

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ З
МАЛОАПЕРТУРНИМИ МАГНІТОСТРИКЦІЙНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ С
МАЛОАПЕРТУРНЫМИ МАГНІТОСТРИКЦИОННЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

IMPROVEMENT OF ULTRASONIC CONTROL SYSTEM WITH SMALLAPERTURE
MAGNETOSTRICTIVE TRANSDUCERS

Розглянуто можливість використання малоапертурних магнітострикційних перетворювачів при побудові систем ультразвукового контролю різних виробів, в тому числі виробів складної форми; приведена конструкція малоапертурного сенсора і показані основні переваги використання таких сенсорів в системах ультразвукового контролю. Визначено вимоги до апаратної частини системи контролю, наведені результати випробувань системи.

Рассмотрена возможность использования малоапертурных магнитоstrictионных преобразователей при построении систем ультразвукового контроля различных изделий, в том числе изделий сложной формы; приведена конструкция малоапертурного сенсора и показаны основные преимущества использования таких сенсоров в системах ультразвукового контроля. Определены требования к аппаратной части системы контроля, приведены результаты испытаний системы.

The possibility of using low-aperture magnetostrictive converters in the construction of ultrasonic inspection systems for various products, including complex shaped articles, is considered; the construction of a low-aperture sensor is shown and the main advantages of using such sensors in ultrasonic testing systems are shown. Ways to improve the main parameters and characteristics of magnetostrictive sensors are given. The requirements for the hardware of the monitoring system are determined, the results of system tests are given.

Ключові слова: *малоапертурний магнітострикційний перетворювач, акустичне навантаження, коефіцієнт електромеханічного зв'язку.*

Ключевые слова: *малоапертурный магнитоstrictионный преобразователь, акустическая нагрузка, коэффициент электроmechanической связи.*

Keywords: *smallaperture magnetostrictive sensor, acoustic load, coefficient of electromechanical coupling.*

Вступ. Методи ультразвукового неруйнівного контролю застосовуються для вирішення широкого кола задач в багатьох галузях промисловості, а також в наукових дослідженнях. В індустріально розвинених країнах ультразвуковий контроль складає 70...80 % серед інших методів неруйнівного контролю завдяки високій чутливості і достовірності виявлення найбільш небезпечних дефектів, високій продуктивності, відсутності шкідливого впливу на організм людини і навколишнє середовище.

Практичний інтерес представляє створення систем неруйнівного контролю високонанвантажених об'єктів складної форми, таких, наприклад, як лопатки турбін, лонжерони лопатей літальних апаратів, тонкостінні елементи несучих конструкцій і багато іншого. Важливим об'єктом контролю є сам ультразвуковий перетворювач діагностичних систем. У переважній

більшості випадків це п'єзоелектричні перетворювачі. Практично всі методи вимірювання характеристик таких перетворювачів, які використовуються в даний час, передбачають проведення інтегральних (усереднених) за площею вимірювань параметрів з використанням стандартних зразків і в далекій зоні акустичного поля перетворювача. Однак для більш точного вимірювання характеристик перетворювачів, для виявлення локальних дефектів, що виникають при їх виготовленні, необхідно проводити диференціальні вимірювання контрольованих параметрів по поверхні перетворювача, що дає можливість визначити причини відхилення параметрів від номінальних значень і вдосконалити технологічні процеси виготовлення перетворювачів.

Мета статті і постановка досліджень. Для систем неруйнівного контролю перерахованих вище об'єктів потрібні малоапертурні ультразвукові перетворювачі, які мають площу робочої поверхні набагато меншу, ніж у контрольованих зразків.

Відомі малоапертурні перетворювачі, що використовують різні акустичні концентратори. Однак застосування таких перетворювачів при прийомі ультразвукових коливань обмежене через низьку чутливість [1].

Магнітострикційні перетворювачі, які випромінюють поздовжні, поперечні, торсійні хвилі широко використовуються в системах неруйнівного контролю [2,3]. У переважній більшості вони мають значні розміри випромінюючої поверхні.

Основний текст статті. Для вирішення перерахованих вище завдань розроблені ультразвукові перетворювачі (рис. 1), що використовують магнітострикційний ефект і мають малу площу поверхні, що випромінює $0,07 \dots 0,8 \text{ мм}^2$ (діаметр хвилеводу $0,3 \dots 1,0 \text{ мм}$), що дозволяє створити в контрольованому зразку напівсферичну (ненаправлену) поздовжню хвилю при зондуєчому радіоімпульсному сигналі з частотою заповнення $0,5 \dots 2,5 \text{ МГц}$ [4]. На рисунку позначено: 1 - корпус; 2 - ультразвукове дзеркало; 3 - хвилевід з магнітострикційного матеріалу; 4 - котушка збудження; 5 - постійний магніт; 6 - демпфер; 7 - роз'єм.

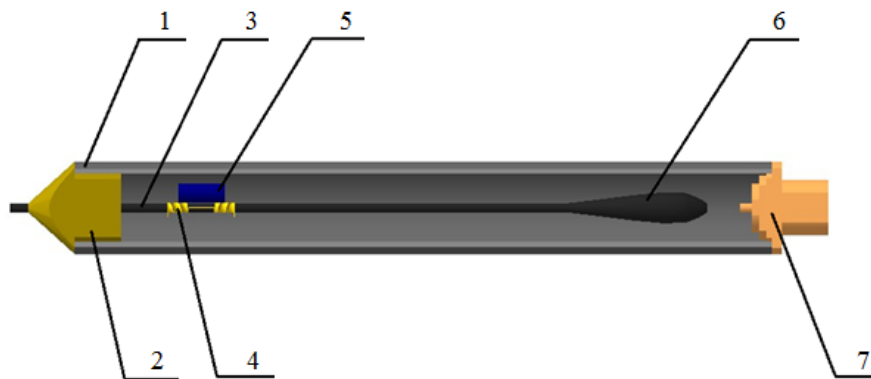


Рис. 1. Ультразвуковий малоапертурний магнітострикційний перетворювач
Fig.1 Ultrasonic low-aperture magnetostrictive transducer.

Основні параметри і характеристики магнітострикційних сенсорів істотно залежать від конструкції самого сенсора, від точності виготовлення його елементів і частин і від технологічних процесів підготовки матеріалів, з яких виготовляється сенсор.

Для малоапертурних сенсорів одним з найважливіших завдань є необхідність забезпечення максимальної чутливості [5].

Дуже важливо зрозуміти, як впливає форма котушки на величину сигналу приймача, яка ефективність другого шару котушки, а також як впливає додатковий ізолюючий шар між хвилеводом і обмоткою на величину прийнятого сигналу.

Проведені експерименти показали, що амплітуда прийнятого сигналу практично пропорційна кількості секцій в котушці. При цьому за рахунок намотування суміжних секцій в протилежних напрямках електричний імпеданс змінюється пропорційно квадрату загального числа витків, а пропорційно першого ступеня їх кількості за рахунок впливу взаємної індуктивного зв'язку між секціями.

З отриманих результатів експериментальних досліджень було з'ясовано, що витки необхідно розташовувати якомога ближче до хвилеводу.

Ефективність двошарової котушки значно зменшилася за рахунок віддалення другого шару обмотки від хвилеводу на величину першого шару.

Згідно з отриманими експериментальними даними були виготовлені високочутливі магнітострикційні сенсори, фотографії внутрішнього модуля і зовнішнього вигляду яких наведені на рис. 2.

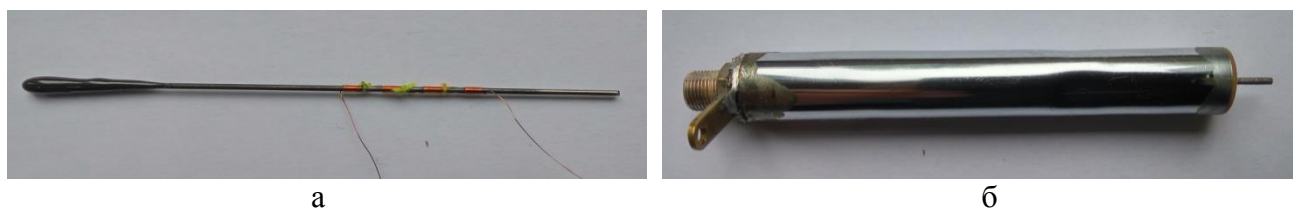


Рис. 2. Малоапертурні магнітострикційні сенсори (а - хвилевід з котушкою і демпфером, б - зовнішній вигляд)

Fig. 2. Low-aperture magnetostrictive sensors (a - waveguide with a coil and damper, b - external appearance)

Висока чутливість сенсорів досягається так само за рахунок використання спеціальних матеріалів з високим значенням коефіцієнта магнітострикції і магнітострикції насичення, які піддаються певній технологічній обробці [5].

Приймаючий кінець хвилеводу сенсора може бути зашліфований врівень, а може виступати на кілька міліметрів з корпусу. У першому випадку для забезпечення акустичного контакту необхідно використовувати контактну рідину. У другому випадку можна обійтися без неї, що дуже зручно при контролі об'єктів з необробленою поверхнею.

Значно скоротити час контролю можна, використовуючи лінійку або матрицю малоапертурних МСС, розміщених в одному корпусі [6]. Збільшення кількості вимірювальних каналів не є складною технічною проблемою при сучасному рівні інтеграції електронних пристроїв.

Електричний імпеданс малоапертурних магнітострикційних сенсорів становить 0,1 ... 10,0 Ом. Виготовлення пасивних узгоджувальних пристроїв в одному корпусі з сенсором дозволяє зменшити втрати сигналу при передачі його до електронних блоків. Особливо це ефективно для сенсорів з маловитковими котушками.

Експериментальні та теоретичні дослідження показали, що найкращі параметри і характеристики перетворювачів досягаються при використанні одношарових маловиткових котушок збудження. Для забезпечення високої потужності випромінювання збуджуючих перетворювачів і підвищення чутливості приймаючих сенсорів використовуються багатосекційні котушки, які дозволяють отримати ефект акустичного підсумовування сигналів в хвилеводі.

Застосування ультразвукових концентраторів при проектуванні малоапертурних сенсорів дозволяє в кілька разів підвищити ефективність останніх [7].

Хвилевід перетворювачів має акустичний імпеданс близький до імпедансу контролюваного об'єкта, що зручно для акустичного узгодження сенсора і об'єкта контролю.

Ще одна істотна перевага МСС - точка Кюрі (температура, при якій зникає магнітострикційний ефект) для більшості поширених магнітострикційних матеріалів знаходиться в межах 600 - 1200 °С, що значно перевищує температуру Кюрі для п'єзоелектричних перетворювачів. Ця особливість дозволяє використовувати малоапертурні МСС при високих температурах, що необхідно для контролю нагрітих тіл (котлів, труб, теплообмінників та ін.) безпосередньо в процесі їх функціонування.

Застосування в системах ультразвукового контролю малоапертурних магнітострикційних сенсорів дозволило так само з високою вірогідністю контролювати розподіл акустичного тиску по поверхні елементів ультразвукових фазованих антенних решіток, а також інші параметри і характеристики сучасних ультразвукових сенсорів. [8,9,10].

У таблиці 1 наведено експериментальні дані, отримані при випробуванні формувача радіоімпульсів, на рис. 3 побудовані криві навантаження.

Таблиця 1. Амплітуди сигналів на виході формувача радіоімпульсів для різних значень частоти заповнення радіоімпульсу і опору навантаження

Table 1. Amplitude of signals at the output of the radio pulse generator for different values of the frequency of filling the radio pulse and the load resistance

f, МГц	0,25	0,5	1	1,25	2,5	5	10
U _{хх} , В	9	9	9	9	9	4	2
U при R _н =5 Ом, В	9	9	9	9	8	2,5	1
U при R _н =0,5 Ом, В	6	6	5	4,5	4	3,6	2
U при R _н =0,2 Ом, В	3,5	3,2	2,2	1,8	1,2	0,4	0

У якості навантаження використовувались резистори відповідного номіналу.

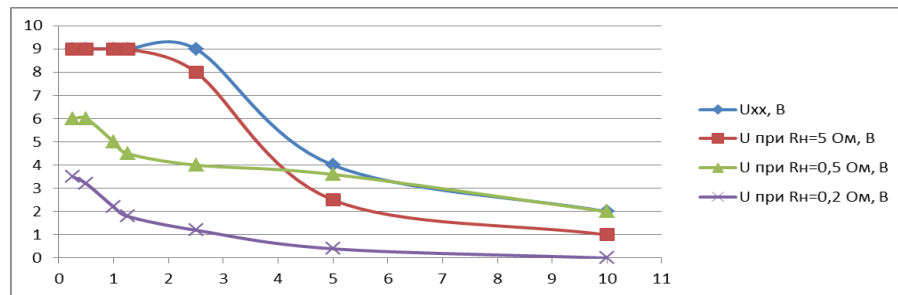


Рис. 3. Графік залежності напруги на виході формувача радіоімпульса від частоти заповнення радіоімпульсу для різних значень опору навантаження

Fig. 3. Graph of the voltage dependence on the output of the radio pulse generator from the frequency of filling the radio pulse for different values of load resistance

Залежність коефіцієнта підсилення вхідного підсилювача електронного приладу наведена на рис. 4.

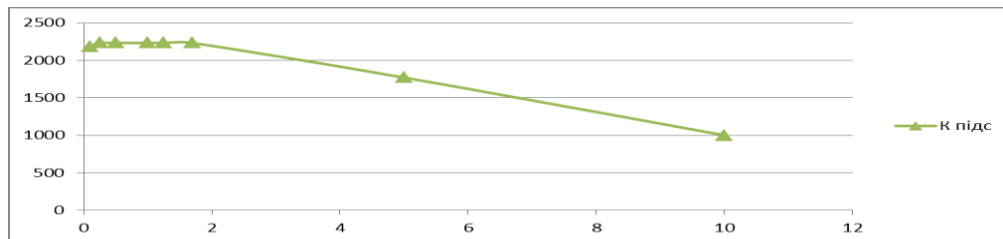


Рис. 4. Графік залежності коефіцієнта підсилення приймаючого підсилювача від частоти заповнення радіоімпульсу

Fig. 4. Graph of the dependence of the gain of the receiving amplifier on the frequency of filling the radio pulse

Заклучна частина. З наведених залежностей можна побачити, що розроблений прилад може використовуватись з ультразвуковими перетворювачами, які мають малий електричний імпеданс. Малоапертурні перетворювачі в багатьох випадках мають суттєві переваги над іншими перетворювачами, що відкриває великі перспективи їх використання.

Список використаних джерел

1. Shevaldykin V.G., Kozlov V.N., Samokrutov A.A. *Inspection of Concrete by Ultrasonic Pulse-Echo Tomograph with Dry Contact. 7th European conference on Non-Destructive Testing. Copenhagen, 26 - 29 May, 1998.*
2. Seung H.M., Kim Y.Y. *Generation of omni-directional shear-horizontal waves in a ferromagnetic plate by a magnetostrictive patch transducer // NDT and E International. – 2016. – Vol. 80. – P.6-14.*

3. Kwun H., Teller C.M. Magnetostrictive generation and detection of longitudinal, torsional and flexural waves in a steel rod // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 1994. – Vol. 96. – P. 1202-1204.
 4. Патент 104567 України. Ультразвуковий малоапертурний магніострикційний перетворювач / В.П. Бабак, І.В. Богачев; заявник і власник патенту ІТТФ НАНУ. – а201306020; заявл. 15.05.13; опубл. 10.02.14, Бюл. №3.
 5. Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики: Монографія / В.П. Бабак, С.В. Бабак, В.С. Березун та ін.; за ред. чл.-кор. НАН України В.П. Бабака / - К., 2015. – 512 с.
 6. Патент 107629 України. Матриця малоапертурних магніострикційних перетворювачів/ В.П. Бабак, І.В. Богачев; заявник і власник патенту ІТТФ НАНУ. – а201312825; заявл. 04.11.13; опубл. 26.01.15, Бюл. №2.
 7. Основи ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник/ В.К. Цапенко, Ю.В. Куц. – К.: НТУУ «КПІ». – 2010. – 448 с.
 8. Pesque P. Methodology for the characterization and design of linear arrays of ultrasonic transducers / P. Pesque, R.H. Coursant, C. Mequio // *Acta Electronica*. – 1983. – V.25, №4. – P.325-340
 9. Туз Ю.М. Измерение акустической взаимной связи между пьезоэлектрическими элементами в ультразвуковых фазированных антенных решётках / Ю.М. Туз, А.П. Красковский, И.В. Богачёв // *Методи та прилади контролю якості. Науково-технічний журнал*. – Івано-Франківськ. – 2009. – № 23. – С. 8–12.
 10. Туз Ю.М. Измерение распределения амплитуды давления на излучающих поверхностях пьезоэлектрических преобразователей ультразвуковых фазированных антенных решёток / Ю.М. Туз, А.П. Красковский, И.В. Богачёв // *Вісник Інженерної академії України*. – Київ. – 2009. – № 3–4. – С. 133–137.
-
1. Shevaldykin V.G., Kozlov V.N., Samokrutov A.A. (1998). *Inspection of Concrete by Ultrasonic Pulse-Echo Tomograph with Dry Contact*. 7th European conference on Non-Destructive Testing. Copenhagen.
 2. Seung H.M., Kim Y.Y. (2016). *Generation of omni-directional shear-horizontal waves in a ferromagnetic plate by a magnetostrictive patch transducer*. *NDT and E International*.
 3. Kwun H., Teller C.M. (1994). *Magnetostrictive generation and detection of longitudinal, torsional and flexural waves in a steel rod*. *Journal of the Acoustical Society of America*, 96, 1202-1204.
 4. Babak V.P., Bogachev I.V. (2014). *Patent 104567 Ukrain'ny. Ul'trazvukovyj maloaperturnyj magnitostrykcijnyj peretvorjuvach*. Institute of Engineering Thermophysics, NAS of Ukraine.
 5. Babak V.P., Babak S.V., Beregun V.S. (2015). *Informacijne zabezpechennja monitoryngu ob'ektiv teploenergetyky*.
 6. Babak V.P., Bogachev I.V. (2015). *Patent 107629 Ukrain'ny. Matrycja maloaperturnyh magnitostrykcijnyh peretvorjuvachiv*. Institute of Engineering Thermophysics, NAS of Ukraine.
 7. Capenko V.K., Kuc Ju.V. (2010). *Osnovy ul'trazvukovogo nerujnivnogo kontrolju: Pidruchnyk*. NTUU «KPI».
 8. Pesque P. (1983). *Methodology for the characterization and design of linear arrays of ultrasonic transducers*. *Acta Electronica*, 25, 4, 325-340.
 9. Tuz Ju.M., Kraskovskij A.P., Bogachjov I.V. (2009). *Izmerenie akusticheskoj vzaimnoj svyazi mezhdju p'ezojelektricheskimi jelementami v ul'trazvukovyh fazirovannyh antennyh reshjotkah. Metody ta prylady kontrolju jakosti*. *Naukovo-tehnichnyj zhurnal*, 23, 8-12.
 10. Tuz Ju.M., Kraskovskij A.P., Bogachjov I.V. (2009). *Izmerenie raspredelenija amplitudy davlenija na izluchajushhijh poverhnostjah p'ezojelektricheskijh preobrazovatelej ul'trazvukovyh fazirovannyh antennyh reshjotok*. *Visnyk Inzhenernoi' akademii' Ukrain'ny*, 3-4, 133-137.