

УДК 658.562: 620.179.16: 620.179.17

doi:10.20998/2413-4295.2026.02.07

ДІАГРАМА СПРЯМОВАНОСТІ ПРЯМОГО СУМІЩЕНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА В ІМПУЛЬСНОМУ РЕЖИМІ

О.М. БОРОДЕНКО¹, Г.М. СУЧКОВ², П.А. ЯКОВЛЄВ³

¹ кафедра інформаційно – вимірвальних технологій, аспірант, НТУ «ХПІ», Харків, Україна, Україна

² кафедра інформаційно – вимірвальних технологій, професор кафедри, НТУ «ХПІ», Харків, Україна

³ кафедра інформаційно – вимірвальних технологій, магістр, НТУ «ХПІ», Харків, Україна

*e-mail: hpi.suchkov@gmail.com

АНОТАЦІЯ. В Україні виробляються і експлуатуються великі об'єми металопродукції різного призначення, в тому числі критичних для функціонування промисловості і господарства. Якість такої продукції в значній мірі забезпечується використанням ультразвукових методів контролю. Робота ультразвукових дефектоскопів і товщиномірів може забезпечувати надійність контролю у випадку відповідності отриманих результатів дійсності. Одним із факторів, що суттєво впливає на результат контролю є діаграма спрямованості ультразвукового перетворювача, який формує ультразвукове поле в об'ємі металовиробу. Ультразвукове поле повинно бути вузьким, мати мінімальні бокові пелюстки по відношенню до центрального робочого променя тощо. Такі вимоги характерні як для традиційних контактних сенсорів, так і для електромагнітно-акустичних перетворювачів. Діаграми спрямованості для прямих суміщених електромагнітно-акустичних перетворювачів на цей час вивчені недостатньо. Тому в виконаних дослідженнях в спрощеному вигляді розроблена фізико – математична модель перетворення імпульсів квазімагнітного та пакетного електромагнітного полів в ультразвукові імпульси в поверхневому шарі феромагнітного об'єкта контролю. Визначена формула для розрахунків ультразвукового поля в металевому напівпросторі. Встановлено, що для збудження вузької діаграми спрямованості ультразвукового поля значної інтенсивності центрального променя і з незначними бічними пелюстками необхідно високочастотну котушку індуктивності електромагнітно-акустичного перетворювача виконувати в вигляді періодичної структури. Моделюванням показано, що в порівнянні з традиційними підходами отриманий результат практично не має бокових пелюсток у створеному в металі ультразвуковому полі. Результати моделювання було перевірено експериментально на феромагнітних зразках в вигляді напівциліндрів радіусами 90, 70, 50 і 30 мм, для чого було створено дослідний стенд. Встановлено, що в експериментальних результатах, в порівнянні з отриманими при моделюванні, при всіх досліджених зразках діаграма спрямованості має більш гострий характер. При цьому бічні пелюстки ультразвукового поля в рамках чутливості приладів ультразвукового стенду не встановлено. Це говорить про перспективність використання імпульсних електромагнітно-акустичних перетворювачів для контролю феромагнітних металовиробів в різних областях промисловості.

Ключові слова: металовиріб; ультразвуковий; контроль; електромагнітно-акустичний; діаграма спрямованості.

DIRECTION DIAGRAM OF A DIRECT COMBINED ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC TRANSDUCER IN PULSE MODE

О.М. BORODENKO¹, H.M. SUCHKOV², P.A. YAKOVLEV³

¹ information-measurement technologies department, post-graduate student, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine

² information-measurement technologies department, professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine

³ information-measurement technologies department, master student, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine

ABSTRACT. In Ukraine, large volumes of metal products for various purposes are produced and operated, including those critical for the functioning of industry and economy. The quality of such products is largely ensured by the use of ultrasonic inspection methods. The operation of ultrasonic flaw detectors and thickness gauges can ensure the reliability of testing if the results obtained correspond to reality. One of the factors that significantly affects the testing result is the beam pattern of the ultrasonic transducer, which forms an ultrasonic field in the volume of the metal product. The ultrasonic field must be narrow, have minimal side lobes in relation to the central working beam, etc. Such requirements are characteristic of both traditional contact sensors and electromagnetic-acoustic transducers. The beam patterns for direct combined electromagnetic-acoustic transducers have not been studied sufficiently at this time. Therefore, in the conducted studies, a simplified physical and mathematical model of the conversion of quasimagnetic and packet electromagnetic field pulses into ultrasonic pulses in the surface layer of a ferromagnetic testing object was developed. A formula for calculating the ultrasonic field in a metal half-space was determined. It was established that to excite a narrow ultrasonic field with a directional diagram with a significant intensity of the central beam and with insignificant side lobes, it is necessary to perform the high-frequency inductance coil of the electromagnetic-acoustic converter in the form of a periodic structure. The simulation showed that, in comparison with traditional approaches, the obtained result has practically no side lobes in the ultrasonic field created in the metal. The simulation results were experimentally verified on ferromagnetic samples in the form of semi-cylinders with radii of 90, 70, 50 and 30 mm, for which a test stand was created. It was found that in the experimental results, in comparison with those obtained during modeling, the directivity diagram for all the studied samples has a sharper character. At the same time, the side lobes of the ultrasonic field within the sensitivity of the ultrasonic stand devices are not established. This

indicates the prospects of using pulsed electromagnetic-acoustic transducers for controlling ferromagnetic metal products in various areas of industry.

Key Words: metal product; ultrasonic; control; electromagnetic-acoustic; radiation pattern.

Вступ

Надзвичайно важливою характеристикою ультразвукових перетворювачів є діаграма спрямованості (ДС) звукового поля в об'єкті контролю (ОК) [1]. В значній мірі вона визначає чутливість контролю, точність вимірювання товщини, швидкості розповсюдження ультразвукових імпульсів, координати дефектів, крок сканування об'єкту контролю, роздільну здатність, вимірювання розмірів дефектів, що має значення при встановленні якості ОК [2].

Вказані характеристики ультразвукових перетворювачів відносяться як до п'єзоелектричних [3] так і до електромагнітно-акустичних (ЕМА) [4] перетворювачів (ЕМАП). Причому в відомих теоретичних роботах [5], як правило, досліджено вплив на ДС безперервного випромінювання ультразвукових хвиль [2, 3], що приводить до появи бічних пелюсток значної величини, рис. 1. В результаті дані контролю можуть не вірно визначатися. Якість контролю буде недостатньою.

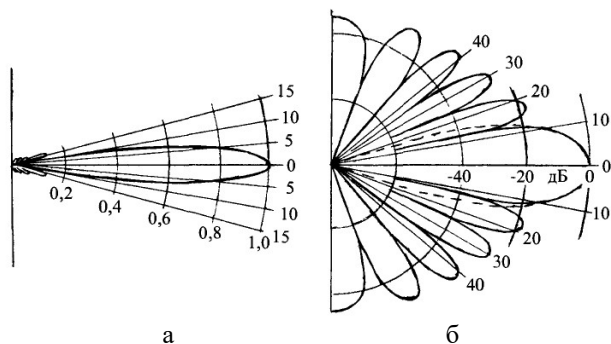


Рис. 1 – Типове представлення ДС: а – у відносних одиницях; б – в дБ. Основна пелюстка – 0

З рис. 1 випливає, що бічні пелюстки ДС можуть суттєво спотворювати результати ультразвукового контролю (УЗК), оскільки вони можуть формувати відбиття від дефектів і результат контролю не буде відповідати реальності. Слід враховувати, що в основній (центральной) пелюстці зосереджено близько 80% енергії, яка випромінюється.

Відомо багато праць [4–12], в яких фахівці з багатьох сторін розглядають питання формування ДС з заданими характеристиками, які, відповідно, визначаються в основному конструкцією ЕМАП та параметрами імпульсів струму їх живлення [4, 7, 12, 13]. Очевидно, що живлення ЕМАП пакетними імпульсами струму (з кількома періодами частоти заповнення) [14, 15], тобто проміжними характеристиками між короткими імпульсами і безперервним випромінюванням ультразвукових

імпульсів буде мати значення при ультразвуковому контролі [16, 17] і потребує відповідних досліджень.

Раніше було визначено, що вплинути на ДС з метою зменшення бокових пелюсток можливо шляхом використання плоских високочастотних котушок з періодичним розташуванням провідників [9, 13].

В напрямку розробки нових ЕМАП працюють як вітчизняні фірми, наприклад НПФ «Ультракон-Сервис» [17], УкрНДІНК [18], Укрінтех [19], ХІМЛАБОРРЕАКТИВ [20] та інші, так і закордонні: Olympus [21], SONATEST [22], Hitachi [23] та інші, що говорить про важливість досліджень ДС таких перетворювачів.

Мета роботи

Метою роботи є обґрунтування раціональних конструкцій ЕМАП за показником діаграми спрямованості ультразвукових полів в металевих об'єктах.

Виклад основного матеріалу

Теоретичні положення з формування діаграми спрямованості ЕМА перетворювача при імпульсному збудженні поляризованого магнітного поля.

На сьогодні імпульсними магнітами вдалося створити постійну величину магнітного поля в поверхневому шарі ОК в вигляді напівпростору на протязі заданого часового інтервалу [14]. Тому будемо вважати, що на ОК діє квазіпостійне магнітне поле. Тоді ДС буде визначатися конструкцією високочастотної котушки індуктивності ЕМАП.

В якості фізичної моделі розглянемо конструкцію високочастотної котушки індуктивності, що наведена на рис. 2. Нехай над поверхнею металічного об'єкту 1 розташована високочастотна котушка індуктивності у вигляді ділянок 2.1, 2.2, 2.3 безкінечно тонкої стрічки шириною a . Відстань між ділянками плоскої стрічки дорівнює b . При розрахунках $b = a$. Кут θ спостереження ультразвукового поля в точці A об'єму ОК на відстані r і називається кутом розкриття діаграми спрямованості.

На ОК 1 діє квазіпостійне нормальне магнітне поле B_n або тангенціальне B_t . Під провідниками 2.1, 2.2 і 2.3 (для прикладу беремо 3 провідника) в поверхневому шарі ОК в ділянках 3.1, 3.2, 3.3 будуть збуджуватися електромагнітні поля за рахунок пакетного високочастотного синусоїдального струму в провідниках високочастотної котушки ЕМАП. В результаті в об'ємі металу будуть формуватися ультразвукові промені з кутом розкриття θ , який визначається за відомим виразом

$$\sin \theta = n\lambda / r \tag{1}$$

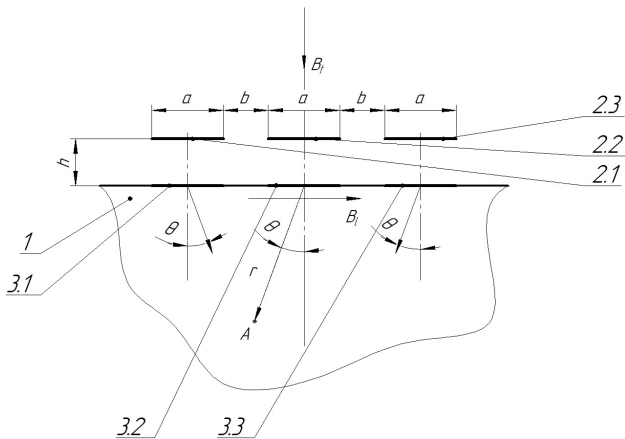


Рис.2 – Модель для розрахунків ДС ЕМАП в металічному ОК

де n – числовий коефіцієнт, що визначається рівнем амплітуди головної пелюстки ДС ($n = 0,61$ для рівня 0 дБ, тобто центрального ультразвукового променя).

Для одиничної ділянки стрічки (наприклад 2.2) високочастотної котушки індуктивності можна записати вираз для амплітуди:

- для поздовжньої хвилі при тангенціальному квазістаціонарному намагнічуванні

$$A_{2.2l} = \frac{jB_t S}{8\pi\mu r} e^{-k_l h \sin \theta} \tag{2}$$

Відповідно для поперечної хвилі при нормальному намагнічуванні

$$A_{2.2t} = \frac{jB_t S}{8\pi\mu r} e^{-k_t h \sin \theta} \tag{3}$$

де k_l – хвильове число для поздовжніх хвиль; k_t – хвильове число для поперечних хвиль; μ – постійна Ламе для матеріалу ОК; j – сила струму в стрічці високочастотної котушки індуктивності ЕМАП; B_t і B_n – максимальні значення величин індукції тангенціального та нормального квазістаціонарного магнітного поля відповідно; h – зазор між ділянками стрічок котушки індуктивності і поверхнею ОК; r – відстань від поверхні ОК до точки спостереження, для якої розраховується амплітуда ультразвукової хвилі.

Складаючи ультразвукові промені від усіх ділянок провідників високочастотної котушки індуктивності ЕМАП отримаємо результуючу ДС

$$DC = \frac{2C}{a\omega tg\alpha} \left[\sin \left(\frac{a\omega \sin \alpha}{2C} \right) \right] \exp \left(-\frac{h\omega \sin \alpha}{C} \right) \sin \left[\frac{N}{2} \left(\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \alpha - \varphi \right) \right] \sin \left[\frac{1}{2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \alpha - \varphi \right)} \right] \tag{4}$$

де h – зазор між високочастотною котушкою і ОК; a – ширина стрічки ділянки високочастотної котушки; C – швидкість розповсюдження ультразвукової хвилі в матеріалі ОК; α – кут поширення ультразвукового променя; ω – кутова частота ультразвукових імпульсів; N – кількість ділянок високочастотної котушки індуктивності; λ – довжина ультразвукової хвилі в матеріалі ОК; φ – дорівнює 0, коли ділянки високочастотної котушки включені з одною фазою, і дорівнює π , коли ділянки високочастотної котушки включені протифазно; d – розмір високочастотної котушки.

Для перевірки розробленої фізико-математичної моделі були виконані розрахунки ультразвукового поля у металевому напівпросторі, для прикладу варіант результату яких наведено на рис.3.

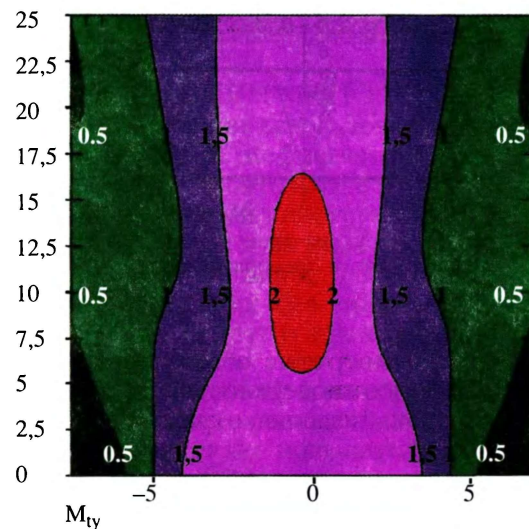


Рис. 3 – Щільність ультразвукового поля в металевому ОК в результаті оптимізації конструкції високочастотної котушки індуктивності ЕМАП

Експериментальні дослідження.

Для перевірки теоретичних досліджень було виготовлено зразки з сталених матеріалів у вигляді

напівциліндрів. Схема проведення експериментальних досліджень наведена на рис. 4.

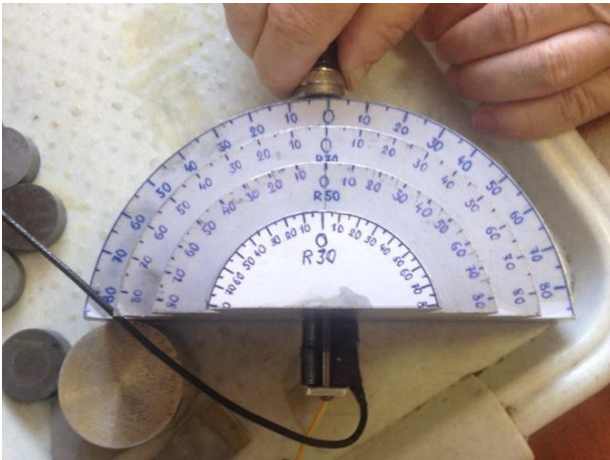


Рис. 4 – Схема вимірювання діаграми спрямованості ЕМАП на сталевому феромагнітному зразку в режимі прийому та в режимі випромінювання

Згідно з схемою ЕМАП випромінює ультразвукові промені, які фіксуються приймаючим перетворювачем. Після цього перетворювач переміщується по криволінійній поверхні зразка, а ЕМАП приймає ультразвукові імпульси. Таким чином визначається ДС в режимі прийому і в режимі випромінювання ультразвукових імпульсів.

Результати побудови ДС в режимі випромінювання при різних радіусах зразків наведено на рис. 5.

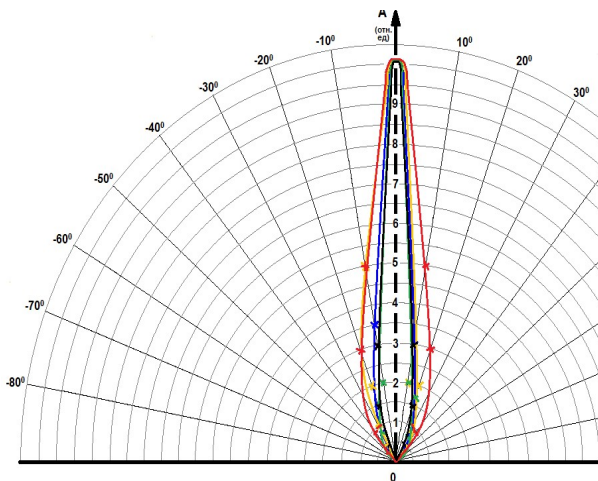


Рис. 5 – ДС в режимі випромінювання ЕМАП при напівциліндрах радіусами 90, 70, 50 і 30 мм

Оскільки збуджене ультразвукове поле симетричне, то зображення на рис.5 наведено частково.

ДС ЕМАП в режимі прийому наведено на рис. 6

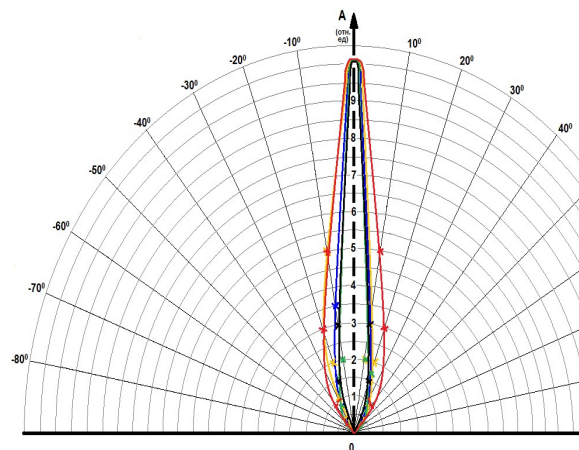


Рис. 6 – ДС ЕМАП в режимі прийому для різних сталевих зразків (напівциліндри з радіусом 90, 70, 50 і 30 мм)

Обговорення результатів

Дані, що наведені на рис.3 показують, що комплексний підхід до побудови конструкції ЕМАП дають можливість підвищити концентрацію ультразвукового поля в ОК вздовж напрямку центрального променя та практично виключити появу бічних пелюсток ДС. В такому варіанті точність визначення координат дефектів в ОК буде підвищуватися.

Аналіз результатів експериментальних досліджень підтвердив результати модельних досліджень. Причому на рівні чутливості використаних приладів контролю бічних пелюсток ДС не виявлено на різних товщинах ОК.

Висновки

Показана можливість виконувати моделювання збудження і прийому ультразвукових імпульсів в металевих об'єктах в випадку намагнічування ОК імпульсним магнітним полем з заданою тривалістю, достатньою для виконання контролю. Тобто квазіпостійним магнітним полем.

Визначена можливість побудови діаграми спрямованості ультразвукового поля в ОК за рахунок побудови височастотної котушки індуктивності ЕМАП в вигляді періодичної структури.

Надано формули для розрахунків ДС та наведені приклади моделювання ультразвукового поля в металевому напівпросторі.

Результати експериментальних досліджень ДС підтвердили висновки модельних досліджень.

Список літератури

1. Цапенко В. К., Куц Ю. В. Основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник. Київ, 2010. 448 с.
2. Карпаш М.О., Рибіцький І.В., Котурбаш Т.Т., Бондаренко О.Г., Карпаш О.М. Акустичний контроль

- конструкцій та устаткування у нафтогазовій галузі. Монографія. – Видавництво: ІФНТУНГ, 2012. – 420 с.
3. Лютак З.П., Лютак І.З. Технологія акустичного контролю нафтогазового обладнання. Видавництво: ІФНТУНГ, 2015. 417 с.
 4. Десятніченко О. В. Електромагнітно-акустичний товщиномір для контролю металовиробів з діелектричними покриттями: дис. канд. техн. наук: 05.11.13. Харків, 2015. 172 с.
 5. Liang, C.–H. Inequality condition for grating lobes of planar phased array / C.–H. Liang, L. Li, X.–J. Dang // Progress In Electromagnetics Research B. – 2008. – Vol. 4. – P. 101–113.
 6. Ванджура, А. Р., Лисенко Ю. Ю. Автоматизований ультразвуковий контроль рейок. XVIII Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених “Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні”, 06-07 грудня 2022 р, м. Київ, Україна: збірник праць конференції. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – С. 202-205.
 7. Плеснецов С.Ю. Розвиток методів та засобів для електромагнітно-акустичного контролю стрижневих, трубчастих та листових металовиробів: автореф. дис. д-ра техн. наук. Харків, 2021. 40 с.
 8. Мигуценко Р.П., Сучков Г.М., Петрищев О.М., Болух В.Ф., Плеснецов С.Ю., Кочерга А.І. Інформаційно-вимірвальні електромеханічні перетворювачі для оцінки якості поверхні феромагнітних металовиробів ультразвуковими хвилями Релея // Технічна електродинаміка. – 2017. – № 2. – С. 70–76.
 9. Jianpeng He, Steve Dixon, Samuel Hill, Ke Xu. A New Electromagnetic Acoustic Transducer Design for Generating and Receiving S0 Lamb Waves in Ferromagnetic Steel Plate. *Sensors*, 2017, vol. 17(5), pp. 10–23. <https://doi.org/10.3390/s17051023>
 10. Suchkov G.M., Taranenko Yu.K., Khomyak Yu.V. A Non-Contact Multifunctional Ultrasonic Transducer for Measurements and Non-Destructive Testing // Measurement Techniques, 2016, №12, Volume 59, Issue 9, pp 990–993. DOI:10.1007/s11018-016-1081-3
 11. Boughedda H., Hacib T., Chelabi M., Acikgoz H., Le Bihan Y. Electromagnetic Acoustic Transducer for cracks detection in conductive material. 2015. 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE). Pages: 1–4. DOI:10.1109/INTEE.2015.7416717.
 12. Сучков Г.М., Ноздрачова К.Л., Хащина С.В., Глоба С.М. Спосіб ультразвукового контролю виробів широкосмуговим електромагнітним перетворювачем. Патент на корисну модель № 71700, G01N29/04. Зявл. 28.12.2011 №u2011 15525, опубл. Бюл №14. 25.07.2012.
 13. Сучков Г.М. Розвиток теорії і практики створення приладів для електромагнітно-акустичного контролю металовиробів: автореф. дис. докт. техн. наук. Харків: НТУ “ХПІ”. 2005. 521 с.
 14. Сучков Г.М., Донченко А.В. Удосконалення електромагнітно-акустичних перетворювачів для ультразвукового контролю якості феромагнітних металовиробів. Тези доповіді Міжнародної наукової інтернет-конференції «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 74). 6–7 лютого 2023 р., м. Тернопіль – м. Переворськ (Польща).
 15. G. M. Suchkov, V.F. Bolyukh, A.I. Kocherga, R.P. Mygushchenko, O. Yu. Kropachek, Increasing the efficiency of the surface-mounted ultrasonic electromagnetic-acoustic transducer due to the magnetic field source. Технічна електродинаміка. № 2, 2023, с. 3–8. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2023.02.003>
 16. Salam Bussi, Suchkov G., Mygushchenko R., Kropachek O., Plesnetsov S. Electromagnetic-acoustic transducers for ultrasonic measurements, testing and diagnostics of ferromagnetic metal products // Ukrainian Metrological Journal, 2019, No.4, pp. 41–49. <https://doi.org/10.24027/2306-7039.4.2019.195956>
 17. www.ultracon-service.com.ua
 18. <https://cpdk.com.ua/service/ultrazvukovij-kontrol>
 19. Укрінтех <https://ukrintech.com.ua/ultrazvukovij-kontrol>
 20. ТОВ «ХІМЛАБОРРЕАКТИВ»
<https://industry.hlr.ua/node/structtest/ultrasonic-flaw-detection/ultrasonic-phased-array-method/>
 21. Olympus Ukraine <https://www.olympus.ua>
 22. <https://sonatest.com/>
 23. <https://www.hitachienergy.com/about-us/company-profile/country-and-regional-information/ukraine>

References (transliterated)

1. Tsapenko V. K., Kuts Yu. V. Osnovy ultrazvukovoho neruivnogo kontroliu: pidruchnyk. Kyiv, 2010. 448 p.
2. Karpash M.O., Rybitskyi I.V., Koturbash T.T., Bondarenko O.H., Karpash O.M. Akustychnyi kontrol konstruktсии ta ustatkuvannia u naftohazovii haluzi. Monohrafiia. – Vydavnytstvo: IFNTUNH, 2012. – 420 p.
3. Liutak Z.P., Liutak I.Z. Tekhnolohiia akustychnoho kontroliu naftohazovoho obladnannia. Vydavnytstvo: IFNTUNH, 2015. 417 p.
4. Desiatnichenko O. V. Elektromahnitno-akustychnyi tovshchynomir dlia kontroliu metalovyrobiv z dielektrychnymy pokryttiamy: dys. kand. tekhn. nauk: 05.11.13. Kharkiv, 2015. 172 p.
5. Liang, C.–H. Inequality condition for grating lobes of planar phased array / C.–H. Liang, L. Li, X.–J. Dang // Progress In Electromagnetics Research B. – 2008. – Vol. 4. – P. 101–113.
6. Vandzhura, A. R., Lysenko Yu. Yu. Avtomatyzovanyi ultrazvukoviy kontrol reiok. XVIII Naukovo-praktychna konferentsiia studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh “Efektyvnist ta avtomatyzatsiia inzhenernykh rishen u prylobuduvanni”, 06-07 hrudnia 2022 r, m. Kyiv, Ukraina: zbirnyk prats konferentsii. – Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2022. – P. 202-205.
7. Plesnetsov S.Iu. Rozvytok metodiv ta zasobiv dlia elektromahnitno-akustychnoho kontroliu stryzhnevyykh, trubchastykh ta lystovyykh metalovyrobiv: avtoref. dys. d-ra tekhn. nauk. Kharkiv, 2021. 40 p.
8. Myhushchenko R.P., Suchkov H.M., Petryshchev O.M., Boliukh V.F., Plesnetsov S.Iu., Kocherha A.I. Informatsiinovymiriuvalni elektromekhanichni peretvoriuvachi dlia otsinky yakosti poverkhni feromahnitnykh metalovyrobiv ultrazvukovymy khvyliamy Releia // Tekhnichna elektrodynamika. – 2017. – № 2. – P. 70–76.
9. Jianpeng He, Steve Dixon, Samuel Hill, Ke Xu. A New Electromagnetic Acoustic Transducer Design for Generating and Receiving S0 Lamb Waves in Ferromagnetic Steel Plate. *Sensors*, 2017, vol. 17(5), pp. 10–23. <https://doi.org/10.3390/s17051023>
10. Suchkov G.M., Taranenko Yu.K., Khomyak Yu.V. A Non-Contact Multifunctional Ultrasonic Transducer for Measurements and Non-Destructive Testing // Measurement Techniques, 2016, №12, Volume 59, Issue 9, pp 990–993. DOI:10.1007/s11018-016-1081-3
11. Boughedda H., Hacib T., Chelabi M., Acikgoz H., Le Bihan

- Y. Electromagnetic Acoustic Transducer for cracks detection in conductive material. 2015. 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE). Pages: 1–4. DOI:10.1109/INTEE.2015.7416717.
12. Suchkov H.M., Nozdrachova K.L., Khashchyna S.V., Hloba S.M. Spisob ultrazvukovoho kontroliu vyrobiv shyrokosmuhovym elektromahnitnym peretvoriuvachem. Patent na korysnu model № 71700, G01N29/04. Zjavl. 28.12.2011 №u2011 15525, opubl. Biul №14. 25.07.2012.
13. Suchkov H.M. Rozvytok teorii i praktyky stvorennia prykladiv dlia elektromahnitno-akustychnoho kontroliu metalovyrobiv: avtoref. dys. dokt. tekhn. nauk. Kharkiv: NTU "KhPI". 2005. 521 p.
14. Suchkov H.M., Donchenko A.V. Udoskonalennia elektromahnitno-akustychnykh peretvoriuvachiv dlia ultrazvukovoho kontroliu yakosti feromahnitnykh metalovyrobiv. Tezy dopovidi Mizhnarodnoi naukovoï internet- konferentsii «Informatsiine suspilstvo: tekhnolohichni, ekonomichni ta tekhnichni aspekty stanovlennia (vypusk 74). 6–7 liutoho 2023 r., m. Ternopil – m. Perevorsk (Polshcha).
15. G. M. Suchkov, V.F. Bolyukh, A.I. Kocherga, R. P. Mygushchenko, O. Yu. Kropachek, Increasing the efficiency of the surface-mounted ultrasonic electromagnetic-acoustic transducer due to the magnetic field source. *Tekhnichna elektrodynamika*. № 2, 2023, s. 3–8. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2023.02.003>
16. Salam Bussi, Suchkov G., Mygushchenko R., Kropachek O., Plesnetsov S. Electromagnetic-acoustic transducers for ultrasonic measurements, testing and diagnostics of ferromagnetic metal products // *Ukrainian Metrological Journal*, 2019, No.4, pp. 41–49. <https://doi.org/10.24027/2306-7039.4.2019.195956>
17. www.ultracon-service.com.ua
18. <https://cpdk.com.ua/service/ultrazvukovyj-kontrol>
19. Ukrintekh <https://ukrintekh.com.ua/ultrazvukovyj-kontrol>
20. TOV «KhIMLABORREAKTYV <https://industry.hlr.ua/nodestructtest/ultrasonic-flaw-detection/ultrasonic-phased-array-method/>
21. Olympus Ukraine <https://www.olympus.ua>
22. <https://sonatest.com/>
23. <https://www.hitachienergy.com/about-us/company-profile/country-and-regional-information/ukraine>

Відомості про авторів (About authors)

Бороденко Олексій Миколайович, аспірант, кафедра інформаційно-вимірювальних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант, м. Харків, Україна; ORCID 0009-0007-4264-1534; e-mail: borodenkoa23@gmail.com.

Borodenko Oleksii, post-graduate, Department of Information and Measurement Technologies, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, ORCID 0009-0007-4264-1534; e-mail: borodenkoa23@gmail.com.

Сучков Григорій Михайлович, доктор технічних наук, професор, кафедра інформаційно-вимірювальних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID 0000-0002-1805-0466; e-mail: hpi.suchkov@gmail.com.

Suchkov Hryhorii, Doctor of Science, Professor, Professor of the Department of Information and Measurement Technologies, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharliv, Ukraine, ORCID 0000-0002-1805-0466; e-mail: hpi.suchkov@gmail.com

Яковлев Павло Андрійович, кафедра інформаційно-вимірювальних технологій, магістр, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна.

Yakovlev Pavlo, Department of Information and Digital Technologies, Master, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Бороденко О.М., Сучков Г.М., Яковлев П.А. Діаграма спрямованості прямого суміщеного електромагнітно-акустичного перетворювача в імпульсному режимі. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2026. № 2 (28). С. 54-59. doi:10.20998/2413-4295.2026.02.07.

Please cite this article as:

Borodenko O., Suchkov H., Yakovliev P. Direction diagram of a direct combined electromagnetic-acoustic transducer in pulse mode. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2026, no. 2(28), pp. 54–59, doi:10.20998/2413-4295.2026.02.07.

Надійшла (received) 24.02.2026
Прийнята (accepted) 24.04.2026
Опублікована (published) 05.06.2026