

УДК 620.179.16

## СЕНСОРИ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ НА ОСНОВІ МАГНІТОСТРИКЦІЙНОГО ЕФЕКТУ

С.В. Бабак, І.В. Богачев\*

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, м. Київ, 03680

*Розроблені та експериментально досліджені малоапертурні магніострикційні перетворювачі для випромінювання та прийому ультразвукових сигналів в твердому тілі. Запропоновано та експериментально досліджено методи покращення їх характеристик, що дозволило збільшити потужність випромінювання більше, ніж у 50 разів, чутливість і розрізняльну здатність при прийомі ультразвукового сигналу – в 2-4 рази при площі випромінюючої поверхні перетворювачів 0,07-0,2 мм<sup>2</sup>. Використання матричних магніострикційних перетворювачів дозволило зменшити час діагностування і вплив випадкових факторів.*

*Ключові слова: малоапертурні магніострикційні перетворювачі, діаграма напрямленості, потужність випромінювання, фазована антенна решітка.*

*Разработаны и экспериментально исследованы малоапертурные магнитоотриционные преобразователи для излучения и приема ультразвуковых сигналов в твердом теле. Предложены и экспериментально исследованы методы улучшения их характеристик, что позволило увеличить мощность излучения более, чем в 50 раз, чувствительность и разрешающую способность при приеме ультразвукового сигнала – в 2-4 раз при площади рабочей поверхности преобразователей не более 0,07-0,2 мм<sup>2</sup>. Использование матричных магнитоотриционных преобразователей позволило уменьшить время диагностирования и влияние случайных факторов.*

*Ключевые слова: малоапертурные магнитоотриционные преобразователи, диаграмма направленности, мощность излучения, фазированная антенная решетка.*

*There were improved and experimentally investigated littleaperture magnetostrictive transducers for emission and reception of ultrasonic signals in solids. There were proposed and experimentally investigated methods of improvement of their descriptions, which allowed to improve power of radiation more than in 50 times, sensitiveness and discriminability at the reception of ultrasonic signal – in 2-4 times at the area of working surface of transducers 0,07-0,2 mm<sup>2</sup>. The using of matrix magnetostrictive transducers allowed to decrease diagnostic time and the influence of casual factors*

*Keywords: littleaperture magnetostrictive transducers, diagram of orientation, the radiation power, phased arrays.*

**Вступ.** Актуальність теми дослідження обумовлена широким застосуванням ультразвукових (УЗ) методів для контролю та діагностики твердих тіл. Акустичні методи широко використовуються у фізичних дослідженнях, зокрема, вони дозволяють вивчати різні явища у твердих тілах. У загальному випадку у середовищі можуть поширюватися пружні хвилі кількох типів, характеристики яких несуть інформацію про різні властивості середовища. Поряд з об'ємними (повздовжніми і поперечними) пружними хвилями у дослідженнях широко застосовуються поверхневі хвилі. Вдосконалення техніки експерименту, розширення діапазону частот пружних хвиль (до 10<sup>9</sup> Гц) разом з розвитком теоретичних уявлень про

механізм поширення пружних хвиль у твердих тілах привели до широкого використання ультразвукових методів у наукових та практичних дослідженнях. Зокрема, відомості про фізико-механічні властивості металів і сплавів, природу фазових переходів, величину міжатомних сил взаємодії можуть бути отримані за допомогою сучасних систем діагностування на основі акустичних методів. Висока чутливість ультразвукових методів до неоднорідностей середовища та варіації його фізико-механічних властивостей привела до створення та розвитку методів ультразвукової діагностики, що дозволяє досліджувати матеріали, які «непрозорі» для інших методів. На їх основі створюються спеціалізовані системи діагностування та контролю твердих тіл

в реальних умовах функціонування.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Ефект магнітострикції був відкритий у 1847р. видатним англійським фізиком Д. П. Джоулем. Він полягає у тому, що тіло з феромагнітного матеріалу у поздовжньому магнітному полі змінює свої розміри. Це явище має назву «лінійної магнітострикції» або «ефект Джоуля». Магнітострикція спостерігається у феромагнетиках лише за температури нижче точки Кюрі і пояснюється дією обмінних і магнітних сил зв'язку. Суть ефекту Джоуля ілюструє рис. 1. Якщо через котушку збудження, намотану на магнітострикційний стержень довжиною  $l$ , пропустити електричний струм, то виникне магнітне поле, під впливом якого стержень змінить свою довжину на величину  $\Delta l$ .

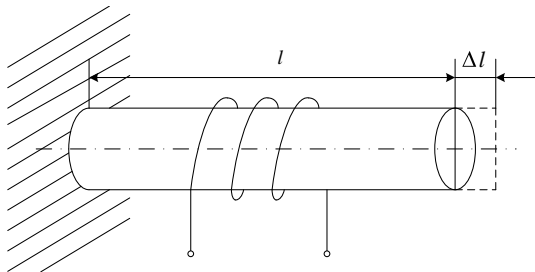


Рисунок 1 - Ілюстрація дії ефекту Джоуля

Відносне значення магнітострикції, яке є однією з основних характеристик магнітострикційного матеріалу, визначається як

$$\lambda B = \Delta l B / l, \quad (1)$$

де  $B$  – магнітна індукція.

Магнітострикція є функцією магнітного поля, в слабких полях вона незначна, в сильних – досягає насичення  $\lambda_s$ .

Окрім лінійної магнітострикції існує цілий ряд інших магнітострикційних ефектів, які відрізняються способом створення магнітного поля і характером механічної деформації. Насамперед слід згадати ефект кутової магнітострикції (ефект Відемана). Цей ефект полягає у закручуванні на величину  $\Delta\varphi$  феромагнітного стержня, вміщеного в комбіноване поздовжнє плюс циркулярне поле (рис.2).

Для ефекту Джоуля можна записати, що:

$$\Delta l(t) / l = m \cdot \Delta U(t), \quad (2)$$

де  $m$  – коефіцієнт електромеханічного зв'язку,  $\Delta U(t)$  – величина зміни електричної напруги на котушці.

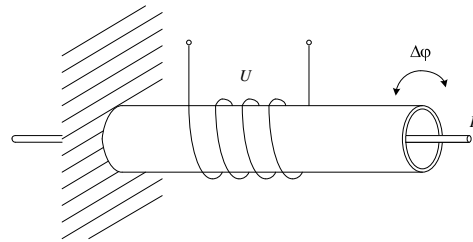


Рисунок 2 - Ілюстрація дії ефекту Відемана

Магнітний стан феромагнетика визначається не тільки прикладеним полем, але і зовнішніми пружними напругами. Магнітопружний ефект (зворотний магнітострикційний ефект), відкритий в середині XIX століття, встановлює зв'язок між прикладеними механічними напруженнями і зміною намагніченості феромагнетика. Будь-якому прямому магнітострикційному ефекту відповідає зворотний магнітострикційний ефект. Лінійній магнітострикції відповідає зворотний магнітопружний ефект Віллари, який полягає у зміні намагніченості феромагнетика і виникненні напруги  $\Delta U$  після прикладення зовнішнього розтягуючого або стискаючого зусилля  $P$  (рис. 3).

Кутовому магнітострикційному ефекту (Відемана) відповідає зворотний магнітопружний ефект – ефект Вертгейма, пов'язаний зі зміною намагніченості стержня і виникненням напруги  $\Delta U$  після прикладення механічної закручуючої напруги  $M$  (рис. 4).

Магнітострикційні ефекти широко використовуються у техніці. Можна стверджувати, що перші магнітострикційні пристрої з'явилися майже одночасно з електромагнітними. Наприклад, один з перших телефонів – телефон Райза, сконструйований у 1860р., ґрунтувався на використанні магнітострикційного ефекту.

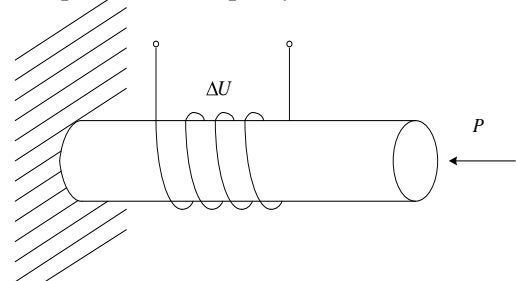
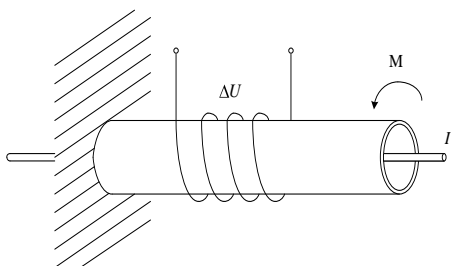


Рисунок 3 - Ілюстрація дії ефекту Віллари

Низька швидкість пружних хвиль (на п'ять порядків менша за швидкість поширення електромагнітних хвиль), отже і мала величина довжини хвилі тієї ж частоти дозволяє

створювати мікромініатюрні високоефективні пристрої оброблювання інформації (лінії затримки, фільтри, системи кодування тощо). Використання нелінійних ефектів, пов'язаних з поширенням ультразвукових хвиль у твердих тілах, призвело до створення частотних помножувачів, змішувачів, параметричних підсилювачів, а також приладів кореляційного аналізу сигналів.



**Рисунок 4 - Ілюстрація дії ефекту Вертейма**

В наш час магнітострикційні ефекти застосовуються, головним чином, для створення ультразвукових резонансних перетворювачів і використовуються в промисловості для обробки крихких матеріалів, зварювання, мийки, очищення тощо.

Зазвичай такі перетворювачі працюють на власній резонансній частоті механічних коливань, оскільки в цьому випадку перетворення енергії з однієї форми в іншу відбувається найбільш ефективно. Магнітострикційні перетворювачі з сердечниками у формі тонкого листового металу працюють найкраще у низькочастотному ультразвуковому діапазоні (від 20 до 50 кГц) і на частотах вище 100 кГц вони мають дуже низький коефіцієнт корисної дії (ККД).

Зворотні магнітострикційні ефекти дозволяють побудувати чисельні сенсори, які можуть бути застосовані для вимірювання зусиль, переміщень, прискорень та інших механічних величин в різних системах автоматизації.

Порівняння магнітострикційних перетворювачів з іншими видами перетворювачів свідчить про їх виключно високу чутливість і значну вихідну потужність, що і визначає область їх застосування.

Методи і засоби ультразвукового діагностування стану вузлів технічних систем і обладнання викладені в працях: І. Н. Єрмолова, В. В. Ключєва, Б. Г. Марченка, Г. М. Свєрдліна, В. Г. Щєрбинського, L. Bergmann, V. Domarkas, R.-J. Kažys, Y. Kikuchi, J. & H. Krautkrämer і

багатьох інших.

В табл. 1 наведено порівняння відомих систем контролю характеристик УЗ поля з п'єзоелектричними перетворювачами (ПЕП) та запропонованої системи з малоапертурними магнітострикційними перетворювачами (МСП).

**Таблиця 1 - Характеристики систем контролю УЗ поля твердих тіл**

	Системи з ПЕП	Система з МСП
Види хвиль	повздовжні поперечні поверхневі	повздовжні поперечні поверхневі
Мін. площа УЗП, мм <sup>2</sup>	1-4	0,07-0,2
Повздовжня розрізнявальна здатність, мм	0,5-1,0	0,02-0,05
Поперечна розрізнявальна здатність, мм	2,0-3,0	0,3-0,5
Частотний діапазон УЗ хвиль, МГц	0,5-10,0	0,5-10,0
Технологія виготовлення УЗ перетворювачів	потребує складних технологічних процесів	достатньо лабораторних умов

Існуючі системи мають невисоку розрізнявальну здатність, що обмежує точність визначення характеристик акустичного поля. Крім того вони мають обмежене застосування при контролі об'єктів складної форми та об'єктів, що використовуються при високих температурах під час їх роботи, тому що температура Кюрі для більшості ПЕП не перевищує 100 °С. Точка Кюрі (температура, при якій зникає магнітострикційний ефект) для більшості магнітострикційних матеріалів розташована в інтервалі 600 - 1200 °С, що значно перевищує температуру Кюрі для п'єзоелектричних перетворювачів. Ця особливість дозволяє використовувати магнітострикційні перетворювачі за високих температур, що необхідно для контролю нагрітих тіл (котлів, труб, теплообмінників тощо) безпосередньо у процесі їх функціонування у системах теплопостачання.

**Мета статті:** розробка малоапертурних ультразвукових сенсорів с покращеними характеристиками та вдосконалення на їх основі ультразвукових систем діагностування.

**Розробка малоапертурних ультразвукових сенсорів для систем діагностування на основі магнітострикційного ефекту.** Значну частину магнітострикційних перетворювачів виміральної інформації складають перетворювачі лінійних переміщень на основі магнітострикційних ліній затримки. Магнітострикційні перетворювачі положення цілком виправдано посіли чинне місце серед пропонованих на ринку датчиків положення. Це зумовлено, в першу чергу, їх високою надійністю, стійкістю до вібраційних впливів, а також значним діапазоном перетворень, відносно невисокою вартістю.

Світовими лідерами розробки і виробництва магнітострикційних перетворювачів положення на сьогодні є такі фірми, як: MTS (США), Balluff (Німеччина), Schlumberger Industries (Франція) та ін. Аналітики цих фірм вказують на понад 1500 областей використання магнітострикційних перетворювачів положення. Перетворювачі цих фірм мають допустиму похибку вимірювання переміщення не більше 1 мм; діапазон робочих температур застосування - від -200 до +200 °С; вимірюване переміщення - від 0 до 6000 мм; мають високу заводостійкість і мінімальну споживану потужність.

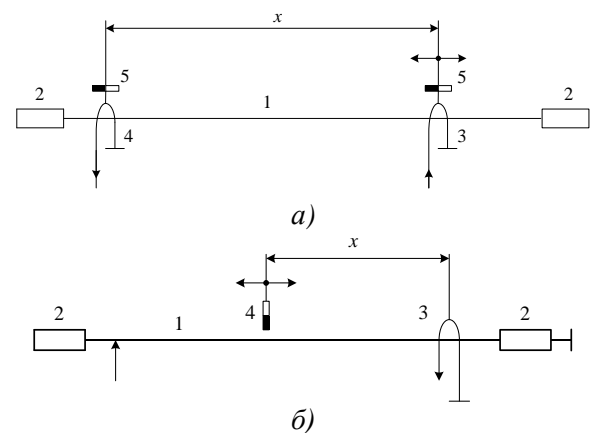
У табл. 2 представлені характеристики магнітострикційних датчиків положення фірм Gefran, Balluff, KSR-Kuebler, MTS Sensors.

Дослідження зарубіжних і вітчизняних вчених, таких як Е.А. Артем'єв, П.А. Грахов, С.Б. Дьомін, А.І. Надєєв, О.М. Петрищев, О.П. Шпинь, В.Х. Ясовєєв, S. Vinogradov та ін., привели до створення великої кількості способів реалізації магнітострикційних перетворювачів положення, появи структурних, технологічних, алгоритмічних методів поліпшення їх метрологічних характеристик.

Залежно від використовуваного типу хвильового руху відомі магнітострикційні

перетворювачі положення на об'ємних і поверхневих акустичних хвилях (ПАХ). Магнітострикційні перетворювачі положення, що використовують ПАХ поки не знайшли широкого застосування, оскільки ПАХ практично не допускають безконтактного збудження та зчитування ультразвукових коливань (затухання близько 80 дБ), тобто не дозволяють побудувати механічно плавно регульовану лінію затримки у великому діапазоні перетворень.

Спрощена функціональна схема МС перетворювача положення, що працює на поздовжніх УЗ хвилях, зображена на рис. 5, а [1].



**Рисунок 5 - Базові конструкції МСП положення на поздовжніх (а) та на крутильних (б) хвилях**

Основу магнітострикційного перетворювача положення становить механічно плавно регульована ультразвукова лінія затримки з феромагнітним дротяним, трубчастим або стрічковим хвилеводом 1, збудження і зчитування ультразвукових імпульсів в якому здійснюється магнітострикційним способом [1, 2, 3].

**Таблиця 2 - Основні характеристики МСП положення**

Характеристики	Balluff	Gefran	KSR-Kuebler	MTS Sensors
Вимірюване переміщення, мм	0...5500	50...4000	200...6000	50...5500
Робоча температура, °С	-40...+85	-30...+90	-45...+125 -200...+200 (для високих і низьких температур)	-200...+125
Похибка вимірювання, мм	< 1	< 1	< 1	0,13...0,8
Напруга живлення, В	до 24	24	10...30	10,5...28

Головними елементами магніострикційного перетворювача положення є вхідний 4 і вихідний 3 електроакустичні перетворювачі (ЕАП), пов'язані акустично зі спільним хвилеводом, на кінцях якого розташовані демпфери 2. Для того, щоб перетворювачі працювали на лінійній ділянці своєї характеристики намагнічування, використовуються їх підмагнічування постійними магнітами 5. Перетворення вхідного електричного сигналу в ультразвуковий відбувається у вхідному ЕАП, що працює на прямому магніострикційному ефекті (ефекті Джоуля). Вторинне перетворення ультразвукового сигналу в електричний відбувається у вихідному ЕАП, робота якого ґрунтується на зворотному магніострикційному ефекті (ефекті Віллари).

Після подачі імпульсу струму збудження у котушку 3 на ділянці хвилеводу 1 під котушкою внаслідок ефекту Джоуля збуджується поздовжня ультразвукова хвиля, що поширюється в обидві сторони по хвилеводу. Хвиля, що поширюється вправо, затухає у демпфері 2. Хвиля, що поширюється вліво, внаслідок ефекту Віллари, наводить е.р.с. у котушці зчитування 4 вихідного ЕАП через час  $t_x$ , пропорційний положенню  $x$ . Поширюючись далі, хвиля поглинається демпфером 2.

Інформацією про переміщення (положення) котушки 3 служить інтервал часу поширення ультразвукового сигналу по хвилеводу між магніострикційними перетворювачами

$$t_x = pX/V_{np}, \quad (3)$$

де  $x$  – узагальнене лінійне переміщення;  $p$  – коефіцієнт чутливості, який визначається способом утворення часового інтервалу;  $V_{np}$  – швидкість поширення поздовжньої УЗ хвилі по хвилеводу, яка визначається рівнянням [4]

$$V_{np} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \left[ 1 - \left( \pi v \frac{R}{\lambda} \right)^2 \right]}, \quad (4)$$

де  $E$  – модуль пружності матеріалу хвилеводу;  $\rho$  – питома щільність матеріалу хвилеводу;  $v$  – коефіцієнт Пуассона (для металів  $v \sim 0,3$ );  $R$  – радіус кола поперечного перетину хвилеводу;  $\lambda$  – довжина поздовжньої ультразвукової хвилі, для якої визначається швидкість.

Швидкість без урахування дисперсії визначає так:

$$V_{np} = \sqrt{E/\rho}. \quad (5)$$

Базова конструкція МСП положення на рис. 5, б [1].

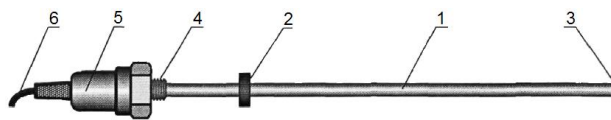
Рухомим елементом МСП положення цього типу є постійний магніт 4, а імпульс струму збудження подається безпосередньо у хвилевід. Навколо хвилеводу утворюється кругове магнітне поле, яке взаємодіє з поздовжнім магнітним полем постійного магніту. У результаті цього магнітне поле у зоні взаємодії змінюється стрибком і, внаслідок прямого магніострикційного ефекту (ефекту Відемана), у хвилеводі виникає крутильна ультразвукова хвиля, що поширюється по хвилеводу. Добігши до зони зчитування, ультразвуковий імпульс перетворюється в електричний, і на виході магніострикційного перетворювача положення формується часовий інтервал, пропорційний переміщенню.

Установлення в кінці діапазону перетворення додаткового нерухомого постійного магніту дозволяє сформувати додатковий опорний інтервал часу і реалізувати рівняння логометричного і диференціального перетворення.

В роботі [1] представлена повна класифікація конструкцій магніострикційних перетворювачів положення в залежності від типів хвилеводів і видів хвиль.

Використання магніострикційних перетворювачів положення для визначення переміщення поплавка у резервуарах для зберігання різних рідин дозволяє створити високоточні ультразвукові рівнеміри та витратоміри.

На рис.6 показана конструкція вимірювального магніострикційного перетворювача положення, яка може бути рекомендована для використання в нормальних і спеціальних умовах експлуатації, зокрема і на теплотехнічних об'єктах.



**Рисунок 6 - Вимірювальний магніострикційний перетворювач положення для ультразвукового рівнеміра**

До складу перетворювача входять лінійний акустичний хвилевід (осцилятор), розміщений у захисному герметичному корпусі 1, і магнітний елемент позиціонування 2, виконаний з можливістю переміщення вздовж корпусу 1. Лінійна ділянка корпусу 1 від герметичної заглушки 3 до різьбового з'єднання 4 є вимірювальною частиною перетворювача. На ділянці між різьбовим з'єднанням 4 і електричним кабелем 6 розміщені

магнітострикційний перетворювач з пристроями узгодження та демпфування, які герметично закриті захисною кришкою 5. Інформаційний сигнал про переміщення магнітного елементу позиціонування 2 через електричний кабель 6 передається у вторинний перетворювач.

Такі перетворювачі широко використовуються для вимірювання та контролю рівня та витрат рідини у ємностях різного призначення. Довжина хвилеводу може сягати 10 м і більше при похибці вимірювання відстані менше 1 мм.

З виконаного вище аналізу існуючих магнітострикційних сенсорів випливає, що вони широко використовуються в різних областях техніки, але майже не використовуються в системах ультразвукового діагностування твердих тіл, якими є більшість важливих об'єктів. У зв'язку з цим виникає ряд запитань: якщо магнітострикційну лінію затримки «розрізати», чи можна використовувати отримані перетворювачі для збудження та приймання ультразвукових хвиль в твердому тілі? Чи буде потужність випромінювання достатньою? Чи вистачить чутливості приймаючих перетворювачів? Об'єкти яких геометричних розмірів можна контролювати?

Необхідно також сказати про те, що збудження і приймання УЗ коливань в твердому тілі можна здійснити лише за допомогою магнітострикційних перетворювачів, що збуджують поздовжні хвилі.

На відміну від рідини, у твердому тілі виникають та поширюються пружні хвилі різних типів, характеристики яких містять інформацію про властивості контрольованих об'єктів та дефекти їх внутрішньої структури. Поряд з об'ємними (поздовжніми та поперечними) пружними хвилями в дослідженнях широко використовуються поверхневі хвилі.

Для випромінювання та приймання ультразвукових хвиль в системах діагностування найчастіше використовуються п'єзоелектричні перетворювачі (ПЕП) із значною площею робочої поверхні. В більшості випадків це є доцільним, оскільки в цьому випадку діаграма напрямленості перетворювача має явно виражений максимум у напрямку випромінювання. Це забезпечує достатню енергію сигналу, відбитого від неоднорідності. Проте існує ряд технічних задач, де використання таких перетворювачів є неможливим. Це задачі вимірювання характеристик ультразвукового поля в тілах малих розмірів, в тілах із складною формою поверхні, в нагрітих тілах тощо. Для їх вирішення можна використовувати

малоапертурні ультразвукові магнітострикційні перетворювачі [5], спрощена конструкція яких зображена на рис. 7, де 1 – корпус, 2 – ультразвукове дзеркало, 3 – хвилевод з магнітострикційного матеріалу, 4 – котушка збудження, 5 – постійний магніт, 6 – демпфер. На рис. 8 зображена лінійка таких перетворювачів в одному корпусі, де 7 – заповнювач, а 8 – магнітний екран.

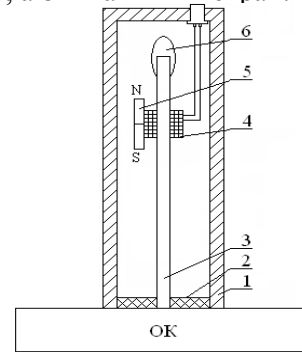


Рисунок 7 - Конструкція малоапертурного МСП

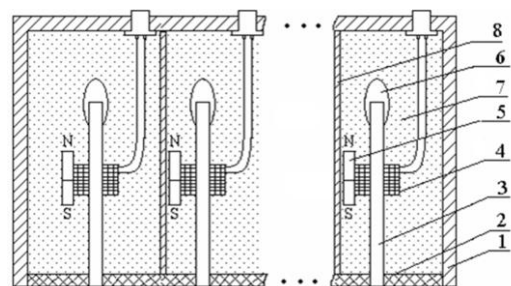


Рисунок 8 - Конструкція лінійки малоапертурних МСП

Основні параметри і характеристики магнітострикційних перетворювачів істотно залежать від конструкції самого перетворювача, точності виготовлення його елементів і частин, а також від технологічних процесів обробки матеріалів, з яких виробляються перетворювачі.

**Вибір матеріалу для виготовлення хвилеводу та його технологічна обробка.** Хвилевід є одним з найважливіших елементів МСП. Параметри матеріалів хвилеводів, за винятком намагніченості насичення і температури Кюрі, досить чутливі до хімічного складу матеріалу і наявності домішок. Тому з метою отримання високих значень магнітострикційних параметрів слід використовувати різні види плавок, що виконуються в індукційних печах за умов вакууму. З доступних та відносно дешевих матеріалів доцільно використовувати залізо-

кобальтовий сплав пермендіур у вигляді дроту циліндричного профілю діаметром від 0,3 до 2,0 мм, що дозволяє підвищити чутливість МСП на порядок у порівнянні з традиційним нікелевим дротом [6].

Ефективність магнітомеханічних перетворювачів значною мірою залежить від електромагнітних і механічних втрат енергії в феромагнітних матеріалах. Електромагнітні втрати складають основну частину загальних втрат. Вони складаються із втрат на вихрові струми (струми Фуко), які залежать від питомого електричного опору матеріалу хвилеводу і втрат на магнітний гістерезис, які оцінюються за коерцитивною силою матеріалу. Ефективність матеріалів тим більша, чим більш значення магнітострикційної сприйнятливості, коефіцієнту магнітомеханічного зв'язку, магнітострикції насичення та чим менші їх електромагнітні втрати [7].

В [6] запропоновано ряд конструкторсько-технологічних методів вдосконалення характеристик малоапертурних МСП:

застосування ультразвукового дзеркала із значно меншим акустичним імпедансом, ніж у хвилеводу, що дозволяє зменшити похибку від проникнення паразитних сигналів крізь бокову поверхню хвилеводу;

використання багатосекційних котушок для збудження та приймання ультразвукових сигналів, що дає можливість підвищити інтенсивність випромінюваних коливань та амплітуду прийнятого сигналу в декілька разів;

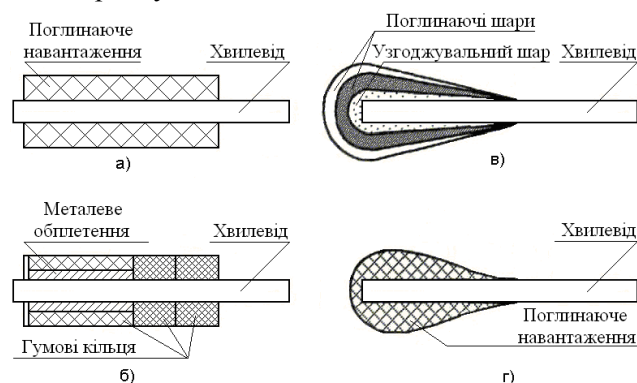
постійний магніт, закріплений на котушці збудження, забезпечує роботу МСП на лінійній ділянці характеристики намагніченості, що дозволяє підвищити точність та чутливість перетворювачів;

застосування демпфера із значним коефіцієнтом поглинання та узгодженим за акустичним імпедансом з матеріалом хвилеводу, що дозволяє значно зменшити (на 30-40 дБ) відбитий від другого кінця хвилеводу паразитний сигнал.

Запропоновані рішення дозволили створити малоапертурні МСП з наступними характеристиками: частотний діапазон 0.1 – 10.0 МГц, тривалість зондуючих імпульсів 0.1 - 16 мкс, площа випромінюючої поверхні 0,07 – 0,79 мм<sup>2</sup> (діаметр хвилеводу 0.3 – 1.0 мм), електричний імпеданс 10 – 500 Ом, відношення сигнал / завада у вимірювальному каналі 20-60дБ.

Матеріали для цих магнітострикційних пристроїв повинні також мати достатньо великий модуль пружності для забезпечення високої жорсткості. Зрозуміло, що питання вартості матеріалу також має важливе значення.

Хороші магнітострикційні властивості мають залізо-алюмінієві сплави (алфери) [8] і залізо-кобальтові сплави. Максимальне значення магнітострикції насичення досягається при 65 – 70% вмісту кобальту і складає  $\lambda_s = 90 \cdot 10^{-6}$ . Залізо-кобальтові сплави мають високе значення модуля пружності і хороші магнітні властивості: рекордне значення індукції насичення і достатньо високу магнітну проникність. Високе значення магнітострикції насичення  $\lambda_s = 70 \cdot 10^{-6}$  зберігається при вмісті кобальту від 40-45%. При меншому вмісті кобальту магнітострикція різко зменшується. Промисловість виробляє два типи залізо-кобальтових сплавів із вмістом 65% Со (сплав К65) і 49% Со з додаванням 2% ванадію для покращення оброблюваності (пермендіур К49Ф2). Обидва сплави мають високе значення модуля пружності і хороші магнітні властивості – рекордне значення індукції насичення  $B_s = 2,4$  Тл і достатньо високу магнітну проникність. При цьому сплав К49Ф2 має дещо кращі магнітні, а сплав К65 – механічні властивості. Низький електричний опір і відповідно високі втрати на вихрові струми в сплаві К65 роблять його менш придатним в техніці ультразвуку. Дещо вища вартість, приблизно в чотири рази більша, ніж у нікелю, не може служити перешкодою для застосування цих сплавів у сучасних високоавтоматизованих системах моніторингу теплотехнічного обладнання.



а)- циліндричний одношаровий, (б)-циліндричний багатоеlementний, (в) краплеподібний багатосаровий, (г) краплеподібний одношаровий

**Рисунок 8 - Конструкції демпферів хвилеводів**

**Вибір матеріалу, форми і геометричних розмірів демпфера.** Демпфери акустичного хвилеводу вводять в конструкцію перетворювачів для зменшення рівня паразитних відбитих сигналів від кінців хвилеводів. З цією метою кінці хвилеводу

забезпечуються спеціальними пристроями, в результаті чого питоме затухання ультразвукової хвилі в кінцевих ділянках хвилеводів плавно зростає до такої величини, коли рівень відбитих від кінців хвилеводу сигналів не перевищує допустимого значення. У сучасних перетворювачах для демпферів найбільш часто використовують шкіру, каучук, гуму, олово і т.п. (рис. 8, а – з). Однак ці демпфери мають складну конструкцію, великі масогабаритні розміри і обмежений температурний діапазон ( $-40 \dots +110^\circ \text{C}$ ).

Кращі поглинаючі властивості мають демпфери краплеподібної (експоненційної) форми середніх розмірів (діаметр близько 5 мм).

**Вибір матеріалу, форми і геометричних розмірів котушки збудження.** На рис. 9 показана найбільш поширена конструкція котушки збудження, що використовується в магніострикційних приладах [9, 10, 11].

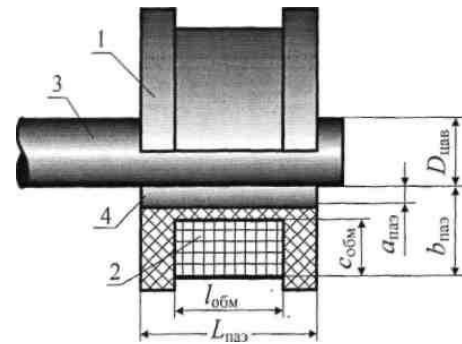
Залежність коефіцієнта використання магнітних властивостей матеріалу хвилеводу  $k_u$  від співвідношення діаметра намотування до діаметру акустичного хвилеводу  $d_m/d_e$  наведена на рис. 10 [10].

З наведеного на рис. 10 графіка видно, що при  $d_m/d_e = 2$  коефіцієнт використання магнітних властивостей хвилеводу становить близько 0,1; тобто в десять разів гірший, ніж при намотуванні дроту безпосередньо на хвилевід.

Схема стенду для перевірки та визначення основних характеристик і параметрів магніострикційних перетворювачів та їх окремих елементів наведена на рис. 11.

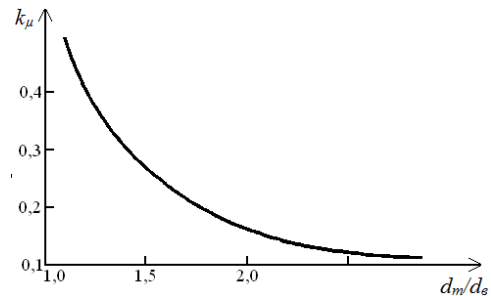
На випромінюючий магніострикційний перетворювач подаються радіоімпульсні сигнали з частотою заповнення  $f$  і тривалістю 2 - 4 періоди несучого коливання. З виходу приймаючого магніострикційного перетворювача сигнал подається через підсилювач на осцилограф для вимірювання амплітуд відповідних прийнятих імпульсів. Амплітуда сигналу на виході формувача радіоімпульсів (ФРІ) у всіх експериментах підтримувалася постійною і дорівнювала 13 В. Змінними параметрами були частота заповнення радіоімпульсів (0,25 – 2,0 МГц) і відстань між витками котушки збудження і хвилеводом (0,1 і 0,2 мм).

Відстані між магніострикційними перетворювачами і торцями хвилеводу обрані з умови  $l_1 \leq l_2$ . Тоді перший радіоімпульс, що прийшов на приймаючий магніострикційний перетворювач, пройде відстань  $l_0$ , другий -  $l_1 + l_0$ , а третій -  $l_2 + l_0$ .

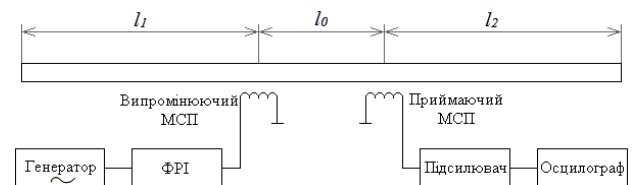


1 – котушка індуктивності; 2 – обмотка, намотана на пластиковий каркас; 3 – акустичний хвилевід; 4 – повітряний зазор

**Рисунок 9 - Традиційна конструкція котушки збудження**



**Рисунок 10 – Залежність коефіцієнта використання магнітних властивостей хвилеводу від співвідношення  $d_m/d_e$**



**Рисунок 11 - Структура стенду для визначення основних характеристик і параметрів МСП та його елементів**

На рис. 12 наведена фотографія перетворюючої частини вимірювального стенду, а на рис. 13 - осцилограми сигналу на виході приймаючого магніострикційного перетворювача. Демпфери на кінцях хвилеводу не встановлювались.

З аналізу отриманих експериментальних даних можна зробити наступні висновки:

- незначне збільшення відстані між витками котушки і хвилеводом призводить до помітного зниження величини прийнятого сигналу, що стає особливо відчутно при збільшенні частоти;

- із збільшенням частоти заповнюючих коливань радіоімпульсів зменшується коефіцієнт електромеханічного зв'язку, що



призводить до зменшення величини прийнятих сигналів.

Отже, необхідно виготовляти котушки збудження МСП з мінімальним віддаленням витків від хвилеводу.

На рис. 14 показана конструкція акусто-електричного перетворювача, яка складається з єдиного монолітного вузла [12], що включає в себе кінцеву ділянку хвилеводу, безкаркасну конструкцію котушки збудження з нульовим повітряним зазором, вбудовану в демпфер.

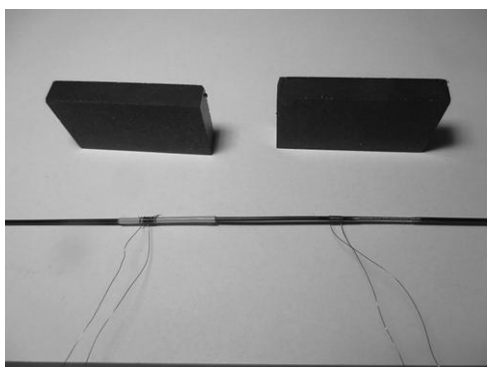


Рисунок 12 – Перетворююча частина вимірального стенду

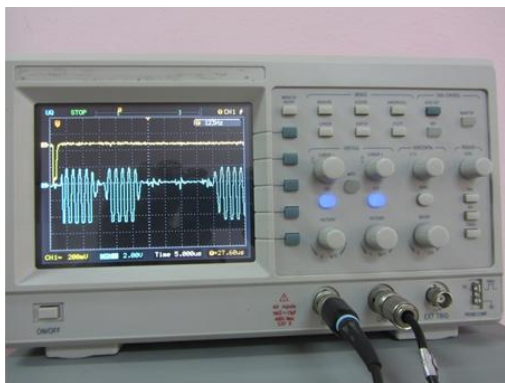


Рисунок 13 - Осцилограма сигналу на виході приймаючого МСП

Обмотка перетворювача може бути виконана з дроту, наприклад марки ПЕТВ - 2 - 0,063 ТУ 16 - 502.003 - 82, який наноситься на зовнішню поверхню хвилеводу. Потім ділянку обмотки і кінець хвилеводу покриваються спеціальним складом на основі епоксидного або полідівуретанового матеріалу і піддають температурній полімеризації. Таким чином, отримують монолітний конструктивний вузол, що включає в себе нерухому обмотку з хвилеводом і демпфером.



Рисунок 14 - Конструкція МСП з безкаркасною катушкою збудження і демпфером

Якщо перетворювач працює на одній частоті, то обмотку можна виконати багатосекційною. Кожна наступна секція намотується на зустріч попередній та на відстані півхвилі від попередньої обмотки. Кількість секцій повинна бути парною. Це дозволяє підвищити чутливість у декілька разів.

**Вибір матеріалу, розмірів і залишкової намагніченості постійного магніту.** Основні параметри і характеристики постійних магнітів детально викладені в [9, 10, 13, 14].

Визначальними є наступні вимоги до магнітних матеріалами постійних магнітів для малоапертурних МСП:

залишкова магнітна індукція  $B_r \geq 14000$  Гс;

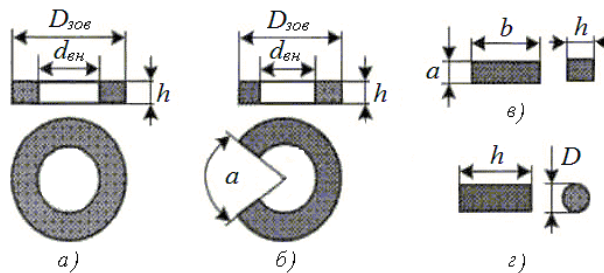
коерцитивна сила  $H_c \geq 530$  Е;

температура Кюрі більше + 760, °С;

діапазон робочих температур від мінус 80 до плюс 200 °С;

висока механічна міцність.

На рис. 15 показані найбільш поширені конструкції постійних магнітів.



а – кільцевий; б – кільцевий урізаний або С-подібний; в – прямокутний; г – стержневий

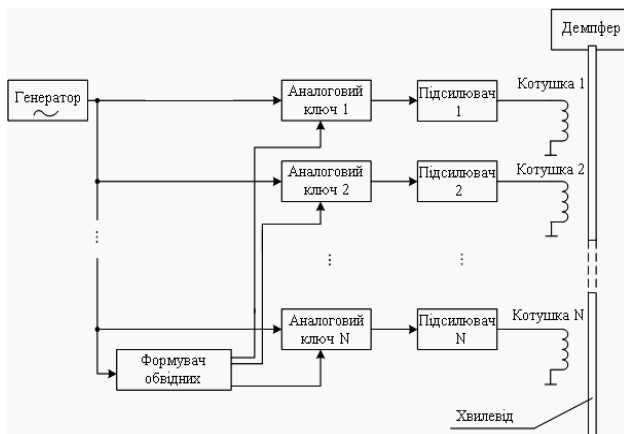
Рисунок 15 – Конструкції поширених постійних магнітів

Для більшості випадків виготовлення малоапертурних магнітострикційних перетворювачів цілком достатньо використовувати стержневі постійні магніти з магнітотвердих матеріалів.

Як було вказано вище, малоапертурний магнітострикційний випромінювач має малу площу випромінюючої поверхні, що дозволяє

створити у контрольованому зразку сферичну (ненаправлену) поздовжню хвилю. Тому для нормальної роботи ультразвукових системи контролю необхідно забезпечити достатню потужність випромінювання.

На рис. 16 наведено структурну схему блоку потужного МСП з акустичним підсумовуванням сигналів у хвилеводі. Запропоноване технічне рішення забезпечує збільшення інтенсивності випромінюваного сигналу у  $N^2$  разів, де  $N$  – кількість каналів підсумовування.



**Рисунок 16 - Схема блоку управління потужного МСП з акустичним підсумовуванням сигналів у хвилеводі**

Залежність акустичного тиску від часу під  $N$ -ою котушкою збудження описується наступними виразами:

$$p_1 t = u_1 t + n-1 a/V_{np} \cdot K \cdot e^{-\beta n-1 a},$$

$$p_2 t = u_2 t + n-2 a/V_{np} \cdot K \cdot e^{-\beta n-2 a},$$

$$p_i t = u_i t + n-i a/V_{np} \cdot K \cdot e^{-\beta n-i a},$$

$$p_N t = u_N t \cdot K,$$

де  $u_i t$  – електричний сигнал на  $i$ -тій котушці збудження;  $K$  – коефіцієнт електромеханічного зв'язку;  $\beta$  – коефіцієнт затухання ультразвукового сигналу у хвилеводі;  $a$  – відстань між котушками збудження;  $n$  – номер котушки збудження,  $N$  – кількість каналів збудження (кількість котушок).

Діаметр випромінюючої поверхні перетворювача (діаметр хвилеводу) становить 0,3 - 0,5 мм. Перетворювач працює на частоті 1 МГц. При такому співвідношенні діаметра перетворювача і частоти несучого коливання радіоімпульсу в досліджуваній зразок

випромінюється ультразвукова поздовжня хвиля з діаграмою напрямленості у вигляді півсфери. Відстані між котушками збудження дорівнюють одній довжині поздовжньої хвилі у хвилеводі. Сигнали в котушки збудження надходять із затримкою в часі по відношенню до попередніх котушок на один період несучого коливання. Таким чином, до кінця хвилеводу сигнали від кожної котушки приходять одночасно і синфазно, що забезпечує акустичне підсумовування сигналів у хвилеводі і дозволяє підвищити амплітуду випромінюваного сигналу в  $N$  разів, а потужність випромінювання – в  $N^2$  разів.

Однак відстані між котушками визначені виходячи з частоти несучого коливання. Таким чином для різних частот несучого коливання необхідно виготовляти різні випромінювачі.

Структурна схема широкопугового випромінюючого МСП, позбавленого цього недоліку, наведена на рис. 17.

Випромінюючий магніострикційний перетворювач містить додатковий хвилевід для отримання сигналів, затриманих у часі на величини, рівні затримкам в основному хвилеводі. Відстані між котушками на хвилеводах можуть бути довільними, але однаковими для основного і додаткового хвилеводів, що забезпечує широкопуговість перетворювача. Підсилювачі 2, 3, ...,  $N$  підсилюють сигнали з котушок 1, 2, ..., 1,  $N$ , до величини сигналу, який надходить на котушку 2.1.

Кількість каналів у випромінюючому магніострикційному перетворювачі може бути будь-якою, проте слід враховувати, що зміщення частинок хвилеводу не повинні перевищувати значення пружних деформацій, бо це може призвести до руйнування хвилеводу.

Поодинокий перетворювач дозволяє визначити факт наявності чи відсутності дефекту, але не дозволяє визначити його просторове положення у зразку. Крім того, для визначення розмірів та місцезнаходження дефекту необхідно виконувати механічне сканування поверхні контрольованого зразка та застосовувати складні алгоритми розрахунку. Цього недоліку можна позбутися, використовуючи лінійки та матриці перетворювачів.

Розроблені малоапертурні магніострикційні сенсори використовувались у системі діагностування фазованих антенних решіток (ФАР). Для цього малоапертурний МСП с діаметром приймаючої поверхні 50 мкм було зачеканено в металевий брус, щоб вимірювання проводились в умовах реального акустичного навантаження [15, 16].

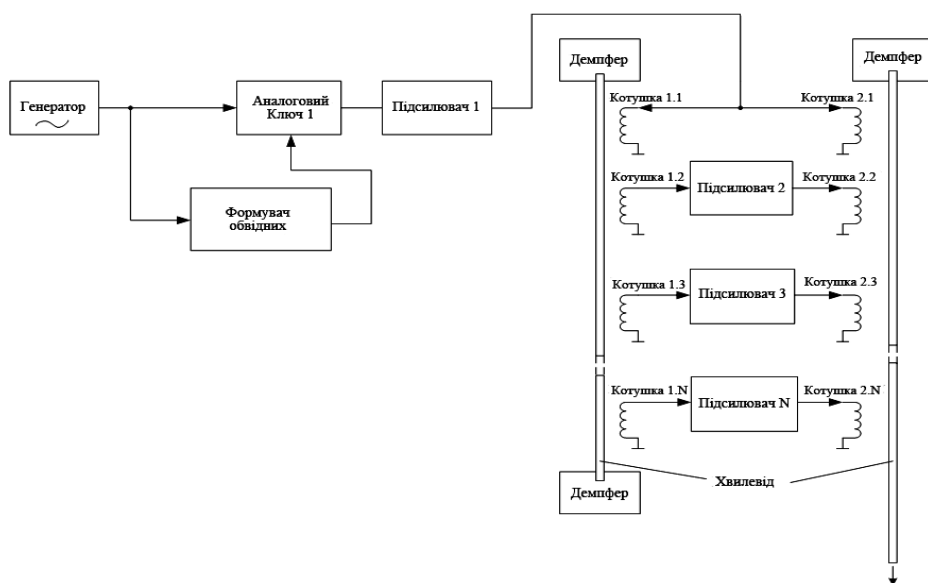


Рисунок 17 - Структурна схема блоку збудження широкопasmового МСП підвищеної потужності

## ВИСНОВКИ

Розроблені та експериментально досліджені методи покращення характеристик малоапертурних МСП дозволили підвищити потужність випромінювання у  $\geq 50$  разів, чутливість та розрізняльну здатність – у 2-4 рази при площі випромінюючої поверхні не більше 0,2 кв. мм.

На основі запропонованих методів покращення характеристик МСП створено експериментальні зразки перетворювачів та проведено їх лабораторні випробування, що підтвердило ефективність запропонованих наукових та технічних рішень.

Створений, досліджений та впроваджений зразок системи, в основу якого покладено розроблені методи та засоби контролю характеристик ультразвукового поля в твердому тілі, що дозволило отримати розподіл акустичного поля на поверхні п'єзоелементів ФАР в умовах реального акустичного навантаження.

Отримані результати доцільно використовувати при розробці вимірювальних приладів та систем ультразвукової діагностики і контролю твердих об'єктів складної форми, малих розмірів та в широкому діапазоні температур.

1. Надеев А.И. Магнитострикционные интеллектуальные преобразователи параметров движения. Монография / Надеев А.И. – Астрахань: АГТУ, 1999. – 155 с. 2.

Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике / Викторов И.А. – М.: Наука, 1966. – 168 с. 3. Красильников В.А. Введение в физическую акустику / В.А. Красильников, В.В. Крылов. - М.: Наука, 1984 – 403 с. 4. Шпинь А.П. Принципы построения магнитострикционных преобразователей перемещений / А.П. Шпинь // Метрология. – 1986. – № 6. – С. 10–18. 5. Пат. 104567 України. Ультразвуковий малоапертурний магнитострикційний перетворювач / Бабак В.П., Богачев І.В.; заявник і власник патенту ІТТФ НАНУ – а201306020; заявл. 15.05.13; опубл. 10.02.14, Бюл. №3. 6. Babak V.P. Use of magnetostriction transducers for control of the ultrasonic phased arrays parameters / V.P. Babak, I.V. Bogachev // Scientific Proceedings. – Sozopol, Bulgaria. – 2013. – № 2 (139). – P. 106–109. 7. Артемьев Э.А. Материалы для звукопроводов волноводных трактов магнитострикционных преобразователей перемещений. Учебное пособие / Артемьев Э.А. – Астрахань: АГТУ, 1997. – 93 с. 8. Pigott M.T. Iron-Aluminium alloys for use in magnetostrictive transducers // Journal acoustical society of America. – 1956. – Vol.28, № 3, P. 346–346. 9. Джонсон Р. Механические фильтры в электронике / Джонсон Р. – М.: Мир, 1986. – 406 с. 10. Захарьяцев Л.И. Конструирование линий задержки / Захарьяцев Л.И. – М.: Сов. Радио, 1972. – 192 с. 11. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / под ред. И.В. Голяминой. - М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с. 12. Прошкин В.Н. Акустоэлектрические преобра-

зователи для нового поколения магнито-стрикционных приборов / В.Н. Прошкин, Э.А. Магомедова // Проблемы технического управления в региональной энергетике. – Пенза: ПГТА, 2006.13. Вонсовский СВ. Магнетизм / Вонсовский СВ. – М.: Наука, 1984. – 208 с. 14. Материалы магнитотвердые деформируемые. Марки: ГОСТ 24897–81. - М.: Изд-во стандартов, 1981. – 9 с. 15. 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. 16. 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.

**Поступила в редакцію 01.12.2014р.**

**Рекомендували до друку: Оргкомітет 7-ої МНТК з НК і ТД обладнання (25 – 28.11.2014р., ІФНТУНГ), докт. техн. наук, проф. Середюк О.Є.**