

ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИНИ

УДК 681.121

DOI: 10.31471/1993-9981-2022-1(48)-27-35

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ЗОНДУЮЧИХ ІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ У СИСТЕМАХ НИЗЬКОЧАСТОТНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ПРОТЯЖНИХ ТРУБОПРОВІДІВ

О. Г. Бодаренко

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

Виконано аналіз сутності взаємодії низькочастотної ультразвукової спрямованої хвилі з несучільностями стінки труби в процесі проведення процедури діагностування технічного стану протяжних трубопроводів. Показано, що механізм відбиття низькочастотної хвилі від несучільностей стінки труби різної висоти співпадає з механізмом відбиття морської приливної або штормової хвилі від дамб різної висоти на суші. Наведена загальна характеристика інформаційних збуджувальних сигналів для зондування стану об'єктів у радіолокації та при діагностуванні протяжних трубопроводів.

Вводиться параметр роздільна здатність системи ультразвукового контролю, під якою уявляється здатність системи контролю роздільно приймати та відтворювати сигнали від двох або більше відбивачів, які близько розміщені один від іншого в напрямку розповсюдження спрямованої хвилі. Проаналізовано наявність так званої мертвої зони, що представляє собою ділянку труби від місця встановлення п'єзоперетворювачів акустичної антени, в якій луно-сигнал від несучільності не відділяється від збудженого (початкового). Наявність мертвої зони та її розмір є важливою характеристикою чутливості низькочастотного діагностування протяжних трубопроводів спрямованими хвилями. Перш за все, важливо знати розмір мертвої зони на ділянці збудження низькочастотних коливань, тому що ця ділянка не буде проконтрольована. Наявність мертвої зони та її розмір є важливою характеристикою чутливості низькочастотного діагностування технічного стану протяжних трубопроводів спрямованими хвилями при виявленні несучільностей стінки труби. Встановлено, що використання обвідної у вигляді функції Хеннінга для модуляції збуджуваного синусоїдального сигналу дозволяє управляти тривалістю цугу акустичного коливання у стінці труби та вхідним і вихідним перехідними процесами, що в свою чергу зменшує тривалість мертвої зони при діагностуванні технічного стану протяжних трубопроводів низькочастотними спрямованими хвилями. Обґрунтована форма обвідної імпульсу збудження коливань у середовищі стінки протяжного трубопроводу у вигляді функції Хеннінга.

Ключові слова: протяжний трубопровід, збуджувальний сигнал, обвідна імпульсу, функція Хеннінга.

The analysis of the essence of the interaction of low-frequency ultrasonic directional wave with the inconsistencies of the pipe wall in the process of diagnosing the technical condition of long pipelines is performed. It is shown that the mechanism of reflection of low-frequency wave from irregularities of the pipe wall of different heights coincides with the mechanism of reflection of sea tidal or storm wave from dams of different heights on land. The general characteristics of information excitation signals for sensing the state of objects in radar and in diagnosing long pipelines are given.

The parameter of the resolution of the ultrasonic control system is introduced, which represents the ability of the control system to separately receive and reproduce signals from two or more reflectors, which are closely spaced from each other in the direction of propagation of the directional wave. The presence of the so-called dead zone, which is a section of the pipe from the place of installation of the piezoelectric transducers of the acoustic antenna, in which the echo signal from the discontinuity is not separated from the excited (initial). The presence of a dead zone and its size is an important characteristic of the sensitivity of low-frequency diagnostics of long pipelines by directional waves.

First of all, it is important to know the size of the dead zone in the low-frequency oscillation excitation section, because this section would not be monitored. The presence of a dead zone and its size is an important characteristic of the sensitivity of low-frequency diagnostics of the technical condition of long pipelines by directional waves when detecting inconsistencies in the pipe wall.

It is established that the use of the Henning function to modulate the excited sinusoidal signal allows to control the duration of the acoustic oscillation train in the pipe wall and input and output transients, which in turn reduces the dead zone duration when diagnosing technical condition of low-frequency pipelines. The form of the envelope pulse of excitation of oscillations in the environment of the wall of the long pipeline in the form of the Henning function is substantiated.

The form of the envelope pulse of excitation of oscillations in the environment of a wall of the extended pipeline in the form of function of Henning is substantiated.

Keywords: long pipeline, excitation signal, envelope pulse, Henning function.

Вступ. У роботі [1] виконано аналіз основних характеристик та особливостей низькочастотного хвильового процесу при діагностуванні технічного стану протяжних трубопроводів ультразвуковими спрямованими хвилями. Визначена сутність низькочастотного хвильового процесу в протяжних трубопроводах та наведені схеми зсуву частинок середовища стінки труби для поздовжньої, згинальної і крутильної мод спрямованої хвилі. Розглянуто дисперсійні діаграми звукових швидкостей для різних мод спрямованих хвиль, на основі яких сформульовано їх основні особливості при діагностуванні технічного стану протяжних трубопроводів. Виконано аналіз хвильового процесу в протяжному трубопроводі з позиції акустичної локації його твердого середовища низькочастотними спрямованими хвилями та розроблено модель активної локаційної низькочастотної ультразвукової системи для діагностування технічного стану трубопроводу. Розглянуто принципи збудження п'єзоелементів акустичної антени, напрямки руху коливань та просторові уявлення про розподіл зміщення частинок середовища труби при розповсюдженні в ньому поздовжніх, крутильних та згинальних мод низькочастотних ультразвукових спрямованих хвиль.

У той же час при застосуванні системи низькочастотного ультразвукового діагностування протяжних трубопроводів спрямованими хвилями суттєвим є процес збудження звукових коливань в середовищі стінки труби п'єзоперетворювачами акустичної антени та їх взаємодія з несучільностями стінки труби під час поширення звукової хвилі середовищем стінки трубопроводу.

Саме аналізу особливостей формування зондуючих імпульсних сигналів присвячена дана робота.

Сутність взаємодії низькочастотної ультразвукової хвилі з несучільностями стінки труби. Найбільш показовим поясненням сутності взаємодії низькочастотної спрямованої хвилі з несучільностями стінки труби протяжного трубопроводу є порівняння процесу розповсюдження низькочастотної хвилі у стінці трубопроводу з процесом переміщення морської хвилі під час цунамі, поданого в роботі японських учених [2]. Слово «цунамі» має японське походження й складається з двох ієрогліфів – «бухта» і «хвиля». Саме в цьому приховане його глибоке розуміння: цунамі набуває руйнівної сили тільки при зіткненні з сушею. Морська хвиля (цунамі) виникає внаслідок морських землетрусів. На відкритому просторі в місці виникнення висота її сягає від 0,1 до 5 м, але рухається вона з величезною швидкістю – до 700 км за годину. При наближенні до берега швидкість хвилі падає, а її висота багаторазово виростає – від 10 до 50 м і більше. Саме тоді величезна стіна води навалюється на землю, змиваючи все на своєму шляху.

Можна вважати, що японські вчені дуже правильно вибрали порівняння механізму відбиття морської хвилі від дамб різної висоти під час цунамі з механізмом відбиття низькочастотної спрямованої хвилі від несучільностей стінки труби різних розмірів. При цьому під цунамі мається на увазі не стихійне лихо, а високі приливні або штормові хвилі.

На рис. 1 схематично зображено амплітуди H_1 та H_2 хвиль цунамі в залежності від висоти 1-ї та 2-ї дамб.

Під час руху морської хвилі в напрямку малої дамби 1 висота H_1 цунамі буде не значною. Відповідно при попаданні морської хвилі на більш високу дамбу 2 висота H_2 хвилі виростає значно.

Для порівняння на рис. 2 схематично зображено залежність амплітуди відбитих сигналів спрямованої хвилі в середовищі труби від несучільностей 2 поперечному перерізі труби різних розмірів.

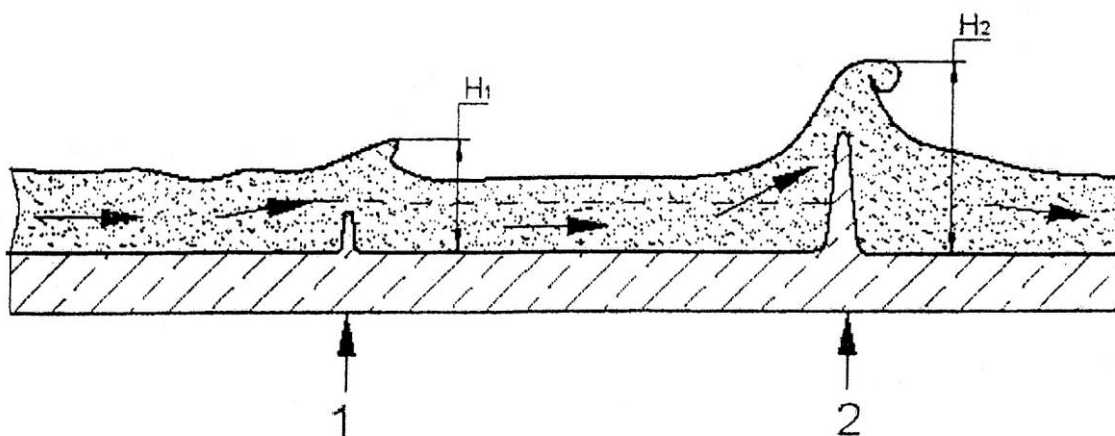


Рисунок 1 – Схематичне зображення амплітуди хвилі цунамі в залежності від висоти дамби

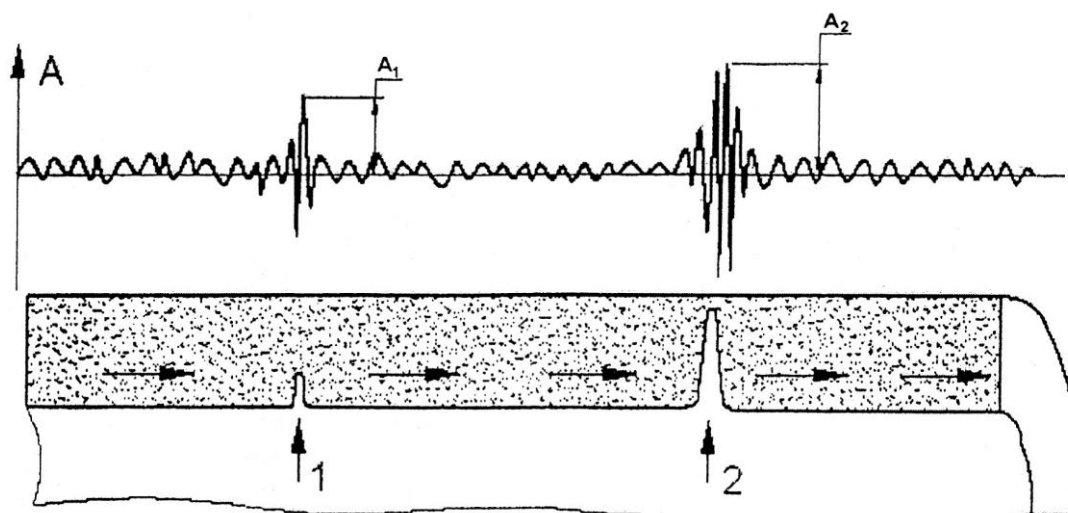


Рисунок 2 – Схематичні зображення амплітуди відбитих сигналів від несучільностей у поперечному перерізі труби різних розмірів

При невеликій несучільності 1 стінки труби амплітуда A_1 відбитого сигналу буде малою. При збільшенні несучільності 2 стінки труби відповідно зростає амплітуда A_2 відбитого від неї сигналу.

Наведені на рис. 1, 2 зображення яскраво ілюструють відповідність амплітуди сигналу низькочастотної спрямованої хвилі, відбитого від несучільностей труби різних розмірів, висоти морської хвилі цунамі в залежності від висоти дамби.

Таким чином, низькочастотні ультразвукові хвилі, які генеруються п'єзоперетворювачами кільцевої антени та поширюються по тілу середовища протяжного трубопроводу в напрямку його вісі, будуть відбиватися від несучільностей стінки труби як граничних поверхонь й повертатися до п'єзоперетворювачів антени.

Інформативними параметрами при проведенні процедури діагностування технічного стану

протяжних трубопроводів будуть відбиті від несучильностей сигнали різної амплітуди та відстань від п'єзоперетворювачів до виявленої несучильності, яка в однорідному середовищі протяжного трубопроводу встановлюється за проміжком часу від точки передавання зондуючого сигналу спрямованої хвилі до приймання відбитого сигналу тим же п'єзоперетворювачем.

Загальна характеристика інформаційних сигналів для зондування стану об'єктів. У різних галузях науки і техніки застосовуються різні інформаційні сигнали, за допомогою яких фіксується змінний у часі та просторі (за величиною) фізичний стан різноманітних промислових об'єктів. Тому такі сигнали найчастіше розглядаються як певні повідомлення, що несуть інформацію про процеси, стан та фізичні величини об'єктів, виражені у формі, зручній для передачі, обробки, зберігання й використання відомостей про об'єкти. Якщо врахувати, що сигнали, як правило, описуються ще й математичною залежністю, то можна отримати нове визначення сигналу. Отже, сигнал – це інформаційна функція, що несе повідомлення про фізичні властивості, стан або поведження деякої фізичної системи, об'єкта чи середовища [3].

Як за величиною, так і у часі інформаційні сигнали можуть мати або безперервні, або дискретні значення. Серед безперервних сигналів найбільш поширеним є синусоїдальний.

У загальному випадку математична модель безперервного синусоїдального сигналу записується у вигляді виразу

$$u(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

де A - амплітуда сигналу; ω_0 - кругова частота; φ_0 - початкова фаза; t - поточний час.

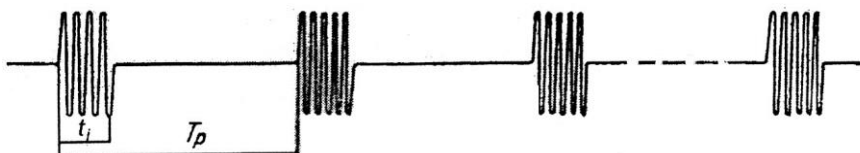


Рисунок 3 – Послідовність збуджувальних радіоімпульсів

Математичну модель радіоімпульсу з прямокутною обвідною в поточному часі можна записати у вигляді

У більшості випадків технічних застосувань синусоїдальних сигналів (радіотехніка, акустична дефектоскопія тощо) використовуються дискретні інформаційні сигнали у вигляді рознесених у часі послідовностей радіоімпульсів, які представляють собою відрізки синусоїдального сигналу тривалістю t_i .

Математичну модель радіоімпульсу $u_p(t)$ можна отримати із виразу (1) моделі синусоїдального сигналу $u(t)$, якщо виконати заміну амплітуди A (постійна величина) на функцію часу $A(t)$, яка описує радіоімпульси[4]:

$$u_p(t) = A(t) \sin(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (2)$$

У радіотехніці при виявленні та оцінці значень параметрів деяких сигналів з апіорно відомими параметрами застосовують різноманітні функції часу $A(t)$ (обвідні радіоімпульсів). Найпростішою є прямокутна обвідна (функція Діріхле), амплітуда якої в інтервалі її спостереження дорівнює одиниці.

Історично задача рознесених у часі радіоімпульсів виникла в області імпульсних радіолокаційних систем. Збуджувальний сигнал представляє собою послідовність прямокутних імпульсів – відрізків синусоїд однакової амплітуди на несучій частоті $\omega_0 = 2\pi/T$, де n - ціле число синусоїдальних коливань в радіоімпульсі з періодом T .

Приклад такої послідовності радіоімпульсів наведено на рис. 3, де t_i - тривалість радіоімпульсу, T_p - період слідування радіоімпульсів.

$$f(t) = \begin{cases} A \cdot \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0), & 0 \leq t \leq t_i, \\ 0, & t < 0 \text{ \& } t > t_i \end{cases} \quad (3)$$

де t_i - тривалість радіоімпульсу; A - амплітуда сигналу; f_0 - циклічна частота синусоїдального сигналу; φ_0 - початковий фазовий кут; $1/f_0 = T$ - період синусоїдальних коливань;

A , f_0 , t_i , φ_0 - постійні величини, які виконують роль інформативних параметрів сигналів.

Особливістю радіоімпульсів, які застосовуються в радіолокації, є те, що при вимірюванні він у вигляді електромагнітної хвилі розповсюджується у просторі і часі без зміни своєї форми. Якщо в зоні дії радіолокаційної станції знаходиться ціль, то радіоімпульс відбивається і, в залежності від розвитку та конфігурації цілі, змінює свою амплітуду та поступає на приймач радіолокаційної станції.

В акустичній дефектоскопії для збудження ультразвукових коливань у середовищі об'єктів контролю застосовуються послідовності радіоімпульсів із прямокутною, дзвіноподібною (гаусовою) та експоненціальною формами обвідної імпульсів. Фактична форма обвідної в акустичній дефектоскопії визначає закон зміни амплітуди в акустичному імпульсі. Найбільше розповсюдження в акустичній дефектоскопії отримали послідовності акустичних імпульсів у вигляді радіоімпульсів з прямокутною формою обвідної. Основними характеристиками таких послідовностей імпульсів є частота заповнення, тривалість окремого імпульсу та період повторення. Останній за звичай вибирається суттєво більшим тривалості окремого прямокутного акустичного імпульсу, тобто $t_i \ll T_p$.

При контролі протяжних трубопроводів низькочастотними ультразвуковими спрямованими хвилями генерація енергії коливань у середовищі труби здійснюється також за допомогою послідовності радіоімпульсів шляхом збудження п'єзоперетворювачів акустичної антени.

При використанні такої послідовності радіоімпульсів для збудження коливань в середовищі протяжного трубопроводу необхідно, щоби тривалість t_i радіоімпульсу та період T_p його слідування (повторення) були вибрані такими, щоби час проходження

імпульсом трубопроводу довжиною L_{Tp} був більше t_i , а кожний відбитий від любого відбивача луно імпульс повертався до п'єзоперетворювача після збудження наступного імпульсу. У цьому випадку в трубопроводі будуть виникати низькочастотні коливання спрямованої хвилі, які не будуть залежати від зміни довжини L_{Tp} трубопроводу.

Тому для виключення впливу на п'єзоперетворювач відбитого від несущіх частот луно-сигналу одночасно із збудженням прямого імпульсу довжина шляху розповсюдження спрямованої хвилі під п'єзоперетворювачів акустичної антени до кінця найбільшої контрольованої ділянки трубопроводу може бути визначена за виразом

$$L_{Tp} > 2Ct_i, \quad (4)$$

де C - швидкість звуку в середовищі трубопроводу.

У залежності від числа n періодів T несучої частоти синусоїдального сигналу радіоімпульсу спрямованої хвилі його тривалість t_i буде визначатися за виразом

$$t_i = nT = \frac{n}{f_0}. \quad (5)$$

Теоретично швидкістю C спрямованої хвилі, числом n синусоїдальних коливань та несучою частотою f_0 радіоімпульсу буде визначатися найменша довжина неконтрольованої ділянки протяжного трубопроводу.

Обґрунтування форми обвідної імпульсу збудження коливань у середовищі протяжного трубопроводу. В акустичній дефектоскопії ряд збуджень, які повторюються, називаються цугом [5]. Зазвичай поняття цугу відноситься до відрізка синусоїди, тобто до радіоімпульсу. Генерація енергії коливань у вигляді такого імпульсу, заповненого синусоїдальною несучою частотою, здійснюється через випромінювальну поверхню п'єзоелектричної пластинки. Якщо цуг змінної напруги відповідає власній частоті пластинки, то на початку і в кінці він раптово обривається. Але при імпульсному збудженні ультразвукових коливань в об'єкті контролю пластинка п'єзоперетворювача внаслідок сил

інерції і сил пружності не схильна до раптових змін і компенсує їх на початку та в кінці циклу коливань вхідним і вихідним перехідними процесами [6]. Зменшення тривалості вхідного і вихідного перехідних процесів досягається за допомогою механічного демпфірування пластини п'єзоперетворювача. Досягти зменшення перехідних процесів, особливо вихідного, за рахунок демпфування пластини не завжди вдається. У той же час наявність тривалого перехідного процесу призводить до збільшення розміру так званої «мертвої зони» [7].

Особливо це має значення в низькочастотному ультразвуковому діагностуванні технічного стану протяжних трубопроводів з застосуванням поздовжньої та крутильних мод спрямованої хвилі.

Мертва зона представляє собою ділянку труби від місця встановлення п'єзоперетворювачів акустичної антени, в якій луно-сигнал від несучільності не відділяється від збудженого (початкового). Наявність мертвої зони та її розмір є важливою характеристикою чутливості низькочастотного діагностування протяжних трубопроводів спрямованими хвилями.

Тут вводиться такий параметр як роздільна здатність системи ультразвукового контролю, під якою уявляється здатність системи контролю роздільно приймати та відтворювати сигнали від двох або більше відбивачів, які близько розміщені один від іншого в напрямку розповсюдження спрямованої хвилі. Для нас перш за все важливо знати розмір мертвої зони на ділянці збудження низькочастотних коливань, тому що ця ділянка не буде проконтрольована.

Визначимо розмір мертвої зони реальної системи низькочастотного ультразвукового контролю протяжних трубопроводів, параметри збуджувального радіоімпульсу якої складають: частота синусоїдального сигналу $f_0 = 40$ кГц.

Кількість періодів сигналу $n = 10$ [8].

На рис. 4 наведено загальний вигляд зонduючого радіоімпульсу (а) та збудженого акустичного коливання у стінці труби (б).

Довжина X мертвої зони при використанні поздовжньої моди спрямованої хвилі з наведеними параметрами у протяжному трубопроводі може бути визначена за виразом [7]:

$$X = C(t_i + t_n) / 2. \quad (6)$$

Період T коливань синусоїдального сигналу частотою $f_0 = 40$ кГц буде дорівнювати:

$$T = \frac{1}{f_0} = 25 \cdot 10^{-6} \text{ сек.}$$

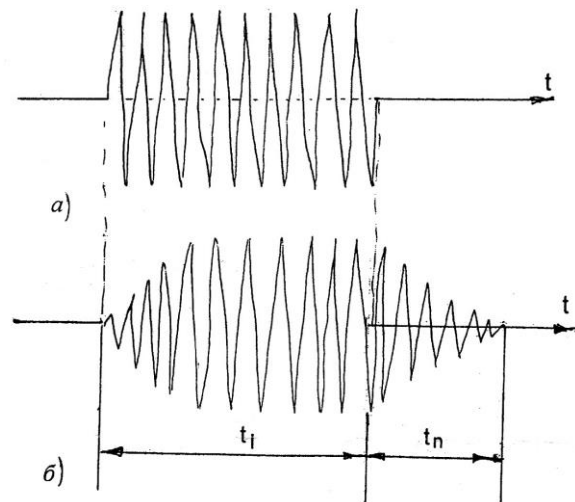


Рисунок 4 – Загальний вигляд зонduючого радіоімпульсу (а) та збудженого акустичного коливання в стінці труби (б), де: t_i - протяжність зонduючого імпульсу (тривалість вимушених коливань п'єзоперетворювача); t_n - протяжність перехідного процесу (тривалість вільних коливань п'єзоперетворювача)

Тоді тривалість прямокутного імпульсу буде складати $t_i = 25 \cdot 10^{-6}$ сек.

Тривалість вхідного і вихідного перехідних процесів згідно рис. 4 складає 5 коливань і дорівнює $t_n = 25 \cdot 10^{-6} \cdot 5 = 125 \cdot 10^{-6}$ сек.

Тоді тривалість цугу збудженого в трубі акустичного коливання буде складати $t_i + t_n = 375 \cdot 10^{-6}$ сек.

При швидкості поздовжньої хвилі $L(0,2) C = 5000$ м/сек тривалість мертвої зони буде мати довжину

$$X = \frac{C(t_i + t_n)}{2} = \frac{5 \cdot 10^6 \cdot 375 \cdot 10^{-6}}{2} = 937,5 \text{ мм} = 0,94 \text{ м.}$$

Наведений розрахунок показує, що тривалість мертвої зони, а відповідно неконтрольованої ділянки труби залежить від

частоти синусоїдального сигналу, кількості коливань в акустичному імпульсі та тривалості вихідного перехідного процесу цугу зондуючого коливання.

Відомо, що кожний імпульс (незалежно від форми) може бути зображений у вигляді ряду Фур'є як сума більшого чи меншого числа необмежених у часі складових коливань синусоїдальної форми, кратних основній частоті f_0 , які розміщуються в більш чи менш широкій смузі частот (частотного спектру).

Частотні компоненти спектру акустичного імпульсу прямокутної форми із заповненням несучої частотою f_0 (при $t=0$) зосереджені в основному поблизу цієї частоти. Положення основного піку імпульсу на часовій шкалі відповідає частоті заповнення f_0 , а його ширина визначається тривалістю t_i імпульсу. Чим більше тривалість імпульсу, тим менша ширина головного частотного піку та смуги частот спектру. Чим коротший акустичний імпульс, тим ширша полоса частот, у якій розміщуються складові частот спектру із ще помітною амплітудою.

Зменшення тривалості мертвої зони при використанні акустичних імпульсів з прямокутною обвідною можна досягнути за рахунок зменшення тривалості t_i зондуючого імпульсу, яке можна здійснити двома шляхами:

1. Вибором несучої частоти f_0 в межах 20 – 100 кГц, які використовуються в низькочастотному ультразвуковому контролі протяжних трубопроводів у залежності від товщини стінки труби

2. Зменшенням числа періодів p несучої частоти в прямокутному акустичному імпульсі.

Зменшення тривалості t_i імпульсу може здійснюватися до визначеної межі за умови, що найбільша частина енергії акустичного прямокутного імпульсу буде міститися в основній частоті f_0 спектра.

Ще одним шляхом зменшення тривалості мертвої зони є зменшення тривалості вихідного перехідного процесу цугу зондуючого імпульсу, який впливає на тривалість усього цугу. Якщо поглянути на форму цього цугу, то можна

замітити, що при збудженні коливання акустичним імпульсом прямокутної форми амплітуда акустичного коливання в середовищі труби під час вхідного перехідного процесу збільшується поступово, потім залишається постійною в залежності від тривалості імпульсу, а потім поступово зменшується до нуля після закінчення прямокутного імпульсу під час вихідного перехідного процесу. Це означає, що цуг акустичного імпульсу в середовищі труби можна описати обвідною, форма якої відрізняється від форми обвідної прямокутного імпульсу. Можна стверджувати, що логічно спробувати вибрати форму обвідної імпульсу, яка б не відрізнялася від форми цугу коливання, яке збуджується в середовищі труби. Тоді тривалість цугу збуджуваного коливання в середовищі труби буде дорівнювати тривалості імпульсів, якими збуджуються п'єзоперетворювачі акустичної антени.

Саме цей принцип використовується в закордонних системах ультразвукового контролю протяжних трубопроводів низькочастотними спрямованими хвилями. Так для побудови обвідної кривої пакетних сигналів, які збуджують п'єзоперетворювачі акустичної антени, використовується так звана «функція Хеннінга» [8].

Функція Хеннінга в основному використовується в радіотехніці для виявлення гармонійних сигналів у широкосмуговому шумі при наявності інтенсивних гармонійних завад низької частоти. Це пов'язано з тим, що при обробці сигналів часто доводиться вирішувати задачі двох типів – задачу виявлення й задачу оцінювання. При виявленні необхідно дати відповідь на питання, чи дійсно спостерігається на даний час деякий сигнал з апріорно відомими параметрами. Оцінювання – це задача вимірювання значень параметрів, які описують сигнал. Часто сигнал зашумлений, на нього можуть накладатися заважаючі сигнали. Для багатьох застосувань найбільш інтересними є періодичні сигнали.

Цілком природно, що вирішення задач виявлення та оцінювання подібних сигналів пов'язане в їх розкладом за базисом, який складається із простих періодичних функцій Sin і Cos. Такий розклад сигналів можна здійснити за допомогою дискретного перетворення Фур'є (ДПФ), що ґрунтовно виконано при дослідженні

різноманітних функцій, які отримали назву «вікон», в роботі [9]. Із класичних вікон у наведеному дослідженні виділено прямокутне вікно (функція) Діріхле, трикутне вікно (функція)

Фейера та ціла сім'я виду $\text{Cos}^n(X)$, які залежать від параметра a , причому a , як правило, ціле число. В якості a частіше всього вибирають числа від 1 до 4. Найбільше застосовується вікно з $a=2$, яке отримало назву вікна Хеннінга, або

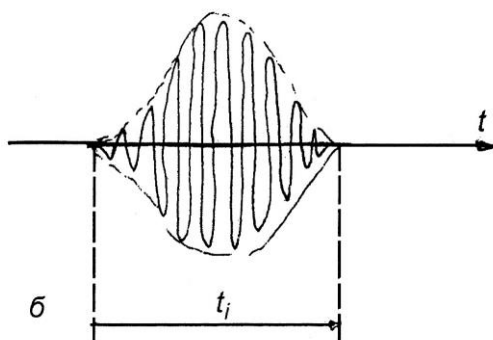
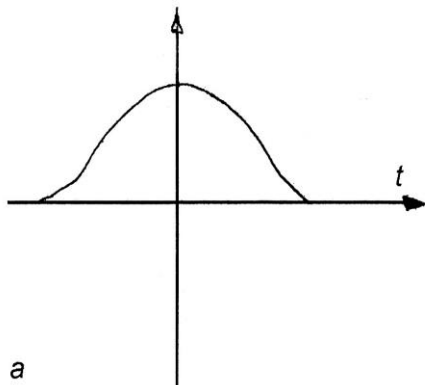


Рисунок 5 – Загальний вигляд вікна функції $\text{cos}^2(a)$ та радіоімпульсу функції Хеннінга

Математичну модель радіоімпульсу з обвідного типу функції Хеннінга в поточному часі можна записати у вигляді

$$f(t) = \begin{cases} A \cdot \text{cos}^2(\sin(2\pi f_0 t + \varphi_0)), & 0 \leq t \leq t_i, \\ 0, & t < 0 \text{ \& } t > t_i \end{cases} \quad (7)$$

Синусоїдальний сигнал с обвідною типу функції Хеннінга має вузький частотний спектр порівняно з частотним спектром радіоімпульсу прямокутної форми.

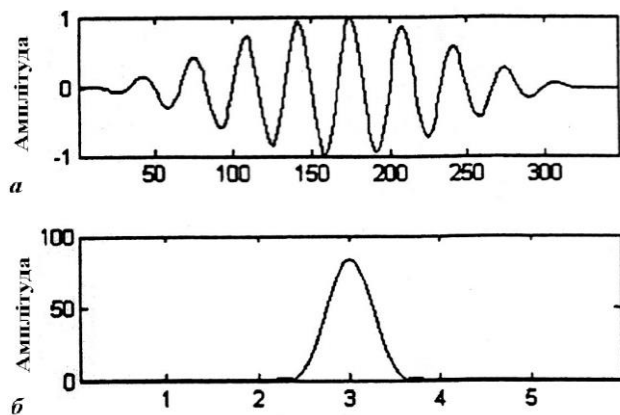


Рисунок 6 – Загальний вигляд зонduючого імпульсу з обвідною функції Хеннінга (а) та його частотний спектр (б)

функції Хеннінга. Саме ця функція, яка уявляє собою підняту косинусоїду, й використовується в низькочастотному ультразвуковому контролі як обвідна радіоімпульсу, що збуджує коливання в середовищі протяжного трубопроводу.

На рис. 5 наведено загальний вигляд вікна функції $\text{Cos}^2(a)$ та радіоімпульсу функції Хеннінга.

Використання обвідної синусоїдального сигналу типу функції Хеннінга дозволяє амплітуді синусоїдального сигналу несучої частоти поступово зростати до максимум на початковій частині обвідної, а потім поступово спадати на завершальній частині обвідної радіоімпульсу.

На рис. 6 в якості прикладу наведено загальний вигляд зонduючого імпульсу з обвідною функцією Хеннінга (а) та його частотного спектру (б) [10]. Зонduючий імпульс містить 10 періодів синусоїдальної спрямованої хвилі з середньою частотою $f_0 = 30$ кГц. Фактично сигнал синусоїдальної хвилі, що використовується для збудження п'єзоперетворювачів акустичної антени, модулюється за допомогою функції Хеннінга для того, щоби зменшити ширину смуги частот його спектру.

Висновки

Наявність мертвої зони та її розмір є важливою характеристикою чутливості низькочастотного діагностування технічного

стану протяжних трубопроводів спрямованими хвилями при виявленні несучільностей стінки труби. Використання обвідної у вигляді функції Хеннінга для модуляції збуджуваного синусоїдального сигналу дозволяє управляти тривалістю цугу акустичного коливання у стінці труби та вхідним і вихідним перехідними процесами, що в свою чергу зменшує тривалість мертвої зони при діагностуванні технічного стану протяжних трубопроводів низькочастотними спрямованими хвилями.

Список використаних джерел

1. Бондаренко О.Г. Основні характеристики та особливості низькочастотного хвильового процесу в протяжних трубопроводах. *Методи та прилади контролю якості*. 2019. № 1. С. 5-23.
2. Takashi K., Fumitoshi S. Guided Wave Pipe Inspection and Monitoring System. *Журнал Японского сварочного общества*. 2006. V. 75. № 4. pp. 8-12.
3. Лагун І.І., Наконечний Р.А. Загальна класифікація сигналів та їх опрацювання. *Методи та прилади контролю якості*. 2009. № 22. С. 71-75.
4. Теоретические основы информационно-измерительных систем: Учебник / В.П.Бабак, С.В.Бабак, В.С.Еременко и др.; под ред. чл-корр. НАН Украины В.П.Бабака. К.: 2014. 823 с.
5. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. Глав.ред. И.П.Голямина. М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1979. 400 с.
6. Ультразвуковой контроль материалов/ под ред. Крауткремер Й., Крауткремер Г. М.: Металлургия, 1991. 752 с.
7. Выборнов Б.П. Ультразвуковая дефектоскопия. М.: Металлургия, 1985. 256 с.
8. Kameyama S, Misu K., Wadaka S. Ultrasonic Test Instrument Using Guided Wave. *Hikakai Kensa*. 2003. v. 52. № 12. pp. 672-678.
9. Harris F.J. On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform. *ТИИЭР*. 1978. т. 66. № 1. pp. 60-96.
10. Mallott R., Mudge P., Gon T-H and W. Balachandran Analysis of cross-correlation and wavelet de-noising for the reduction of the effects of dispersion in long-range ultrasonic testing. *Insight*. 2007. vol. 49. № 6. pp. 350-355.

Referenses

1. Bondarenko O.H. Osnovni kharakterystyky ta osoblyvosti nyz'kochastotnoho khvyl'ovoho protsesu v protyazhnykh truboprovodakh. *Metody ta prylady kontrolyu yakosti*. 2019. № 1. S. 5-23.
2. Takashi K., Fumitoshi S. Guided Wave Pipe Inspection and Monitoring System. *Zhurnal Yaponskoho svarochnoho obshchestva*. 2006. V. 75. № 4. pp. 8-12.
3. Lahun I.I., Nakonechnyy R.A. Zahal'na klasyfikatsiya syhnaliv ta yikh opratsyuvannya. *Metody ta prylady kontrolyu yakosti*. 2009. № 22. S. 71-75.
4. Teoretycheskye osnovy ynformatsyonno-ymerytel'nykh system: Uchebnyk / V.P.Babak, S.V.Babak, V.S.Eremenko y dr.; pod red. chl-korr. NAN Ukrayny V.P.Babaka. K.: 2014. 823 s.
5. Ul'trazvuk. Malen'kaya entsyklopedyya. Hlav.red. Y.P.Holyamyna. M.: Yzd-vo «Sovetskaya entsyklopedyya», 1979. 400 s.
6. Ul'trazvukovoy kontrol' materyalov/ pod red. Krautkremer Y., Krautkremer H. M.: Metallurhyya, 1991. 752 s.
7. Vybornov B.P. Ul'trazvukovaya defektoskopyya. M.: Metallurhyya, 1985. 256 s.
8. Kameyama S, Misu K., Wadaka S. Ultrasonic Test Instrument Using Guided Ware. *Hikakai Kensa*. 2003. v. 52. № 12. pp. 672-678.
9. Harris F.J. On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform. *ТYYЕР*. 1978. т. 66. № 1. pp. 60-96.
10. Mallott R., Mudge P., Gon T-H and W. Balachandran Analysis of cross-correlation and wavelet de-noising for the reduction of the effects of dispersion in long-range ultrasonic testing. *Insight*. 2007. vol. 49. № 6. pp. 350-355.