

УДК 620.179

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТОВЩИНИ  
МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ БЕЗКОНТАКТНИМ АКУСТИЧНИМ МЕТОДОМ***О.М. Карнаш, І.В. Рибіцький, М.О. Карнаш**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська,  
15, м. Івано-Франківськ, 76019, тел.(80-342)504708*

*Представлены результаты лабораторных испытаний установки для измерения толщины стальных образцов бесконтактным акустическим методом. Описана конструкция бесконтактного ультразвукового преобразователя, принцип работы экспериментальной установки. Раскрыт способ определения толщины бесконтактным акустическим методом. Поданы результаты измерений толщины исследуемых образцов и определена погрешность измерений. Доказана целесообразность использования нейрон-сетевого подхода для обрабатывания маскируемых шумами эхо-импульсов.*

Оцінка залишкового ресурсу більшості металоконструкцій базується на вимірюванні їх залишкової товщини.

Найбільш поширеним в нафтогазовій промисловості є неруйнівний акустичний метод контролю товщини, як такий, що володіє високою точністю результатів вимірювань, не має обмежень щодо матеріалу об'єкта контролю та не спричиняє шкідливого впливу на робочий персонал. Основним недоліком такого методу контролю є необхідність забезпечення якісного контакту ультразвукового перетворювача з об'єктом контролю за допомогою контактних речовин.

Використання безконтактних ультразвукових способів дає можливість виключити цей недолік, розширити діапазон використання та збільшити продуктивність контролю. Проте великі значення втрат енергії акустичних коливань, що виникають в даному випадку, унеможливають використання традиційних ультразвукових перетворювачів [1].

В попередніх роботах авторів даної статті було проаналізовано проблеми, які виникають при розробці безконтактних ультразвукових перетворювачів для контролю товщини

*The results of laboratory test of plant for thickness measuring of still pattern by a air-coupled acoustic method are given. The construction of air-coupled ultrasonic transducer, principle of work of the laboratory test are described in this article. The method of thickness measurement for air-coupled acoustic method is exposed. The results of the thickness measuring of the still pattern and certainly error of measuring are given. Proof of the use of neuronet as is well for this task are given.*

матеріалів [2]. За допомогою математичного моделювання доведено, що для підвищення чутливості методу необхідно використовувати штучні нейронмережі [3], що дає можливість локалізувати зашумлені ехо-сигнали, які за допомогою традиційних методів оброблення дефектоскопічної інформації локалізувати не можливо.

Проте, незважаючи на певні успіхи щодо безконтактного вимірювання товщини різних матеріалів, все ще досить важко локалізувати ехо-імпульси, які пройшли крізь пластину, виготовлену із металу. Дана проблема пов'язана з великими втратами енергії акустичних коливань, що виникають на границі розділу п'єзоелемент/повітря та повітря/металевий зразок [4]. Рішення даної проблеми може бути знайдене шляхом покращення характеристик генераторно-приймального тракту та безконтактного ультразвукового перетворювача.

Метою даної роботи є розробка експериментальної установки для вимірювання товщини металоконструкцій безконтактним акустичним методом та проведення її лабораторних випробувань.

Попередні експериментальні випробування проводились за допомогою безконтактного ультразвукового перетворювача з одношаровим узгоджувачим шаром. Така конструкція перетворювача забезпечувала зменшення втрат енергії акустичних коливань на 26 дБ на границі розділу п'єзоелемент/повітря [3]. Проте, як було показано раніше, за допомогою такого перетворювача не було можливим отримання ехо-імпульсів через об'єкти контролю, які виготовлені із металу.

Тому, провівши аналіз літературних джерел та здійснивши математичне моделювання багат шарового узгоджувачого шару, було запропоновано нову конструкцію безконтактного ультразвукового перетворювача (рис. 1).



1 – корпус перетворювача; 2 – демпфер; 3 – корпус резонатора; 4 – п'єзоелемент; 5 – узгоджувачий шар; 6 – фіксує кільце

### Рисунок 1 – Конструкція багат шарового безконтактного ультразвукового перетворювача

Конструктивно ультразвуковий перетворювач складається з корпусу 1, демпфера 2, корпусу резонатора 3, п'єзоелектричної пластини 4, виготовленої з титанату барію ТБК-3 діаметром  $a = 20$  мм і резонансна частота якої складає  $f = 1$  МГц, багат шарового узгоджувачого шару 5 та фіксує кільця 6. Демпфер, п'єзоелектрична та узгоджувачий шар склеюють між собою за допомогою епоксидної смоли і утворюють резонатор, який розміщують в корпусі резонатора. Електричне з'єднання п'єзопластини з відповідними контактами закріпленого на корпусі роз'єму виконане за допомогою тонких провідників. Резонатор

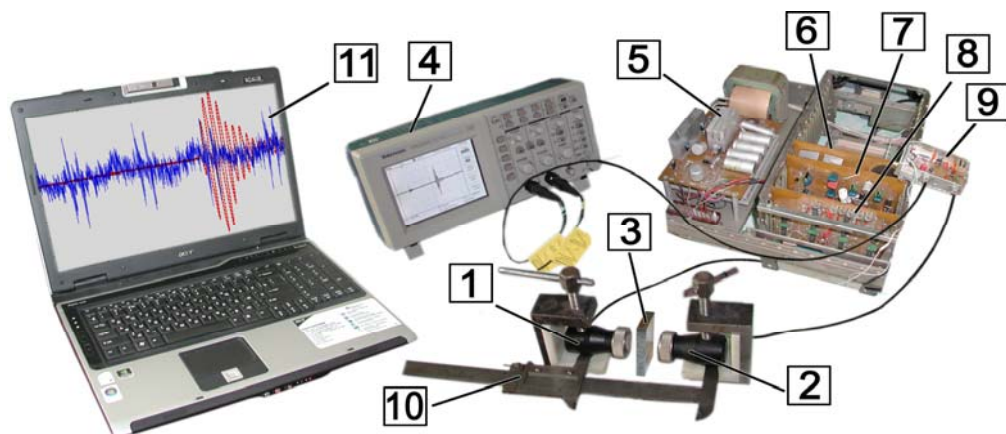
закріплюють в корпусі перетворювача за допомогою фіксує кільця.

Багат шаровий узгоджувачий шар складається з трьох пластин дископодібної форми діаметром, який рівний діаметру п'єзоелектричної пластини. Перша пластина узгоджувачого шару, яка кріпиться безпосередньо до п'єзопластини, виготовлена з алюмінію і має товщину 0,78 мм. Друга пластина узгоджувачого шару виготовлена з поліетилену товщиною 0,65 мм. Остання пластина узгоджувачого шару виготовлена з паперу вторинної переробки і має товщину 0,085 мм. Пластини узгоджувачого шару фіксуються між собою і до п'єзоелемента за допомогою епоксидної смоли. Експериментально було визначено, що така конструкція перетворювача забезпечує зменшення втрат енергії акустичних коливань на 32 дБ.

Під час попередніх випробувань для збудження п'єзоелектричних перетворювачів було використано серійний дефектоскоп DiO 562. Експериментальним шляхом за допомогою цифрового осцилографа Tektronix TDS 1012 було встановлено, що амплітуда збуджувачого сигналу ультразвукового генератора складає 300 В. З метою збільшення амплітуди збуджувачого сигналу було запропоновано розробити генератор збуджувачих коливань, який давав би можливість підняти амплітуду збуджувачого сигналу до 600 В. Це дозволить підняти у двічі амплітуду ехо-імпульсів. На рис. 2 зображено загальний вигляд удосконаленої експериментальної установки.

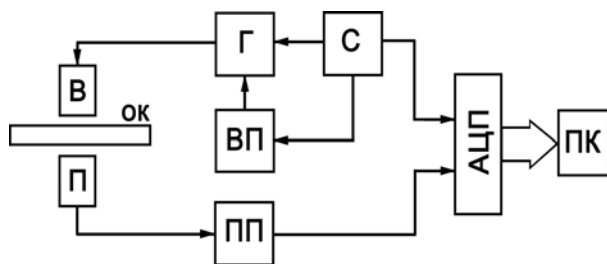
Удосконалена експериментальна установка для контролю товщини матеріалів складається з акустичного блоку, генераторно-приймального тракту та блоку візуалізації, оцифрування та оброблення акустичних сигналів. До акустичного блоку входять два безконтактні ультразвукові перетворювачі (випромінюючий і приймаючий) та штангельциркуль. До складу генераторно-приймального тракту входять блок живлення, високовольтний генератор, генератор ультразвукових коливань, синхронізатор та попередній підсилювач. Блок візуалізації оцифрування та оброблення акустичних сигналів містить цифровий осцилограф Tektronix TDS1012 та персональний комп'ютер. Блок-схема удосконаленої експериментальної установки подано на рис. 3.

Принцип роботи експериментальної установки полягає в наступному. Синхронізатор формує імпульси прямокутної форми частотою 1 кГц, задній фронт яких запускає



1, 2 – випромінюючий та приймаючий безконтактний ультразвуковий перетворювач відповідно; 3 – об'єкт контролю; 4 – цифровий осцилограф; 5 – блок живлення; 6 – високовольтний перетворювач; 7 – генератор ультразвукових коливань; 8 – синхронізатор; 9 – попередній підсилювач; 10 – штангельциркуль; 11 – персональний комп'ютер

**Рисунок 2 – Загальний вигляд удосконаленої експериментальної установки**



ОК – об'єкт контролю; В, П – випромінюючий та приймаючий безконтактний ультразвуковий перетворювач відповідно; Г – генератор ультразвукових коливань; ВП – високовольтний перетворювач; ПП – попередній підсилювач; С – синхронізатор; АЦП – аналого-цифровий перетворювач (цифровий осцилограф); ПК – персональний комп'ютер

**Рисунок 3 – Блок схема удосконаленої експериментальної установки**

високовольтний перетворювач. Високовольтний перетворювач працює до появи заднього фронту прямокутного імпульсу, накопичуючи електричну енергію в генераторі ультразвукових коливань. При появі переднього фронту прямокутних імпульсів високовольтний перетворювач вимикається, запускається генератор ультразвукових коливань, який віддає накопичену енергію ультразвуковому перетворювачу у вигляді синусоподібних імпульсів напруги та вмикається аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Така почергова робота генератора ультразвукових коливань та високовольтного перетворювача зумовлена

необхідністю виключення взаємного впливу кожного блоку на роботу один одного.

Імпульси напруги, які потрапляють на п'єзоелемент перетворювача, збуджують в ньому ультразвукові коливання, які від перетворювача через повітряний зазор потрапляють на об'єкт контролю. На границі розділу повітря/об'єкт контролю ультразвукові коливання зазнають часткового відбивання та заломлення. Частина енергії ультразвукових коливань проходить крізь об'єкт контролю та повітряний зазор і потрапляє на приймаючий перетворювач, в якому відбувається перетворення механічних коливань в коливання струму. Ці електричні коливання підсилюються за допомогою попереднього підсилювача і подаються на аналого-цифровий перетворювач (цифровий осцилограф Tektronix TDS101). Оцифровані дані з АЦП потрапляють в персональний комп'ютер, який здійснює обробку отриманих даних за допомогою нейромереж [3, 5] та визначення товщини за наперед визначеним алгоритмом.

Визначення товщини об'єкта контролю ОК прохідним методом здійснюється наступним чином. Безконтактні ультразвукові перетворювачі (випромінюючий та приймаючий) розміщуються один навпроти іншого на фіксованій відстані  $L = 20$  мм, так щоб їхні акустичні осі співпадали. Вмикається експериментальна установка та відбувається вимірювання часу проходження ультразвукових коливань  $T_1$  від випромінюючого до приймаючого перетворювача (рис. 4, а).

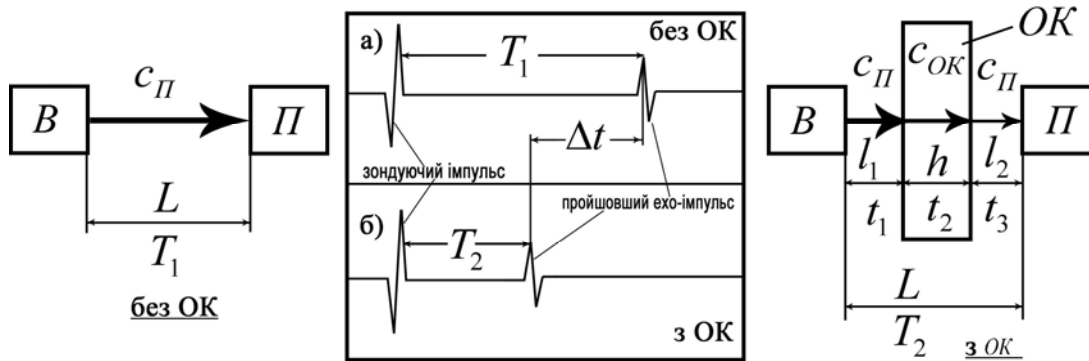


Рисунок 4 – Схема вимірювання товщини

Після цього між перетворювачами розміщується плоский зразок так, щоб його поверхні були перпендикулярні до акустичних осей перетворювачів та проводиться вимірювання часу проходження ультразвукових коливань (УЗК)  $T_2$ , який буде рівний сумі часу проходження УЗК від випромінюючого перетворювача до ОК  $t_1$ , часу проходження УЗК в ОК  $t_2$  та часу поширення ультразвукових коливань від об'єкта контролю до приймаючого перетворювача  $t_3$  (рис. 4, б):

$$T_2 = t_1 + t_2 + t_3. \quad (1)$$

Враховуючи те, що час поширення УЗК рівний частці від ділення пройденого шляху на швидкість поширення УЗК, тоді рівняння (1) можна записати наступним чином:

$$T_2 = \frac{l_1}{c_{\Pi}} + \frac{h}{c_{ОК}} + \frac{l_3}{c_{\Pi}} \text{ або } T_2 = \frac{1}{c_{\Pi}}(l_1 + l_2) + \frac{h}{c_{ОК}}, \quad (2)$$

де  $l_1, l_2$  – відстань від випромінюючого перетворювача до ОК та від ОК до приймаючого перетворювача відповідно;  $h$  – товщина ОК;  $c_{ОК}, c_{\Pi}$  – швидкість поширення УЗК в матеріалі ОК та повітрі відповідно.

Оскільки  $l_1 + l_2 = L - h$ , то

$$T_2 = \frac{1}{c_{\Pi}}(L - h) + \frac{h}{c_{ОК}}. \quad (3)$$

Після розкриття дужок в рівнянні (3) різницю  $\Delta t = T_1 - T_2$  часів проходження УЗК в першому та другому випадках можна записати наступним чином:

$$\Delta t = \frac{L}{c_{\Pi}} - \frac{L}{c_{\Pi}} + \frac{h}{c_{\Pi}} - \frac{h}{c_{ОК}},$$

або 
$$\Delta t = h \left( \frac{c_{ОК} - c_{\Pi}}{c_{ОК} \cdot c_{\Pi}} \right), \quad (4)$$

де  $T_1 = L / c_{\Pi}$ .

Таким чином з рівняння 4 можемо записати вираз для визначення товщини об'єкта контролю:

$$h = \Delta t \left( \frac{c_{ОК} \cdot c_{\Pi}}{c_{ОК} - c_{\Pi}} \right). \quad (5)$$

Отже для розрахунку товщини об'єкта контролю при вимірюванні ультразвуковим прохідним методом необхідно виміряти час проходження УЗК від випромінюючого до приймаючого перетворювача без та при розміщенні між ними ОК. При цьому очевидно, що ця товщина не буде залежати від відстані між перетворювачами.

Для проведення експериментальних випробувань було відібрано 12 сталених зразків товщиною від 0,55 мм до 9,53 мм (рис. 5). Перед початком випробувань товщину кожного зразка було визначено за допомогою мікрометра.

Випробування проводились згідно з наступною методикою. Безконтактні ультразвукові перетворювачі розміщуються один навпроти одного на відстані 20 мм. Відстань вимірювалася за допомогою штангельциркуля.

Вмикали експериментальну установку та проводили оцифрування, запис осцилограми та реєстрація часу проходження ехо-імпульсу. З оцифрованої вибірки виділяли прохідний ехо-імпульс, який в подальшому використовувався для розрахунку взаємо-кореляційної та для тренування нейромережі [3].

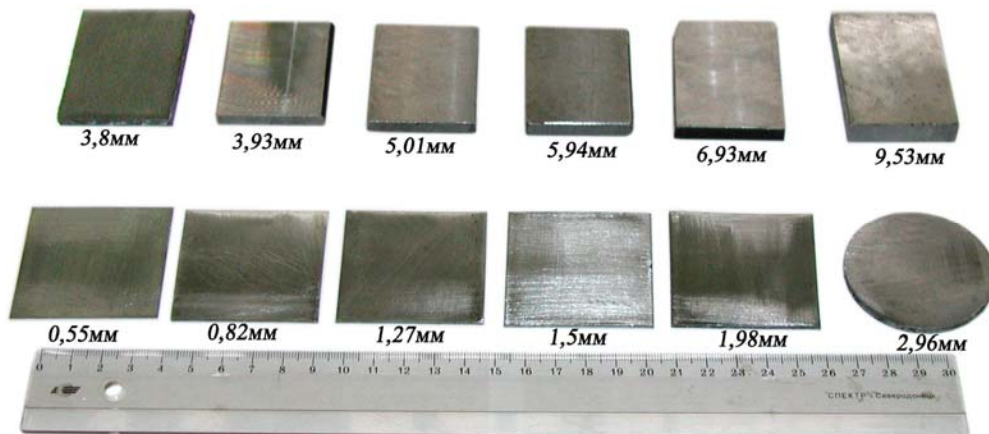


Рисунок 5 – Зразки для проведення експериментальних досліджень

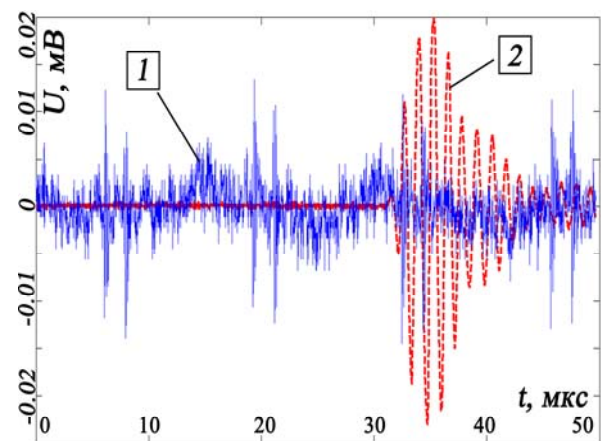
Після цього між перетворювачами розміщували досліджуваний зразок, як було описано попередньо, та проводили оцифрування та запис прохідного ехо-імпульсу. Загалом таких досліджень було проведено 120 по 10 на кожному зразку.

Як було сказано попередньо, при використанні безконтактних ультразвукових перетворювачів виникають значні втрати енергії ультразвукових коливань, що призводить до того, що амплітуда прохідних ехо-імпульсів є досить малою і співрозмірною з власними шумами перетворювача та попереднього підсилювача. В такому випадку традиційними методами виявити та локалізувати прохідний імпульс є не можливим.

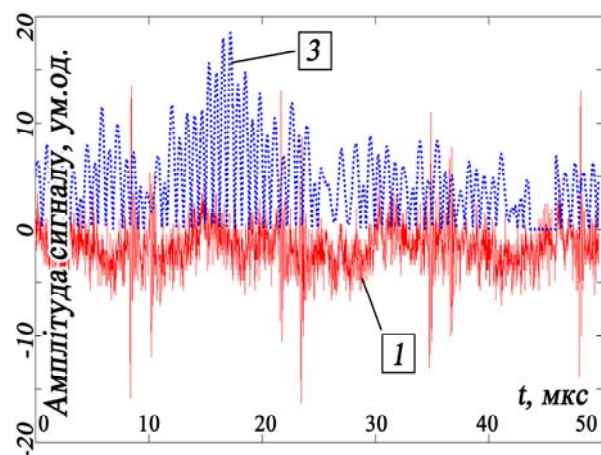
З метою виявлення таких ехо-імпульсів, як показали попередні теоретичні [6] та експериментальні [3] дослідження, доцільно використовувати кореляційний та нейромеревий підходи, алгоритм роботи яких було описано у згаданих вище роботах. Таким чином для кожної оцифрованої осцилограми прохідного через досліджувані зразки ехо-імпульсу було розраховано взаємо-кореляційну функцію (рис. 6, а) та отримано виходи нейромережі (рис. 6, б).

Розраховані взаємокореляційні функції та отримані виходи нейромережі дали можливість локалізувати прохідні ехо-імпульси та обчислити згідно (5) товщини досліджуваних зразків. Результати вимірювань та похибки подано в табл. 1.

Також було визначено середню абсолютну похибку вимірювань, яка склала 0,2 мм та 0,44 мм для нейромережевого та взаємокореляційного підходів відповідно.



а)



б)

Рисунок 6 – Взаємокореляційна функція (а, позиція 2) та вихід нейромережі (б, позиція 3) типового ехо-сигналу (позиція 1), отриманого через досліджуваний зразок

Таблиця 1 – Результати експериментальних вимірювань

|   |      | Дійсне значення товщини зразків, мм                         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---|------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|   |      | 0,55  | 0,82 | 1,27 | 1,5  | 1,98 | 2,96 | 3,8  | 3,93 | 5,01 | 5,94 | 6,93 |
| Похибка<br>приведена до<br>діапазону $\Delta$ , % | 2,32 | Розраховані значення товщини (нейромережевий підхід), мм    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|   |      | 0,47  | 0,71 | 1,33 | 1,66 | 1,75 | 2,58 | 3,61 | 3,89 | 4,89 | 4,94 | 6,56 |
|   | 6,88 | Розраховані значення товщини (взаємкореляційний підхід), мм |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|   |      | 1,05  | 1,21 | 1,25 | 1,74 | 2,09 | 2,14 | 3,74 | 3,78 | 4,76 | 5,4  | 5,57 |

Як бачимо з отриманих результатів, нейромережевий метод володіє меншою похибкою вимірювань у порівнянні з традиційним взаємкореляційним методом. Крім того, нейромережевий підхід дає можливість локалізувати ехо-імпульс, що пройшов через зразок та розрахувати його ширину, чого не можливо було отримати при використанні взаємкореляційного методу. Таким чином результати експериментальних випробувань підтвердили проведені раніше теоретичні дослідження.

Проведені аналогічні експериментальні дослідження на зразках з більшою товщиною були незадовільними оскільки жоден з запропонованих методів не дозволив впевнено локалізувати ехо-імпульс. Це пояснюється тим, що амплітуда прхідних через пластину ехо-імпульсів є значно меншою за рівень власних шумів перетворювача та підсилювача і локалізувати їх не можливо.

Таким чином на основі проведених експериментальних досліджень, які представлені вище, можна зробити наступні висновки:

- удосконалено та виготовлено експериментальну установку та конструкцію безконтактних ультразвукових перетворювачів, що дало змогу зменшити втрати енергії акустичних коливань на 32 дБ;

- проведено експериментальні випробування безконтактного ультразвукового способу, що дало змогу визначити товщину сталених зразків в діапазоні від 0,55мм до 9,53мм з похибкою 2,32% для нейромережевого та 6,88% для взаємкореляційного варіантів способу.

- результати експериментальних випробувань показали, що для обробки зашумлених ехо-імпульсів доцільно використовувати нейромережевий підхід, який забезпечує меншу похибку вимірювань.

### Література

1. Gómez T. E. y. Montero F. "Piezoelectric transducers for air-coupled operation in the frequency range 0.3-2.5 MHz". *IEEE International Ultrasonics Symposium*. - Atlanta 7-10, 2001.
2. Рибіцький І.В., Карнаш О.М., Карнаш М.О. Аналіз безконтактних методів ультразвукового контролю матеріалів і виробів. // *Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів*. – Львів. – 2007. – Вип. 12. – С. 111 – 116.
3. Карнаш О.М., Рибіцький І.В., Карнаш М.О. Експериментальна перевірка можливості використання взаємкореляційного та нейромережевого підходів для підвищення чутливості безконтактного ультразвукового способу контролю товщини матеріалів // *Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів*. – Львів. – 2007. – Вип. 13. – С. 152 – 160.
4. Junho Song, Chimenti D. E., "Design, Fabrication and Characterization of a Spherically Focused Capacitive Air-Coupled Ultrasonic Transducer" // *International Journal of Applied Science and Engineering*. - 2006.4.- P. 1-19.
5. M. Thavasimuthu, C. Rajagopalan, P. Kalyanasundaram, Baldev Raj. Improving the evaluation sensitivity of ultrasonic pulse echo technique using a neural network classifier // *NDT&E International*. – 1996. – Vol. 29. – No. 3. – PP. 87-93, .
6. Рибіцький І.В. Математична модель узгоджуючого шару н'єзоперетворювача та розрахунок втрат енергії акустичних коливань при безконтактному способі вимірювання товщини // *Методи та прилади контролю якості*. – 2007. - № 18. – С. 40-45.