

Спектрально-часова дефектоскопія в реальному часі на основі цифрових сигнальних процесорів.

A.P. Гвоздак, В.М. Долгов

кафедра Автоматизованих систем обробки інформації, Радіофізичний факультет, Дніпропетровський Державний Університет, проспект Гагаріна 72, будівля 12, м. Дніпропетровськ, 320625 Україна.
e-mail: andrey@rff.ds.u.dp.ua , dolgov@rff.ds.u.dp.ua , тел. +380(562)769092

Розглядається метод реалізації спектрально-часового перетворення в реальному масштабі часу з використанням цифрового сигнального процесора. Метод реалізовано для виявлення дефектів типу «тріщина» при дефектоскопії гарячекатаних труб в умовах прокатного стану. Використання спектрально-часового відображення інформації магнітно-індукційної дефектоскопії дозволило підвищити достовірність виявлення і локалізації випадкових дефектів. Теоретично і експериментально підтверджена більш висока інформативність низькочастотної частини динамічного спектра сигналів, які реєструються стосовно до задачі виявлення дефектів в умовах амплітудної нестабільності через вплив зміни відстані між поверхнею труби і датчиком. Приведені результати експериментів доводять, що основною інформаційною ознакою є не амплітуди, а значення основної частоти в динамічному спектрі сигналів, які реєструються, що дозволило підвищити чутливість дефектоскопії через нейтралізацію впливу на цю ознаку ефектів випадкової зміни відстані між поверхнею труби і датчиком дефектоскопа.

1. Модель реєструемого сигналу та вибір інформаційних ознак

Важливою прикладною особливістю МД (магнітно-індукційної дефектоскопії) є використання безконтактних систем намагнічування, які обертаються навколо труби (частота обертання $f_0 = 40 \div 50$ об/с) зі змінням вхідної інформації шляхом безконтактних індукційних перетворювачів. Оскільки саме наявність системи намагнічування, що обертається навколо труби має принципове значення для спектрально-часового методу, то спочатку розглянемо ідеалізований варіант абсолютно круглої труби з одним протяжним дефектом типу «тріщина». У цьому випадку сигнал $g(t)$ що реєструється перетворювачем буде являти собою періодичну послідовність

$$g(t) = g_T(t) \cdot s(t), \quad (1)$$

де $g_T(t)$ - сигнал дефекта на інтервалі одного періода, тобто

$$g_T(t) = \begin{cases} g(t); & 0 \leq t < T_0 \\ 0; & t \geq T_0 \end{cases}$$

Інтервал T_0 зв'язаний з частотою обертання системи намагнічування f_0 співвідношенням $T_0 = 1/f_0$, а $s(t)$ являє собою переодичну послідовність δ -імпульсів з періодом T_0 :

$$s(t) = \sum_{n=1}^N \delta(t - nT_0).$$

Як відомо [1], періодична тимчасова послідовність допускає подання у вигляді дискретної суми

$$g(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A(n) \exp(j2\pi nt/T_0), \quad (2)$$

де коефіцієнти $A(n)$ пропорційні величинам гармонік перетворення Фур'є $G_T(f)$ для одного періода послідовності $g(t)$

$$A(n) = \frac{1}{T_0} G_T\left(\frac{n}{T_0}\right). \quad (3)$$

З виразів (2) і (3) витікає, що при використанні системи намагнічування, яка обертається навколо труби, спектральна характеристика системи буде лінійчаторю з відстанню між гармоніками $\Delta f = f_k - f_{k-1} = \frac{1}{T_0}$.

Оскільки $g_T(t)$ - відеосигнал, то його основний енергетичний спектр буде зосереджений в області низьких частот. У зв'язку з цим твердження про те, що «... частоти сигналів від основних видів дефектів типу порушень сплошності лежать в області 3÷3,5 кГц» [2], уявляється мало віправданим. Ці частоти обов'язково присутні в спектрі сигналу дефекту $g_T(t)$, але набагато більш інформативним (в енергетичному значенні) параметром для виявлення дефекту є поява низько-частотної модульованої гармоніки (40÷50 Гц).

Експериментальні дослідження показали, що на відміну від ідеалізованої ситуації, реальною технологічною особливістю є той факт, що труба являє собою многогранник, причому число цих граней заздалегідь невідоме і може варіюватись в межах партії труб. З цієї обставини витікає два важливих практичних висновки:

1. Вихідний сигнал перетворювача навіть при контролі бездефектної труби являє собою переодичну послідовність

$$g(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} B(n) \exp\left(\frac{j2\pi nt}{T_K}\right), \quad (4)$$

де $T_K = \frac{T_0}{k}$ (к-невідоме число граней). Коефіцієнт

$B(n)$ описує спектральну характеристику сигналу окремої грані.

2. Наявність «технологічної огранки» приводить до періодичної зміни відстані між перетворювачем і поверхнею труби. Наслідком цього дефекту є наявність паразитної амплітудної модуляції вихідного сигналу перетворювача, що приводить до зниження порога чутливості дефектоскопії при використанні в якості інформативного параметра амплітуди вихідного сигналу.

Боротьба з «паразитною амплітудною модуляцією» в основному здійснюється шляхом використання високочастотної фільтрації, що з урахуванням вищевиведеного аналізу на думку авторів, є малоекективним і в будь-якому випадку приводить до зниження реальної чутливості контролю.

Рішення задачі забезпечити максимальну чутливість контролю незалежно від рівня «паразитної амплітудної модуляції» без використання процедури високочастотної фільтрації пов'язане з пошуком нових (не енергетичних) інформаційних ознак і вимагає більш детального вивчення впливу сигналу дефектів на результатуючий сигнал перетворювача.

Представимо бездефектний сигнал «обмеженої» труби у вигляді

$$g(t) = b(t) \cos(2\pi f_k t), \quad (5)$$

де $f_k = \frac{1}{T_k}$; $b(t)$ - сигнал «грані».

Сигнал одиничного протяжного дефекту в припущені ідеалізованої поверхні труби, аналогічно з (5) можна представити як

$$p(t) = a(t) \cdot \cos 2\pi f_0 t, \quad (6)$$

де $f_0 < f_k$; $a(t)$ - функція, що описує сигнал дефекта. Результатуючий сигнал $z(t)$ на виході перетворювача бути рівний

$$z(t) = p(t) \cdot g(t) = \frac{1}{2} a(t) \cdot b(t) \times \\ \times \left\{ \cos 2\pi (f_k + f_0) t + \cos 2\pi (f_k - f_0) t \right\}. \quad (7)$$

З аналізу виразу (7) витікають три важливих висновки.

1. Поява дефекту приводить до розщеплення основної невідомої спектральної компоненти f_k на дві основні компоненти $(f_k + f_0)$ і $(f_k - f_0)$ і ряд комбінаційних гармонік завдяки лінійчатості спектра функції $\frac{1}{2} a(t) \cdot b(t)$.

2. Момент розщеплення спектральної компоненти f_k може служити інформаційною ознакою виявлення дефекту при контролю труб з довільним числом граней.

Важливо тут є та обставина, що ця ознака є інваріантною до зміни відстані між поверхнею труби і перетворювачем, що відкриває можливість підвищення чутливості контролю на основі використання енергетичних параметрів.

3. Для надійного виявлення моменту розщеплення основної гармоніка f_k необхідна роздільна здатність спектрального аналізу порядку $\Delta f \approx f_0 / 4$, тобто 10-12 Гц, що не здійснено аналоговими методами в цехових умовах. Мабуть, даний факт і сприяв використанню амплітудних критеріїв відображення.

З усього вищевикладеного витікає, що вихідний сигнал перетворювача в загальному випадку потребує розглядати як нестационарний, оскільки наявність дефекту веде до зміни значень основних частот. Саме ця обставина обумовлює необхідність використання спектрально-часових методів аналізу. Останнім часом у цьому напрямі була розроблена велика кількість алгоритмів, але враховуючи необхідність обробки інформації по мірі її надходження і реальні можливості цифрових сигнальних процесорів [3,4], єдиним засобом залишається метод короткочасового перетворення Фур'є

$z_k(\tau) = h(\tau) z(t - k\Delta T), \quad \tau \in [0 \dots T]; \quad k = 1, \dots, K$,

де $h(\tau)$ являє собою ковзаючу по часовій осі вагову функцію, визначену на фіксованому інтервалі T , тривалість якого визначає роздільну здатність $\Delta f = 1/T$ спектрального аналізу; ΔT - величина послідовного зміщення тимчасового «вікна» $h(\tau)$, що характеризує точність локалізації сигналу дефекту (тобто момент розщеплення основної спектральної гармоніки, у часовій області), k - загальне число сегментів зміщення у часовій області.

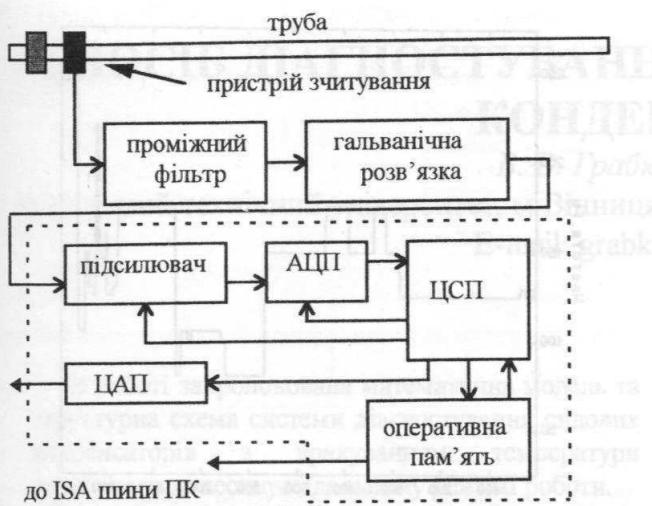
Для кожного зміщення k обчислюється модуль спектральної характеристики

$$z_k(f, k) = \int_{k\Delta T}^{k\Delta T+T} z_k(\tau) \exp(j2\pi f\tau) d\tau, \quad k = 1, \dots, K.$$

Остаточний результат відображається у вигляді яркісного (кольорового) зображення в залежності $z_k(f, k)$ в координатах частота-час.

2. Експериментальна установка зіставлення та обробки інформації

Структурна схема експериментальної установки представлена на мал. 1. Установка складається з підсилювача і аналогово-цифрового перетворювача (АЦП), керованих цифровим сигналним процесором (ЦСП). ЦСП встановлює необхідне посилення сигналу, що реєструється, і частоту квантування для АЦП. Дані в цифровому вигляді з АЦП поступають в регістри ЦСП через послідовний порт (SPI-послідо-



Малюнок 1

вний інтерфейс для периферійних схем), що дозволяє організувати прямий запис даних у пам'ять ЦСП. Після накопичення необхідного числа вибірок даних здійснюється операція прямого перетворення Фур'є за час, необхідний для накопичення подальшої групи вибірок для реалізації алгоритму «ковзаючого часового вікна». По закінченні чергового циклу обчислення спектральної характеристики заданої дільниці дефектограми подається команда персональному комп'ютеру (ПК) про завершення перетворення і обчисленні значення «поточної» спектрограмми вибираються програмою, що виконується, на ПК з пам'яті ЦСП в пам'ять ПК. По закінченні процесу перетворення дані, накопичені в пам'яті ПК, обробляються і перетворюються в зображення в системі координат час-частота і візуалізуються на екрані монітора. При цьому амплітуда кожної гармоніки кодується яскравістю або кольором для синтезованого зображення.

Вибір даного варіанту схеми системи обробки інформації дозволяє реалізувати процес обробки даних в реальному масштабі часу з мінімальними витратами апаратних ресурсів і забезпечити високу роздільність здатність спектрального аналізу.

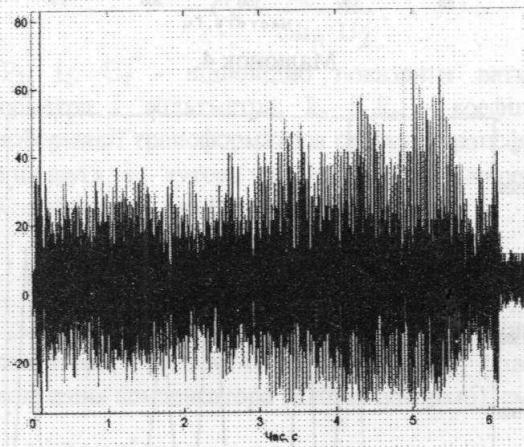
У якості ЦСП використовувався процесор TMS320C31 з тактовою частотою 50МГц. Кількість точок в ковзаючому вікні вибиралася рівним 1024 (підібрано експериментально для забезпечення необхідної роздільної здатності і якісного формування зображення). Час обчислення швидкого перетворення Фур'є по алгоритму RADIX2 становить 1.54 мс. Частота квантування АЦП була вибрана 5кГц, що при вибрані величині тимчасового вікна забезпечує дозволячу здатність спектрального аналізу ≈ 5 Гц. Для зменшення впливу бічних пелюсток кожний сегмент даних згладжувався ваговою функцією Хемінга. Розрядність АЦП MAX-132, що використовується була 14 біт.

Крок послідовного зміщення вікна у часовій області був рівний 32 відлікам. При цьому на кожну трубу довжиною приблизно 11÷12 м і швидкість руху

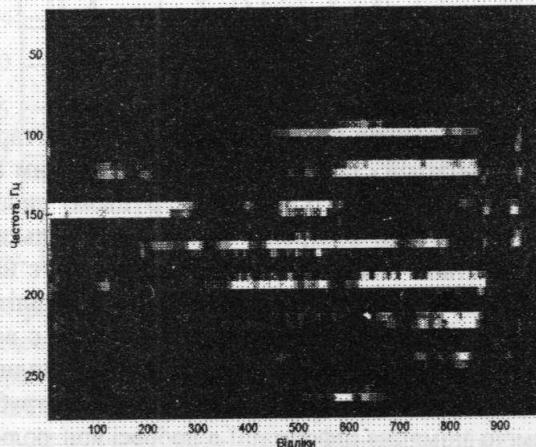
$1.5\div2.0$ м/с доводилося більше ніж 900 операцій обчислень короткочасного перетворення Фур'є.

3. Експериментальні результати

Неважаючи на те, що система контролю дозволила аналізувати одночасно 512 гармонік в діапазоні 0÷2500 Гц, відповідно до вищевикладених міркувань наочно візуалізувалися лише гармоніки в діапазоні 25÷375 Гц. Типовий сигнал котельної холоднокатаної труби діаметром 60мм і товщиною стінки 4мм з протяжним дефектом типу тріщина, що реєструється на виході АЦП в реальному масштабі часу представлений на мал. 2. Результат короткочасового спектрального аналізу в координатах частота (вісь «Y») і час (фактичний номер ковзаючого перетворення Фур'є - вісь «X») представлений на мал. 3.



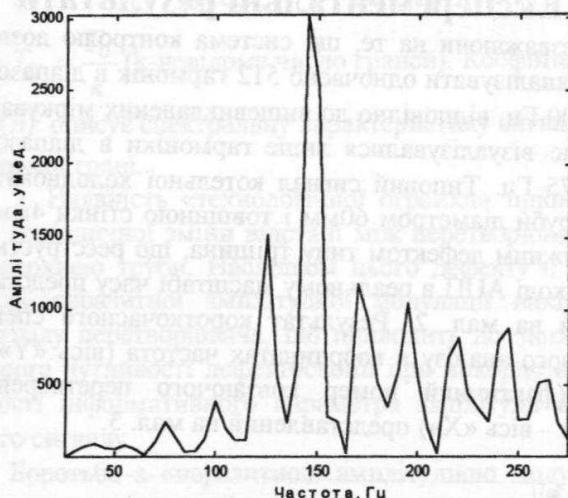
Малюнок 2.



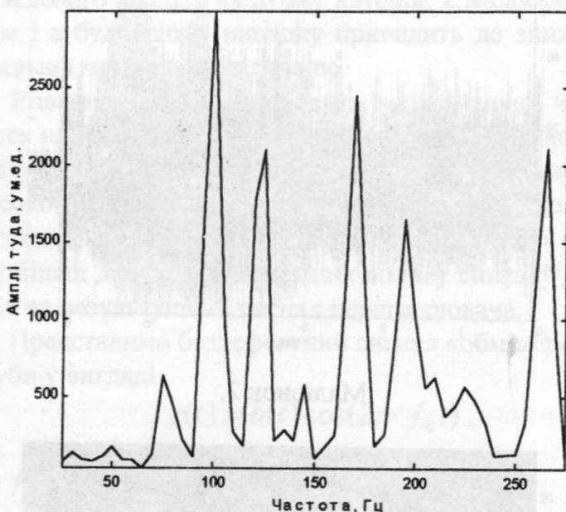
Малюнок 3.

З аналізу мал.3 видно, що до 300-ої вибірки в частотно-часовій площині чітко простежується одна домінуюча гармоніка частотою $f_0 \geq 150$ Гц відповідна бездефектній області труби. Наявність протяжного дефекту приводить до розщеплення цієї гармоніки на ряд модуляційних частот, розташованих як вище, так і нижче частоти f_0 . Останнє наочно вітікає з розгляду поточних амплітудно-частотних характеристик сигналу дефектоскопу відповідних безде-

фектної (мал. 4) і дефектної (мал. 5) вибірки відповідно.



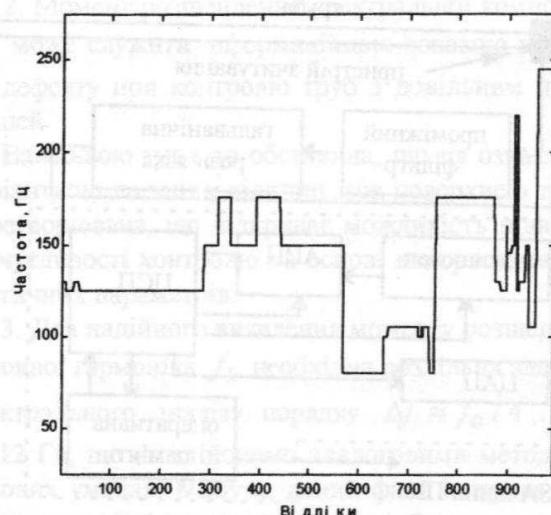
Малюнок 4.



Малюнок 5.

Один з варіантів знаходження домінуючої гармонії в початковій стадії контролю з подальшим аналізом тільки динаміки її амплітуди. У цьому випадку адаптація системи контролю відбувається тільки на першому етапі. Аналіз цієї гармонії показує наявність дефекту приводить до зменшення амплітуди гармоніки. Однак сама амплітуда гармоніки є величиною нестабільною, що мабуть, пов'язано з впливом випадкової зміни відстані між поверхнею труби і системою знімання інформації в процесі контролю.

Другим варіантом оцінювання частоти відповідній максимальній гармоніці в поточному спектрі кожної вибірки сигналу дефектоскопа. Як показує аналіз результатів приведених на мал. 6, процедура прийняття рішення тут набагато простіше, оскільки різним варіантам амплітуди відповідає одне значення частоти. Останнє дає підставу розглядати значення частоти відповідної максимумам амплітуди в поточному спектрі сигналу дефектоскопа або стійкої ознаки інваріантної до зміни відстані між трубою і дат-



Малюнок 6.

чиками, і що підвищує достовірність і чутливість відношення сигналів протяжних дефектів.

4. Висновок

Використання спектрально-часового відображення інформації магнітно-індукційної дефектоскопії в реальному масштабі часу на основі використання цифрових сигналних процесорів дозволяє підвищити достовірність виявлення і локалізації випадкових дефектів. Теоретично і експериментально підтверджена більш висока інформативність низькочастотної частини динамічного спектра сигналів, що реєструються, стосовно до задачі виявлення дефектів в умовах амплітудної нестабільності через вплив зміни відстані між поверхнею труби і датчиком знімання інформації. Використання в якості основної інформаційної ознаки не амплітуди, а значення частоти основної гармоніки в динамічному спектрі сигналів, що реєструються, дозволяє підвищити чутливість дефектоскопії через нейтралізацію впливу на цю ознакоу ефектів випадкової зміни відстані між поверхнею труби і датчиком дефектоскопа.

Література

1. Гоноровский И.С. *Радиотехнические цепи и сигналы*. -М: Радио и связь, 1986., 512 с.
 2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник. Кн. 2. Под ред. В.В. Клюева. - М.: Машиностроение, 1986., 352 с.
 3. *TMS320C3x User's Guide*. Texas Instrument. SPRU031D. Houston, TX 1994.
 4. *Digital Signal Processing Applications with the TMS320 Family by Texas Instruments*. Vol.3. SPRA012A. Houston, TX 1990. Prentice-Hall, Inc., 1990.
 5. Федоренко Ю.К. *О спектральной плотности электрических сигналов наводимых в индукционных датчиках магнитным полем дефектов типа линейного диполя*. - Дефектоскопия, 1965 №3, с. 53-60.