

МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 621.691.4

DOI: 10.31471/1993-9981-2022-2(49)-5-26

ОСОБЛИВОСТІ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТРУБОПРОВОДІВ НИЗЬКОЧАСТОТНИМИ СПРЯМОВАНИМИ ХВИЛЯМИ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ

О. Г. Бондаренко

*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України
вул. К. Малевича, 11, м. Київ-150, 03650, Україна, e-mail: usndt@ukr.net*

На основі розробленої класифікації відбивачів низькочастотної ультразвукової спрямованої хвилі обґрунтована класифікація множини контрольних образів відбивачів технологічного трубопроводу, які розділені на відповідні підмножини контрольних образів, що відносяться до трьох кластерів (груп). Складовими кластерів є підмножини контрольних образів, що відображають відповідно технологічні, конструктивні та експлуатаційні відбивачі технологічного трубопроводу. Підмножини контрольних образів кожного кластеру розділені відповідно на симетричні та асиметричні. Для застосування теорії розпізнавання образів у процедурі діагностування технічного стану технологічного трубопроводу системами низькочастотного контролю спрямованими хвилями визначено основні поняття суті контрольних та діагностичних образів, ознаки наведених образів стосовно експлуатаційних відбивачів трубопроводу.

На основі аналізу експериментальних досліджень, наведених у зарубіжних наукових виданнях, визначено розв'язуючі межі ознак діагностичних образів, які прийняті в системах низькочастотного контролю спрямованими хвилями протяжних трубопроводів і які відповідають втратам металу в поперечному перерізі стінки труби, що дозволяють розділити ознаки контрольних образів експлуатаційних відбивачів на три класи. Такі розділюючі межі визначені на рівні 9 % та 12 % втрат металу в поперечному перерізі стінки труби.

Виконано аналіз процедури контрольньо-діагностичного процесу при визначенні технічного стану технологічних трубопроводів з застосуванням систем низькочастотного ультразвукового контролю спрямованими хвилями, яка ґрунтується на операції ідентифікації втрат металу стінки труби протягом часу експлуатації трубопроводу. Розроблена структурна схема процедури контрольньо-діагностичного процесу, в основу якої покладено правило порогової ідентифікації дефектів з використанням логічної двійкової системи кодування інформації, що реалізується за допомогою порогових елементів.

Описано спосіб попереднього представлення підмножин контрольних образів, отриманих від технологічних і конструктивних відбивачів трубопроводу, та підмножини експлуатаційних контрольних образів, розділених на три класи, що знайшли своє відображення при розробці формату шкали численних, накладених один на одного, А-сканів на дисплеї системи Teletest при контролі дільниці трубопроводу.

Проаналізовано особливості ідентифікації втрат металу у поперечному перерізі стінки труби через наявність дефекту. Показано, що за даними контролю технічного стану трубопроводу з використанням системи низькочастотного контролю спрямованими хвилями неможливо обґрунтувати інформацію про глибину ураження стінки труби, яку можуть дати тільки фізичні методи вимірювання товщини стінки за допомогою засобів товщинометрії. Розроблена схема алгоритму оцінки втрат металу стінки труби, яка ілюструє, що висновок про наявність дефекту та ступінь ураження стінки труби з використанням системи низькочастотного контролю спрямованими хвилями роблять за амплітудою відбитого сигналу. Але така оцінка є не прямою, тобто якісною. Величина потоншення стінки труби, виміряна товщинометром, є прямою, тобто кількісною. Між ними немає прямої кореляції, тому що використовуються різні фізичні способи та засоби оцінки.

Ключові слова: розпізнавання образів, розв'язуюча межа, контрольний образ, діагностичний образ, контрольньо-діагностичний процес, ідентифікація дефектів.

Based on the analysis of theoretical foundations and practical aspects of methods and basic principles of image recognition systems in various fields of science and technology, the essence of the basic concepts of image recognition methodology in relation to its use in assessing the technical condition of industrial facilities by non-destructive testing and technical diagnostics. The essence of the concept of "image" and its use in sonar to obtain images of acoustic images in the detection of submarines and registration of seismic signals in the search for oil fields. The mathematical problem of classification of images based on separate functions is given, which consists in division of all space of signs of images to corresponding classes with application of elements of threshold logic on dividing borders between classes.

Based on the developed classification of reflectors of low-frequency ultrasonic directional wave, the classification of the set of control images of reflectors of the process pipeline is substantiated, which are divided into corresponding subsets of control images belonging to three clusters (groups). Components of clusters are subsets of control images that reflect, respectively, technological, structural and operational reflectors of the technological pipeline. The subsets of control images of each cluster divided into symmetric and asymmetric, respectively. To apply the theory of pattern recognition in the procedure of diagnosing the technical condition of the technological pipeline by low-frequency control systems with directional waves, the basic concepts of control and diagnostic images, features of these images in relation to operational reflectors of the pipeline.

Based on the analysis of experimental studies presented in foreign scientific journals, the defining boundaries of diagnostic image features, which adopted in low-frequency control systems by directional waves of long pipelines and which correspond to metal losses in the cross section of the pipe wall in three classes. Such separating limits are set at 9% and 12% of metal losses in the cross section of the pipe wall.

The analysis of the procedure of control and diagnostic process in determining the technical condition of technological pipelines using low-frequency ultrasonic control systems by directional waves, which is based on the operation of identifying metal losses of the pipe wall during the operation of the pipeline. The structural scheme of the procedure of control-diagnostic process developed, which based on the rule of threshold identification of defects with the use of logical binary information coding system, which realized by means of threshold elements.

The method of preliminary presentation of subsets of control images obtained from technological and structural reflectors of the pipeline and subsets of operational control images divided into three classes described in the development of the scale format of numerous superimposed A-scans on the «Teletest» display, control of the pipeline section.

Features of identification of metal losses in the cross section of the pipe wall due to the defect analyzed. It is shown that according to the control of the technical condition of the pipeline using low-frequency control system by directional waves it is impossible to substantiate information about the depth of the pipe wall, which can only give physical methods of measuring wall thickness using thickness gauges. A scheme of the pipe wall metal loss estimation algorithm has been developed, which illustrates that the conclusion about the presence of a defect and the degree of damage to the pipe wall using a low-frequency directional wave control system is based on the amplitude of the reflected signal. However, such an assessment is not direct, ie qualitative. The amount of thinning of the pipe wall, measured by a thickness gauge, is direct, ie quantitative. There is no direct correlation between them, because different physical methods and means of evaluation are used.

Key words: pattern recognition, delimiter, control image, diagnostic image, control-diagnostic process, defect identification.

Вступ. На даний час у різних галузях промисловості України знаходиться в експлуатації велика кількість різноманітних відповідальних промислових об'єктів, які в значній мірі потребують проведення процедур оцінки їх технічного стану з метою продовження ресурсу подальшої експлуатації. Серед таких відповідальних об'єктів значну кількість складають технологічні трубопроводи, що постійно потребують забезпечення необхідної працездатності. Це можна досягнути шляхом застосування процедур неруйнівного контролю, діагностування технічного стану та їх періодичного моніторингу в процесі

експлуатації.

В роботі [1] наведена спрощена класифікація найбільш поширених технологічних трубопроводів із труб середнього діаметра, виконано аналіз різноманітних пасивних і активних, локальних і регіональних методів неруйнівного контролю, що застосовуються для виявлення дефектів у технологічних трубопроводах. Серед активних регіональних методів неруйнівного контролю технологічних трубопроводів виділено акустичний кореляційний метод та метод низькочастотного контролю направленими спрямованими хвилями. Наведена також класифікація основних типових відбивачів

у структурі технологічних трубопроводів, які поділені на технологічні, конструктивні та експлуатаційні. Останні як несущі виникають в стінці труби технологічного трубопроводу в процесі експлуатації і є предметом виявлення при застосуванні систем низькочастотного УЗК спрямованими хвилями. Отримана при цьому інформація про несущість стінки труби може бути використана для встановлення діагнозу, тобто для визначення технічного стану трубопроводу, в якому він знаходиться в момент часу проведення контролю. Саме дані процесу неруйнівного контролю, які дають можливість отримати інформацію про технічний стан технологічного трубопроводу для оцінки можливості продовження ресурсу його експлуатації, відносяться до процесу технічного діагностування його стану.

Таким чином, неруйнівний контроль та технічне діагностування – це процеси, за допомогою яких з використанням теорії, методів і засобів, що складають основу технічної діагностики, у кільцевому результаті можна отримати інформацію про технічний стан технологічного трубопроводу, який знаходиться в експлуатації, та у першому наближенні оцінити його залишковий ресурс.

Відомо, що впродовж всього строку експлуатації любого технічного об'єкта здійснюється необхідний об'єм дій, визначений технічною документацією на об'єкт, у результаті чого він виконує свої функції. В процесі здійснення таких дій методами і засобами неруйнівного контролю можуть визначатися характеристики об'єкта контролю, так звані контрольні ознаки – несущість в матеріалі об'єкта, що виникають в процесі його виготовлення та експлуатації і підлягають виявленню під час контролю. Таким чином, неруйнівний контроль – це визначення за контрольними ознаками з використанням відповідних методів і засобів наявних несущостей в об'єкті контролю та визначення окремих із них в якості дефектів.

Необхідність переходу від процесу неруйнівного контролю до процесу технічного діагностування стану об'єкта приводить до пошуку діагностичних ознак, які відображають геометричні параметри дефектів згідно з прийнятою класифікацією дефектів, що

дозволяє оцінити рівень технічного стану об'єкта діагностування.

Саме тому всі методи і засоби технічної діагностики та дані процесу неруйнівного контролю об'єкта, які надають можливість отримати інформацію про технічний стан об'єкта для оцінки можливості продовження ресурсу його експлуатації, відносяться до технічного діагностування. Таким чином, технічне діагностування – це методологія визначення технічного стану об'єкта з метою оцінки його технічної безпеки і прогнозування ресурсу його експлуатації. Саме визначення відповідності об'єкта вимогам промислової безпеки шляхом оцінки його технічного стану є головною задачею технічного діагностування [2].

Основою процесу технічного діагностування прийнято вважати загальну теорію розпізнавання, яка складає важливий розділ технічної кібернетики і займається розпізнаванням образів любой природи і характеру. В цілому термін «розпізнавання образів» визначає різноманітне поле діяльності, пов'язане як з реальними життєвими потребами (розпізнавання людьми і тваринами «образів» в оточуючому їх середовищі), так і з вирішенням наукових і технічних задач.

Сутність основних положень теорії розпізнавання образів при діагностуванні технічного стану промислових об'єктів. Теорія розпізнавання образів вивчає методи одержання та оцінки діагностичної інформації, діагностичні моделі, алгоритми розпізнавання та прийняття рішень стосовно до задач діагностування технічного стану промислових об'єктів, часто в умовах обмеженої інформації, коли необхідно удаватися до використання певних прийомів і правил для прийняття рішень. Щодо процесу технічного діагностування при визначенні стану промислових об'єктів основні етапи його проведення включають необхідність виконання операції класифікації дефектів з точки зору їх небезпеки, визначення основних діагностичних ознак дефектів відносно класів, алгоритмів розпізнавання дефектів при прийнятті рішень, що дозволить отримати кількісну інформацію щодо належності дефектів до кожного класу, виконати оцінку технічного стану об'єкта та обґрунтувати прогноз щодо можливого ресурсу його експлуатації.

Алгоритм розпізнавання містить сукупність послідовних безумовних дій в процесі діагностування технічного стану об'єкта, в результаті чого технічний стан об'єкта може бути віднесений до одного із можливих класів (діагнозів). У більшості задач технічного діагностування класи (діагнози) встановлюються заздалегідь, і в цих умовах задачу розпізнавання називають задачею класифікації.

У цьому випадку алгоритми розпізнавання частіше всього групуються на діагностичних моделях, які встановлюють зв'язки між станами технічної системи та їх відображеннями у просторі діагностичних образів. Важливою частиною проблеми розпізнавання є прийняття рішень, для чого використовуються розв'язуючі правила. Суттєвою частиною процесу розпізнавання є вибір діагностичних образів, які описують стан об'єкта. Діагностичні образи повинні бути достатньо інформативними, щоби при вибраному числі діагнозів процес розпізнавання технічного стану об'єкта міг бути здійсненим.

Аналіз теоретичних основ та практичних аспектів методів й основних принципів побудови систем розпізнавання образів у різних галузях науки та техніки показує, що існують три основні типи методології: евристична, математична та лінгвістична (синтаксична) [3].

При вирішенні задач із застосуванням методів розпізнавання образів у техніці використовуються математичні методи, в основу яких покладені правила класифікації. Ці методи побудови систем розпізнавання образів можна розділити на два класи: ймовірнісні (статистичні) і детерміністичні.

Постановка задачі розпізнавання образів при ймовірнісних методах така. Існує технічний об'єкт, який знаходиться в одному із n випадкових станів D_i . Відома сукупність діагностичних образів, кожний із котрих з визначеною ймовірністю характеризує стан об'єкта. Необхідно побудувати розв'язуюче правило, за допомогою якого пред'явлена (діагностуєма) сукупність контрольних образів була б віднесена до одного із можливих діагнозів (станів) об'єкта.

При детерміністичних методах розпізнавання зручно формулювати задачу на геометричній мові. Якщо технічний об'єкт

характеризується n -мірним фактором X , то будь-який стан об'єкта представляє собою точку в n -мірному просторі параметрів (діагностичних образів). Передбачається, що діагноз D_i відповідає деякій області простору образів, що розглядається. Необхідно визначити розв'язуючі правила, у відповідності з якими пред'явлений вектор X^* (діагностуємий об'єкт) буде віднесено до визначеної області діагнозу. Таким чином задача зводиться до поділу простору образів на області діагнозів (класів).

При детерміністичному підході області діагнозів зазвичай вважаються «неперетинними», тобто ймовірність одного діагнозу, в область якого попадає точка, дорівнює одиниці, а ймовірність інших дорівнює нулю. Подібним чином передбачається, що і кожний образ або зустрічається при цьому діагнозі, або відсутній.

У подальшому розглядається можливість застосування детерміністичного підходу в задачі розпізнавання образів у процедурі діагностування технічного стану технологічних трубопроводів низькочастотними ультразвуковими спрямованими хвилями.

Для цього визначимо, яка інформація за змістом була введена в поняття «образ» з самого початку його застосування в неруйнівному контролі. В найбільш загальному розумінні образ – це деяка множина одночасних спостережень, якій можна поставити у відповідність вектор

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

компонентами якого є кремні спостереження, взяті в сукупності [4].

Першими системами, призначеними для отримання образів акустичних зображень, були гідролокатори для виявлення підводних човнів та реєстрації сейсмічних сигналів при пошуку родовищ нафти [5]. Обидві системи випромінювали акустичні імпульси й приймали відбиті сигнали, дозволяючи вирахувати відстань у часі приходу відбитого сигналу. Метод гідролокації підводних човнів приводить у цілому до отримання одновимірних результатів. Саме принцип гідролокації був застосований у неруйнівному контролі об'єктів та в медицині для дослідження стану людини.

Задача розпізнавання образів полягає в класифікації деякої групи об'єктів на основі визначених вимог. Об'єкти, що відносяться до

одного класу образів, мають спільні властивості. Вимоги, що визначають класифікацію, можуть бути різними, тому що у відмінних ситуаціях виникає необхідність у різноманітних типах класифікацій.

У цілому задачі, що виникають при побудові систем розпізнавання образів, можна розділити на такі [6, 7].

Першою можна вважати задачу визначення того, які вимірювання повинні бути виконані над вхідним образом, де кожна вимірювана величина – деяка характеристика процесу, або ознака образу. Критерій відбору ознак ґрунтується на важливості ознак для характеристики образу або на впливі даних ознак на якість розпізнавання, тобто на точність розпізнавання.

Другою важливою задачею розпізнавання образів слід вважати класифікацію, тобто прийняття рішення про належність вхідних образів тому чи іншому класу, яке ґрунтується на вимірюваннях відібраних ознак. Ознаки класу образів уявляють собою характерні властивості, загальні для всіх образів цього класу. Ознаки, що характеризують відмінності між окремими класами, інтерпретуються як міжкласові ознаки.

Наступна важлива задача теорії розпізнавання образів полягає у пошуку оптимальних алгоритмів розрахунку, необхідних для класифікації та інтерпретації результатів. Одним із ефективних підходів до розв'язання задачі розпізнавання образів є метод, пов'язаний з використанням системи лінійних відокремлюючих функцій [4, 6 – 8]. Саме за допомогою відокремлюючих функцій формулюється математична задача класифікації образів, яка полягає у віднесенні всього простору ознак образу до відповідних класів. Це можна трактувати як розбиття простору ознак на взаємно неперетинні області, кожна із яких відповідає деякому класу ознак образу.

Загалом вектор X за виразом (1), що носить назву вектору ознак, можна розглядати як вектор ознак у просторі множини ознак Ω_x . Математична задача класифікації ознак образу за допомогою відокремлюючих функцій формулюється таким чином [6].

Хай $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$ позначають m можливих класів ознак, що підлягають розпізнаванню за

виразом (1), де x_i уявляє собою i -у ознаку.

Тоді відокремлююча функція $D_j(X)$, яка відноситься до класу ознак ω_j , $j=1, 2, \dots, m$, така, що якщо вхідна множина ознак, що являє собою вектор X , належить класу ω_i , то величина $D_i(X)$ повинна бути найбільшою. Хай $X \in \omega_i$ значить, що вектор ознак X належить класу ω_i . Тоді можна записати, що для всіх $X \in \omega_i$ критерій сортування ознак буде визначатися набором відокремлюючої функції $D_i X > D_j(X)$, для всіх $i, j=1, \dots, m, i \neq j$. (2)

Таким чином, у просторі ознак Ω_x межа розбиття, що носить назву розв'язуючої межі, між областями, які відносяться відповідно до класу ω_i та класу ω_j , буде виражатися рівнянням:

$$D_i(X) - D_j(X) = 0. \quad (3)$$

Узагальнена схема класифікатора, в основу якого покладено критерій (3), наведена на рис. 1.

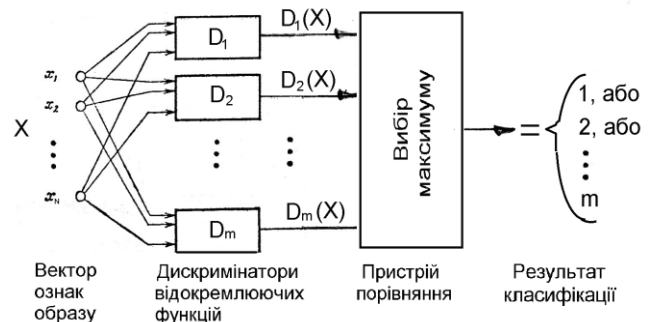


Рисунок 1 – Узагальнена схема класифікатора

Наведений класифікатор у загальному випадку являє собою пристрій, що відносить кожен поступаючу на його вхід допустиму множину ознак образу до одного із кінцевого числа класів, вираховавши при цьому множину відокремлюючих функцій. Класифікація виконується шляхом знаходження максимальних відокремлюючих функцій. Таким чином, класифікатор виносить рішення, що стосується класу, до якого відноситься ознака, й тим самим реалізує відображення m класів.

Можна вибрати багато різноманітних форм відокремлюючих функцій $D_i(X)$, які задовольняють умови (2). Ми ж надалі будемо

розглядати тільки лінійні системи. На рис. 2 наведено типовий приклад застосування відокремленої функції $D_i(X)$ при визначенні

простої розв'язуючої межі для випадку розділення двомірного простору ознак на класи [6].

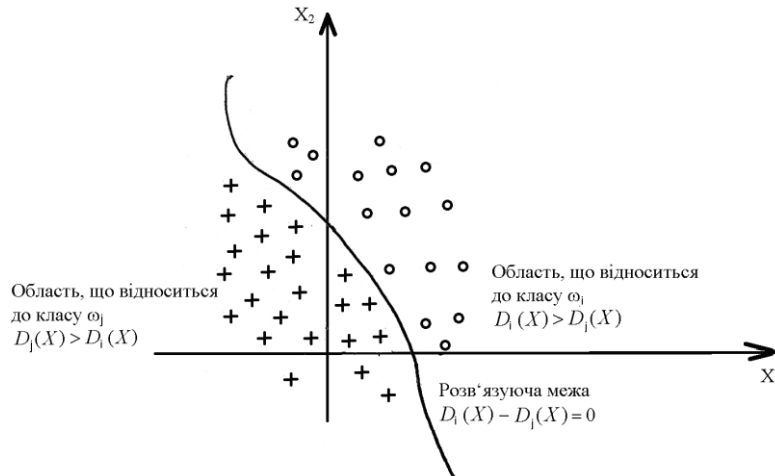


Рисунок 2 – Приклад простої розв'язуючої межі для випадку розділення двомірного простору ознак на класи ω_i та ω_j

Простий варіант двомірної лінійної відокремлюючої функції можна узагальнити на N-вимірний випадок розпізнавання образів. У цьому випадку в якості функції $D_i(X)$ береться лінійна комбінація ознак x_1, x_2, \dots, x_N . Тоді вид лінійної відокремлюючої функції запишеться формулою [3]:

$$D_i(X) = w_{1i} \cdot x_1 + w_{2i} \cdot x_2 + \dots + w_{ki} \cdot x_N + w_{i,N+1}, \quad (4)$$

де w_1, w_2, \dots, w_k - вагові коефіцієнти;

x_1, x_2, \dots, x_N - змінні вимірні характеристики ознак.

Формулу (4) можна записати у вигляді [6]:

$$D_i(X) = \sum_{k=1}^N w_{ki} \cdot x_k + w_{i,N+1}, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

Розв'язуюча межа між областями ω_i та ω_j

для множини ознак Ω_x буде мати вигляд:

$$D_i(X) - D_j(X) = \sum_{k=1}^N w_k \cdot x_k + w_{N+1} = 0, \quad (6)$$

де $w_k = w_{ik} - w_{jk}$; $w_{N+1} = w_{i,N+1} - w_{j,N+1}$

Рівняння (6) являє собою рівняння гіперплощини у просторі ознак Ω_x .

Найпростішим є лінійний класифікатор, що складається із двох класів, тобто $m = 2$. Тоді, згідно (5), $i, j = 1, 2 (i \neq j)$. В цьому випадку в якості класифікатора, що використовує лінійну відокремлюючу функцію, застосовується елемент порогової логіки. На рис. 3 наведено схему лінійного класифікатора двох класів [6].

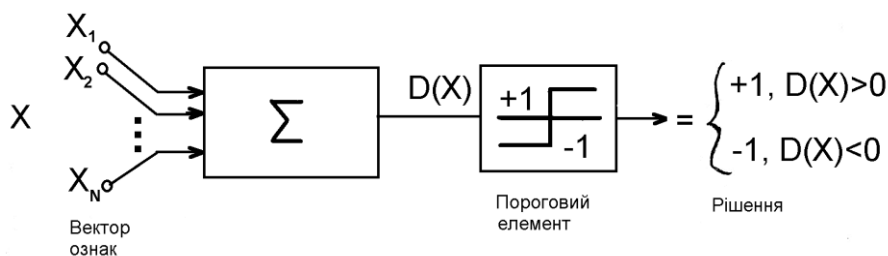


Рисунок 3 – Схема лінійного класифікатора двох класів

Прийнявши, що відокремлююча функція $D(X) = D_1(X) - D_2(X)$, отримуємо, що: якщо вихідний сигнал $= +1$, тобто при $D(X) > 0$, то $X \in \omega_1$; якщо вихідний сигнал $= -1$, тобто при $D(X) < 0$, то $X \in \omega_2$.

Таким чином, класифікатор для двох класів можна розглядати як пристрій, що вираховує єдину відокремлюючу функцію $D(X)$ і класифікує X у відповідності з алгебраїчним знаком результату згідно рис. 3.

У такому лінійному класифікаторі ознаки, що характеризують об'єкт, відносяться до логічних (детермінованих), які можна розглядати як елементарні висловлювання, що можуть приймати два значення істинності виду «так» та «ні» з повною невизначеністю.

В технічній діагностиці по схемі цього класифікатора приймається рішення про розмежування виявлених при ультразвуковому неруйнівному контролі дефектів на «допустимі» та «недопустимі», використовуючи порогове значення дефекту. Для порівняння сигналів від дефектів використовується індикація від еталонного дефекту.

Саме цей найпростіший підхід до розпізнавання образів, що полягає в порівнянні з еталонами, використовується в теорії розпізнавання, коли деяка множина еталонів образів для кожного класу зберігається в системі розпізнавання [3, 6]. Вхідний образ, що розпізнається, порівнюється з еталоном кожного класу. Це означає, що класифікація образів ґрунтується на заздалегідь вибраних еталонах образів. Іншими словами, якщо вхідний образ краще відповідає еталону i -го класу образів, ніж іншому будь-якому еталону, то вхідний образ класифікується таким, що належить до i -го класу образів. У свою чергу підхід порівняння вхідних образів з еталонами вимагає вибору підходящих еталонів у залежності від практичного застосування теорії розпізнавання образів у різних сферах.

Класифікація контрольних образів відбивачів та визначення основних понять ознак образів при технічному діагностуванні стану технологічних трубопроводів. Відомо, що дослідження будь-якого явища, як правило, починається з класифікації. Будь-які факти та явища повинні бути упорядковані, перш ніж ми

зможемо їх зрозуміти та розробити загальні принципи, які пояснюють їх появу та очевидний порядок. З цієї точки зору стверджується, що саме класифікація є одним із фундаментальних процесів у наукових дослідженнях і тому вважається інтелектуальною діяльністю високого рівня, необхідного нам для розуміння природи любого факту та явища. Але оскільки класифікація – це упорядкування об'єктів за їх подібністю, а об'єктом можна назвати все що завгодно, включаючи процеси, дії та характеристики, то можна прийти до висновку, що класифікація не обмежується рамками людського інтелекту і в дійсності є фундаментальними властивостями всіх живих організмів.

Вирішення задачі застосування теорії розпізнавання образів при діагностуванні технічного стану технологічних трубопроводів з використанням систем низькочастотного УЗК спрямованими хвилями вимагає розробки класифікації образів відбивачів технологічного трубопроводу, класифікація яких наведена в роботі [1].

В процесі акустичної локації середовища стінки труби технологічного трубопроводу низькочастотними ультразвуковими спрямованими хвилями з однієї точки встановлення п'єзоперетворювачів акустичної антени результатом локації буде множина відбитих від усіх відбивачів технологічного трубопроводу сигналів, які можна назвати контрольними образами. Всю множину $\{A\}$ одночасно отриманих контрольних образів від усіх відбивачів, узятих у сукупності, можна розділити на три кластери (групи), складовими яких будуть підмножини контрольних образів, отриманих відповідно від технологічних, конструктивних та експлуатаційних відбивачів технологічного трубопроводу.

До першого кластера буде віднесена підмножина $\{A_t\}$ контрольних образів, отриманих від технологічних відбивачів, яка в свою чергу може бути розділена на контрольні образи від симетричних та асиметричних відбивачів. Другий кластер буде включати підмножину $\{A_k\}$ контрольних образів від конструктивних відбивачів трубопроводу, яка також буде складатися із контрольних образів від симетричних та асиметричних відбивачів. Місця розміщення технологічних і

конструктивних відбивачів відомі згідно з технічною документацією на трубопровід й тому контрольні образи таких відбивачів можуть бути легко виділені із усієї множини $\{A\}$ контрольних ознак відбивачів, отриманих на контрольованій ділянці трубопроводу низькочастотними спрямованими хвилями.

Нарешті, третій, найбільш важливий кластер з точки зору процедури діагностування технічного технологічного трубопроводу, складає підмножина $\{A_e\}$ контрольних образів від експлуатаційних відбивачів, яка також включає контрольні образи від асиметричних

(дефектів стінки труби) та симетричних (дефекти зварних з'єднань труб) відбивачів. До дефектів стінки труби відносяться корозійні пошкодження та ерозійні стоншення металу у поперечному перерізі стінки труби. Контрольні образи цих дефектів на контрольованій ділянці трубопроводу розмішуються випадково, але контрольні ознаки будуть опосередковано давати інформацію про розміри дефектів стінки труби.

На рис. 4 наведена класифікація контрольних образів технологічного трубопроводу.



Рисунок 4 – Класифікація контрольних образів відбивачів технологічного трубопроводу

Наведені на рис. 4 розподілення множини $\{A\}$ контрольних образів відбивачів технологічного трубопроводу на мові образів називається алфавітом кластерів, до яких віднесені відповідні підмножини контрольних ознак відбивачів. Характерною ознакою наведеного розділення контрольних ознак є те, що для розпізнавання типу відбивачів використовується однотипна інформація, тобто контрольні образи, які мають одну фізичну природу – відбиті від відбивачів електричні сигнали.

При проведенні процедури діагностування технічного стану технологічних трубопроводів з

використанням системи низькочастотного ультразвукового контролю нас найбільше буде цікавити кластер підмножини контрольних образів від експлуатаційних відбивачів, за параметрами яких будуть прийматися рішення про технічний стан трубопроводу. Визначення контрольних образів експлуатаційних відбивачів необхідно також для того, щоби мати хоча б якийсь уявлення про закономірність зміни у часі втрат металу у поперечному перерізі стінки труби із-за корозійного пошкодження та ерозійного зношення для кожного конкретного технологічного трубопроводу, щоби можна було зробити висновок про його технічний стан.

Для застосування теорії розпізнавання у процедурі діагностування технічного стану технологічних трубопроводів визначимо основні поняття контрольних та діагностичних образів, які будуть використовуватися у процедурі діагностування.

Контрольний образ – підмножина $\{Ae\}$ відбитих сигналів від експлуатаційних несучільностей труби, що відображають у відсотках втрати металу стінки труби внаслідок корозійного пошкодження або ерозійного її зношення.

Ознака контрольного образу – підмножина амплітуд відбитих сигналів від експлуатаційних несучільностей стінки труби. Саме підмножина амплітуд відбитих сигналів у відсотках втрати металу буде характеризувати технічний стан трубопроводу й дозволяє розділити контрольні образи на класи. У закордонних системах низькочастотного УЗК підмножину відбитих сигналів стосовно відсотків втрати металу стінкою труби розділено на три класи: незначні, помірні, серйозні.

Діагностичний образ – підмножина відбитих сигналів від штучних несучільностей стінки труби, що відображають у відсотках втрати металу стінки та визначають відповідні розв'язуючі межі між обґрунтованими класами дефектів стінки труби.

Ознака діагностичного образу – підмножина амплітуд відбитих сигналів від штучних несучільностей стінки труби, які визначають пороги ідентифікації дефектів між класами на відповідній розв'язуючій межі.

Інформативний параметр процесу діагностування технічного стану трубопроводу – значення залишкової частини амплітуди відбитого сигналу контрольного образу від експлуатаційної несучільності, яке виникає після автоматичного порівняння (розпізнавання) амплітуди контрольного образу з амплітудою (порогом) діагностичного образу на визначеній розв'язуючій меті та буде віднесене до відповідного класу дефектів стінки труби.

Визначення підмножини діагностичних образів на розв'язуючих межах між класами контрольних образів. Для виконання процедури діагностування технічного стану технологічних трубопроводів на базі підмножини амплітуд відбитих сигналів від експлуатаційних несучільностей шляхом

розбиття контрольних образів на класи в залежності від ступеня втрати металу стінки труби в закордонних системах низькочастотного УЗК було застосовано спосіб виготовлення штучних дефектів стінки труби та проведення експериментальних досліджень з визначення ознак діагностичних образів на розв'язуючих межах між класами ознак контрольних образів.

Найбільш вагові дослідження у цьому напрямку були приведені в Англії фірмою Plant Integrity Limited, яка одна з перших розробила систему та технологію далекодійного низькочастотного діагностування технічного стану протяжних трубопроводів типу Teletest [9]. Роботи з визначення класів ознак контрольних образів експлуатаційних відбивачів проводилися на основі експериментів шляхом визначення залежності амплітуди відбитого сигналу від величини втрати металу в поперечному перерізі стінки труби, які задавалися механічним шляхом.

Дослідження базувалися на способі оцінки чутливості технології низькочастотного ультразвукового діагностування протяжних трубопроводів спрямованими хвилями при визначенні зовнішньої корозії труби під ізоляцією та внутрішньої корозії труби. Експерименти проводилися на системних трубопроводах з ізоляцією на технологічних трубопроводах діаметром 50 – 300 мм [9, 10]. Мінімальною необхідною чутливістю було визначення корозії на глибину 50 % товщини стінки, а також області $D/2 \times D/2$ (D – діаметр труби), що становило приблизно 9 % площі поперечного перерізу труби на відстані не менш 15 м від місця установки перетворювачів акустичної антени. Оскільки корозію можна розглядати як глибокі виїмки невеликої площі, то в процесі досліджень ставилося також завдання перевірити чутливість методу при визначенні корозії глибиною 50 % товщини стінки й області $3t \times 3t$ (t – товщина стінки труби), що становило приблизно 3 % площі поперечного перерізу стінки труби.

Експериментальні дослідження ґрунтувалися на використанні різних моделей несучільностей стінки труби, виготовлених механічним шляхом, в результаті чого було встановлено, що спрямовані хвилі, які розповсюджуються в трубопроводі, можуть бути застосовані для визначення корозійного

ураження стінки труби.

У роботі [9] наведені результати теоретичних і практичних досліджень для визначення відбиттів від втрат поперечного перерізу труби діаметром 76 мм. Частота збуджуваного сигналу становила 70 кГц. При дослідженні використовувалися штучні дефекти у вигляді паза 50 % товщини стінки як функція довжини окружності й паза шириною більше 11 % довжини окружності як функція глибини дефекту. Потім ці дослідження були розширені й на більший розмірний діапазон дефектів, забезпечуючи, таким чином, пакет даних про знайдені відбиття. На рис. 5 наведена середня залежність між амплітудою відбитого сигналу й площею дефекту як пропорцією поперечного перерізу стінки труби.

Можна помітити, що не всі кружечки, що відповідають амплітуді відбитого сигналу при одній і тій же площі дефекту, лежать на середній лінії. Було висловлене припущення, що глибокі дефекти з малою довжиною по окружності труби дають більше відбиття, чим довгі по окружності, але неглибокі тієї ж площі. Це теоретичне припущення було експериментально перевірене на трубах діаметром 76 і 200 мм, що містять штучні дефекти у вигляді пазів відомих площ поперечного перерізу. У більшості випадків практичні результати були близькі до прогнозованого. Тому наведена на рис. 5 залежність була використана як база для опису чутливості методу УЗК спрямованими хвилями в системі Teletest [9]. Із залежності рис. 5 видно, що в діапазоні від 15 до 50 % площі пошкодженого дефектом поперечного перерізу труби крива чутливості змінюється більш плавно. У діапазоні від 3 до 9 % чутливість методу проявляється сильніше.

Підтвердження про можливість за допомогою довгохвильового УЗК виявляти невеликі втрати металу на рівні 3 % поперечного перерізу труби наведені в більше ранній роботі [10]. У роботі [11] також підтверджується можливість прийому відбитого сигналу від реального еталонного відбивача на рівні 4 % дефектності поперечного перерізу труби.

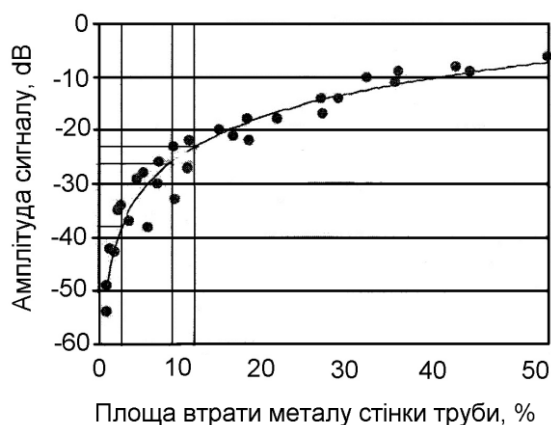


Рисунок 5 – Залежність амплітуди відбитого сигналу від площі втрат металу: кружечки – відбиття від дефектів; крива – найкраща збіжність залежності

Підтвердження обраних порогів системи Teletest здійснювалося шляхом проведення дослідницьких робіт з європейського проекту RACH, очолюваному Лондонським університетом [12]. Основна частина роботи полягає в зборі даних про неруйнівний контроль зразків труб, пошкоджених корозією, з використанням восьми методів НК для порівняння їхньої здатності виявлення дефектів. Випробування проводилися «у сліпу» без знання існуючих дефектів. Оцінка результатів досліджень здійснювалася незалежною групою з Бюро Vezitas, Париж. На рис. 6 наведені результати оцінки 36 різних дефектів для труб діаметром 150 мм. Графік побудований у вигляді залежності глибини пошкодження дефектами стінки труби від довжини по окружності й показує виявлені й невиявлені дефекти. Криві відбивають дефекти на рівні 3 % і 9 % площі поперечного перерізу труби.

Графіки на рис. 6 показують, що при «сліпих» умовах контролю система Teletest працює як очікувалося. Очевидно обмежене виявлення дефектів при 3 % рівня й нижче його. Дані показують класичну ймовірність характеристик виявлення, що збільшується в області вище рівня, що відповідає 3 % поперечного перерізу труби. Всі контрольовані дефекти навколо й вище 9 % рівня були виявлені. Ці результати дуже важливі, тому що вони демонструють можливості роботи системи Teletest на відомих зразках з відомими дефектами й можуть бути відтворені при

проведенні діагностики трубопроводів з корозією в невідомих місцях.

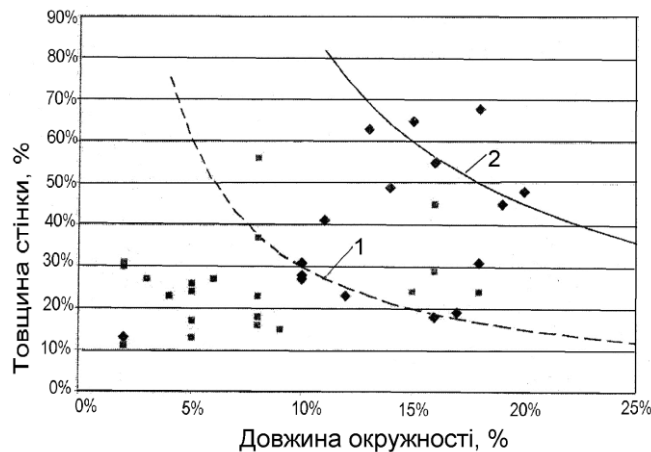


Рисунок 6 – Результати виявлення дефектів системою Teletest як залежності глибини пошкодження стінки труби від довжини по окружності:

◇ - виявлені дефекти; □ - не виявлені дефекти; 1 – межа 3 % зони; 2 – межа 9 % зони

Такі ж дослідження були проведені на трубах діаметром 600 мм (товщина стінки 8,74 мм) на 86 видах моделей дефектів, виконаних механічним шляхом [13]. У цьому випадку були виявлені дефекти значно нижче кривої 9 % площі поперечного перерізу труби, а також дефекти нижче, ніж 3 % площі. Результати цих досліджень показали, що у випадку труби з більшим діаметром мінімальна чутливість до виявлення втрат металу стінок, еквівалентна 9 % площі поперечного перерізу, вище, а практична мета обстеження 3 %-ої площі стінки труби була досягнута для більшості випадків. Як впливає з роботи [9], чутливість до дефектів вище на лініях більших діаметрів труб, коли відношення діаметра до товщини стінки труби набагато більше, ніж при малих діаметрах труб. Однак на трубах великого діаметра досить складно виявити невеликі окремі ділянки корозії, тому що розмір кожного корозійного пошкодження не пропорційний внутрішньому діаметру труби [13].

Найбільш важливим є те, що метод і технологія низькочастотного УЗК є методом якісної дистанційної візуалізації місця

розташування дефектів і чутливий до зменшення поперечного перерізу труби, тобто до будь-яких втрат металу в комбінації глибини й довжини по окружності труби через корозійне пошкодження або ерозійне зношення стінки труби. Це досягається завдяки передачі кругової хвилі уздовж стінки труби, що взаємодіє з поперечним перерізом у кожній точці середовища труби. При цьому технологія низькочастотного діагностування рівною мірою чутлива до дефектів на внутрішній і зовнішній поверхнях труби. Однак пошкоджена частина стінки труби погано виявляється цим методом у напрямку осьової лінії труби. Це пояснюється тим, що спрямована хвиля при розповсюдженні вдаряється в границю зміни перетину труби й відразу ж відбивається, хоча від довгого дефекту в напрямку осьової лінії труби може відбитися більш сильний сигнал, чим від короткого за умови достатнього великого розміру окружності труби [9]. У той же час довгі дефекти в осьовому напрямку труби можуть привести до зниження міцності труби.

Поряд з визначенням амплітуд відбитих сигналів від експлуатаційних відбивачів фіксувалися амплітуди сигналів від конструктивних та технологічних відбивачів протяжного трубопроводу. На рис. 7 наведені залежності амплітуд відбитих сигналів від конструктивних, технологічних та експлуатаційних відбивачів протяжного трубопроводу при розповсюдженні не дисперсних спрямованих хвиль.

При відсутності дисперсії низькочастотної спрямованої хвилі амплітуда відбитого сигналу від конструктивних відбивачів типу фланець та кінець труби близька до амплітуди збуджуваного сигналу й прийнята за 100 %, тобто відповідає 0 дБ. Амплітуда відбитих сигналів від технологічних відбивачів типу якісного зварного з'єднання буде складати 20 % від амплітуди збуджуваного сигналу, що відповідає мінус 14 дБ. Ці два сигнали використовуються у системі Teletest для формування кривих «корегування «відстань – амплітуда» (кВА) при ідентифікації інформації від експлуатаційних відбивачів.

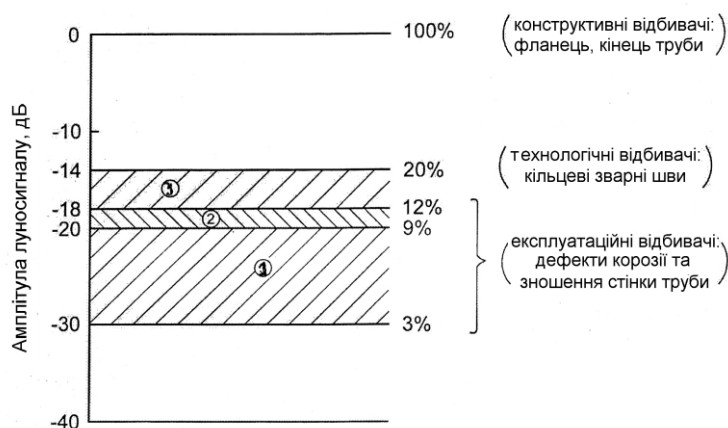


Рисунок 7 – Залежність амплітуд відбитих сигналів від відбивачів протяжного трубопроводу при розповсюдженні недисперсійних спрямованих хвиль

Найважливішим результатом проведених експериментальних досліджень було встановлення трьох класів ознак контрольних образів експлуатаційних відбивачів (дефектів) протяжного трубопроводу. Виходячи із запропонованого діапазону визначення амплітуд сигналів від дефектів на рівні 3, 9 та 12 % втрати металу стінки труби, на рис. 7 виділено три класи ознак контрольних образів експлуатаційних відбивачів протяжного трубопроводу: ω_1 , до якого будуть відноситися всі змінні амплітуди сигналів x_{1i} від дефектів від 3 % до 9 %; ω_2 – зі змінними амплітудами сигналів від 9 % до 12 %; ω_3 – зі змінними амплітудами сигналів більше рівня 12 %. При цьому амплітуда відбитих сигналів на рівні 12 % втрати металу стінки труби буде відповідати мінус 18 дБ, 9 % – мінус 20 дБ, а 3 % – мінус 30 дБ.

У залежності від амплітуди відбитих сигналів від експлуатаційних відбивачів між класами діє послідовний лінійний зв'язок, який можна представити загальною відокремлюючою функцією у вигляді лінійної суми:

$$D(X) = w_1 x_1 + w_2 x_2 + w_3 x_3, \quad (7)$$

де w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти, кожний із яких відноситься до відповідного класу; x_1, x_2, x_3 – змінні амплітуди сигналів від несучильностей у кожному класі.

Згідно з рис. 7 в якості розв'язуючої межі між класами ω_1 та ω_2 вибрана межа 9 % втрати

металу у поперечному перерізі труби, а між класами ω_2 та ω_3 – 12 %. На основі проведених досліджень нижня межа виявлення штучних дефектів на рівні 3 % втрати металу прийнята як межа розсіяного шуму. Враховуючи, що розв'язуюча межа між класами ω_1 та ω_2 прийнята на рівні 9 % втрати металу, то до класу ω_1 будуть відноситися всі значення x_{1i} амплітуд відбитих сигналів, які задовольняють виразу $3\% < x_{1i} < 9\%$. Застосовуючи до цієї межі принцип відокремлюючої функції, можна всю сукупність амплітуд відбитих сигналів на рівні 9 % розділити прямою лінією, рівняння якої буде мати вид:

$$D(X) = w_1 x_1 + w_2 x_2. \quad (8)$$

Очевидно, що підставлення у формулу (8) любых значень амплітуд відбитих сигналів $x_{1i} < 9\%$ дасть негативні значення функції $D(X)$ і буде віднесено до класу ω_1 . Відповідно позитивне значення функції $D(X)$ прийме при підставленні значень амплітуд відбитих сигналів $x_{2i} > 9\%$ і буде віднесено до класу ω_2 . Якщо значення амплітуди ознак контрольних образів буде знаходитися на розв'язуючій межі, то маємо випадок, що відповідає умові невизначеності $D(X) = 0$.

Розв'язуюча межа між класами ω_2 та ω_3 прийнята на рівні 12 % втрати металу. Тому до

класу ω_2 будуть відноситися всі значення x_{2i} амплітуд відбитих сигналів, які задовольняють виразу $9\% < x_{2i} < 12\%$. Застосовуючи до цієї межі також принцип відокремлюючої функції можна всю сукупність амплітуд ознак контрольних образів дефектів на рівні 12% розділити прямою лінією, рівняння якої буде мати вид:

$$D(X) = w_2 x_2 + w_3 x_3. \quad (9)$$

При підставленні у формулу (9) любых значень амплітуд ознак контрольних образів $x_{2i} < 12\%$ дасть також негативне значення функції $D(X)$ і буде віднесене до класу ω_2 .

Відповідно позитивне рішення функції $D(X)$ прийме при підставленні значень амплітуд ознак контрольних образів $x_{3i} > 12\%$ і буде віднесене до класу ω_3 . Якщо значення амплітуди діагностичної ознаки буде знаходитися на розв'язуючій межі, то $D(X) = 0$.

На рис. 8 наведені схеми розділення ознак контрольних образів відокремлюючою функцією на рівні 9% втрати металу (а), класи ω_1 та ω_2 , і на рівні 12% (б), класи ω_2 та ω_3 .

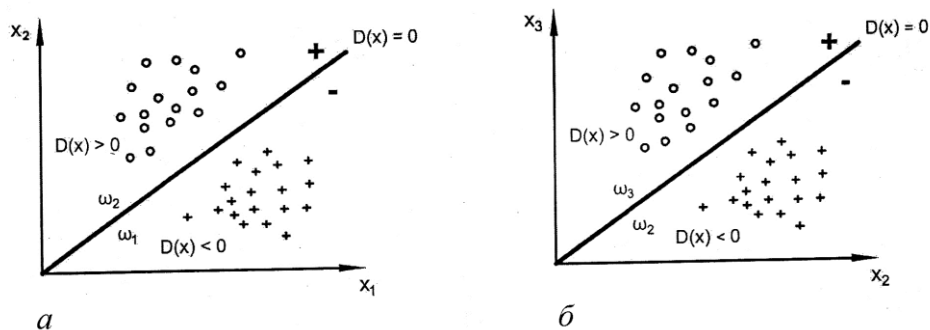


Рисунок 8 – Схеми розділення ознак контрольних образів відокремлюючими функціями на рівні 9% втрати металу (а), класи ω_1 та ω_2 , та на рівні 12% (б), класи ω_2 та ω_3

Таким чином, на основі експериментальних досліджень заздалегідь були визначені ознаки діагностичних образів від штучних дефектів у вигляді різних значень амплітуд відбитих від них сигналів, які слугують розв'язуючими межами на рівні 9% і 12% втрат металу по товщині стінки труби між класами ознак контрольних образів. У відповідності з теорією розпізнавання образів основу такого способу класифікації ознак контрольних образів складає процес навчання, в задачу котрого входить розділення отриманої підмножини амплітуд відбитих сигналів від експлуатаційних несучільностей на відповідне число класів.

Враховуючи, що визначення класів ознак контрольних образів на розв'язуючих межах між класами здійснювалася на основі ознак діагностичних образів, отриманих шляхом проведення експериментальних досліджень, то такий спосіб класифікації називається «навчанням з учителем». Таким чином, на основі експериментальних досліджень було

одержано підмножину ознак діагностичних образів, які виконують функції розв'язуючих меж між класами ознак контрольних образів. В результаті було відпрацьовано критерій класифікації ознак контрольних образів, який враховує відмінність амплітуд відбитих сигналів від експлуатаційних несучільностей, які характерні для окремих класів виходячи з величин втрати металу у поперечному перерізі стінки труби.

Проведені експериментальні дослідження показали, що існує монотонна залежність між амплітудою відбитих сигналів від ідеалізованих дефектів стінки труби та їх розмірами таким чином, що більші амплітуди відбитих сигналів отримують від більших дефектів. Відбиті сигнали від реальних несучільностей є більш складними через те, що форма та розміщення їх також впливають на амплітуду відбитого від них сигналу.

У процесі розробки технології Teletest далекодуючого низькочастотного

ультразвукового діагностування протяжних трубопроводів методом ультразвукової локації з використанням не дисперсійних спрямованих хвиль дефекти класу ω_1 менше 9 % втрати металу стінки труби отримали назву «незначних». Дефекти стінки труби класу ω_2 , відбиті від яких сигнали перевищують 9 %, але менше 12 %, одержали назву «помірних». Нарешті дефекти класу ω_3 , сигнали від яких перевищують 12 % втрати металу стінки труби, називаються «серйозними».

Аналіз процедури контрольно-діагностичного процесу при визначенні технічного стану технологічного трубопроводу. Відомо, що технологія та система Teletest є інструментом попереднього 100 % контролю, задачею якого є віднесення амплітуд відбитих сигналів від експлуатаційних несучильностей технологічного трубопроводу до одного із класів з метою визначення втрат металу стінки труби. Як це відбувається на практиці демонструє структурна схема процедури контрольно-діагностичного процесу при визначенні технічного стану трубопроводу, яка наведена на рис. 9.

Проведення процедури контрольно-діагностичного процесу згідно рис. 9 ґрунтується на виконанні операції ідентифікації втрат металу стінки труби технологічного трубопроводу протягом часу його експлуатації, яка здійснюється за допомогою двох методів:

1. Розділення підмножини ознак контрольних образів технологічного трубопроводу на розв'язуючих межах здійснюється з застосуванням так званого «правила порогової ідентифікації дефектів» на основі використання елементів порогової логіки.

2. Визначення розмірів втрат металу стінки труби здійснюється з використанням методів і засобів локальної дефектоскопії, зокрема, ультразвукової та магнітної товщинометрії.

Відомо, що практично кожний метод неруйнівного контролю при визначенні виявленої несучильності в якості дефекту ґрунтується на використанні найбільш розповсюдженого способу, який носить назву «правила порогової ідентифікації дефектів», для реалізації котрого в неруйнівному контролі

застосовуються саме елементи порогової логіки. В основі правила порогової ідентифікації у методах НК лежить порогове значення інформативних сигналів від виявлених несучильностей, що розділяє виміряні значення інформативних сигналів від виявлених несучильностей на відповідність бездефектним і дефектним ділянкам об'єкта контролю. Застосування правила порогової ідентифікації в НК полягає в порівнянні інформаційного сигналу від несучильності з деяким сигналом від несучильності, прийнятим в якості порогового, котрий однозначно дозволяє визначити характер несучильності: дефект чи не дефект.

Фактично в основі правила порогової ідентифікації дефектів з НК лежить логічна система кодування інформації, яка використовує цифри «нуль» та «одиниця», з яких і складається двійкова система кодування інформації.

Принцип дії правила порогової ідентифікації дефектів в неруйнівному контролі реалізується за допомогою порогових елементів, що базуються на основі двійкових сигналів, тобто двійковій системі числення, що використовується в різних системах автоматизованого неруйнівного контролю.

Використання двійкових сигналів на виходах порогових елементів таких систем кодування в будь-який момент часу є однозначними функціями двійкових сигналів на вході. Тому, порогові елементи складають численний та важливий клас різноманітних цифрових систем.

Зазвичай, пороговий елемент являє собою пристрій з декількома двійковими входами та одним двійковим виходом. На кожному виході порівнюється дійсне число, яке називається вагою. Сигнал на виході пристрою дорівнює константі, яка позначається логічним значенням «0» до того часу, коли зважена сума вхідних сигналів не стане рівною або не перевищить дійсне число, яке називається порогом. В цьому випадку вихідний сигнал стає рівним другій константі, яка позначається логічним значенням «1».

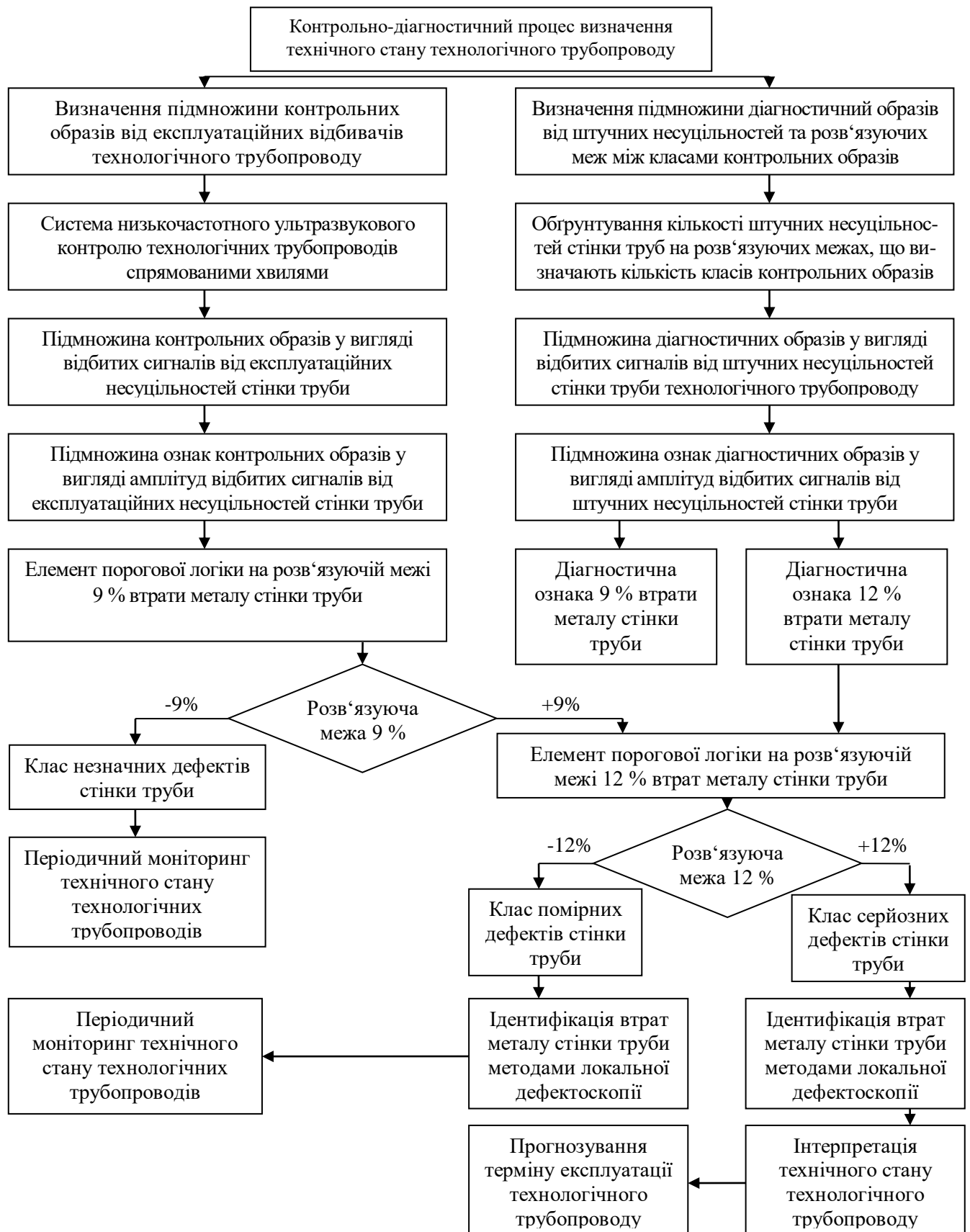


Рисунок 9 – Структурна схема контрольно-діагностичного процесу

В загальному випадку пороговий елемент визначається такими математичними співвідношеннями [14]:

$$G \equiv 1, \text{ якщо } \sum_{i=1}^n w_i y_i > K;$$

$$G \equiv 0, \text{ якщо } \sum_{i=1}^n w_i y_i < K. \quad (10)$$

де G - двійковий сигнал на виході порогового елемента, який дорівнює 1 або 0; y_i - двійковий сигнал на i -му виході порогового елемента, який дорівнює 1 або 0; w_i - вага i -того входу, що є кінцевим дійсним числом; n - загальна кількість входів; K - поріг, кінцеве дійсне число.

Це математичне визначення порогового елемента з різним ступенем достовірності відповідає різноманітним реальним явищам. Зокрема, природними типами порогових елементів є нейрони, що існують в центральній нервовій системі людей і тварин та слугують

для передачі нейрологічної інформації. На базі штучних нейронних мереж створюються альтернативні системи автоматичного ультразвукового контролю.

Штучні порогові елементи можуть бути побудовані різними способами. На сучасному етапі розвитку науки і техніки в якості порогових елементів застосовуються досягнення електроніки. Тому значення співвідношень (10) полягає в тому, що вони описують поведінку природних та штучних порогових елементів, які отримали також широке розповсюдження в теорії прийняття рішень та в задачах, пов'язаних зі створенням штучного інтелекту.

Схема на рис. 10 ілюструє найпростіший загальний спосіб побудови порогових елементів згідно з виразом (10):

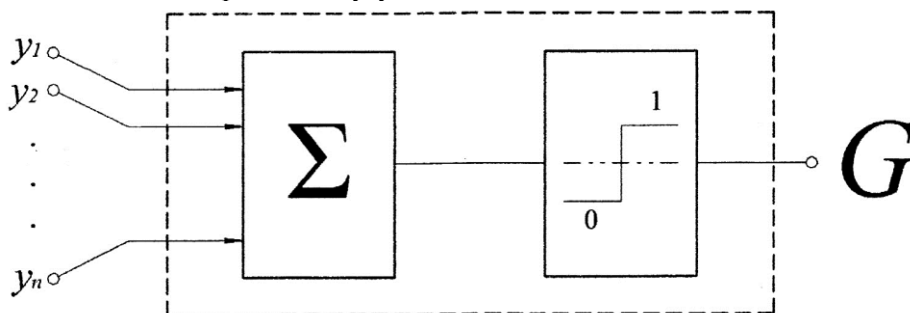


Рисунок 10 – Схема побудови порогових елементів простим способом

Якщо в якості прикладу прийняти, що на вхід порогового елемента з порогом $T=1/2$ потрапляють три вхідних сигнали з вагами $w_1=1$, $w_2=1$, $w_3=-1$, то логічна поведінка такого елемента буде відповідати логічному значенню 1(0). Модуль такого порогового елемента з позначенням порогу і його ваг наведено на рис. 11.

При застосуванні методології розпізнавання образів в НК в якості порогу можуть використовуватися різні цифри двійкової системи. Так, у наведеній на рис. 3 схемі лінійного класифікатора з двох класів логічна система кодування інформації пороговим елементом, використовуються цифри «+1» та «-1». У якості порогу, тобто розв'язуючої межі між вхідними сигналами, служить цифра «0».

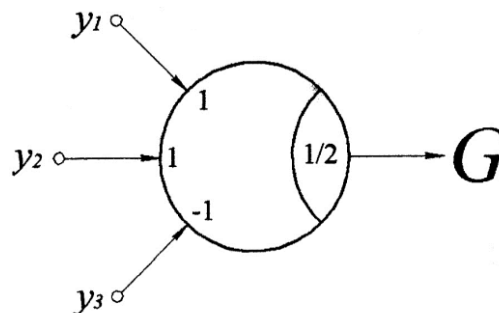


Рисунок 11 - Схема моделі порогового елемента з різними значеннями ваг трьох вхідних сигналів

У наведеній на рис. 9 структурній схемі процедури контрольно-діагностичного процесу при визначенні технічного стану технологічних трубопроводів у якості порогу на розв'язуючих межах використовуються ознаки діагностичних образів, амплітуди сигналів яких відповідають втратам металу стінки труби на рівні порогів $K_1 = 9\%$ і $K_2 = 12\%$, тобто відповідно «+9%» та «-9%» і «+12%» та «-12%».

Враховуючи, що технологія та система Teletest є інструментом 100 % контролю технічного стану протяжного трубопроводу, віднесення відбитого сигналу як серйозного, що перевищує 12% втрати металу стінки труби, підлягає проведенню подальших досліджень зони дефекту локальними методами контролю. Класифікація відбитого сигналу як серйозного показує, що ймовірна присутність великого дефекту класу ω_3 . Дефекти класу ω_2 відповідно відбитого сигналу як помірного вимагають проведення періодичного моніторингу і тому він реєструється, хоча не перевищує сигналу серйозного дефекту. Дефекти типу «незначного» класу ω_1 , які наближаються до рівня 9%, повинні також реєструватися, оскільки для деяких застосувань системи Teletest виявлення невеликих дефектів також бажано й може вимагати моніторингу ділянки трубопроводу у зв'язку з можливим розвитком таких дефектів трубопроводу з часом.

Спосіб представлення попередньої контрольної інформації про технічний стан трубопроводу. Наведена на рис. 4 класифікація отриманої від відбивачів технологічного трубопроводу множини контрольних образів, розділених на підмножини технологічних, конструктивних та експлуатаційних контрольних образів трубопроводу, в цілому знайшла своє відображення при розробці формату шкали численних А-сканів на дисплеї системи Teletest, накладений один на одного

[15]. Teletest – це технологія дистанційної акустичної локації протяжних трубопроводів, яка являє собою імпульсну систему для діагностування великих обсягів металу з однієї точки установлення п'єзоперетворювачів акустичної антени. Спрямовані хвилі, відбиті від дефекту, приймаються п'єзоперетворювачами й після підсилення, обробки й заглушення завад виводяться на екран персонального комп'ютера як випрямлені сигнали у вигляді А-сканів залежності амплітуди від відстані, подібно використовуваному при звичайному ультразвуковому контролі, але в часовому діапазоні виміру, що відповідає десяткам метрів, а не сантиметрів. Враховуючи, що спрямовані хвилі носять дисперсійний характер, то при калібруванні часової шкали А-скану для зчитування відстані, а не часу, у системі Teletest є комп'ютерна програма визначення швидкості поширення хвилі для обраної частоти випробувань із каліброваної або «дисперсійної» кривої. У програмне забезпечення Teletest вбудована бібліотека дисперсійних кривих, які мають різний вигляд залежно від сполучення «діаметр труби/товщина стінки». Звичайно на дисплей накладені криві корегування «відстань – амплітуда», які призначені для часового регулювання чутливості й відображають лінії рівної чутливості при рівній відстані від перетворювачів.

На рис. 12 в якості прикладу наведено формат дисплея системи Teletest при контролі ділянки протяжного технологічного трубопроводу довжиною 36 м з виведенням на екран залежностей амплітуд відбитих сигналів від конструктивних, технологічних та експлуатаційних відбивачів трубопроводу згідно з рис. 7 в процесі розповсюдження у середовищі стінки труби низькочастотної ультразвукової спрямованої хвилі.

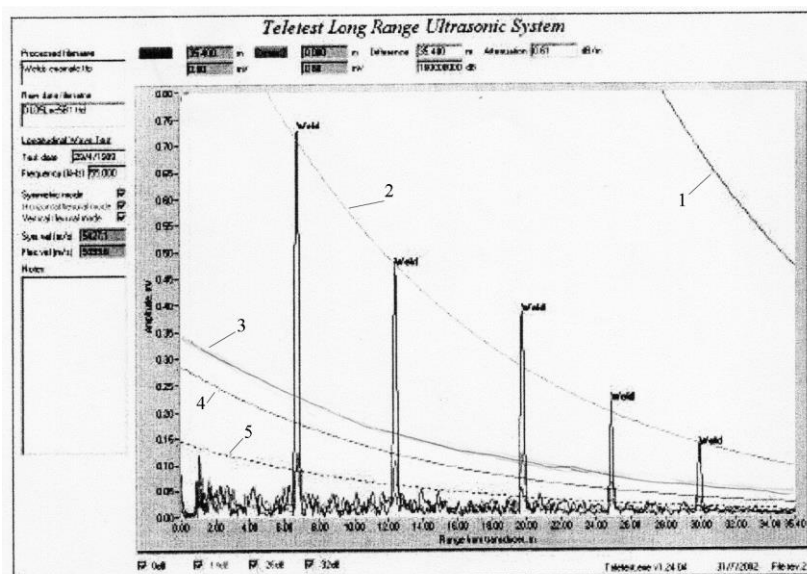


Рисунок 12 – Формат дисплея А-скану системи Teletest при контролі дільниці протяжного трубопроводу

Дисплей використовується для попереднього представлення контрольної інформації про технічний стан технологічного трубопроводу. По горизонталі відкладена відстань у метрах від місця встановлення перетворювачів системи або початку відліку, по вертикалі – амплітуди відбитих сигналів у dB від усіх відбивачів трубопроводу. На А-скан системи Teletest виведено п'ять кривих коригування «відстань – амплітуда» [15].

- Крива 1 (0 dB). Ця крива відображає 100 % відбиття сигналів від конструктивних елементів (відбивачів) трубопроводу, якими можуть бути фланець або кінець труби. Ці відбивачі відіграють роль майже ідеального відбивача і демонструють відсутність дисперсності спрямованої хвилі при розповсюдженні в трубопроводі. Відсутність дисперсності вибраної моди спрямованої хвилі можна продемонструвати на контрольному зразку у вигляді одиночного відрізка труби в лабораторії й використовувати для установа абсолютної стандартної чутливості системи Teletest та перевірки її працездатності. Цю еталонну величину звичайно називають «відбивач 0 dB». На дисплеї системи Teletest крива відображається як крива чорного кольору.

- Крива 2 (-14 dB). Ця крива відображає відбиття сигналів від технологічних відбивачів, якими є зварні з'єднання дільниці трубопроводу.

Сигнали від кільцевих зварених швів на трубі, які поступово загасають із відстанню, утворюють ідеальні відбивачі для задання кривої корегування. Досвід використання системи Teletest показує, що кільцевий шов зі звичайним профілем верхнього й кореневого проходу має відбивну здатність, еквівалентну до 20 % (-14 dB) сигналу від кінця труби (в 5 раз менш інтенсивне ніж відображення від загального відображення від кінця труби). Поки існують невеликі коливання від шва до шва, це положення добре підтверджується на практиці. На екрані дисплея системи Teletest ця крива відображається синім кольором.

- Крива 3 (-18 dB). Ця крива відображає відбиття мікросигналів від експлуатаційних відбивачів трубопроводу, якими є корозійне пошкодження та ерозійне зношення стінки труби, і визначає втрату металу на рівні 12 % відбиття сигналу від кінця труби. Цей граничний рівень втрати металу використовується для визначення аномалій, сигнали від яких розглядаються як «серйозні» і можуть досягати рівня -14 dB. На екрані дисплея А-скан системи Teletest ця крива відображається червоним кольором.

- Крива 4 (-20 dB). Ця крива визначає втрату металу стінки труби на рівні 9 % відбиття сигналу від кінця труби. Цей рівень втрати металу використовується для визначення

аномалій стінки труби, сигнали від яких розглядаються як «помірні» і можуть досягати рівня -18 дБ. Аномалії, які дають сигнали, що не перевищують криву -20 дБ, розглядаються як «незначні». На екрані дисплея А-скан системи Teletest ця крива відображається зеленим кольором.

- Крива 5 (-30 дБ). Ця крива відображає відбиття сигналів від експлуатаційних відбивачів на рівні 3 % втрати металу у поперечному перерізі стінки труби. Крива використовується як детермінанта ефективного діапазону тестування. Це дозволяє виявляемій аномалії (-30 дБ) мати коефіцієнт сигнал-шум 6 дБ або краще. Цей рівень відношення сигналу до шуму необхідний для ефективної інтерпретації даних тесту і практично відіграє роль межі як діапазону тестування, так і чутливості до менших аномалій. На екрані дисплея А-скан системи Teletest ця крива відображається штриховою лінією.

Нижче рівня кривої -30 дБ на дисплеї записані, накладені одна на одну, три криві розсіяного шуму, які відображають відбиття спрямованої хвилі від шорстких поверхонь труби.

Таким чином розпізнавання дефектів протяжних технологічних трубопроводів при використанні низькочастотних ультразвукових спрямованих хвиль здійснюється за величинами амплітуд відбитих сигналів, що відповідають втратам металу у поперечному перерізі стінки труби, та шляхом віднесення амплітуд до різних класів. Рішення при виявленні дефектів виносяться при перевищенні амплітудою відбитого сигналу відповідного порогу, визначеного для кожного класу на основі експериментальних досліджень. Таким чином, в основі класифікації дефектів технологічних трубопроводів лежить спосіб амплітудної класифікації.

Особливості ідентифікації втрат металу стінкою труби із-за дефекту. Згідно з приведеною на рис. 9 структурною схемою процедури контрольно-діагностичного процесу визначення технічного стану технологічного трубопроводу після рознесення амплітуд відбитих від дефектів труби сигналів за класами, найбільш важливою наступною операцією є ідентифікація кількісних втрат металу у поперечному перерізі труби із-за

дефекту і, в першу чергу, тих, що відносяться до класу «серйозних». Аналіз викладеної вище попередньої контрольної інформації про технічний стан трубопроводу у залежності від амплітуди сигналів, відбитих від реальних дефектів стінки труби, дає можливість, тільки у деякій мірі, судити про глибину ураження стінки труби в залежності від зміни поперечного перерізу стінки труби [9]. Висота відбитих сигналів від дефектів відповідає ступеню зміни площі поперечного перерізу труби під дією дефекту. Можна вважати, що амплітуда сигналу характеризує ступінь дефектності поперечного перерізу труби. Тому, в першому наближенні, можна прийняти, що ступінь дефектності D за циліндричним перерізом труби може визначитися у відсотках при віднесенні площі S_o до всієї площі S_{mp} поперечного перерізу

труби, тобто
$$D = \frac{S_o}{S_{mp}} \cdot 100\% .$$

У той же час інформація про амплітуду відбитих сигналів низькочастотної спрямованої хвилі не містить інформації щодо глибини дефекту, яка в принципі є інформацією про товщину стінки труби. Така інформація про залишкову товщину стінки труби може бути отримана при вимірюванні її засобами локальної товщинометрії, наприклад, засобом ультразвукової товщинометрії, ультразвукова хвиля якого спрямована по товщині стінки труби перпендикулярно вісі труби.

Тоді глибина l дефекту стінки труби буде дорівнювати:

$$l = t - t_0 ,$$

де t - вся товщина стінки труби; t_0 - виміряна товщинометром залишкова товщина стінки труби.

Глибина дефекту характеризує ступінь H стоншення стінки труби, котре визначається у відсотках при віднесенні глибини l дефекту до номінальної товщини t стінки труби, тобто

$$H = \frac{l}{t} \cdot 100\% .$$

Як впливає із наведеного, прямої кореляційної залежності між даними про дефект, отриманої низькочастотними хвилями, і даними про глибину потоншення, отриманими при вимірюванні товщини стінки труби, немає.

Спрямована хвиля у загальному випадку чутлива до зміни площі поперечного перерізу труби в комбінації глибини ураження стінки та довжини вздовж окружності труби, що підтверджують дослідження в роботі [9]. Хоча глибокий дефект тієї ж площі з малою довжиною по окружності труби може давати більше відбиття, однак інформацію про ступень ураження площі поперечного перерізу труби амплітуда відбитого сигналу несе в цілому, й із

цієї інформації неможливо обґрунтувати інформацію про глибину поразення стінки труби. Таку інформацію можуть дати інші фізичні засоби вимірювання товщини стінки труби, наприклад, ультразвукова товщинометрія, тощо.

Це ілюструє схема алгоритму оцінки втрат металу в поперечному перерізі стінки труби, яка наведена на рис. 13.

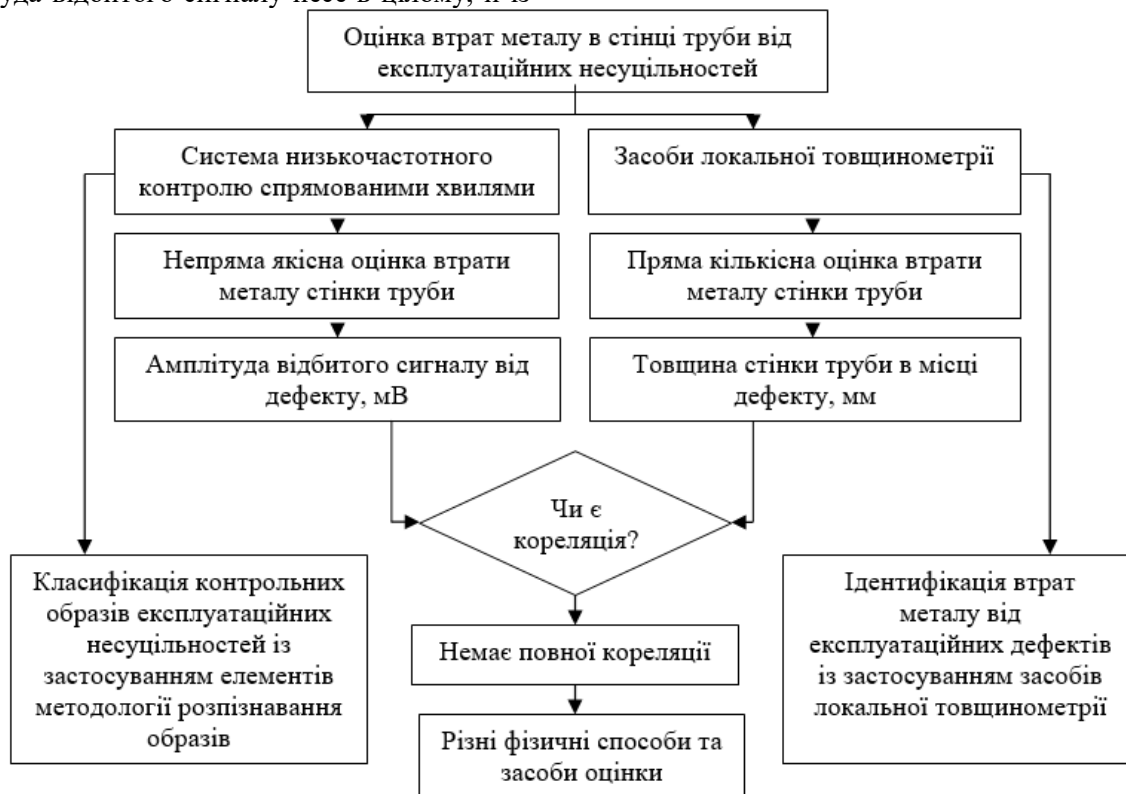


Рисунок 13 – Схема алгоритму оцінки втрат металу в поперечному перерізі стінки труби

Алгоритм визначає два наведені вище напрямки оцінки втрат металу в поперечному перерізі труби від експлуатаційних дефектів. Як відмічалось, про наявність дефекту та ступінь ураження стінки труби з використанням спрямованої хвилі роблять висновок за амплітудою відбитого сигналу, яка вимірюється в мВ. Але така оцінка ступеню дефектності стінки труби є непрямую, тобто якісною. Величина потоншення стінки труби, виміряна товщинометром, подається в мм і є прямою, тобто кількісною. Тому між цими величинами немає повної кореляції, тому що використовуються різні фізичні величини.

Провести оцінку глибини потоншення стінки труби за амплітудою відбитого сигналу в деякій мірі можливо, якщо відомий тип дефекту стінки труби (наприклад, тип корозії). Але, якщо врахувати, що на практиці спочатку проводиться попередній контроль технічного стану трубопроводу, то виконати це важко. У подальшому такий зв'язок може бути встановлений в процесі моніторингу технічного стану трубопроводу в результаті формування картини розвитку дефекту, накопичення та аналізу статистичних даних про дефекти з використанням низькочастотних спрямованих хвиль та засобів локального неруйнівного

контролю [11]. Це означає, що для вирішення задачі оцінки технічного стану технологічного трубопроводу низькочастотними спрямованими хвилями необхідно підтримувати зворотний зв'язок за фактичними статистичними даними, отриманими спрямованими хвилями, та даними за типом дефекту (ступеню утоншення стінки), за допомогою яких може бути встановлена кореляційна залежність.

Тому, як показано на рис. 13, основною функцією системи низькочастотного ультразвукового контролю технологічних трубопроводів на даний час є класифікація контрольних образів експлуатаційних несущальностей із застосуванням елементів методології розпізнавання образів, а засобів локальної товщинометрії – ідентифікація втрат металу експлуатаційних дефектів у поперечному перерізі стінки труби.

Варто також зазначити, що застосування технології та техніки низькочастотного ультразвукового контролю технологічних трубопроводів спрямованими хвилями вимагає повного розуміння факторів, які впливають на результати оцінки технічного стану технологічних трубопроводів, та практичного досвіду інтерпретації отриманих результатів фахівцями, які проводять роботи в реальних умовах експлуатації трубопроводів різного призначення.

Висновки

1. Показано, що основою процесу технічного діагностування стану промислових об'єктів прийнято вважати загальну теорію розпізнавання образів як важливого розділу технічної кібернетики, яка ґрунтується на застосуванні математичних методів класифікації образів з використанням відокремлюючих функцій та розв'язуючих меж між класами образів.

2. Розроблена класифікація множини контрольних образів від відбивачів низькочастотної спрямованої хвилі технологічного трубопроводу, які розділені на три кластери (групи), складовими котрих є підмножини контрольних образів, отриманих відповідно від технологічних, конструктивних та експлуатаційних відбивачів трубопроводу.

3. Наведено значення ознак діагностичних образів на розв'язуючих межах, які подані в зарубіжних наукових виданнях та прийняті в

системах низькочастотного контролю спрямованими хвилями при визначенні технічного стану протяжних трубопроводів у залежності від втрат металу в поперечному перерізі стінки труби із-за дефекту.

4. На основі проведеного аналізу процедури контрольно-діагностичного процесу при визначенні технічного стану технологічного трубопроводу розроблена його структурна схема, яка базується на застосуванні системи низькочастотного контролю спрямованими хвилями та операції ідентифікації втрат металу в стінці труби.

5. Показано, що системою низькочастотного ультразвукового контролю спрямованими хвилями технологічних трубопроводів шляхом застосування методології розпізнавання образів здійснюється операція розділення відбитих сигналів від експлуатаційних відбивачів за класами (класифікація контрольних образів), а засобами локальної товщинометрії виконується операція вимірювання фактичної глибини ураження стінки труби (ідентифікація втрат металу стінки труби).

6. При проведенні операції ідентифікації втрат металу в стінці труби із-за дефекту слід враховувати, що амплітуда відбитого від несущальності труби сигналу не несе інформацію про глибину ураження стінки, тому що оцінка дефектності труби спрямованими хвилями є якісною, а виміряна по місцю глибина є кількісною, й тому між цими величинами немає повної кореляції.

Список використаних джерел

1. Бондаренко О.Г. Методи неруйнівного контролю та технічного діагностування стану протяжних технологічних трубопроводів / *Методи та прилади контролю якості*. 2022. № 1. С. 5-17.

2. Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідник-посібник. Під заг. ред. В.В.Панасюка. – Т. 5. Неруйнівний контроль і технічна діагностика. Під ред. З. Т. Назарчука. Львів: ФМІ ім.Г.В.Карпенка, 2001. 1134 с.

3. Tou J., Gonzalez R. *Pattern Recognition Principles*. London. 1974. 416 p.

4. *Research Techniques in Nondestructive Testing*. Edited by R.S. SHARPE. London, 1970. 490

- p.
5. Verhaden C., Duin R., Groen F., Joosten J. and Verbeek P. Progress Report on Pattern Recognition. Reports on Progress in Physics/ 1980. V. 43. № 6. pp. 785-831.
 6. Fu K. Sequential Methods in Pattern Recognition and Machine Learning. London. 1968. 265 p.
 7. Недосека А.Я. Основы розрахунку та діагностики зварних конструкцій. К.: Вид-во «ІНДПРОМ», 1998. 640 с.
 8. Duda R., Hart P. Pattern Classification and Scene Analysis. Toronto, 1973. 512 p.
 9. Report. Teletest Long Range Ultrasonic Testing Technijue – Performance Details. / *Document Reference*: TTP/01. May. 2001. 20 p.
 10. Murde P.J., Lank A.M., Allyne D.N. A long range method of the detection of orrosion under insulation in process pipework - Thermie Project: OG 474/94, 5-th European Union Hydrocarbons Symposium, Edinburg. 26-28 November, 1996.
 11. Jkeaa T., Kanehada R., Miyazawa M., Matsuoka J., Fujiwara M. Guided Ware Technology Process for Field Testing of Pipers of Plant / *Hinakai Kensa*. 2005. V. 54. - № 11. P. 595-599.
 12. Reliability Assessment for Containment of Hazardous Materials RACH. European Commission. – Project OG 112/FR/UK. Final Report, 1999.
 13. Koenig M.J., Budenik T.A., RUST s.w., Nestrekoroht J.B.: Topical Report GRI-94/0381:GRI Pipeline Simulation Facility Metal Loss Defect / *Gas research Institute*, April 1995.
 14. Dertouzos M. Threshold Logic: A Synthesis Apporoach. Research Monograph № 32. Massachusetts. 1965. 342 p.
 15. Long Kange Ultrasonic Test System. Section I. System Overview and Principles of Operation. – September, 2004. – 6 p.
- V.V.Panasyuka. – Т. 5. Neruynivnyy kontrol' i tekhnichna diahnostyka. Pid red.. Z. T. Nazarchuka. L'viv: FMI im.H.V.Karpenka, 2001. 1134 s. [in Ukrainian]
3. Tou J., Gonzalez R. Pattern Recognition Principles. London. 1974. 416 p.
 4. Research Techniques in Nondestructive Testing. Edited by R.S. SHARPE. London. 1970. 490 p.
 5. Verhaden C., Duin R., Groen F., Joosten J. and Verbeek P. Progress Report on Pattern Recognition. Reports on Progress in Physics/ 1980. V. 43. № 6. pp. 785-831.
 6. Fu K. Sequential Methods in Pattern Recognition and Machine Learning. London. 1968. 265 p.
 7. Nedoseka A.YA. Osnovy rozrakhunku ta diahnostyky zvarnykh konstruksiy. K.: Vyd-vo «INDPROM», 1998. 640 s. [in Ukrainian]
 8. Duda R., Hart P. Pattern Classification and Scene Analysis. Toronto, 1973. 512 p.
 9. Report. Teletest Long Range Ultrasonic Testing Technijue – Performance Details. / *Document Reference*: TTP/01. May. 2001. – 20 p.
 10. Murde P.J., Lank A.M., Allyne D. N. A long range method of the detection of orrosion under insulation in process pipework - Thermie Project: OG 474/94, 5-th European Union Hydrocarbons Symposium, Edinburg. 26-28 November, 1996.
 11. Jkeaa T., Kanehada R., Miyazawa M., Matsuoka J., Fujiwara M. Guided Ware Technology Process for Field Testing of Pipers of Plant / *Hinakai Kensa*. 2005. V. 54. № 11. P. 595-599.
 12. Reliability Assessment for Containment of Hazardous Materials RACH. European Commission. – Project OG 112/FR/UK. Final Report, 1999.
 13. Koenig M.J., Budenik T.A., RUST s.w., Nestrekoroht J.B.: Topical Report GRI-94/0381:GRI Pipeline Simulation Facility Metal Loss Defect / *Gas research Institute*, April 1995.
 14. Dertouzos M. Threshold Logic: A Synthesis Apporoach. Research Monograph № 32. Massachusetts. 1965. 342 p.
 15. Long Kange Ultrasonic Test System. Section I. System Overview and Principles of Operation. – September, 2004. – 6 p.

References

1. Bondarenko O.H. Metody neruynivnoho kontrolyu ta tekhnichnoho diahnostuvannya stanu protyazhnykh tekhnolohichnykh truboprovodiv. *Metody ta pryklady kontrolyu yakosti*. 2022. № 1. S. 5-17. [in Ukrainian]
2. Mekhanika ruynuvannya i mitsnist' materialiv: Dovidnyk-posibnyk. Pid zah. red.