

УДК 624.21

**РОЗПІЗНАВАННЯ ПОДІЙ ДЕФЕКТОУТВОРЕННЯ В ТИПОВИХ  
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛКАХ МОСТОВИХ СПОРУД ЗА СИГНАЛАМИ  
ВІБРОАКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ**

**Оксень Є.І.**, д-р техн. наук, професор

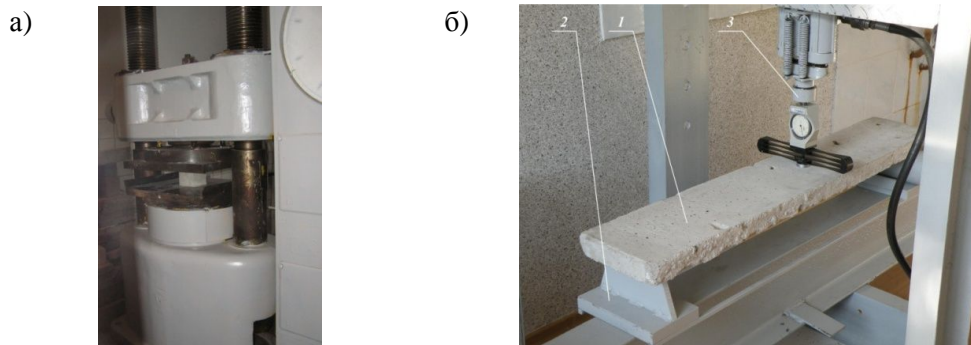
*Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНД»)*

У дорожній галузі України в умовах підвищення інтенсивності руху, збільшення вагових характеристик транспортних засобів та швидкого старіння конструкцій для мостів зі значним терміном експлуатації виникла потреба оперативного визначення технічного стану. Враховуючи те, що вихід із ладу штучної споруди спричиняє великі народногосподарські втрати при організації об'їздів та відновленні руху, роботи, що спрямовані на діагностику технічного стану залізобетонних конструкцій мостів та шляхопроводів при експлуатаційних навантаженнях, є актуальними для народного господарства. Дослідженнями [1, 2] показано, що процес деформування залізобетонних конструкцій супроводжується локальними структурними змінами матеріалу з супутнім випромінюванням акустичних хвиль. Тому при динамічному навантаженні елемента конструкції встановлені на ньому вимірювальні перетворювачі фіксують досить широкий спектр коливань, що характеризують як зміну загальних розмірів (низькочастотна частина спектра – вібрація), так і інтенсивність деградаційних процесів (високочастотна складова – акустична емісія) [3, 4]. Встановлення співвідношень між показниками інтенсивності коливань в певних частотних діапазонах надає можливість оцінити вплив окремого динамічного навантаження на конструктивний елемент.

Мета роботи – підвищення надійності та зменшення трудових витрат обстежень технічного стану шляхом визначення наявності дефектів в залізобетонній конструкції за сигналами віброакустичної емісії при змінних навантаженнях.

**Дослідження формування спектрів сигналів віброакустичної емісії**

Дослідження процесів формування спектрів сигналів віброакустичної емісії розкриття та розвитку тріщин в залізобетонних конструкціях під впливом низькошвидкісних змінних навантажень виконувалось в лабораторних умовах з застосуванням гідравлічного пресу (рис. 1а) та стенду низькошвидкісного навантаження (рис. 1б).



*Рисунок 1 – Навантаження випробувальних зразків залізобетонних конструкцій*

Випробувальні зразки залізобетонну (з армуванням та без) розміром 100×100×100 мм (рис. 2) піддавалися осьовому навантаженню на стиск. Зразки балки з одношаровим армуванням розмірами 900×200×50 мм і 2000×200×100 мм (рис. 3) навантажувались за схемою «балка на двох опорах».



Рисунок 2 – Випробувальні зразки залізобетону



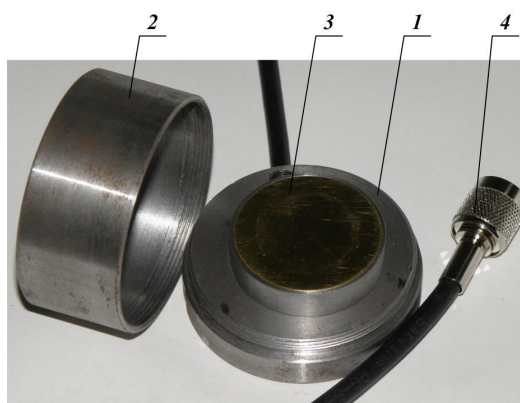
Рисунок 3 – Залізобетонна балка на стенді низькошвидкісного навантаження

Зусилля деформування балок створювалося за допомогою навантажувального пристрою (рис. 3), що складається з двох паралельних робочих гідроциліндрів *1*, зразкового динамометра стиснення *2* з мікрометричною голівкою *3*. Для уникнення впливу оператора на коливання вимірювального ланцюга робоча рідина надавалась в робочі гідроциліндри крізь гумовий високонапірний шланг. При випробуваннях навантаження нарощувалось ступінчасто до появи першого сигналу руйнування з витримкою до 1500 с з фіксацією розвитку процесу дефектоутворення. Швидкість нарощування навантаження приймалась в межах  $0,000002 \div 0,00001 \text{ с}^{-1}$  від зусилля руйнування зразка.

а)



б)



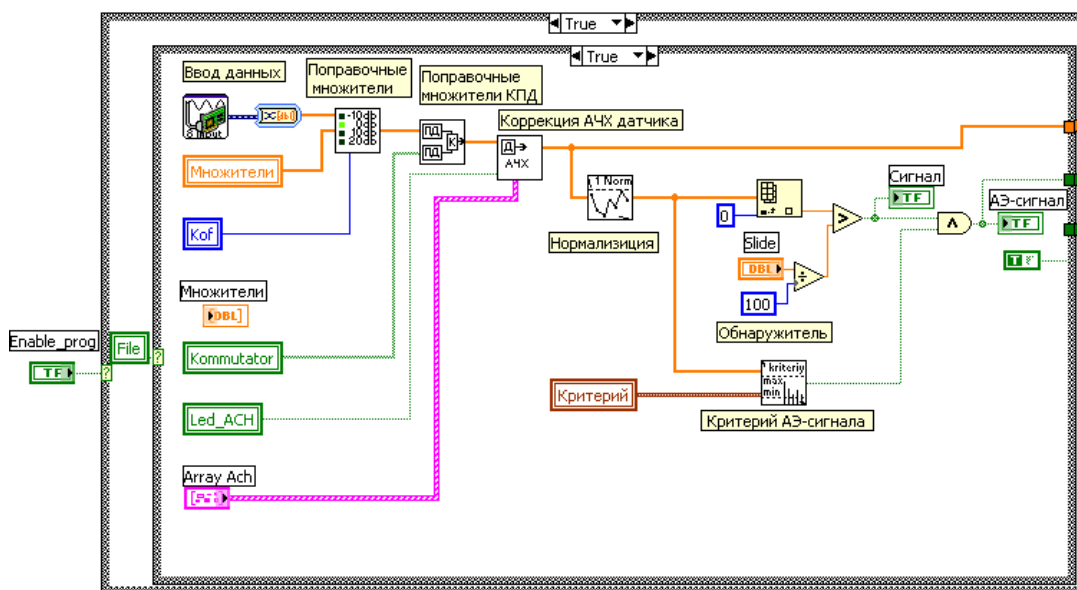
а) склад обладнання; б) перетворювач вібраакустичної емісії.

Рисунок 4 – Обладнання фіксації спектрів сигналів

Запис сигналів віброакустичної емісії (BAE) та виділення областей сигналів, що містять імпульси акустичної активності, здійснювались безперервно як в процесі нарощування навантаження, так і при витримці. Для фіксації сигналів акустичної емісії застосовувалась експериментальна апаратура (рис. 4а) у складі перетворювача віброакустичної емісії 1, підсилювача заряду LP-03 2, двоканального апаратного фільтру 3, модуля аналого-цифрового перетворювача (АЦП) ADA-1406 4, блока живлення 5 та usb-кабелю 6 підключення апаратури до вимірювального комп'ютера. Отримання сигналів віброакустичної емісії здійснювалось за допомогою п'єзоелектричного перетворювача (рис. 4б), конструктивно виконаного з корпусу 1, на який наклеєно височастотний елемент, розташованого над ним низькочастотного біморфного елемента 3, кришки 2 та сигнального кабелю 4. Для покращання акустичного контакту між корпусом перетворювача сигналів та поверхнею залізобетонних зразків був нанесений прошарок з акустичного гелю.

Програмний комплекс для аналізу сигналів віброакустичної емісії було розроблено в середовищі LabVIEW компанії National Instruments. При розробці структури програми враховувались наступні фактори:

- застосування двох аналогових входів (низькочастотний та височастотний канали), які необхідно вимірювати та обробляти в реальному часі;
- послідовність обробки даних, що надходять;
- час, необхідний для зчитування інформації з модуля АЦП та час, необхідний для обробки даних;
- мінімальна кількість необхідних даних для збереження у файл і можливості подальшого завантаження без втрати інформації.



*Рисунок 5 – Підсистема обробки даних, що встановлює наявність акустичного імпульсу*

Так як виявлення на вході пристрою амплітуд акустичного імпульсу реалізовано програмно, то збір даних та їх обробка в програмному комплексі відбувається безперервно. Відповідно до прийнятої логіки (рис. 5) при виконанні умови обраного критерію наявності

акустично-емісійного (АЕ) імпульсу відбувається буферизація даних і видача керувального сигналу для запису ідентифікованого фрагменту сигналу в відповідний файл.

Узагальнена схема обробки програмою даних, що надходять, містить такі основні блоки:

- вхідні дані можуть бути отримані як безпосередньо з пристрою спряження, так і з попередньо записаного файлу шляхом вибірки відповідного блоку;
- блок «Корекція амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) датчика» – у разі включення блоку на всіх частотах вводяться поправочні множники для коригування впливу нелінійності функції системи «об'єкт-перетворювач». АЧХ відповідних систем беруться із загального банку даних;
- блок «Нормування» призначено для нормування даних за максимальним значенням усередненої спектральної функції вхідного сигналу;
- блок «Ідентифікатор» – граничний пристрій, призначений для виявлення та ідентифікації сигналів АЕ за спектральними ознаками і контролем наявності імпульсу в низькочастотному спектрі – вібраційна емісія (ВЕ). Вибір критеріїв для ідентифікації задається оператором;
- «Критерій АЕ-сигналу» – блок перевірки відповідності параметрів сигналу АЕ за даних умов. Містить банк даних для сигналів різного типу. Вибір критеріїв здійснюється оператором під час випробувань або обробки.

Робоча панель програми аналізу сигналів у режимі реального часу наведена на рис. 6.

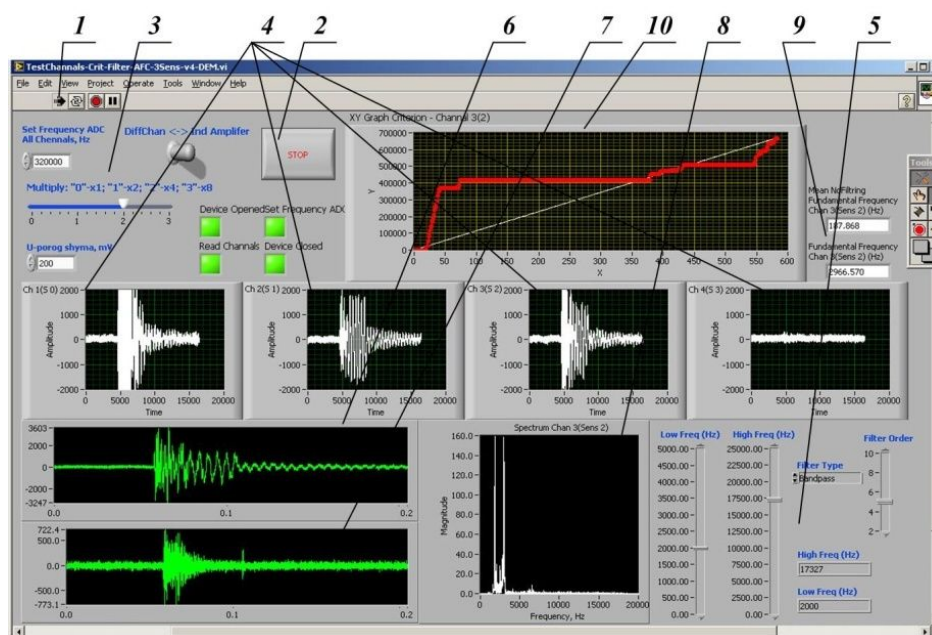


Рисунок 6 – Робоча панель програми аналізу сигналів у режимі реального часу

Пуск програми здійснюється натисканням кнопки **1**, припинення роботи – натисканням кнопки **2**. Перед запуском програми оператор повинен встановити в полі **3** відповідні режими роботи модулю АЦП:

- частоту опитування модулю АЦП (загальна частота опитування усіх застосованих каналів);



- режим підключення сигнальних кабелів до модулю АЦП (пряме диференційне або диференційне з індивідуальними підсилювачами);
- коефіцієнт апаратного підсилювання сигналу ( $\times 1$ ,  $\times 2$ ,  $\times 4$  або  $\times 8$ ), а також в полі 5 режими програмної фільтрації сигналів:
  - тип фільтру;
  - порядок фільтру;
  - нижню та верхню границі фільтрації.

Після запуску програми оператор має можливість контролювати роботу обладнання фіксації процесів формування спектрів сигналів за показниками рівня сигналів на діаграмах 4 (з метою подальшого розвитку системи контролю апаратне та програмне забезпечення виконано з можливістю підключення до чотирьох каналів одночасно), встановлювати режим фільтрації за показниками моніторів 6 та 7 і діаграмою амплітудно-частотної характеристики фрагменту сигналу після фільтрації 8. Одночасно програма надає можливість контролювати процес вибору режиму фільтрації за індикаторами нижньої та верхньої границі фільтрації і значенням максимальної частотної складової коливаний 9. Також на діаграмі 10 надається значення приросту енергії акустичних коливаний у відфільтрованому сигналі з початку спостереження та середнє значення енергії акустичних коливаний при спостереженні. Співвідношення цих діаграм може застосовуватись як енергетичний критерію стану конструкції, що спостерігається.

#### Обґрунтування критерію розпізнавання подій дефектоутворення в залізобетонних конструкціях

Встановлення спектральних особливостей виникнення та поширення в тілі залізобетонних зразків при руйнуванні, зовнішньої динамічної дії та власних коливаннях виконано шляхом спільного аналізу ВЕ та АЕ компонентів коливаний. Спектральна характеристика коливаний для зафіксованого фрагменту сигналу  $f$  довжиною  $N$  розраховувалась відповідно до залежностей дискретного Фур'є – перетворення. При цьому в комплексній формі коефіцієнти гармонійного ряду визначалися за формулою (1):

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f_i e^{-j(2\pi/N)ki}, \quad (1)$$

де  $k = 1, 2, \dots, \frac{N}{2}$ ;

$$\operatorname{Re}(C_0) = \frac{1}{2N} \sum_{i=0}^{N-1} f_i;$$

$$\operatorname{Im}(C_0) = 0.$$

Коефіцієнти гармонійного ряду розраховувалися відповідно до алгоритму швидкого Фур'є-перетворення  $fft$  для чого розмірність фрагмента вектора сигналу  $f$  приймалася рівною  $N = 2^n$ .

Побудова амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) сигналу акустичної емісії виконувалася на основі фундаментальної властивості:

- для амплітуди

$$A_k = |C_k| = \sqrt{\operatorname{Re}(C_k)^2 + \operatorname{Im}(C_k)^2}, \quad (2)$$

– для частоти

$$n_k = \frac{1}{T \times k}, \quad (3)$$

де  $T$  – період опитування каналу аналого-цифрового перетворювача, с.

Контроль за випромінюванням віброакустичної енергії в процесі росту тріщин в масиві залізобетонних балок здійснювався до їх повного розвитку і виходу на поверхню балки. Після чергового кроку навантаження та 20-хвилинної витримки поверхня балки оглядалася візуально за допомогою мікроскопа. Тріщини, що утворилися на поверхні, фотографувалися (рис. 7).

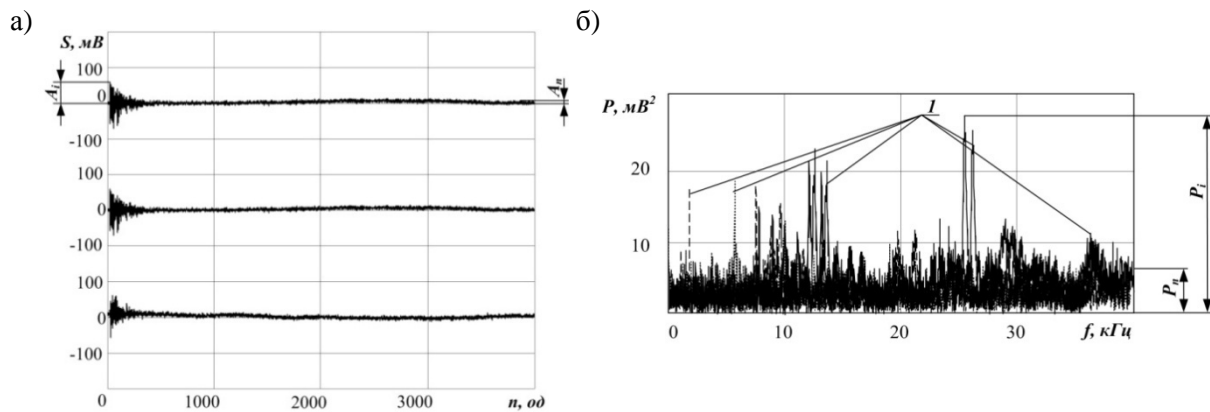
У процесі навантаження випробувальних балок було зафіксовано і оброблено понад 1000 акустичної емісії від процесів утворення та розвитку тріщин у масиві залізобетонних зразків.

Характерний вид імпульсів акустичної емісії від дефектоутворення та розвитку тріщин представлено на рис. 8а. Для запису осцилограм частота опитування становила 80 кГц, що відповідає 0,0125 с на 1000 точок відліку.



а) бокова поверхня; б) нижня поверхня.

Рисунок 7 – Поперечні тріщини на поверхнях балок



а) загальний вигляд осцилограм; б) АЧХ.

Рисунок 8 – Імпульси акустичної емісії від дефектоутворення

## ШТУЧНІ СПОРУДИ

Приклад амплітудно-частотної характеристики імпульсів АЕ, що розраховані згідно поданих вище залежностей, наведено на рис. 86. Особливістю розподілу енергії коливань є одночасна наявність декількох максимумів  $I$  в кожному з імпульсів. На графіках для порівняння показано співвідношення максимальних амплітуд імпульсів  $A_i$  та амплітуди шумів  $A_n$ , а також відповідних енергій коливань в сигналах  $P_i$  та  $P_n$ .

Розподіл енергії зафіксованих в процесі випробувань імпульсів по частотах наведено в табл. 1.

**Таблиця 1** – Розподіл імпульсів по частотах

Частота, кГц	2÷5	5÷10	10÷15	15÷20	20÷30	30÷40
Число, од.	73	274	292	137	207	97
Число, %	6,8	25,4	27,0	12,7	19,2	9,0

Аналіз сукупності показників АЧХ віброакустичних коливань залізобетонних зразків вказує на те, що енергія віброакустичних коливань при руйнуванні розташована в досить обмежених частотних інтервалах. Таким чином, амплітудно-частотний аналіз сигналів віброакустичних коливань залізобетонних балок в реальному часі може бути рекомендований для застосування при встановленні розвитку процесу тріщиноутворення під час динамічних навантажень.

В якості критерію розпізнавання подій дефектоутворення в залізобетонних конструкціях може бути рекомендована умова одночасної наявності в фрагменті сигналу, що підлягає аналізу, імпульсу від динамічного процесу

$$A_i > K_a \times A_n \quad (4)$$

та формуванні в спектральній характеристиці імпульсу високочастотної енергетичної складової

$$P_{il} > K_p \times P_n, \quad (5)$$

де  $K_a$  та  $K_p$  – коефіцієнти надійності розпізнавання процесу дефектоутворення за амплітудою і спектральною енергією коливань відповідно.

За результатом виконаних лабораторних досліджень в якості критерію розпізнавання подій розкриття та розвитку тріщин в залізобетонних конструкціях може бути запропоновано залежність, що являє співвідношення між сумарним рівнем енергії сигналів в області частот, притаманним руйнуванню, до сумарного рівня енергії шумів

$$K = \begin{cases} 0 & \text{if } \begin{matrix} 18000\Gamma\text{ц} & \leq & 600\Gamma\text{ц} & & 33000\Gamma\text{ц} & & \ddot{\circ} \\ \ddot{\circ} & S_{high} & \leq & \ddot{\circ} & S_{high} & + & \ddot{\circ} & S_{high} \\ 600\Gamma\text{ц} & & \leq & 0 & 18000\Gamma\text{ц} & & \ddot{\circ} \end{matrix} \\ 1 & \text{if } \begin{matrix} 18000\Gamma\text{ц} & & 600\Gamma\text{ц} & & 33000\Gamma\text{ц} & & \ddot{\circ} \\ \ddot{\circ} & S_{high} & > & \ddot{\circ} & S_{high} & + & \ddot{\circ} & S_{high} \\ 600\Gamma\text{ц} & & \leq & 0 & 18000\Gamma\text{ц} & & \ddot{\circ} \end{matrix} \end{cases}, \quad (6)$$

де  $S_{high}$  – енергія коливань відповідної складової сигналу.

### Висновки

До характерних особливостей АЧХ сигналів акустичної емісії при навантаженні залізобетонних зразків потрібно віднести:

- розподіл енергії коливань в АЧХ сигналу ФВЧ в діапазоні частот 600÷18000 Гц з наявністю декількох локальних максимумів;
- сумарна енергія коливань в АЧХ, що розташовані за межами вказаних діапазонів, не перевищує 1 % від загальної.

За результатом виконаних лабораторних досліджень в якості критерію розпізнавання подій розкриття та розвитку тріщин в залізобетонних конструкціях може бути запропоновано кількісне оцінювання розподілу енергії коливань між частотними діапазонами.

### Література

1. Филоненко С.Ф. Акустическая эмиссия. Измерения, контроль, диагностика. – К.: КНУЦА, 1999. – С. 304.
2. Скальський В.Р., Коваль П.М. Акустична емісія під час руйнування матеріалів, виробів і конструкцій. Методичні аспекти відбору та обробки інформації. – Львів: СПОЛОМ, 2005. – 396 с.
3. Оксень Е.И., Пархоменко В.В., Мосиенко Н.П., Сергийчук Н.П. Диагностика трещинообразования железобетонной конструкции методом звуковой локации // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: Збірн. наук. праць. – Горлівка: АДІ ДонНТУ, 2006. № 2(3). – С. 99–103.
4. Оксень Е.И., Пархоменко В.В. Исследование частотных характеристик акустических импульсов при разрушении железобетонных балок // Зб. «Дороги і мости», вип. 7, т. 2.– К.: ДерждорНДІ, 2007/ – С. 92–97.