

# ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.317

О.Бухало<sup>1</sup>, канд. техн. наук; Б.Клим<sup>1,2</sup>, канд. техн. наук;  
Г.Микитин<sup>1</sup>, канд. техн. наук; Є.Почапський<sup>1,2</sup>, канд. техн. наук;  
Р.Федорів<sup>1</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України

<sup>2</sup>Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

## АСПЕКТИ МЕТРОЛОГІЧНОЇ АТЕСТАЦІЇ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ СИСТЕМИ ВІДБОРУ І ОБРОБКИ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

*Розглянуто особливості метрологічної атестації вимірювальних каналів системи реєстрації сигналу акустичної емісії згідно з вимогами, наведеними в стандартах з метрологічного забезпечення вимірювальних інформаційних систем. Наведена модель вимірювального каналу та модель похибки каналу розробленої акустико-емісійної системи. Розроблена методика проведення атестації акустичного вимірювального каналу системи.*

### Умовні позначення

$x(t)$ ,  $y(t)$  - вхідний і вихідний сигнали вимірювального каналу (ВК);

$g_H(t)$  - номінальна імпульсна перехідна характеристика (динамічна) ВК ;

$K_H$  - номінальний статичний коефіцієнт перетворення ВК;

$\Delta_k$  - похибка каналу;

$\Delta_0$  - основна похибка вимірювального засобу (охоплює систематичну складову  $\Delta_s$ , випадкову складову  $\Delta_o$  основної похибки);

$\sum_{i=1}^l \Delta_{до ді}$  - сума додаткових похибок  $\Delta_{до ді}$  вимірювального засобу, обумовлених дією величин впливу та неінформативних параметрів вхідного сигналу вимірювальних засобів;

$l$  - число додаткових похибок;

$\Delta_{дин.}$  - динамічна похибка вимірювальних засобів, обумовлена впливом швидкості (частоти) зміни вхідного сигналу;

$P_M(\theta)$  - імовірність безвідмовної роботи за метрологічними відмовами за час  $\theta$  ;

$P_{м.з.}(t)$  - задана імовірність безвідмовної роботи за метрологічними відмовами за міжповірочний інтервал;

$N$  - число вимірювальних каналів;

$t$  - коефіцієнт Стюдента;

$\varepsilon$  - допустима похибка репрезентативності;

$k$ ,  $k_0$  - коефіцієнт передачі ВК і його нормоване значення ;

$\sigma_{\Delta_{дин}}$  - середнє квадратичне відхилення динамічної похибки ВК;

$\sigma_n$  - середнє квадратичне відхилення результату вимірювання;

$n$  - кількість спостережень в точці метрологічної перевірки діапазону вимірювань.

## 1. Метрологічне забезпечення вимірювальної акустико-емісійної системи

В галузі неруйнівного контролю (НК) об'єктів метрологічне забезпечення (МЗ) має свої особливості. Метрологічне забезпечення засобів неруйнівного контролю – це сукупність методів, засобів та критеріїв, які гарантують достовірність даних про якісні та кількісні ознаки об'єктів контролю [1]. Серед засобів неруйнівного контролю матеріалів і конструкцій методом акустичної емісії є вимірювальні інформаційні системи (ВІС), зокрема вимірювальні акустико-емісійні системи [2,3,4,5]. Такі системи мають особливості реалізації методології вимірювання (контролю) параметрів сигналу акустичної емісії (АЕ), конструктивно-технічного виконання апаратної частини, алгоритмічної і програмної реалізації відбору і обробки сигналу акустичної емісії, метрологічного забезпечення як зі сторони наявності зразкового сигналу, так і зі сторони випробувань, атестації вимірювальних каналів (системи). В роботі [6] проаналізовано деякі підходи до МЗ акустико-емісійних вимірювань. Це – метод локації дефекту за допомогою акустичної системи, метод поелементного контролю. Але ці методи не враховують імовірнісної структури сигналу акустичної емісії, що не дає змоги визначити похибки оцінки його статистичних характеристик у вимірювальних системах. Тому в [6] обґрунтовано принцип застосування стохастичної міри для метрологічного забезпечення вимірювання характеристик сигналу АЕ. Тут стохастична міра – це вимірювальний генератор зразкових стохастичних сигналів, який штучно створює електричний випадковий зразковий сигнал, що імітує сигнал на виході первинного вимірювального перетворювача (ПВП) і має задані і нормовані статистичні характеристики. Зразковий стохастичний сигнал є сигналом з “нульовою” вимірювальною інформацією (стохастичні характеристики відомі апіорі), тому результат його вимірювальних перетворень в системі містить інформацію лише про метрологічні характеристики вимірювальних каналів. Згідно з концептуальним підходом до створення метрологічного забезпечення (МЗ) вимірювань [7], серед елементів процедури МЗ системи відбору і обробки інформації є моделювання зразкового стохастичного сигналу, методи атестації стохастичної міри [6], метрологічна атестація вимірювальних каналів системи.

Розроблена вимірювальна інформаційна система призначена для відбору і обробки вимірювальної інформації при експериментальних дослідженнях матеріалів, контролі міцності і довговічності елементів конструкцій з використанням методу акустичної емісії [5]. В основі цього методу є реєстрація п'єзоелектричним перетворювачем (ПЕП) пружних хвиль, випромінюваних об'єктом дослідження. Вимірювальний сигнал з виходу ПВП поступає на вхід модуля підсилювачів. Підсилений у заданій смузі частот сигнал поступає на входи модулів аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) та оперативної обробки, далі в персональний комп'ютер. Модуль підсилювачів містить попередній і основний підсилювачі, які забезпечують підсилення та передачу сигналу з виходу ПВП до апаратури без зменшення рівня сигнал - шум, керований фільтр для задання робочого діапазону частот. Модуль АЦП забезпечує перетворення аналогового сигналу в реальному масштабі часу з мінімальними спотвореннями. До складу цього модуля входить буферна пам'ять. Модуль оперативної обробки містить пристрій виділення моментів появи екстремумів вимірювального сигналу, пристрій оцінювання інтенсивності випадкового імпульсного потоку, формувач часових міток, схему управління, компаратор. Інтерфейс вводу- виводу призначений для управління апаратним блоком зі сторони комп'ютера, а також для вводу вимірювальної інформації з буферної пам'яті модуля АЦП.

Технічні характеристики системи такі: робоча смуга частот - 10-1000 кГц; максимальний коефіцієнт підсилення каналу 80 дБ; приведений до входу АЦП поріг дискримінації 10-1000 мВ; частоти квантування АЦП - 1, 2, 4 МГц; кількість двійкових розрядів перетворення 8; час перетворення аналогового сигналу в двійковий код не біль-

ше 0,1 мкс; споживана потужність не перевищує 40 В А; живлення системи здійснюється від мережі змінного струму напругою  $220 \pm 10\%$  В і частотою  $50 \pm 1$  Гц.

## **2. Аспекти метрологічної атестації вимірювальних каналів акустико-емісійної системи**

Програма метрологічної атестації (ПМА) ВІС встановлює основні вимоги до її побудови і змісту, згідно з рекомендаціями [8], і поширюється на вимірювальну інформаційну систему відбору і обробки сигналів акустичної емісії ВІС АЕ одиничного виготовлення. Програма метрологічної атестації містить рекомендації з встановлення: тривалості міжповірочних інтервалів, об'єму представленої вибірки, кількості досліджуваних точок в діапазоні вимірювань, кількості спостережень в досліджуваних точках вимірювання. Метою метрологічної атестації ВІС є - експериментальне дослідження вимірювальних каналів, скероване на визначення узагальненої оцінки метрологічних характеристик даного типу системи в нормальних умовах експлуатації та видача документа, який засвідчує метрологічні характеристики, встановлені в процесі атестації.

Задачі метрологічної атестації вимірювальної системи :

- визначення номенклатури оцінок метрологічних характеристик (МХ) вимірювальних каналів (ВК) і їх оцінка;
- встановлення відповідності метрологічних характеристик вимогам технічного завдання, нормам точності вимірювання, що задані в стандартах;
- встановлення відповідності агрегатних засобів вимірювань до вимог функціональної, інформаційної, експлуатаційної, конструкторської, метрологічної сумісності;
- встановлення номенклатури метрологічних характеристик вимірювального каналу, які підлягають контролю;
- встановлення міжповірочних інтервалів вимірювальних каналів;
- встановлення порядку надзору за системою;
- надання рекомендацій Держстандарту про доцільність імпорту системи;
- виявлення потреби у серійному випуску системи одиничного виготовлення.

Згідно з методологією вимірювання параметрів сигналу АЕ, первинний вимірювальний перетворювач (ПВП) в залежності від частотного спектру досліджуваного сигналу розміщений на об'єкті дослідження [9]. Тобто в даному випадку його тлумачать як контактний. До складу системи, окрім ПВП (давача), входять апаратний блок та персональний комп'ютер типу ІВМ РС. Апаратний блок містить модуль підсилювачів, модуль аналогово-цифрового перетворювача (АЦП), модуль оперативної обробки інформації, інтерфейс вводу - виводу.

В даному випадку атестації підлягає вимірювальний канал, що є складовою частиною вимірювальної інформаційної системи у вигляді сукупності засобів вимірювальних операцій, засобів зв'язку (для послідовного перетворення вимірювального сигналу) та приладу, що створює кодовий сигнал вимірювальної інформації, який використовується з метою числового вимірювального перетворення і контролю [10]. Приклад структури такого ВК, що підлягає атестації, наведений в [11].

## **3. Вимоги щодо підготовки вимірювальних каналів до експериментальних досліджень**

### **3.1. Структурні схеми вимірювальних каналів системи відбору і обробки сигналів акустичної емісії**

Вимірювальний канал (системи) - сукупність засобів вимірювальної техніки, засобів зв'язку та інших технічних засобів, призначений для створення сигналу вимірювальної інформації про одну вимірювану фізичну величину. Згідно з функціональною схемою ВІС АЕ [5], структури вимірювальних каналів наведені на рис.1.

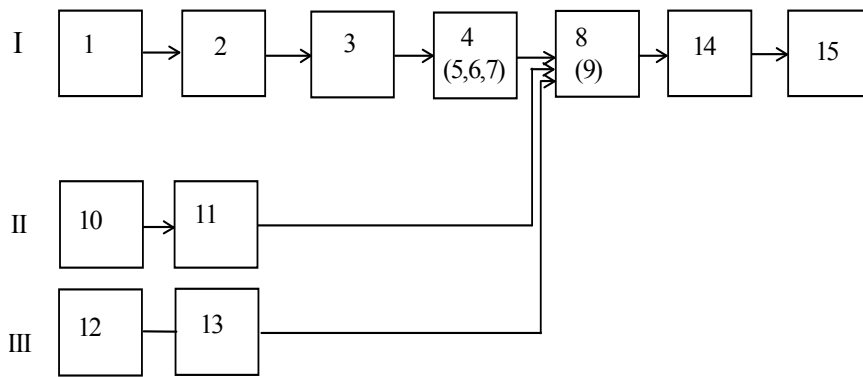


Рис. 1. Структури вимірювальних каналів системи

Канал вимірювання параметрів сигналу акустичної емісії (канал акустичний - I) у функціональному зв'язку охоплює: попередній підсилювач (1); керований підсилювач акустичного каналу (2); керований смуговий фільтр (3); аналогово-цифровий перетворювач акустичного каналу (4); аналоговий компаратор, блок управління, формувач “мертвого часу” (5,6,7); буферна пам'ять, таймер (8,9); інтерфейс (14); персональний комп'ютер (15). Канал вимірювання механічного навантаження на досліджуваний зразок (канал навантаження - II) охоплює такі компоненти: керований підсилювач каналу навантаження (10); аналогово-цифровий перетворювач каналу навантаження (11); буферна пам'ять, таймер (8,9); інтерфейс (14); персональний комп'ютер (15). Канал вимірювання параметрів розкриття тріщини (канал розкриття тріщини - III) у структурі містить: керований підсилювач каналу розкриття тріщини (12); аналогово-цифровий перетворювач каналу розкриття тріщини (13); інтерфейс (14); персональний комп'ютер (15). Метрологічній атестації вимірювальної акустико-емісійної системи підлягають: високочастотний канал відбору і попередньої обробки сигналу акустичної емісії, низькочастотний канал контролю навантаження зразка, низькочастотний канал контролю розкриття тріщини зразка.

### 3.2. Модель ВК системи відбору і обробки сигналів акустичної емісії

Вихідний сигнал ВК залежить від вхідного сигналу, метрологічних характеристик ВК та величин впливу на канал. Розроблення математичної моделі вимірювального каналу системи враховує такі аспекти: ВК складається з лінійних та аналого-цифрових компонентів; зміною величин впливу можна нехтувати.

Динамічна модель ВК (стосовно сигналу) в нормальних умовах експлуатації системи, враховуючи статичний характер величин впливу, запишеться [12]

$$y(t) = K_n \int_{-\infty}^{\infty} g_n(t-\tau)x(\tau)d\tau \quad (1)$$

Для статичного режиму в нормальних умовах експлуатації ВІС

$$y = K_n x. \quad (2)$$

### 3.3. Модель похибки ВК (акустичного, навантаження, тріщини)

В нормальних умовах, які не призводять до додаткової похибки, що виникає при відхиленні однієї з величин впливу від нормального значення або виходу її за межі ділянки нормальних значень функціонування ВІС, модель похибки основного вимірювального каналу (акустичного) така [13]:

$$\Delta_k = \sqrt{\Delta_0^2 + \sum_{i=1}^l \Delta_{\text{дод}_i}^2 + \Delta_{\text{дин}}^2} \quad (3)$$

Модель похибки ВК (навантаження, розкриття тріщини) така :

$$\Delta_k = \sqrt{\Delta_0^2 + \sum_{i=1}^l \Delta_{\text{дод}_i}^2} \quad (4)$$

### 3.4. Комплекс нормованих метрологічних характеристик ВК системи

Встановлення комплексу нормованих МХ ґрунтується на виборі моделі похибки вимірювального каналу. При оцінюванні МХ вимірювальних засобів їх похибка охоплює: похибку за рахунок варіації, дрейфу, систематичну, випадкову складові похибки, додаткову і динамічну похибки. Раціональний комплекс МХ вимірювального каналу повинен охоплювати характеристики всіх складових моделі похибки. Критерії суттєвості певних складових моделі похибки для засобів з цифровим принципом вимірювання наведені в [13]. Мінімальна кількість досліджуваних точок в діапазоні вимірювань параметрів САЕ - три: на початку діапазону, в кінці та в середині (відповідно 10,50,100% діапазону) [14].

#### 3.4.1. Вимоги до вибору способу і норм подання МХ вимірювальних каналів

Характеристики систематичної складової  $\Delta_s$  похибки вибирають з таких [13]:

- значення систематичної складової  $\Delta_s$
- або
- значення систематичної складової  $\Delta_s$ , математичне сподівання  $M[\Delta_s]$  і середнє квадратичне відхилення  $\sigma[\Delta_s]$  систематичної складової похибки.

Характеристики випадкової складової  $\Delta$  похибки ВІС вибирають з таких [13]:

- середнє квадратичне відхилення  $\sigma[\Delta]$  випадкової складової похибки
- або
- середнє квадратичне відхилення  $\sigma[\Delta]$  випадкової складової похибки, нормалізована автокореляційна функція  $r_{\Delta}^{\circ}(\tau)$

або функція спектральної густини  $S_{\Delta}^{\circ}(\omega)$  випадкової складової похибки.

Характеристика випадкової складової  $\Delta_n$  похибки від гістерезису - варіація  $b_0$  вихідного сигналу засобу вимірювань.

Характеристика похибки ВК системи - зона невизначеності, в яку потрапляє вимірювана фізична величина і розглядається як випадкова величина [15]. На сьогодні тривають обговорення про застосування в метрологічній практиці концепції невизначеності вимірювань [16].

#### 3.4.2. Способи нормування метрологічних характеристик ВК

Характеристики систематичної складової похибки вимірювального каналу без врахування давача нормують встановленням відповідно [13] :

- меж (додатньої, від'ємної)  $\Delta_{sm}$  допустимої систематичної складової похибки вимірювального каналу;

- меж  $\Delta_{sm}$  допустимої систематичної складової похибки, математичного сподівання  $M[\Delta_s]$  і середнього квадратичного відхилення  $\sigma[\Delta_s]$  систематичної складової ВК;

Характеристики випадкової складової похибки нормують встановленням відповідно [13] :

- межі  $\sigma_m^0[\Delta]$  допустимого середнього квадратичного відхилення випадкової складової похибки ВК,
- межі  $\sigma_m^0[\Delta]$  допустимого середнього квадратичного відхилення випадкової складової похибки, номінальної нормалізованої автокореляційної функції  $r_\Delta(\tau)$  випадкової складової похибки та меж допустимих відхилень цих функцій від номінальних.

Характеристики випадкової складової  $\Delta$  похибки від гістерезису нормують встановленням межі допустимої варіації  $b_m$  вихідного сигналу ВК.

При нормуванні характеристики похибки ВК встановлюють межі  $\Delta_m$  допустимої похибки і меж  $b_m$  допустимої варіації вихідного сигналу (покази) системи.

Нормовані характеристики похибки ВК ВІС (характеристики систематичної складової похибки, характеристики випадкової складової похибки, характеристики похибки ВК ВІС)- подають числом або функцією (формула, таблиця, графік) інформативного параметра вхідного або вихідного сигналу для абсолютних, відносних, приведених похибок [13].

### **3.5. Експериментальні дослідження ВК системи відбору і обробки сигналів акустичної емісії**

Згідно з рекомендаційними вимогами [8], експериментальні дослідження ВК пов'язані з технічною документацією, наданою при метрологічній атестації. Власне, для експериментальних досліджень названих ВК необхідні: технічне завдання на розроблення системи; технічний опис та інструкція з експлуатації ВІС; методика перевірки вимірювальної інформаційної системи .

Експериментальні дослідження вимірювальних каналів системи відображають етапи і послідовність виконання робіт, згідно рекомендаціями [8]. Розглянемо їх зміст.

Об'єм вибірки вимірювальних каналів, які підлягають дослідженню, встановлюють з врахуванням структурних особливостей вимірювальної інформаційної системи відбору і обробки сигналів акустичної емісії.

Кількість досліджуваних точок в діапазоні вимірювань і спосіб апроксимації результатів вимірювань повинна забезпечувати оцінку метрологічних характеристик з заданою довірчою імовірністю.

Кількість спостережень в досліджуваних точках діапазону вимірювання повинна забезпечувати оцінку метрологічних характеристик вимірювань із заданою довірчою імовірністю.

Вимоги до режиму вимірювань і до їх послідовності в часі повинні бути встановлені згідно з технічним описом ВІС та інструкцією з експлуатації.

Вказуються основні вихідні дані і прийнятий спосіб вираження точності вимірювання і форма подання результатів вимірювань; характеристики умов проведення атестації; перелік величин впливу та характер їх зв'язку з похибкою вимірювального каналу.

Наводиться математичний вираз, який визначає залежність між похибкою вимірювального каналу і її складовими за нормальних умов.

Викладається процедура проведення експериментальних досліджень вимірювального каналу за нормальних умов.

Викладається методика обробки результатів досліджень і наведені формули оцінки характеристик похибки вимірювального каналу.

Наводяться рекомендації з встановлення тривалості міжповірочних інтервалів вимірювальних каналів системи.

Враховується повнота і правильність вибраних методів і засобів повірки та вказані критерії, які визначають придатність вимірювальних каналів.

Розглянемо один з етапів експериментальних досліджень для основного акустичного вимірювального каналу.

Встановлюють тривалість міжповірочних інтервалів ВК згідно з вимогами технічного завдання на розроблення ВІС, технічного опису та інструкції з експлуатації. Найбільш прийнятними критеріями для встановлення міжповірочних інтервалів є критерії безвідмовної роботи за метрологічними відмовами [8]. Критерій безвідмовної роботи за метрологічними відмовами при початковій оцінці міжповірочного інтервалу ( $t$ ), коли була проведена дослідна експлуатація вимірювальних каналів системи, такий :

$$t = \frac{[1 - P_{м.з.}(t)]\theta}{1 - P_{м.з.}(\theta)} \quad (5)$$

$P_{м.з.}(t)$  - вибирається з ряду 0,80;0,85; 0,90; 0,95;0,98; 0,99.Вимірювання параметрів сигналу АЕ проводять з заданою імовірністю  $P_{м.з.}(t)=0,95$ . Імовірність безвідмовної роботи за метрологічними відмовами за час  $\theta=10000$  год  $P_{м.з.}(\theta)= 0,9$ .

#### 4. Методика проведення атестації акустичного ВК системи

##### 4.1. Зразкові засоби вимірювань, необхідні для проведення атестації вимірювальних каналів системи

При проведенні метрологічної атестації агрегатизованої ВІС (вимірювальних каналів) методом зразкових приладів - критерієм наукової, нормативної і технічної основ метрологічного забезпечення є точність зразкових приладів, яка в 3-5 разів вища за точність робочих засобів вимірювання [12]. Відповідно до таких вимог вибирають зразкові засоби вимірювання – вольтметри, генератори, осцилографи. Характеристики генератора псевдовипадкового імпульсного сигналу, як генератора зразкового стохастичного сигналу (акустичної емісії), такі [17]: інтенсивність стаціонарного імпульсного потоку і початкова інтенсивність слідування імпульсів в пакеті  $(1,2,5, \dots) 10^n \text{ C}^{-1}$ ,  $n = -1; 0; 1$ ; постійна часу спаду інтенсивності потоку в пакеті  $(0,08 \cdot 2^m) \text{ C}$ ,  $m= 0,1,2,3,4,5,6$ ; похибка установки заданих значень інтенсивності і постійної часу не більше 0,3 %; відносна відмінність дисперсій числа відліків для генерованого і “чисто” пуассонівського потоків при їх однаковій інтенсивності не більше 6 %; значення мертвого часу 0,1,2,..., 63 мкс; ємність лічильників  $10^6$ ; форма вихідних імпульсів імітатора сигналу АЕ

$$F(t - t_i) = U_o \cos[\omega(t - t_i)] \exp[-\beta(t - t_i)], \quad t \geq t_i, \quad (6)$$

де  $U_o$ - початкове значення амплітуди вхідного сигналу, регулюється в діапазоні 0,2-2 В;

$\omega$ - частота коливань в пакеті, дорівнює 0,3;0,5;1 МГц;

$\beta$ - показник спаду експоненти, дорівнює  $10^3; 10^4; 10^5 \text{ C}^{-1}$ .

##### 4.2. Встановлення об'єму вибірки основного вимірювального каналу

Розрахунок об'єму вибірки кількості ідентичних за структурою вимірювальних каналів системи проводиться за формулою

$$n = \frac{t^2 N}{4\varepsilon^2 N + t^2} \quad (7)$$

Задана довірча імовірність  $P=0,95$ , коефіцієнт Стюдента  $t=1,96$ , допустима похибка репрезентативності  $\varepsilon =10\%$ . [8].

#### 4.3. Встановлення кількості досліджуваних точок в діапазоні вимірювань параметрів сигналу АЕ та кількості спостережень в досліджуваних точках діапазону

Для багатоканальних вимірювальних інформаційних систем, призначених для реалізації єдиної функції перетворення з цифровим принципом перетворення і пристроєм відображення інформації про сигнал АЕ- досліджуваними точками є значення в одиницях вихідної величини, які відповідають значенням вхідної величини. За умови несуттєвості варіації, як у випадку акустичного ВК, метрологічні дослідження проводять в точках 10,50,100% діапазону вимірювань параметрів сигналу АЕ. Точність акустичного вимірювального каналу (коефіцієнт передачі ВК, оцінка його похибки) обумовлюється алгоритмом знаходження коефіцієнта перетворення вхідного максимального значення амплітуди зразкового синусоїдного сигналу  $U_{\text{вх}i}$  частотою  $f_i$  у цифровий код  $M_{i \text{ max}}$ . Кількість  $N_0$  періодів синусоїди, за які з вказаною імовірністю  $Q =0,995$  з'явиться максимальне числове значення цифрового відліку  $M_{i \text{ max}}$

$$N_0 = Ent\left[-\frac{f_i}{f_\delta} \frac{\pi}{\sqrt{2}\delta} \ln(1-Q)\right], \quad (8)$$

де  $Ent(x)$  - ціла частина значення вимірюваної величини  $x$ ;

$f_\delta$  - частота дискретизації;

$\delta$  - задана відносна похибка оцінки максимального значення амплітуди синусоїди.

Коефіцієнт передачі вимірювального каналу

$$k_i = \frac{M_{i \text{ max}}}{U_{\text{вх}i}(f_i)} \quad (9)$$

Основна відносна похибка значення коефіцієнта передачі

$$\delta_k = \frac{\max |k_i - k_0|}{k_0} \quad (10)$$

Такий алгоритм дозволяє визначити коефіцієнт перетворення вимірювального каналу з апіорі заданою точністю. Для оцінки точності вимірювання параметрів сигналу АЕ встановлюють кількість спостережень ( $n$ ) в досліджуваних точках (10,50,100%) амплітудного і частотного діапазону. Відповідно розглянутий алгоритм функціонує в кожній ( $n$ -ій) точці спостережень. В кожній досліджуваній точці діапазону вимірювання параметрів сигналу АЕ, залежно від заданої довірчої імовірності  $P_d$ , визначають кількість спостережень ( $n$ ) за формулою [12]

$$n \geq \frac{2}{1 - P_d} \quad (11)$$

де  $P_d$  - задана довірча імовірність -0,95.

#### 4.4. Режим вимірювання параметрів сигналу акустичної емісії

Згідно з встановленими вимогами до вибору режиму вимірювань системи [13], у методиці проведення атестації акустико-емісійної ВІС вибрано режим вимірювання параметрів сигналу АЕ – динамічний.



#### 4.5. Встановлення вихідних даних та умов визначення похибки вимірювального каналу системи

Способом вираження точності вимірювання параметрів сигналу акустичної емісії є похибка вимірювального каналу та її складові. До визначуваних характеристик похибки вимірювального каналу системи відносять: систематичну складову похибки  $\Delta_s$ ,

середнє квадратичне відхилення  $\sigma \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \end{bmatrix}$  випадкової складової похибки; похибку вимірювального каналу  $\Delta_k$ .

Формою подання результатів вимірювання досліджуваного сигналу є протокол набору експериментальних даних при метрологічних дослідженнях ВК системи [8]. Атестацію ВІС проводять після її попереднього напрацювання не більше 6 місяців. Систему атестують за умови наявності таких документів: технічне завдання на розроблення системи відбору сигналів акустичної емісії; технічний опис та інструкція з експлуатації ВІС; проект програми метрологічної атестації ВІС; проект методики повірки системи. Для нормальних умов експлуатації акустико-емісійної ВІС розраховують такі метрологічні характеристики вимірювальних каналів: систематичну складову  $\Delta_s$  похибки ВК; випадкову складову  $\Delta_0$  похибки ВК; похибку каналу  $\Delta_k$  ВК.

#### 4.6. Аналітичне подання похибки ВК системи за нормальних умов експлуатації

В нормальних умовах експлуатації ВІС аналітично похибка вимірювального каналу подається у вигляді

$$\Delta_k = \sqrt{\Delta_0^2 + \sum_{i=1}^l \Delta_{\text{дод}i}^2 + \Delta_{\text{дин}}^2} \quad (12)$$

Якщо складова  $\sum_{i=1}^l \Delta_{\text{дод}i}$  мала, то її можна не враховувати. Для акустичного вимірювального каналу (I) модель похибки

$$\Delta_{k_i} = \sqrt{\Delta_0^2 + \Delta_{\text{дин}}^2} \quad (13)$$

$$\Delta_0 = \sqrt{\Delta_s^2 + \Delta^2} = \sqrt{\Delta_s^2 + \left(\frac{t\sigma_n}{\sqrt{n}}\right)^2} \quad (14)$$

Динамічна похибка  $\Delta_{\text{дин}}$  вимірювального каналу - системи в динамічному режимі більшою мірою обумовлюється динамічними властивостями АЦП [11]. Динамічна похибка ВК системи при вимірюванні значень амплітуд  $U_{10}$ ;  $U_{50}$ ;  $U_{100}$  сигналу АЕ відповідно на амплітудах і частотах 10, 50, 100 відсотків діапазону визначається як

$$\Delta_{\text{дин}} = \frac{|U_{10} - U_{100}|}{2U_{50}} \quad (15)$$

Для частинного випадку, коли зміна динамічної похибки є незначною, можемо вважати  $\Delta_{\text{дин}} \approx \sigma_{\Delta_{\text{дин}}} = \text{const}$ , а похибку акустичного вимірювального каналу  $\Delta_k$  подати не через згортку (13), а через  $\sigma_{\Delta_{\text{дин}}}$  і  $\Delta_0$  у вигляді

$$\Delta_k = \sqrt{\sigma_{\Delta_{\text{дин}}}^2 + \Delta_0^2} \quad (16)$$

$$\sigma_{\Delta_{\text{дин}}} \cong \sqrt{(\Delta_{\text{дин}_1}^2 + \Delta_{\text{дин}_2}^2 + \dots + \Delta_{\text{дин}_n}^2) / (n-1)} \quad (17)$$

$n$  - кількість вимірювань.

У нашому випадку

$$\Delta_{\text{дин}_1} = U_{10} - U_{\text{сер}}; \Delta_{\text{дин}_2} = U_{50} - U_{\text{сер}}; \Delta_{\text{дин}_3} = U_{100} - U_{\text{сер}};$$

$U_{\text{сер}}$  – середнє значення амплітуди сигналу АЕ при  $n=3$ , відповідно в трьох точках 10, 50, 100 відсотків амплітудного і частотного діапазону.

Оскільки структура вимірювальних каналів навантаження та розкриття тріщини (I, II) є ідентичною (рис. 1), то модель похибки для цих ВК аналітично запишеться

$$\Delta_{k_{2,3}} = \Delta_0 = \sqrt{\Delta_s^2 + \sigma_{\Delta}^2} \quad (18)$$

#### 4.7. Визначення похибки ВК системи за нормальних умов експлуатації

Процедура проведення експериментальних досліджень вимірювальних каналів (акустичного, навантаження) в нормальних умовах експлуатації дає можливість визначити похибку ВК. В основі процедури експериментальних досліджень є схема експерименту (рис.2) згідно з структурами вимірювальних каналів системи, режимом її роботи, типом вхідного сигналу, вимірюваними величинами, використовуваними засобами.

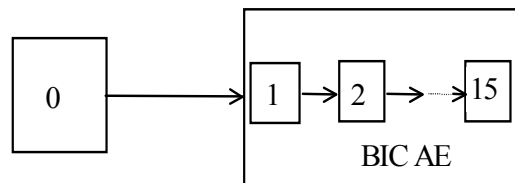


Рис. 2. Схема експерименту

У схемі експерименту: 0 - зразковий вимірювальний засіб, з виходу якого на входи системи подається зразковий сигнал; 1,2,3,..., 15 - компоненти вимірювальних каналів системи. Експериментальні дослідження вимірювальних каналів проводяться за методикою випробувань вимірювальної інформаційної системи [18].

#### 4.8. Методики оцінки метрологічних характеристик ВК та алгоритми обробки результатів вимірювань

В основі обробки результатів експерименту є вибір методики оцінювання та алгоритму обробки інформації. Методику (М) та алгоритм оцінки (контролю) метрологічних характеристик вибирають в залежності від мети метрологічних досліджень (випробувань), режиму випробувань ВК (системи), необхідної точності результатів метрологічних випробувань. Функціонують такі методики оцінки (контролю) метрологічних характеристик [19]:

- $M(0)$  - коли дрейф, варіацію і випадкову складову похибки не враховують;
- $M(0 \overset{\circ}{\Delta})$  - коли враховують тільки випадкову складову похибки;
- $M(OB)$  - коли враховують варіацію;
- $M(OD)$  - коли враховують тільки дрейф;
- $M(OB \overset{\circ}{\Delta})$  - коли враховують тільки варіацію і випадкову складову похибки;
- $M(OD \overset{\circ}{\Delta})$  - коли враховують тільки дрейф і випадкову складову;
- $M(OBD)$  - коли враховують варіацію і дрейф;
- $M(OBD \overset{\circ}{\Delta})$  - коли враховують варіацію, дрейф, випадкову складову похибки.

Для метрологічної атестації ВК системи при вимірюванні амплітуди сигналу акустичної емісії у відповідному частотному діапазоні вибрана методика оцінки і контролю систематичної і випадкової складових без врахування варіації. Методика оцінки полягає в поданні на вхід випробуваної системи детермінованого (синусоїдного) сигналу  $x_i$ , що відповідає  $i$ -й випробуваній точці діапазону вхідного сигналу АЕ - амплітуди в певному частотному діапазоні та  $n$  - кратному відліку вихідного сигналу.

При вимірюванні інтенсивності слідування імпульсів вибрана методика оцінки і контролю основної похибки. Методика оцінки полягає в поданні на вхід випробуваного основного каналу системи стохастичного сигналу, що відповідає і -й випробуваній точці діапазону вхідного сигналу - інтенсивності слідування імпульсів та обробці результатів вимірювань.

Обробка результатів вимірювань - це знаходження середнього значення числового (точкового) ряду випробувань вимірювального каналу системи і його середнього квадратичного відхилення. Використовуються такі вихідні дані для обробки результатів вимірювань: об'єм вибірки  $n$ ; значення вхідного сигналу в і-й випробуваній точці діапазону  $x_i$ ; масив значень вхідного сигналу  $x_i$ ; масив значень вихідного сигналу  $y_i$ ; номінальна статична характеристика перетворення  $f_{ном}(x)$ ; межа допустимого значення систематичної складової похибки  $\Delta_{сдоп}$  і допустимого значення середнього квадратичного відхилення випадкової складової похибки  $\sigma_{сдоп}^0(\Delta)$ .

При вимірюванні амплітуди сигналу АЕ (у певному частотному діапазоні) у методиці атестації ВК використана оцінка і контроль систематичної і випадкової складових відносно похибки відносно виходу системи [19]. При вимірюванні інтенсивності слідування імпульсів у методиці атестації ВК використана оцінка і контроль основної похибки відносно виходу системи. Оцінка інтенсивності слідування імпульсів сигналу АЕ в інтервалі часу  $T$

$$\hat{n}_i = \frac{N}{T_i}, \tag{19}$$

де  $N$  - кількість імпульсів в інтервалі  $T$ . Якщо вимірювання проводяться з постійною статистичною похибкою, необхідно щоб  $n_i T_i \approx const$ . Відповідно відносна статистична похибка вимірювання інтенсивності

$$\delta_i = \frac{1}{\sqrt{\hat{n}_i \cdot T_i}} = \frac{1}{\sqrt{N_i}}. \tag{20}$$

#### **4.9. Вимоги до оформлення результатів експериментальних досліджень**

Розроблена акустико-емісійна система є придатною до функціонування, якщо при визначенні метрологічних характеристик ВК виконуються умови, закладені в технічному завданні. Результати набору експериментальних даних при метрологічних дослідженнях вимірювальних каналів системи подаються у вигляді протоколу. За результатами метрологічних досліджень акустичного вимірювального каналу, методикою оцінки і контролю систематичної і випадкової складових при вимірюванні амплітуди сигналу АЕ, методикою оцінки і контролю основної похибки при вимірюванні інтенсивності - здійснюється їх обробка.

*The article is dealing with features of measuring channels metrological certification in the system for the acoustic emission signal registration with accordance to requirements of measuring standards in force. For developed acoustic-emission system the model of measuring channel and model of channel's error are listed. Method of carrying out the certification of an acoustic measuring channel is regarded.*

#### **Література**

1. Микитин Г.В. Особливості метрологічного забезпечення неруйнівного контролю /В кн.: Механіка руйнування і міцність матеріалів. Довідниковий посібник //Під заг.ред. В.В.Панасюка. Т.5. Неруйнівний контроль і технічна діагностика /Під ред. З.Т. Назарчука.- Львів: ФМІ, 2001.-С. 931-937.
2. Патон Б.Є., Недосека А.Я. Диагностика и прогнозирование остаточного ресурса сварных конструкций //Техн. Диагностика и неразрушающий контроль.- 1992.- №1.- С.3-17.
3. Філоненко С.Ф. Методи і системи акусто-емісійної діагностики // Автореферат дисертації . – Київ, 2003.- С. 36.
4. Скальський В.Р., Пустовой В.М., Бархан А. Портативний накопичувач вибірок сигналів акустичної емісії SVR-6//Техн.диагностика и неразрушающий контроль.- 1999.- №3.- С.24-32.

5. Бухало О.П., Клим Б. П., Микитин Г. В., Почапский Е. П., Федорив Р.Ф. Компьютеризированная информационно- вычислительная система отбора и обработки сигнала акустической эмиссии АЕ-2Л/ Техническая диагностика и неразрушающий контроль .- 2003.- №1. - С. 8-13
6. Бухало О.П., Клим Б.П., Микитин Г.В., Почапский С.П. Проблема метрологічного забезпечення акустико-емісійних вимірювань // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів, вип.8: Неруйнівний контроль та діагностика неоднорідних об'єктв: Зб.наук.праць.- Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, 2003.- С.53-67.
7. Микитин Г. В., Бухало О.П., Клим Б. П.,Почапський Е. П., Федорів Р. Ф. Концептуальний підхід до створення метрологічного забезпечення вимірювань // Український метрологічний журнал .- 2001 .- № 4. – С. 5-9.
8. МИ 2002 - 89. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Организация и порядок проведения метрологической аттестации. - Москва : Изд-во стандартов.- 1991. - 35 с.
9. Бухало О.П., Драган Я.П., Клим Б.П., Микитин Г.В., Почапський С.П. Аспекти міряння параметрів сигналу акустичної емісії // Збірник наукових праць. “Комп’ютерні технології друкарства”- 1999. - №6.-С.168-183.
10. ДСТУ 2681 - 94. Метрологія. Терміни та визначення: -Київ: Держстандарт України, 1994. - 66 с.
11. Брагин А.А., Семенюк А.Л. Основы метрологического обеспечения аналого-цифровых преобразователей электрических сигналов.- М.: Изд-во стандартов, 1989.- 164с.
12. Вопросы экспериментального определения метрологических характеристик измерительных каналов ИИС / А.Л.Семенюк, А.Д.Пинчевский, А.В.Шишкин, Л.Н.Отко // В сб. научных трудов “Метрологическое обеспечение динамических измерений в ИИС”.- Львов: ВНИИМИУС, 1984. - 92 с.
13. ГОСТ 8.009-84. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормирование и использование метрологических характеристик средств измерений.- М.:Изд-во стандартов,1985.- 150 с.
14. Р50 - 080. 99. Метрологія. Системи вимірювальні інформаційні. Метрологічне забезпечення. Основні положення. - Київ: Держстандарт України, 2000 р. - 15 с.
15. Федорів Р.Ф., Микитин Г.В. Елементи теорії міряння . – Тернопіль : ТДТУ, 1999.- 165 с.
16. Марков Б. Ф.Проблемы внедрения в метрологическую практику “Руководство по выражению неопределенности измерений // Наукові праці III Міжнародної науково-технічної конференції "Метрологічне забезпечення в галузі електричних, магнітних та радіовимірювань" (Метрологія в електроніці-2000), У 2-х томах. - Т. 1. - Харків, 10-12 жовтня 2000 р. - С. 40- 45.
17. Бухало О.П. Образцовый импульсный стохастический сигнал - применение, воспроизведение, аттестация. // Измерительная техника.-1997.- №6. - С. 24-33.
18. РД “Метрологическое обеспечение информационно-измерительных систем”. - М.: Изд-во стандартов, 1984.- 263 с.
19. ГОСТ 8.508-84. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологические характеристики средств измерений и точности характеристики средств автоматизации ГСП. Общие методы оценки и контроля.-М.: Изд-во стандартов, 1984.-С. 53.

*Одержано 23.04.2003 р.*