УДК 622.691.4.002.5

СПОСІБ СЕЛЕКТИВНОГО ЗБУДЖЕННЯ МОД УЛЬТРАЗВУКОВИХ КІЛЬЦЕВИХ ХВИЛЬ

І. З. Лютак, І. С. Кісіль

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, тел. (8-03422) 4-60-77

Представлено математичний опис і спосіб збудження окремої моди ультразвукової кільцевої спрямованої хвилі в стінці трубопроводу. Для виокремлення інформативної складової із групи мод запропонований підхід з використанням декількох ультразвукових первинних перетворювачів.

Представлено математическое описание и способ возбуждения отдельной моды ультразвуковой кольцевой направленной волны в стенке трубопровода. Для выделения информативной составляющей из группы мод предложен подход с использованием нескольких ультразвуковых первичных преобразователей.

Mathematical description and method of excitation of separate modes of the ultrasonic circumferential guided waves is presented in the wall of pipeline. For the selection of informing constituent from the group of modes offered approach with the use of array of ultrasonic transducers.

Кільцеві ультразвукові хвилі поширюються у площині перпендикулярній осі трубопроводу та паралельно границям розділу середовищ метал-повітря. На даний час такі хвилі починають досліджувати з метою застосування їх у неруйнівних методах контролю. Їх перевагами перед об'ємними є здатність поширюватись на значні відстані без суттєвого загасання амплітуди. Це дозволяє контролювати технічний стан перерізу трубопроводу, маючи доступ до нього лише з одного боку. Зменшення площі контакту первинного давача із поверхнею трубопроводу є важливим при контролі в умовах експлуатації підземних нафтогазопроводів, повне шурфування яких зменшує продуктивність та вартість робіт. Використання кільцевих ультразвукових хвиль дозволить контролювати як магістральні трубопроводи в важкодоступних місцях, так і отримувати більш точні результати у порівнянні з традиційними точковими методами на основі об'ємних хвиль.

Фізичні основи поширення ультразвукових кільцевих хвиль є досить складними. Ці хвилі характеризуються дисперсією (залежністю швидкості поширення від частоти) та багатомодальністю [1]. Є два типи кільцевих хвиль: спрямовані та горизонтально-поляризовані. Їх розрізняють за поляризацією коливань. В горизонтально-поляризованих хвилях напрям коливання елементарного об'єму пружного середовища є паралельним границям розділу метал – повітря. В спрямованих хвилях напрям коливання елементарного об'єму пружного середовища є довільним. Крім того, в стінках трубопроводів можуть існувати спрямовані хвилі, що поширюються в трубопроводі вздовж осі. Для ефективного застосування кільцевих хвиль в неруйнівному контролі необхідна математична модель, що описує їх поширення.

Одним із перших ґрунтовних досліджень спрямованих хвиль є праця Газіса [2]. В цій праці науковець досліджує збудження і поширення ультразвукових спрямованих хвиль у трубах нахиленим первинним давачем. Ідентифікація перших базових мод спрямованих хвиль парою п'єзоелектричних первинних перетворювачів, що працюють у вузькій частотній смузі, була здійснена Фітчем [3]. Тут автор порівняв теоретичні дані з експериментальними. Дослідження збудження спрямованих хвиль широкосмуговими давачами за допомогою лазерної установки представлено Нішіно [4]. Ідентифікація як нульової моди хвилі Лемба, так і спрямованих хвиль з використанням вейвлет-перетворень представлено Такемото [5]. Також дослідження поширення спрямованих хвиль на згинах труб із потоншенням їх стінок та наповненням рідиною

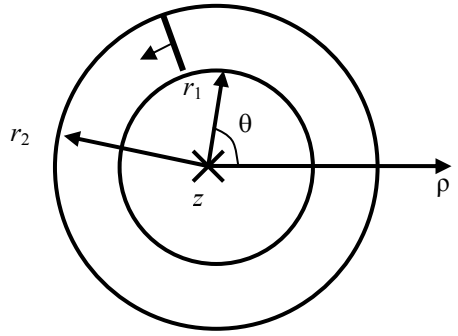
представлено в пряцях Нішіно, Такемото та Сато [6, 7, 8]. Вказані праці досліджують параметри поширення спрямованих хвиль вздовж осі трубопроводу. В них не досліджуються методи генерування спрямованих хвиль, тому ці праці складно застосувати до неруйнівних методів контролю.

Ефективність застосування кільцевих хвиль у неруйнівному контролі трубопроводів є оптимальною у порівнянні із спрямованими хвилями, що поширюються в стінках труб вздовж осі та об'ємними хвилями. Спільними ознаками спрямованих хвиль, що поширюються вздовж осі трубопроводу, та кільцевими спрямованими хвилями є їх розділення за типами коливань зовнішньої та внутрішньої поверхонь труби [9, 10]. Переваги використання кільцевих хвиль у неруйнівному контролі перед об'ємними хвилями в тому, що вони покривають весь об'єм поширення, а не площинно, як властиво при використанні традиційних ультразвукових методів із поздовжніми та поперечними хвилями. Переваги використання мод кільцевих хвиль перед спрямованими хвилями, що поширюються в стінках труб вздовж осі, полягають у тому, що частота кільцевих мод може бути значно більшою, і тому за їх допомогою можна виявляти неоднорідності та дефекти із меншими геометричними розмірами [1].

Спосіб генерування горизонтально-поляризованих хвиль за допомогою електромагнітних первинних давачів представлено науковцями Хірао та Огі [11]. У своїй праці науковці досліджували залежність параметрів перших двох мод горизонтально-поляризованих кільцевих хвиль від наявності корозійних дефектів на поверхні труби. Недоліком запропонованого підходу є складність реалізації методу в натурних умовах та забезпечення необхідної точності при проведенні контролю. Генерування вибіркових мод ультразвукових спрямованих хвиль, що поширюються в стінках труб вздовж осі, за допомогою ряду первинних перетворювачів представлено колективом науковців на чолі з Кімом [12]. Для генерування кільцевих хвиль запропонованим способом необхідно його удосконалити, дослідивши необхідні хвильові параметри (дисперсні властивості, структуру мод). З аналізу видно, що для збільшення ефективності застосування кільцевих хвиль в неруйнівному контролі необхідно розробити метод їх генерування п'єзоелектричними первинними давачами.

В даній роботі розробляється метод вибіркового генерування кільцевих хвиль за допомогою п'єзоелектричного первинного перетворювача. Для здійснення методу запропоновано математичну модель поширення кільцевих хвиль. Вибір окремих мод кільцевих хвиль здійснюється за допомогою повороту первинного перетворювача. Для підсилення амплітуди окремих мод цих хвиль запропоновано використання декількох первинних перетворювачів.

Розглянемо поширення горизонтально-поляризованої кільцевої ультразвукової хвилі в стінці трубопроводу. Математичний опис поширення цієї хвилі будемо здійснювати в циліндричних координатах (рис. 1).



ρ, ϴ, z – циліндричні координати; r_1, r_2 – відповідно внутрішній та зовнішній радіуси труби

Рисунок 1 – Модель поширення кільцевих ультразвукових хвиль в трубі

Загальне рівняння, що описує хвильові властивості горизонтально-поляризованих кільцевих хвиль є таким [1]:

$$u_z = \left(U_1 J_p\left(k_\theta r\right) + U_2 Y_p\left(k_\theta r\right)\right) cos\left(\omega t - p\theta\right) , \qquad (1)$$

де u_z – коливання елементарного об'єму пружного середовища, $k_ϴ$ – кутове хвильове число, r та ϴ – циліндричні координати, U_1 та U_2 – відповідно амплітуди об'ємних хвиль, J_p та Y_p – функції Бесселя першого та другого роду порядку p, ω - кутова частота, t – час.

В (1) невідомими є значення амплітуд об'ємних хвиль та коливання елементарного об'єму. Застосуємо граничні умови поширення ультразвукових кільцевих хвиль у ненавантаженому трубопроводі [1]:

$$\left[G \frac{\partial u_z}{\partial r} \right]_{|r=r_1, r_2} = 0 , \qquad (2)$$

де G - константа зсуву.

Провівши диференціювання (1), отримаємо визначник, що описують дисперсні властивості кільцевих мод горизонтально-поляризованих хвиль [1]:

$$\begin{vmatrix} \frac{p}{r_2}J_p(k_\theta r_2)-k_\theta J_{p+1}(k_\theta r_2) & \frac{p}{r_2}Y_p(k_\theta r_2)-k_\theta Y_{p+1}(k_\theta r_2) \\ \frac{p}{r_1}J_p(k_\theta r_1)-k_\theta J_{p+1}(k_\theta r_1) & \frac{p}{r_1}Y_p(k_\theta r_1)-k_\theta Y_{p+1}(k_\theta r_1) \end{vmatrix}=0 . \quad (3)$$

Визначник (3) дає можливість дослідити дисперсні властивості горизонтально-поляризованих мод кільцевих хвиль у формі $k_\theta(\omega)$.

Для кільцевих спрямованих хвиль зміщення елементарного об'єму середовища u_r, u_θ буде у двох напрямках, позначених відповідними індексами координат [1]:

$$u_r = \begin{bmatrix} U_1\left(\frac{p}{r}J_p(k_\theta r)-k_\theta J_{p+1}(k_\theta r)\right)+ \\ +U_3\left(\frac{p}{r}Y_p(k_\theta r)-k_\theta Y_{p+1}(k_\theta r)\right)- \\ -\frac{p}{r}\left(U_2 J_p(k_\theta r)+U_4 Y_p(k_\theta r)\right) \end{bmatrix} cos(\omega t - p\theta) ,$$

$$u_\theta = \begin{bmatrix} U_2\left(\frac{p}{r}J_p(k_\theta r)-k_\theta J_{p+1}(k_\theta r)\right)+ \\ +U_4\left(\frac{p}{r}Y_p(k_\theta r)-k_\theta Y_{p+1}(k_\theta r)\right)- \\ -\frac{p}{r}\left(U_1 J_p(k_\theta r)+U_3 Y_p(k_\theta r)\right) \end{bmatrix} sin(\omega t - p\theta) , \quad (4)$$

де U_1, U_2, U_3, U_4 – відповідно амплітуди падаючих та відбитих об'ємних поздовжніх та поперечних хвиль.

Для знаходження невідомих значень амплітуд об'ємних хвиль в (4) визначимо граничні умови. Для ненавантаженої труби радіальні та тангенційні компоненти напружень σ_{rr} та $\sigma_{r\theta}$ будуть дорівнювати нулю на її поверхнях [13]:

$$\sigma_{rr} = \left[\lambda\left(\frac{u_r}{r}+\frac{\partial u_r}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial u_\theta}{\partial \theta}\right)+2\mu\frac{\partial u_r}{\partial r}\right]_{r=r_1,r_2} = 0 ,$$

$$\sigma_{r\theta} = \left[\lambda\left(-\frac{u_\theta}{r}+\frac{\partial u_\theta}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial u_r}{\partial \theta}\right)\right]_{r=r_1,r_2} = 0 , \quad (5)$$

де λ, μ – коефіцієнти Пуассона; u_r, u_θ - коливання елементарного об'єму пружного середовища в стінці труби.

Співставивши (5) та (4), отримаємо детермінант d_{ij}, i, j = 1,2,3,4, який описує формування та поширення спрямованої кільцевої хвилі за аналогією до (3). Кожен ряд детермінанта d_{ij} описує об'ємну поздовжню чи поперечну хвилю. Прирівнявши d_{ij} до нуля, можемо знайти дисперсійні параметри спрямованої кільцевої хвилі.

Дисперсійні криві горизонтально-поляризованої та спрямованої кільцевих ультразвукових хвиль дозволяють вибрати частоти первинного давача для їх генерування. В стінці товщиною $2h$ може існувати ряд окремих мод кільцевих хвиль певної частоти ω, що відрізняються одна від одної фазовими та груповими швидкостями, розподілом зміщення елементарного об'єму та напружень по товщині [9]. Необхідно визначити, які моди кільцевих хвиль легше збуджувати та приймати для визначеної геометрії об'єкту контролю.

При збудженні кільцевих спрямованих хвиль необхідно враховувати той факт, що коли частота генерування первинним давачем не буде співпадати із коренями (5) та (3), в стінці труби утворюватиметься синфазне коливання об'єму середовища [9]. Такі коливання не будуть поширюватись вздовж границь розділу середовищ. Кільцеві спрямовані хвилі будуть утворюватись при такій комбінації частоти генерування первинного перетворювача та товщини стінки труби, при якій виникатиме стояча хвиля (рис. 2). Первинним перетворювачем збуджується падаюча ультразвукова об'ємна хвиля, що інтерферує з відбитою від другої поверхні труби. В результаті при певній частоті хвилі та товщині стінки зміщення фаз падаючої та відбитої хвиль складатиме четверту частину довжини хвилі, що утворить стоячу хвилю у радіальному напрямку. В такій стоячій хвилі не відбувається переносу енергії в напрямку r, а лише просторове перетворення кінетичної енергії в потенціальну з подвоєною частотою. Тому в такій хвилі області між вузлами і пучностями розглядаються як автономні системи, а сама стояча хвиля – як розподілене в просторі коливання [13].

Математично стоячу хвилю можна описати так [14]:

$$u_r = U_{r0}\,sin(kr-\omega t)+U_{r0}\,sin(kr+t)= \\ = 2U_{r0}\,cos(\omega t)sin(kr) , \quad (6)$$

де k – хвильове число, U_{r0} – амплітуда об'ємної ультразвукової хвилі, r – координата, t- час, ω - частота.

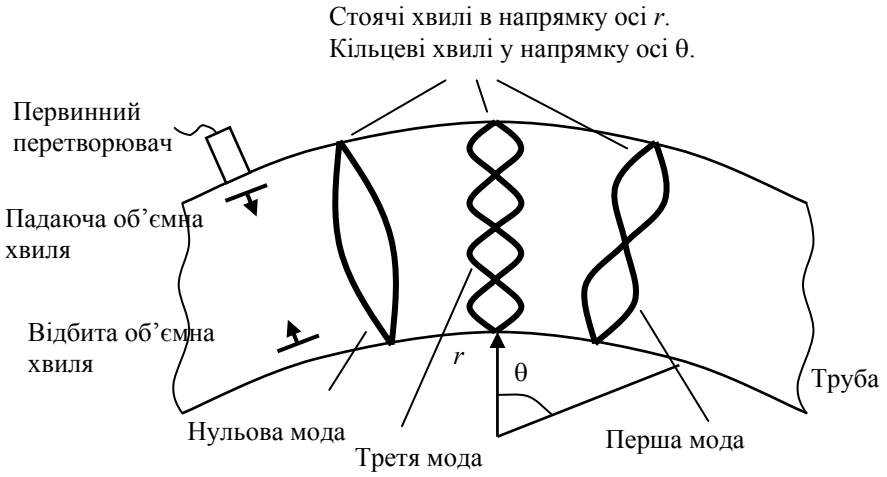


Рисунок 2 – Утворення кільцевих хвиль у стінці труби

Перший множник (6) $cos(\omega t)$ відповідає за коливання в часі, а другий $sin(kr)$ – за просторове положення, яке є незмінним.

Для створення кільцевої спрямованої хвилі необхідно виконати таке співвідношення між товщиною стінки та частотою для симетричних мод [9]:

$$2h = \frac{\lambda_l}{2}, \frac{3\lambda_l}{2}, \frac{5\lambda_l}{2}, \ldots \;; \qquad 2h = \lambda_t, 2\lambda_t, 3\lambda_t, \ldots, \tag{7}$$

де λ_l, λ_t – відповідно довжини поздовжньої та поперечної хвиль.

Для антисиметричних мод цих хвиль співвідношення є таким [9]:

$$2h = \frac{\lambda_t}{2}, \frac{3\lambda_t}{2}, \frac{5\lambda_t}{2}, \ldots \;; \qquad 2h = \lambda_l, 2\lambda_l, 3\lambda_l, \ldots. \tag{8}$$

Повне число симетричних мод N_s спрямованої хвилі при товщині $2h$ та частоті ω є таким [9]:

$$N_s = 1 + \left(\frac{2h}{\lambda_t}\right) + \left(\frac{2h}{\lambda_l} + \frac{1}{2}\right), \qquad N_a = 1 + \left(\frac{2h}{\lambda_l}\right) + \left(\frac{2h}{\lambda_t} + \frac{1}{2}\right). \tag{9}$$

З аналізу (7) і (8) виходить, що кільцеві спрямовані хвилі можуть бути створеними як поперечними, так і поздовжніми об'ємними хвилями.

Найбільш простий спосіб створення таких хвиль є введення поперечної хвилі в трубопровід нормально до його поверхні. Залежно від поляризації коливань такої хвилі ми отримаємо або горизонтально-поляризовані моди, або спрямовані. В залежності від частоти первинного перетворювача та товщини стінки можна збудити як симетричні, так і антисиметричні моди. Якщо поляризація коливань первинного перетворювача співпадає з віссю труби, то створюються горизонтально-поляризовані моди. Коли поляризація коливань первинного давача є перпендикулярною до осі труби, створюються лише спрямовані моди, (рис. 3). У випадку, коли поляризація згенерованих коливань є довільною, будуть створюватись обидва типи мод [1].

Як можна побачити із рис. 2, утворення певної моди кільцевої хвилі залежатиме від просторового розміщення її пучності та вузла по відношенню до площі контакту первинного перетворювача та поверхні труби. Моди, які мають розміщення вузла на поверхні (зміщення елементарного об'єму є незначним), складно збуджувати. Навпаки, при розміщенні пучності на поверхні труби велика частина коливної енергії передається від первинного перетворювача у відповідну моду.

Визначити зміщення елементарного об'єму на поверхні труби кожної окремої моди кільцевих хвиль можна на основі (1) та (4).

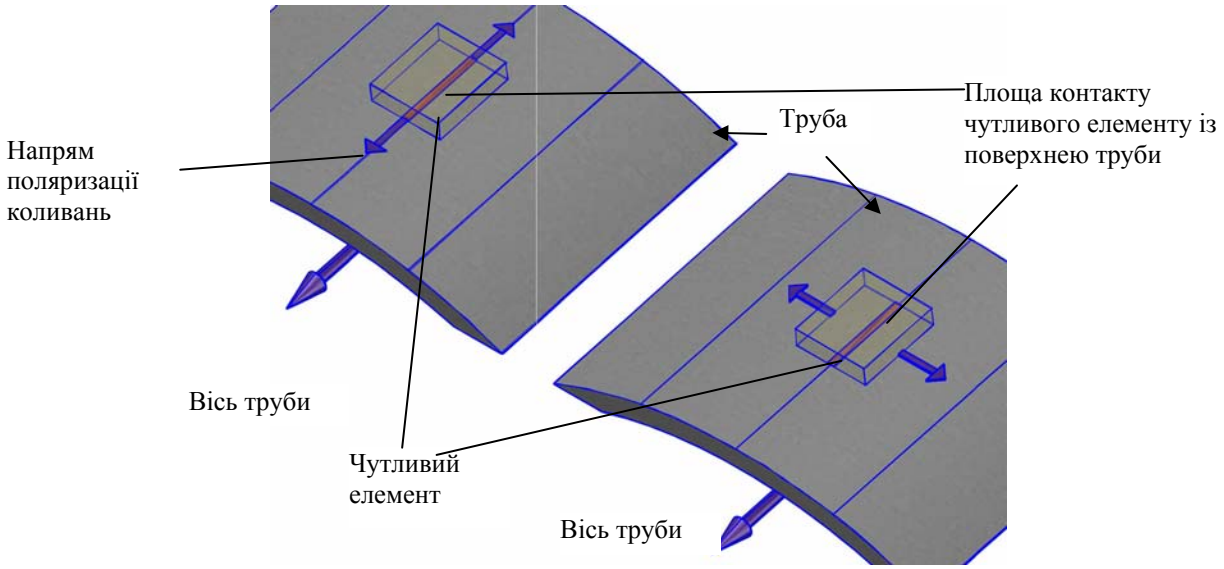


Рисунок 3 – Генерування кільцевих хвиль у трубі ультразвуковим давачем із поперечною поляризацією коливань

При генеруванні мод кільцевих хвиль необхідно брати до уваги амплітудно-частотні характеристики первинного перетворювача. Як відомо, будь-який чутливий елемент генерує коливання у певній смузі частот. Розрізняють як широкосмугові, так і вузькосмугові давачі. Очевидно, із збільшенням ширини частотної смуги первинного перетворювача можуть генеруватись кілька мод кільцевих хвиль. Якщо моди генеруються первинним давачем одночасно і мають близькі за значенням групові швидкості, то їх складно розрізняти при прийомі. Тому необхідно удосконалити підхід генерування хвиль, при якому інформативна частина хвильового поля була б виділена.

При проведенні неруйнівного контролю на трубопроводі важливим є забезпечення генерування та прийому кільцевих хвиль з одного місця. Проте в процесі генерування кільцевої хвилі утворюється стояча хвиля, що поширюється в обидві сторони від місця контакту поверхні труби та чутливого елементу давача. Це створює складності прийому хвилі давачем, що задіяний у її генеруванні.

Для вирішення вказаних труднощів запропоновано використати декілька первинних перетворювачів (рис. 4) [12]. На крайній первинний перетворювач подається електричний імпульс, що заставляє коливатись чутливий елемент та створює кільцеву хвилю. Через певний проміжок часу подібний електричний сигнал подається на наступний первинний перетворювач, який буде генерувати ультразвукову хвилю в стінці труби. Для ефективного підсилення інформаційної складової хвильового поля необхідно забезпечити генерування хвилі другим перетворювачем у момент часу приходу кільцевої хвилі від першого давача. В результаті амплітуда коливань елементарного об’єму необхідної моди кільцевої хвилі зросте у порівнянні з іншими збуреннями в стінці труби (хвилями, що рухаються у протилежному напрямку, завадами тощо). Інкрементне задіювання наступного первинного перетворювача ще більше виокремить інформативну складову [12].

Затримка в часі Δt між сигналами сусідніх первинних перетворювачів буде такою [12]:

$$\Delta t = \frac{L}{c_\phi} \ , \qquad (10)$$

де L – відстань між центрами чутливих елементів первинних перетворювачів, c_ϕ – фазова швидкість інформативної моди кільцевої хвилі.

За допомогою запропонованого підходу можна вибирати інформативну моду, що є можливим також і у випадку генерування широкосмуговим первинним давачем кількох мод одночасно. Це досягається тим, що кожна мода відрізняється фазовою швидкістю, тому час приходу мод до сусідніх давачів буде різним [12].

Точність взаємного місцеположення давачів не є обов’язковою, оскільки відстань регулюється часом затримки при калібруванні давачів у лабораторних умовах.

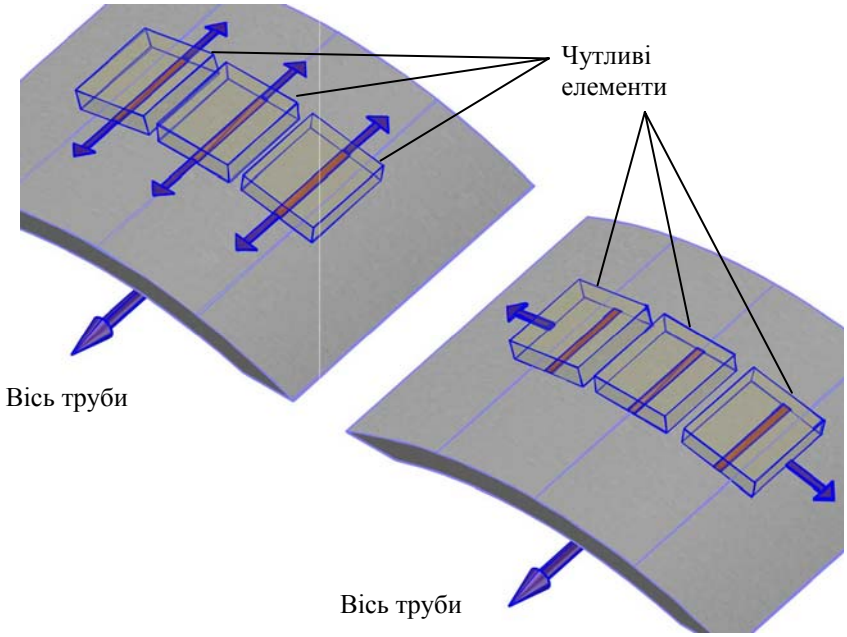


Рисунок 4 – Вибіркове генерування мод кільцевих хвиль

Для спрощення виготовлення первинних перетворювачів доцільно застосовувати зовнішню схему затримки (рис. 5), яка під'єднана до вторинного пристрою, спроектованого для роботи з об'ємними хвилями (ультразвуковий дефектоскоп) [12]. Такий підхід дозволяє замінювати давачі при переході на іншу товщину труби чи частоту без зміни всіх компонентів вимірювальної системи.

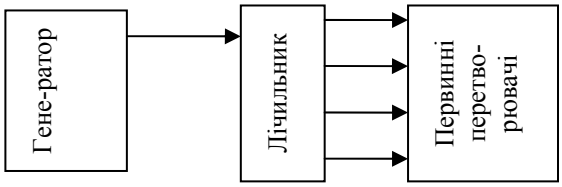


Рисунок 5 – Схема реалізації затримки сигналу від генератора до ультразвукових первинних перетворювачів

ВИСНОВКИ

Спосіб генерування ультразвукових мод кільцевих хвиль є важливою складовою розроблення нового неруйнівного методу контролю технічних параметрів трубопроводів.

Вибіркове генерування окремих мод збільшує ефективність їх застосування та зменшує похибку інтерпретації отриманих результатів.

Подальші дослідження необхідно проводити в напрямку удосконалення хвильових параметрів згенерованих кільцевих хвиль.

Література

1. H. Nishino, R. Yokoyama, H. Kondo, and K. Yoshida. Generation of Circumferential Guided Waves Using a Bulk Shear Wave Sensor and their Mode Identification // Japanese Journal of Applied Physics. – V. 46, No. 7B, 2007. – P. 4568 – 4576.

2. D. C. Gazis. Excitation and propagation of non-axisymmetric guided waves in a hollow cylinder // J. Acoust. Soc. Am. – V. 109, Issue 2, 2001. – P. 457 – 464.

3. A. H. Fitch. Synthesis of Dispersive Delay Characteristics by Thickness Tapering in Ultrasonic Strip Delay Lines // J. Acoust. Soc. Am. – V. 35, Issue 5, 1962. – P. 709 – 71.

4. H. Nishino, S. Takashina, F. Uchida, M. Takemoto, and K. Ono. Modal Analysis of Hollow Cylindrical Guided Waves and Applications // Jpn. J. Appl. Phys. – 40, 2001. – P. 364 – 370.

5. M. Takemoto, K. Ono, and H. Nishino. Acoustic Emission – Beyond the Millennium. // Elsevier Science. – Amsterdam. 2000. – 244 p.

6. H. Nishino, K. Yoshida, H. Cho, and M. Takemoto. Propagation phenomena of wideband guided waves in a bended pipe // Ultrasonics. – V. 44, Supplement 1, 22 December 2006. – P. 1139 – 1143.

7. H. Nishino, M. Takemoto, and N. Chubachi. Estimating the diameterthickness of a pipe using the primary wave velocity of a hollow cylindrical guided wave // Appl. Phys. Lett. 85, (2004). – P. 1077 – 1079.

8. H. Sato, M. Lebedev, and J. Akedo. Theoretical and Experimental Investigation of Propagation of Guide Waves in Cylindrical Pipe Filled with Fluid // Jpn. J. Appl. Phys. 45 (2006) pp. 4573 – 4576.

9. И. А. Викторов. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. – М.: Наука. – 1966. – 168 с.

10. X. Zhao and J. L. Rose. Guided circumferential shear horizontal waves in an isotropic hollow cylinder // J. Acoust. Soc. Am. – V. 115, Issue 5, 2004. – P. 1912 – 1916.

11. M. Hirao and H. Ogi. An SH-wave EMAT technique for gas pipeline inspection // NDT&E Int. – V. 32, № 3, 1999. – P. 127 – 132.

12. Y. H. Kim, Sung-Jin Song, Joon-Soo Park, J. H. Jeon1, etc. Generation of the ultrasonic guided waves in a seamless stainless steel pipe using an array transducer // Review of QNE. – V. 24, 2005. – P. 211 – 218.

13. А. М. Прохоров. Физическая энциклопедия. – М.: «Большая Российская энциклопедия». – т. 4. – 1994. – 700 с.

14. Онлайн енциклопедія. http://en.wikipedia.org/wiki/Standing_wave.

Рекомендована до друку Оргкомітетом 5-ої Міжнародної н/т конференції „Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання", яка відбулася в ІФНТУНГ 02–05.12.2008р.