким чином для кожного досліджуваного екземпляра існує власна швидкість проходження звукових хвиль. Сигнал при поширенні хвиль в такому середовищі значно змінює свою форму, оскільки приймальний сенсор спочатку реагує на поздовжні хвилі, а потім на інші типи хвиль, які мають нижчі швидкості поширення. При цьому мають місце багатократні відбивання від границь бетонного об'єкту, та інтерференційні явища. Для збудження акустичних коливань може бути використаний ударний об'єкт: молоток з заокругленим торцем робочої поверхні або металева кулька. Наявність сферичної форми необхідна для забезпечення однорідності створення звукових імпульсів, що не залежить від кута зіткнення ударного об'єкту і досліджуваної поверхні. У випадку використання кульки, додатково, стає можливим забезпечити однаковий ударний імпульс в разі, якщо кулька буде кинута з однакової висоти під час кожного з експериментів. Однак на для всіх випадків форма імпульсного збурення за допомогою кульки є можливою – наприклад коли досліджуваний об'єкт не забезпечений доступом до його верхньої поверхні, або та поверхня не є плоскою, має малу площу або розташована на значній висоті і є недосяжною для експериментатора. Крім того, внаслідок того, що бетонна поверхня, особливо у випадку наявності значної кількості великогабаритного наповнювача (щебінь, каміння великого розміру) має негладку контактну площину, одержати ідентичні за своїми характеристиками імпульси - важко. Формування таких імпульсів відбувається по-різному в залежності від того, в яку зону бетонної поверхні потрапляє ударний об'єкт – в зону наповнювача, в зону арматури чи в зону зв'язуючої речовини. Для цих випадків твердість досліджуваної поверхні буде різною (природний камінь, сталь і цементно-пісочна суміш), і як наслідок форма генерованих імпульсів буде дещо відрізнятись. Ширина спектру ударного імпульсу, зворотно-пропорційна до часу контакту ударного елемента (імпактора) з досліджуваною поверхнею. Для того, щоб частота резонансу була виразно присутня у виміряній АЧХ, необхідно, щоб час контакту при ударі

відповідав умові:

$$\tau < \frac{1}{f} \quad (1)$$

де  $f$ -частота резонансу.

Структура акустичного поля генерованого ударом зовнішнього об'єкту, одержана внаслідок комп'ютерного моделювання методом кінцевих елементів, наведена на рис 1.[4]

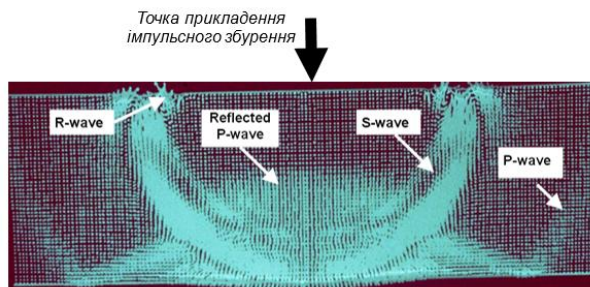
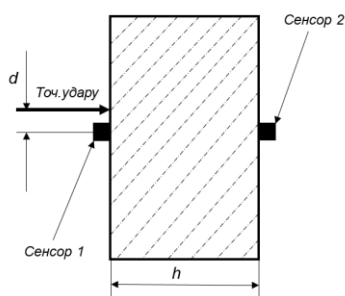


Рисунок 1 – Структура акустичного поля, генерованого ударом

На рисунку наведено поширення акустичних хвиль в перерізі бетонного зразка. Можемо спостерігати виникнення хвиль різних основних типів: Р-хвиля (поздовжні коливання) S-хвилі, (поперечні хвилі, тобто хвилі зсуву) та R-хвилі (хвилі Релея). Видно, що поздовжні коливання мають більшу швидкість у порівнянні з іншими типами акустичних хвиль, можуть відбиватись від границь матеріалу і мають тенденцію до вирівнювання фронту свого поширення з віддаленням від точки утворення. Таким чином, при сприйнятті вібросенсорами можливе пряме вимірювання швидкості поширення Р-хвиль, шляхом вимірювання кількості відліків АЦП між появами двох одночасно записаних вібросигналів. Схема такого методу вимірювання наведена на рис.2. [5]

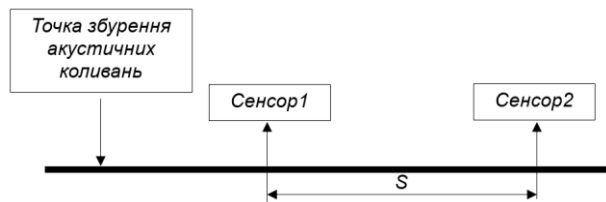
Точковий удар по досліджуваному зразку здійснюється на мінімальній відстані  $d$  від вібросенсора №1, при цьому виконується умова  $d \ll h$ . Таким чином можна вважати, що відстань  $h$  визначає затримку між імпульсами, за рахунок поширення акустичних хвиль у бетоні.

У випадку неможливості застосування тінювого методу, швидкість поширення акустичної хвилі може визначатись шляхом вимірювання запізнювання сигналу між показами двох вібросенсорів, розташованих на одній геометричній лінії на відстані  $S$  один від одного.



**Рисунок 2 – Схема тінювого методу вимірювання швидкості звуку**

У випадку, якщо збурення акустичної хвилі проводилось імпульсним способом шляхом подачі імпульсу в точку досліджуваного зразка, що також розміщена на згаданій геометричній лінії, однак розташована поза межами двох вібросенсорів (див. рис. 3).



**Рисунок 3 – Схема поверхневого методу вимірювання швидкості звуку**

Розглянемо функціонування методу вимірювання швидкості на прикладі бетонного блоку розмірами: 2310x390x570мм. Зовнішній вигляд такого блоку наведено на рис.4.



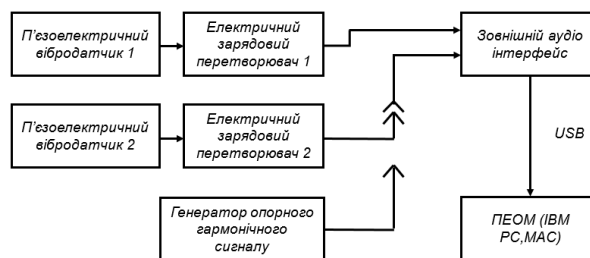
**Рисунок 4 – Зовнішній вигляд досліджуваного бетонного блоку**

Для одержання даних була розроблена експериментальна вимірювальна система. Система призначена для одержання попередніх даних, які стосуються стану досліджуваних об'єктів, з метою вироблення методів та алгоритмів діагностування, які будуть використані при розробленні стаціонарної системи діагностування бетонних конструкцій.

Система складається з наступних основних

елементів (див. рис.5):

- 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 5 – Структурна схема вимірювальної системи**

Сигнали від п'єзоелектричного датчика надходять на електричний зарядовий перетворювач, який здійснює підсилення слабкого електричного сигналу до рівня, достатнього для беззадової передачі до зовнішнього аудіо інтерфейсу, де аналоговий сигнал оцифровується і надходить на вхід персонального комп'ютера. Генератор опорного гармонічного сигналу служить для калібрування зовнішнього аудіоінтерфейсу в складі вимірювальної системи. Він генерує стабільний синусоїдальний сигнал амплітудою 0,775В і частотою 1000 Гц. 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 співвідносити 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]. Чутливий елемент віброперетворювача – згинального типу. Відмітна особливість віброперетворювача – висока заводськість. Корпус віброперетворювача герметично ущільнений, виконаний з титанового сплаву.

В якості переносного аудіо інтерфейсу

можна використати Native Instruments Komplete Audio 6 [7]. Дані, записані у вигляді аудіофайлів, обробляються за допомогою стороннього програмного забезпечення (Matlab [8] або сумісного з ним вільного програмного забезпечення Octave [9]). Збурення імпульсних коливань може здійснюватись за допомогою вільного падіння сталених кульок, або за допомогою імпактора, який являє собою сталю кульку зафіксовану на кінці пружини (див. рис.6).

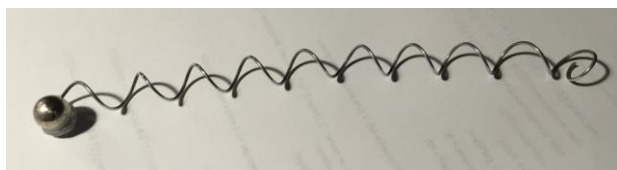


Рисунок 6 – Імпактор. Зовнішній вигляд

Останній дозволяє підвищити енергію удару при використанні кульки невеликого діаметру. За допомогою такого пристрою можна здійснювати сильні короткі удари по поверхні досліджуваного об'єкту формуючи імпульсні збурення, які можуть бути використані для побудови імпульсної характеристики.

На рисунку 7 наведені виміряні імпульси, одержані з вібросенсорів, які розташовані на меншій та більшій відстані від імпульсного джерела збурення.

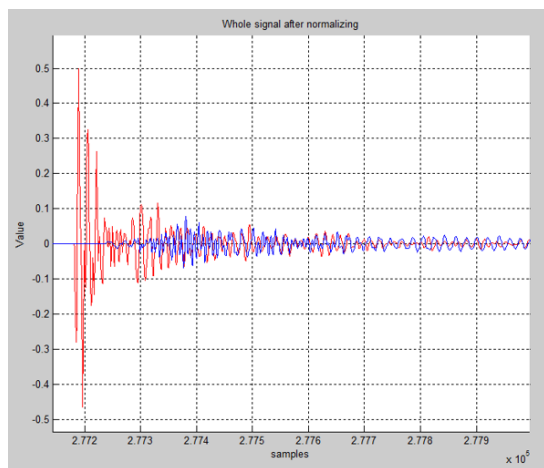


Рисунок 7 – Форма імпульсів з виходу першого та другого вібросенсорів

Видно, що вібросенсор 1, який розташований ближче до джерела збурення, продукує сигнал більший за амплітудою, ніж сигнал з вібросенсора 2 який розташований на відстані 2,31м. В цьому разі амплітуда сигналу в загальному значно нижча. Крім того процес

наростання сигналу є плавним, тому важко встановити безпосередньо часову різницю між фронтами сигналу, крім того, сигнал, який пройшов через бетонне середовище, може мати нечіткий флюктуаційний фронт, що ускладнює його виявлення на фоні шумів. Також за допомогою ударного неавтоматизованого інструменту важко наносити удари однакової амплітуди для заданого об'єкту і в одну і в ту ж точку бетону, тому будь-які зміщення відносно початкової зони призводять до зміни форми сигналу яка одержується на виходах вібросенсорів.

Для усунення можливих флюктуацій фронту доцільно провести ковзне згладжування модуля сигналу у відповідності до наступної залежності:

$$SMA_t = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} p_{t-i} \quad (2)$$

Розмір вікна згладжування вибирається в залежності від вибраної частоти дискретизації. У випадку, якщо частота дискретизації менша ніж 96кГц, розмір вікна вибираємо 2 точки, проте, якщо частота дискретизації рівна 96кГц і вище, то розмір вікна розраховуємо з залежності:

$$n = 3 \cdot \left\lceil \frac{F_s}{96 \cdot 10^3} \right\rceil \quad (4)$$

При фіксації фронту імпульсу виберемо порогове значення, яке рівне десятикратному середньому значенню шумового сигналу, знятого за умови відсутності імпульсного збурення на протязі 10тис відліків частоти дискретизації, окремо для першого та другого каналу:

$$S_{Lim} = 10 \cdot \text{mean} \left[ S_{i=1..10000} \right] \quad (5)$$

Оскільки тестові імпульсні сигнали мають широкі межі амплітуди, перед вимірюваннями параметрів імпульсів необхідно провести їх нормування, шляхом введення нормуючого множника, таким чином, щоб перші імпульси мали максимальну амплітуду 0.5, а другі були підсилені/послаблені на ту ж саму величину, що і перші. Приклад таких огинаючих наведений на рис 8:



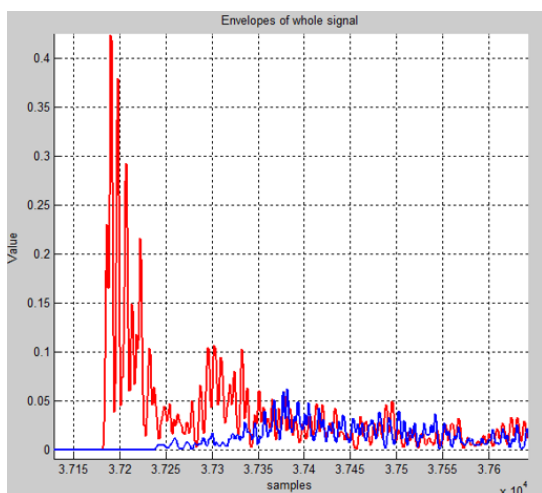


Рисунок 8 – Форма огинаючої імпульсів з для першого та другого вібрисенсорів

Експериментально одержані, дані зсуву між початками даних сигналів (205 відліків АЦП).

Побудуємо одержані дані у вигляді гістограми. Кількістю інтервалів гістограми, визначається за формулою Стерджеса:

$$k = \lceil \log_2 n \rceil = \lceil \log_2 205 \rceil = 9 \quad (6)$$

При побудові гістограми відкидаємо різниці значення, які можна вважати «промахами». Ці значення забезпечують швидкості, які не мають фізичної реалізованості для бетону:  $3 \cdot 10^3 \leq v_p \leq 5,7 \cdot 10^3$  м/с.

Виникнення їх зумовлене аномальними процесами під час вимірювання, зумовленим зовнішнім паразитним акустичним шумом, та викидами (випадковим торканням до об'єкту досліджень, подвійні удари).

Як видно з гістограми (див. рис.9), одержаний статистичний розподіл наближається до нормального.

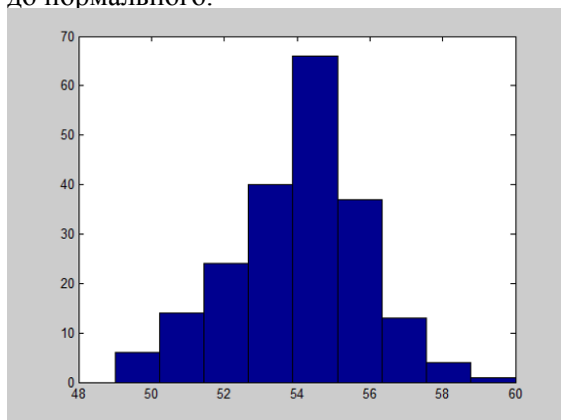


Рисунок 9 – Гістограма розподілу відліків затримки між сигналами

Апроксимуємо гістограму, одержану на

основі експериментальних даних гаусівською кривою, представленою наступною залежністю: (див. рис.10)

$$h(x) = a1 \cdot e^{-\left(\frac{x-b1}{c1}\right)^2} \quad (7)$$

де:  $a1, b1, c1$  - деякі масштабні коефіцієнти, які підбираються для кожного конкретного випадку окремо. В даному разі:  $a1=58,64$ ;  $b1=54,27$ ;  $c1=2,579$ ;

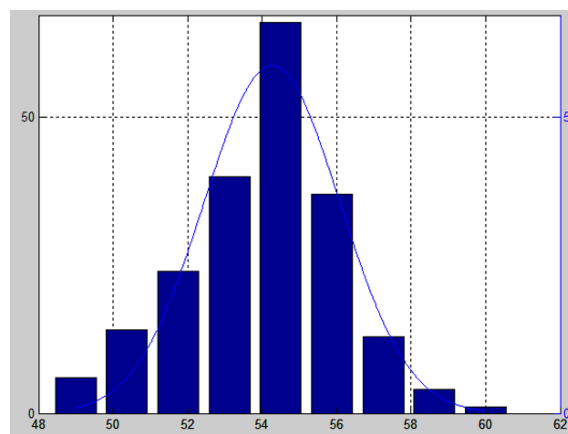


Рисунок 10 – Результати гаусівської апроксимації гістограми

Розрахуємо швидкість поширення акустичних хвиль в бетонному зразку на основі усереднення повного набору  $N$  різницевих відліків  $\Delta n_i$ :

$$v_{pa} = \frac{d \cdot F_s}{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \Delta n_i} = \frac{2,31 \cdot 96 \cdot 10^3}{52,283} = 4241,53 \text{ м/с}$$

Для уточнення значення швидкості, будемо усереднювати тільки значення тих  $M$  відліків, які потрапляють до найбільшого класу гістограми  $\Delta[n_{max}]_i$ :

$$v_{pc} = \frac{d \cdot F_s}{\frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^M \Delta n_{max_i}} = \frac{2,31 \cdot 96 \cdot 10^3}{54,5152} = 4067,86 \text{ м/с}$$

Для подальшого уточнення значення швидкості акустичної хвилі в досліджуваному бетонному зразку, застосуємо значення затримки одержане, як максимальне значення гаусівської апроксимації заданої гістограми:

$$v_p = \frac{d \cdot F_s}{\Delta n_{hmax}} = \frac{2,31 \cdot 96 \cdot 10^3}{54,27} = 4086,88 \text{ м/с}$$

Приймаючи  $v_p$  за еталонне значення,

розрахуємо значення похибок. Відносна похибка вимірювання швидкості поширення акустичних коливань з даних, одержаних внаслідок повного усереднення:

$$\delta_{\nu_{pa}} \approx \frac{|\nu_p - \nu_{pa}|}{\nu_p} \cdot 100 = \frac{4086,88 - 4241,53}{4086,88} \cdot 100 \approx 3,8\%$$

В результаті повторної серії експериментів, виконаних на однотипних бетонних блоках, авторами було встановлено повторюваність результатів на рівні 3%.

### ВИСНОВКИ

Таким чином застосування техніки аналізу гістограми за умов флуктуацій зондових сигналів, дозволяє підвищити точність вимірювань швидкості поширення акустичних коливань в бетонних зразках, орієнтовно, на 3%. Одержане значення повинне бути в подальшому уточнене для випадків використання інших типів бетоноподібних матеріалів (наприклад асфальтобетону). Для таких випадків також повинна бути перевірена можливість використання кривої Гауса для апроксимації гістограми одержаних експериментальних даних.

*І. Качанов В.К., Соколов І.В. Проблемы ультразвукового контроля протяженных сложноструктурных изделий с большим*

*затуханием сигналов. // Дефектоскопия.-2007.- № 8.- С. 82-93.2. 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, "Imact-Echo:A Method for Flaw Detection in Concrete Using Trancient Stress Waves",NBSIR 86-3452,National Bureau of Standards,Sept.,222 6.«ANS-114,» 26 1 2015. [Онлайновий]. <http://npoit.ru/products/item/low/ahc-114>.7.«Native Instruments,» 24 1 2015. [Онлайновий]. <http://www.native-instruments.com/en/products/komplete/audio-interfaces/komplete-audio-6/specifications/> 8.«Matlab,» Mathworks, 25 1 2015. [Онлайновий] <http://www.mathworks.com/products/matlab/> 9.«Octave,» 6 8 2014. [Онлайновий]. <https://www.gnu.org/software/octave/>.*

**Поступила в редакцію 23.11.2016 р.**

**Рекомендували до друку: докт.техн.наук, проф. Олійник А.П., докт. техн. наук, проф. Семенцов Г.Н.**