

# Вдосконалення вимірювального ультразвукового електромагнітно-акустичного перетворювача

М.Є. Познякова, Г.М. Сучков, Р.П. Мигущенко, О.Ю. Кропачек, А.В. Донченко

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", вул. Кирпичова, 2, 61002, Харків, Україна  
poznyakova-me@ukr.net; hpi.suchkov@gmail.com; mrp1@ukr.net; kropachek@ukr.net; donchenko.a@gmail.com

## Анотація

Розглянуто ряд недоліків відомих електромагнітно-акустичних перетворювачів при вимірюванні параметрів тонких металовиробів, що полягають у недостатній чутливості та неможливості вимірювань тонких або уражених корозією листів, труб, оболонок тощо. Для їх усунення вдосконалено портативний прямий сумішений електромагнітно-акустичний перетворювач для вимірювань товщини та діагностики феромагнітних виробів через діелектричні прошарки, що дало можливість підвищити чутливість засобу та зменшити вплив перехідних процесів від зондуєчого імпульсу на результати контролю. Для перевірки можливостей розробленого перетворювача виготовлено спеціальний стенд, який включав до себе генератор потужних високочастотних імпульсів струму, підсилювач прийнятих ультразвукових імпульсів та цифровий осцилограф. Експериментально показано, що нова електронна схема безконтактного сенсора дозволяє якісно узгодити давач із генератором зондуєчих імпульсів та підсилювачем прийнятих ультразвукових пакетних сигналів. У результаті чутливість перетворювача стосовно амплітуд донних імпульсів і завад збільшилася в 2,5...3 рази, а також забезпечено діагностику металовиробів із товщинами, на 30...50% меншими, ніж при використанні традиційних приладів.

**Ключові слова:** електромагнітно-акустичний перетворювач; ультразвукові вимірювання; товщинометрія; донний імпульс; діелектричне покриття; феромагнітний металовиріб.

Отримано: 13.01.2023

Відредаговано: 24.03.2023

Схвалено до друку: 29.03.2023

## Вступ

Ультразвукові перетворювачі широко застосовуються для вимірювання товщини та інших параметрів феромагнітних виробів як у процесі виробництва, так і при їх експлуатації [1–3]. Для запобігання корозії та захисту виробів і об'єктів застосовують покриття фарбою, пластиком, керамікою тощо. Для традиційних ультразвукових перетворювачів, які потребують використання контактних рідин, наявність покриття є неприпустимою для проведення контролю. Покриття необхідно видаляти, а після проведення діагностики – відновлювати, що суттєво підносить ціну процесу проведення ультразвукового (УЗ) контролю металовиробів [3].

Останнім часом активно ведуться теоретичні дослідження та практичні розробки електромагнітно-акустичних (ЕМА) перетворювачів (ЕМАП) [4–10], які при проведенні УЗ контролю не вимагають зачищення поверхні феромагнітних виробів. Проте виникає протиріччя. З одного боку, зачищення поверхні від матеріалу покриття має бути виключено, а з іншого – збільшується відстань від ЕМАП до поверхні металу об'єкта контро-

лю (ОК), що призводить до зменшення чутливості перетворювача [11–12], а також до збільшення часу релаксації електричних коливань ("дзвону") після завершення дії потужного зондуєчого імпульсу струму у високочастотній котушці сенсора [7]. Внаслідок цього неконтрольований шар металу збільшується, а товщину тонких виробів, що уражені корозією, виміряти практично неможливо.

Для вирішення зазначеної проблеми виконуються дослідження, які спрямовані на збільшення індукції магнітного поля [4]. Проте можливості постійних магнітів щодо створення значних величин індукції на великих відстанях від ЕМАП практично вичерпані. Аналогічно вичерпані значною мірою можливості збільшення величини високочастотного пакетного струму, що живить давач [11].

На нашу думку, перспективнішим напрямом створення ЕМАП є вдосконалення високочастотних котушок індуктивності перетворювача та системи управління її живленням [6].

За результатами аналізу інформаційних джерел автори визначили мету досліджень та розробки:

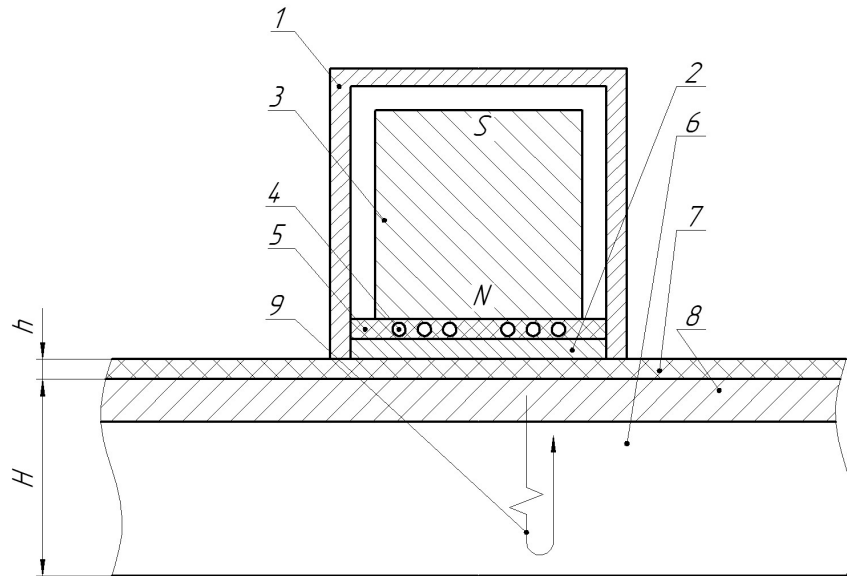


Рис. 1. Спрощене зображення конструкції ЕМА перетворювача

- забезпечення ЕМА контролю металовиробів та об'єктів із невеликою товщиною металу;
- збільшення чутливості ЕМАП при контролі та вимірюванні характеристик матеріалу феромагнітних виробів.

#### Удосконалення ЕМАП

Розроблений ЕМА перетворювач побудовано за традиційною схемою [4], спрощену конструкцію якого показано на рис. 1.

ЕМАП містить корпус 1, протектор 2, потужний постійний магніт 3 на основі кераміки NeFeB. Плоска маловиткова високочастотна котушка індуктивності 4, що вбудована в основі 5, розташована під одним із полюсів магніту 3, містить джгут з  $n$  ізольованих між собою провідників однакової довжини і з'єднаних паралельно. На рис. 1 показані об'єкт контролю (ОК) 6 товщиною  $H$ , на поверхню якого нанесено діелектричне покриття 7 товщиною  $h$ . Позицією 8 показано шар металу, що може не контролюватися

за наявності “дзвону”, а позицією 9 – напрямки розповсюдження ультразвукових хвиль. У корпусі 1 також розміщено електронний блок управління роботою ЕМАП (діоди, конденсатори та ін. – на рис. 1 не показані).

Для досягнення поставленої мети автори виготовили плоску маловиткову високочастотну котушку індуктивності 4 перетворювача з  $n$  тонких провідників однакової довжини, а електронний блок управління – відповідно до рис. 2.

На рис. 2 показано:  $a$  – вхід блоку для подання високочастотних імпульсів струму  $I_1$  від потужного генератора високочастотних зондуючих імпульсів (ГЗІ) (на рисунку не показаний) та імпульсу управління  $I_2$ ;  $D_1, D_2$  та  $D_3$  – діодні ключі;  $C_1$  та  $C_2$  – конденсатори;  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$  і  $R_7$  – резистори;  $L$  – джгут з  $n$  тонких ізольованих між собою провідників однакової довжини;  $D_4$  та  $D_5$  – діоди;  $T_1$  та  $T_2$  – тиристори;  $P$  – електронний ключ;  $b$  – вихід ЕМА перетворювача на підсилювач прийнятих відбитих з об'єму ОК сигналів.

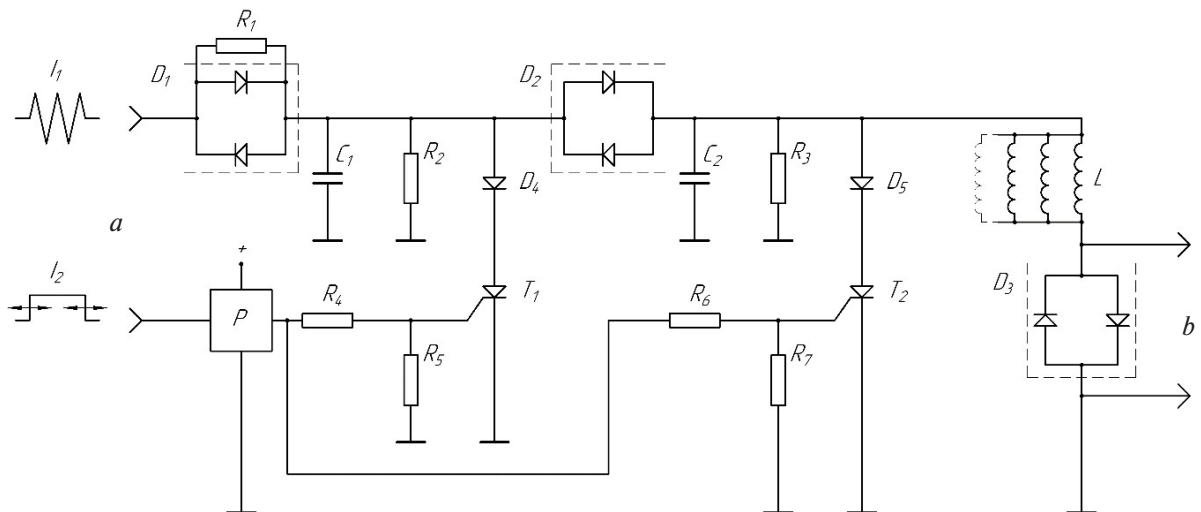


Рис. 2. Електронна схема ЕМАП

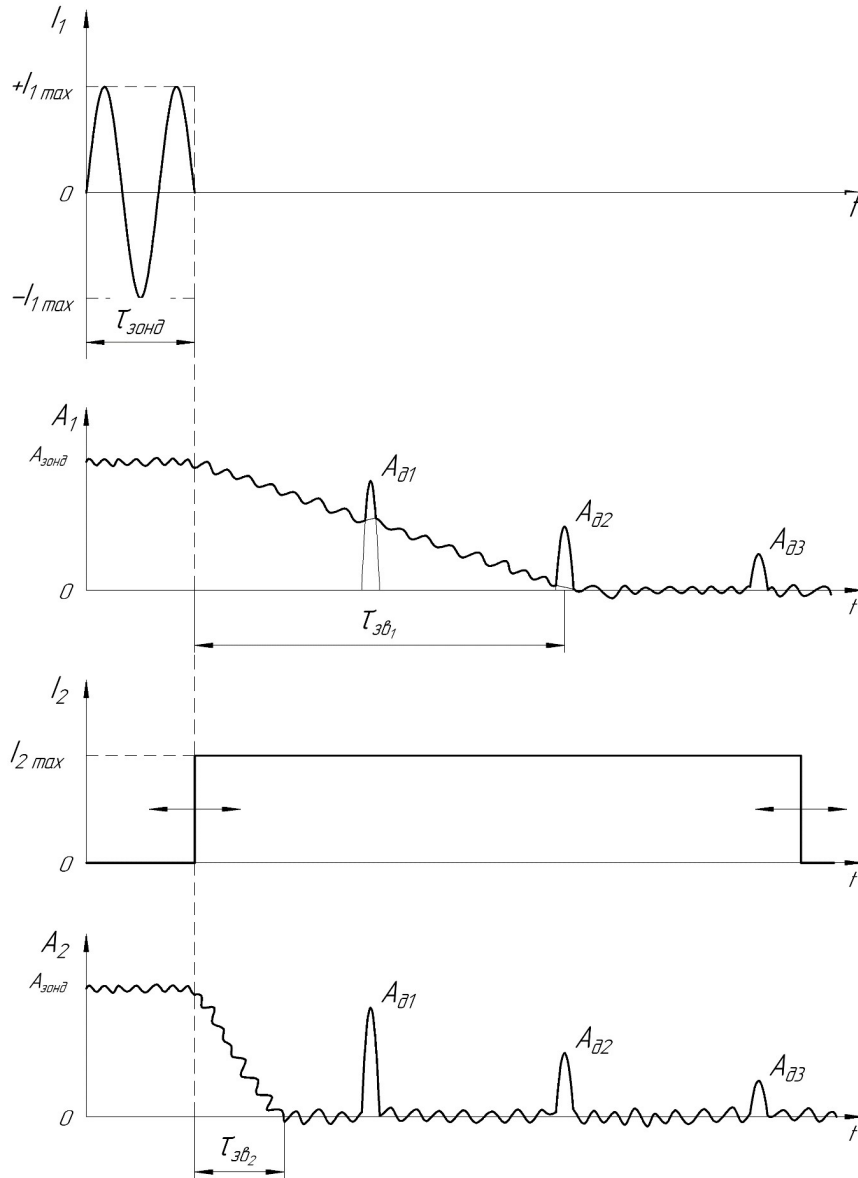


Рис. 3. Схематичні часові розгортки роботи ЕМАП

Методика використання вдосконаленого ЕМА перетворювача реалізується таким чином (рис. 2): на вхід електричної схеми ЕМАП подається потужний високочастотний імпульс  $I_1$ , наприклад, за допомогою ГЗІ, наведеного в статті [11], у вигляді пакета з заповнення кількома періодами високої частоти, що задана нормативно-технічною документацією, і часовою тривалістю, яка залежить від кількості періодів та частоти збуджуваних ультразвукових коливань. Імпульсні діодні ключі  $D_1$ ,  $D_2$  та  $D_3$  під дією високої напруги відкриваються. Утворюється резонансний контур із ланцюжка: вихідні параметри ГЗІ,  $L$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  та загальний провід. У котушці індуктивності  $L$  формується потужний пакетний високочастотний імпульс струму  $\pm I_{1max}$  тривалістю зондування  $\tau_{зонд}$  (рис. 3).

Після завершення часу дії зондуючого імпульсу струм у котушці індуктивності  $L$  миттєво не зникає, а поступово зменшується. В результаті

збуджуючий імпульс збільшується на час  $\tau_{зв.1}$  (“дзвін”). Сумарний час дії імпульсу струму  $I_1$  (рис. 3) в котушці індуктивності  $L$  становить  $\tau_{зонд} + \tau_{зв.1}$ , під час дії якого прийняти з ОК корисний сигнал неможливо. Виникає неконтрольована зона 8 (рис. 1) поверхневого шару ОК 6. Окрім того, неможливо вимірювати малу товщину металу або кородованої ділянки ОК за першим відбитим з виробу імпульсом  $A_{d1}$  (рис. 3), наприклад, труб, листів тощо.

Для зменшення часу “дзвону”  $\tau_{зв.1}$  від  $A_{зонд}$  після завершення дії зондуючого імпульсу  $\tau_{зонд}$  на вхід  $P$  – електронного ключа подається імпульс  $I_2$ , з виходу якого через резистори  $R_4$  і  $R_6$  вмикаються тиристори  $T_1$  і  $T_2$ . Регулювання часу початку дії імпульсу  $I_2$  потрібне, оскільки він залежить від кількості періодів і частоти збуджуваних ультразвукових коливань у складі  $\tau_{зонд}$  до величини, що забезпечує закриття діодних ключів  $D_1$ ,  $D_2$  і  $D_3$  з урахуванням додаткового заглушення

“дзвону”, що забезпечується резисторами  $R_2$ ,  $R_3$ . Після закриття діодних ключів  $D_1$ ,  $D_2$  та  $D_3$  амплітуда “дзвону”, що дорівнює падінню напруги на ланцюжку  $T_1$  і  $D_4$ , додатково пригнічується ланцюжком: вихідні параметри ГЗІ,  $R_1$ ,  $C_1$ ,  $R_2$  та загальний провід. Другий контур додаткового заглушення “дзвону” утворюється такими елементами:  $C_2$ ,  $R_3$ ,  $L$ , вхід підсилювача прийнятих імпульсів, що підключається до виходу  $b$  ЕМАП, та загальний провід. Тривалість  $\tau_{зв.1}$  зменшується до величини  $\tau_{зв.2}$  (рис. 3), що приводить до можливості вимірювати товщину тонших металовиробів за рахунок прийому близько розташованих за часом імпульсів  $A_{01}$ ,  $A_{02}$ ,  $A_{03}$  і наступних.

В окремому приймальному контурі, утвореному ланцюжком  $C_2$ ,  $R_3$ ,  $L$  і вхідними параметрами підсилювача прийнятих донних імпульсів  $A_{01}$ ,  $A_{02}$  і  $A_{03}$ , і загальним провідником, додатково пригнічуються компоненти імпульсів “дзвону” малої амплітуди  $\tau_{зв.1}$  за допомогою резистора  $R_3$ . В результаті тривалість імпульсів “дзвону”  $\tau_{зв.2}$  стає суттєво меншою, ніж тривалість імпульсів “дзвону”  $\tau_{зв.1}$ . Прийняті імпульси  $A_{01}$ ,  $A_{02}$  і  $A_{03}$  (рис. 3), які раніше, за інших рівних умов, перекривалися імпульсом “дзвону”  $\tau_{зв.1}$ , стають доступними для вимірювання, наприклад, товщини тонших виробів за відомою формулою [1]  $H = Ct/2$ , де  $H$  – товщина ОК;  $C$  – швидкість поширення зсувних ультразвукових коливань у матеріалі контрольованого виробу;  $t$  – проміжок часу між прийомом двох сусідніх донних імпульсів.

Додатково забезпечити діагностику тонших ОК або кородованих ділянок можливо за рахунок зменшення тривалості  $\tau_{зв.1}$  від 10 до 1 періоду частоти заповнення пакетного імпульсу, а також збільшуючи частоту струму живлення ЕМАП, що дозволяє здійснювати, наприклад, пристрій, наведений у публікації [11]. При цьому відповідно сумарна тривалість  $\tau_{зонд} + \tau_{зв.2}$  суттєво зменшується.

Утворення двох окремих контурів при збудженні ультразвукових імпульсів і прийому відбитих з ОК імпульсів  $A_{01}$ ,  $A_{02}$  і  $A_{03}$  дозволяє за допомогою конденсаторів  $C_1$  і  $C_2$  точно встановити частоти ЕМАП при збудженні та прийомі корисних імпульсів однаковими, що підвищує чутливість перетворювача.

Слід зазначити, що при використанні традиційних п'єзоелектричних перетворювачів із контактною рідиною вимірювати товщину ОК при діелектричному покритті, що відшарувалося, неможливо. На роботу ЕМА перетворювача не впливає наявність на поверхні металу ділянок діелектричного покриття, що відшарувалося.

Для встановлення можливостей розробленого ЕМАП було виготовлено дослідний стенд, який дає можливість проводити діагностику ОК в діапазоні частот 2...5 МГц імпульсами ультразвукових зсувних коливань із тривалістю 1...10 періодів частоти

заповнення. Частота перетворювача змінювалася шляхом регулювання ємності конденсаторів  $C_1$  та  $C_2$  (рис. 2). Плоску котушку індуктивності давача було виготовлено з 6 витків джгутом, що містить 80 ізольованих між собою мідних провідників діаметром 0,08 мм однакової довжини, що дозволяє більш точно встановлювати частоти збуджених та прийнятих УЗ коливань. Робоча зона плоскої котушки індуктивності з лінійною частиною провідників становила  $30 \times 12$  мм<sup>2</sup>.

При дослідженнях були використані зразки із загартованих та незагартованих феромагнітних сталей ст.0, ст.10, ст.20, ст.45, 09Г2С та вуглецева сталь У7 із широким діапазоном електромагнітних характеристик: відносна магнітна проникність 100...200 одиниць, питома електрична провідність 4...7,6 МСм/м. Як діелектричне покриття використовували прокладки зі склотекстоліту товщинами 1,5...20 мм. Такий вибір діапазону товщин прокладок обґрунтований тим, що зазвичай в умовах експлуатації ОК покриваються фарбою шаром товщиною до 2...3 мм. Товщина пластикових покриттів досягає 5 мм, а діелектричних нашарувань у трубах – до 20 мм.

#### Обладнання, методика проведення експериментальних досліджень та результати

Дослідження виконані на спеціальному стенді, що містить генератор височастотних зондувальних імпульсів [11], що живить ЕМАП, з регулятором частоти імпульсів та їх тривалості; генератор імпульсів  $I_{2max}$  заглушення “дзвону”  $\tau_{зв.1}$ , який синхронізований із ГЗІ та цифровим осцилографом і вмикається автоматично після вимкнення зондуючого імпульсу  $\tau_{зонд}$ ; смуговий попередній підсилювач прийнятих корисних імпульсів, з'єднаний із цифровим осцилографом. Частотна смуга попереднього підсилювача прийнятих сигналів знаходилася в інтервалі 0,5...13 МГц.

На першому етапі досліджено параметри ЕМАП, що визначають його працездатність. Методика виконання дослідження була такою. На зразку з товщиною, виміряною штангенциркулем, розміщувалася діелектрична прокладка заданої товщини, на яку встановлювався перетворювач ЕМА. Регулювалася частота струму живлення давача до отримання максимального значення амплітуди першого прийнятого імпульсу та мінімального “дзвону”. Якщо “дзвін” перекривав перший донний імпульс, то зменшували тривалість зондуючого імпульсу. Якщо і в цьому випадку перший донний імпульс не відокремлювався від зондуючого, то збільшували частоту струму живлення до отримання позитивного результату і повторювали операції з регулюванням частоти струму живлення та тривалості зондуючого імпульсу. Ці операції потрібні, оскільки іноді неможливо



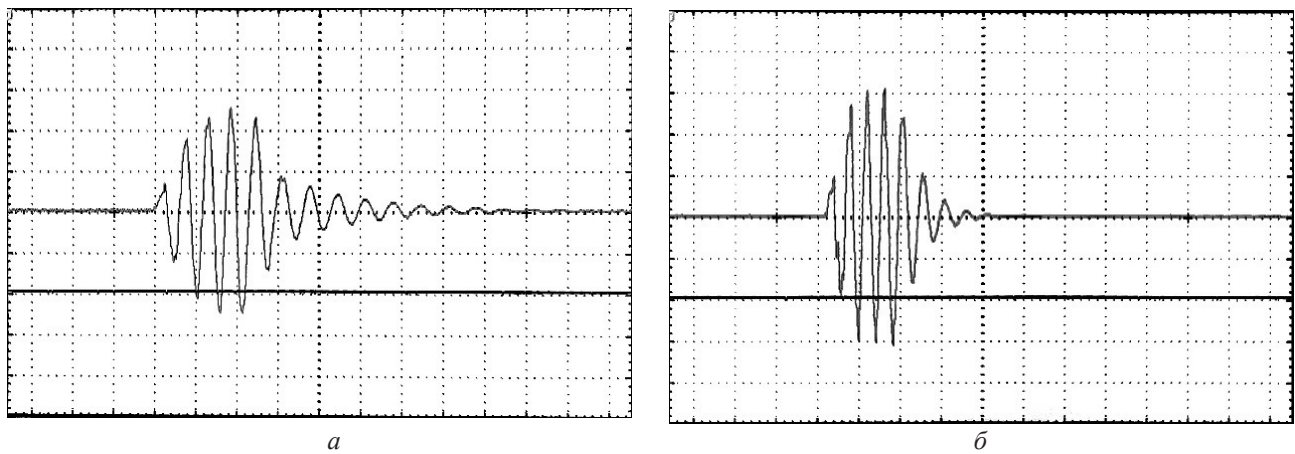


Рис. 4. Експериментальні часові розгортки зонduючих імпульсів напруги живлення ЕМАП на екрані осцилографа

отримати навіть другий та наступні донні імпульси через значне ослаблення ультразвукових коливань, обумовлене корозією металу, чи в композитних матеріалах. Відбиті від дефектів імпульси тим більше не можуть бути зафіксованими, бо вони приймаються раніше, ніж перший донний сигнал.

Якщо матеріал тонкого ОК акустично прозорий, але перший або наступний донні імпульси перекриваються “дзвоном” після виконання вищенаведених операцій, то діагностику виробу доцільно виконувати за наступними донними імпульсами, що відокремлюються від зонduючого сигналу.

Результативність використаних нових технічних рішень підтверджується експериментальними даними, наведеними на рис. 4, де показані часові розгортки, отримані при використанні традиційним ЕМАП (а) та удосконаленим перетворювачем (б).

Аналіз даних, наведених на рис. 4, показує, що часова тривалість зонduючих імпульсів, збуджених удосконаленим ЕМА перетворювачем, менша на 30%, ніж тривалість зонduючих імпульсів традиційного сенсора. В результаті розроблений перетворювач дає можливість діагностувати

ультразвуковими імпульсами більш тонкі металовироби.

Окрім вищенаведеного, новий ЕМАП має більшу чутливість до ультразвукових імпульсів, що відбиті з об’єму металовиробу. Це підтверджується експериментальними даними на рис. 5 для традиційного (а) і розробленого (б) перетворювачів. На рис. 5 позначено: 1 – зонduючий імпульс; донні імпульси  $A_{01}$ ,  $A_{02}$ ,  $A_{03}$  та наступні, що відбиті від протилежної сторони листового зразка зі сталі 09Г2С товщиною 15 мм. Експерименти виконані з використанням ультразвукових імпульсів частотою 2...2,2 МГц часовою тривалістю 4 періоди частоти заповнення пакета. Товщина діелектричного прошарку становила 15,7 мм.

Аналіз даних, наведених на рис. 5, дає можливість зробити такі висновки. Часова тривалість традиційного ЕМА сенсора приблизно на 30...50% довша, ніж тривалість розробленого ЕМАП. Амплітуда першого і наступних донних імпульсів у 2,5...3 рази більша для нового перетворювача, що свідчить про суттєве підвищення чутливості ультразвукового контролю за амплітудною ознакою.

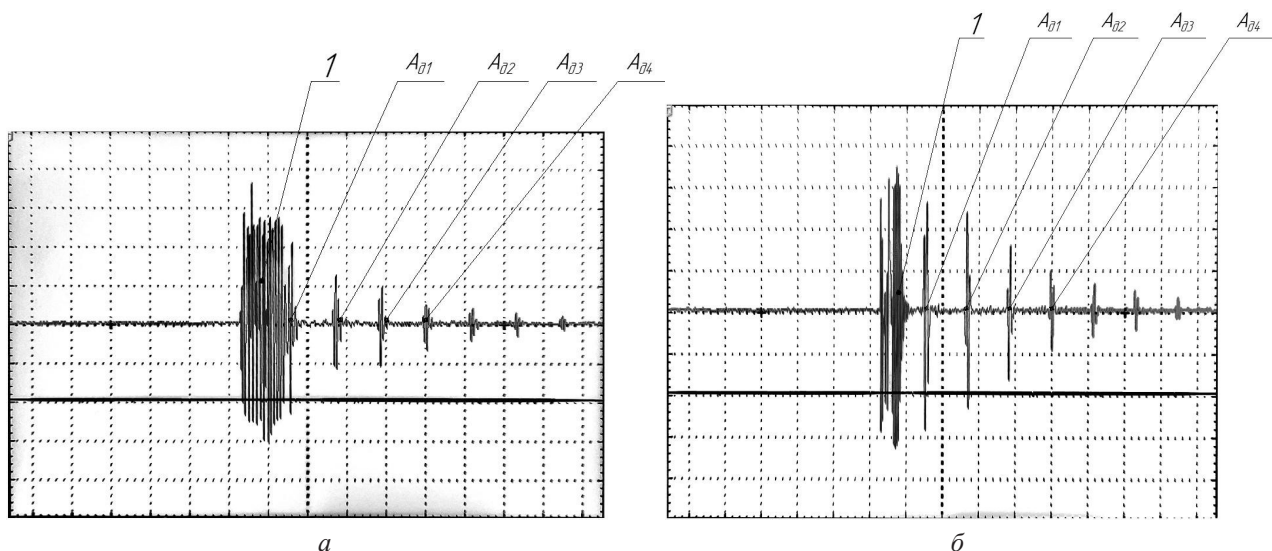


Рис. 5. Експериментальні часові розгортки, що отримані з допомогою розробленого стенда для традиційного і удосконаленого ЕМАП

## Висновки

Удосконалено портативний накладний прямий суміщений ультразвуковий електромагнітно-акустичний перетворювач для вимірювань, контролю та діагностики феромагнітних виробів через діелектричні прошарки, який дозволяє проводити контроль якості при повітря-

них зазорах або діелектричних покриттях та осадженнях товщиною до 15...20 мм. На 30...50% зменшено неконтрольовану приповерхневу зону металу. В 2,5...3 рази підвищено чутливість ультразвукового сенсора при використанні амплітудного методу оцінки якості виробу.

# Improvement of the measuring ultrasonic electromagnetic-acoustic transducer

M. Pozniakova, G. Suchkov, R. Mygushchenko, O. Kropachek, A. Donchenko

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kirpichova Str., 2, 61002, Kharkiv, Ukraine  
poznyakova-me@ukr.net; hpi.suchkov@gmail.com; mmp1@ukr.net; kropachek@ukr.net; donchenko.a@gmail.com

## Abstract

Based on the analysis of previously published research and studies, it has been established that despite their significant advantages over traditional "contact" sensors in measurements, testing and diagnostics of thin dielectric coated (via paint, plastic, etc.) metal products, the available electromagnetic-acoustic transducers provide insufficient sensitivity and significant uncontrolled ("dead") zone. This situation complicates testing of thin sheets, pipes, shells, tanks etc., and sometimes makes it impossible to measure the remaining thickness of the metal.

The analysis of available research has shown that the possibility of transducers sensitivity increases via traditional increase in the magnetic induction value, and the high-frequency current value is practically exhausted. At the same time, the prospects for improving the design of electromagnetic-acoustic transducers were determined. The problems of traditional transducers were solved through development of a new electronic control circuit. For this, the control unit was designed to be distributed between ultrasonic shear pulse excitation devices, and as a result, for the device of ultrasonic signals reflected from the metalwork reception, the device sensitivity was increased. In addition, to provide the possibility to test and measure thin metal product thickness, the electronic circuit was supplemented with means of interference suppression after the powerful supply of the high-frequency current of the converter, which allowed significantly reducing the "dead" zone.

A special stand was constructed to experimentally test the capabilities of the transducer developed, including a powerful high-frequency current pulse generator, an amplifier of received ultrasonic pulses and a digital oscilloscope. It has been experimentally demonstrated that the new electronic circuit of the non-contact sensor allows it to be qualitatively matched with the probing pulse generator and the amplifier of the received ultrasonic packet signals. As a result, the sensitivity of the transducer was increased by 2.5...3 times in relation to the amplitudes of bottom pulses and interference. At the same time, the diagnostics of metal products with thickness 30...50% less than the traditional sensitivity threshold of non-contact device is ensured.

**Keywords:** electromagnetic-acoustic transducer; ultrasonic measurements; thickness gauging; bottom pulse; dielectric coating; ferromagnetic metal product.

## Список літератури

1. Троицкий В.А. Технология и оборудование неразрушающего контроля качества. Введение в профессию. Киев: Интерсервис, 2021. 182 с.
2. Hirao M., Ogi H., Yasui H. Contactless measurement of bolt axial stress using a shear-wave electromagnetic acoustic transducer. *NDT & E International*, 2001, vol. 34, issue 3, pp. 179–183. [https://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695\(00\)00055-4](https://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695(00)00055-4)
3. Blitz J., Simpson G. *Ultrasonic Methods of Non-Destructive Testing*. Springer-Verlag New York, 1991, LLC. ISBN 978-0-412-60470-6
4. Плеснецов С.Ю. Развитие методов та засобів для електромагнітно-акустичного контролю стрижневих, трубчастих та листових металовиробів: автореф. дис. д-ра техн. наук. Харків, 2021. 40 с.
5. 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>
- Сучков Г.М., Болюх В.Ф., Кочерга А.І., Мигущенко Р.П., Кропачек О.Ю. Підвищення ефективності накладного ультразвукового електромагнітно-акустичного перетворювача за рахунок джерела магнітного поля. *Технічна електродинаміка*. 2023. № 2. С. 3–8. <https://doi.org/10.15407/techned2023.02.003>
  - Десятніченко О.В. Електромагнітно-акустичний товщиномір для контролю металовиробів з діелектричними покриттями: дис. канд. техн. наук. Харків: НТУ “ХПІ”, 2015. 172 с.
  - 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>
  - Innerspec. URL: [www.innerspec.com/portable/emat-sensors](http://www.innerspec.com/portable/emat-sensors)
  - Nordinkraft. The quality guard. URL: [www.nordinkraft.de](http://www.nordinkraft.de)
  - Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Десятніченко А.В. Теорія і практика електромагнітно-акустичного контролю. Ч.5. Особливості конструювання і практичного застосування ЕМА пристроїв ультразвукового контролю металоприладів: монографія. 2016. 230 с.
  - Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Плеснецов С.Ю. Чувствителність ультразвукового контролю ЕМА способом при виявленні естественних внутрешніх дефектів металоприладів. Возможности толщинометрии (Обзор ч. 3). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2019. № 2. С. 51–57. <https://dx.doi.org/10.15407/tdnk2019.02.08>
- avtoref. dys. d-ra tekhn. nauk [Development of methods and tools of electromagnetic-acoustic testing of rod-shape, pipe-shaped and sheet metal products: abstr. d-r tech. sci. diss.]. Kharkiv, 2021. 40 p. (in Ukrainian).
- 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>
  - Suchkov H.M., Boliukh V.F., Kocherha A.I., Myhushchenko R.P., Kropachek O.Iu. Pidvyshchennia efektyvnosti nakladnoho ultrazvukovoho elektromahnitno-akustychnoho peretvoriuvacha za rakhunok dzherela mahnitnoho polia [Increasing the efficiency of the overhead ultrasonic electromagnetic-acoustic transducer due to the source of the magnetic field]. *Technical electrodynamics*, 2023, no. 2, pp. 3–8 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15407/techned2023.02.003>
  - Desiatnichenko O.V. Elektromahnitno-akustychnyi tovshchynomir dlia kontroliu metalovyrobiv z dielektrychnymy pokryttiamy: dys. kand. tekhn. nauk [Electromagnetic-acoustic thickness gauge for dielectric-coated metal product thickness gauging: cand. tech. sci. diss.]. Kharkiv, 2015. 172 p. (in Ukrainian).
  - 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>
  - Innerspec. Available at: [www.innerspec.com/portable/emat-sensors](http://www.innerspec.com/portable/emat-sensors)
  - Nordinkraft. The quality guard. Available at: [www.nordinkraft.de](http://www.nordinkraft.de)
  - Migushenko R.P., Suchkov G.M., Petrishev O.N., Desyatnichenko A.V. Teoriya i praktika elektromahnitno-akusticheskogo kontrolya. Ch.5. Osobennosti konstruirovaniya i prakticheskogo primeneniya EMA ustrojstv ultrazvukovogo kontrolya metallozdelij: Monografiya [Theory and practice of electromagnetic-acoustic control. Part 5. Design features and practical application of EMA devices for ultrasonic testing of metal products. Monograph]. 2016. 230 p.
  - Suchkov G.M., Petrishchev O.N., Plesnetsov S.Yu. Chuvstvitelnost ultrazvukovogo kontrolya EMA sposobom pri vyiyavlenii estestvennyih vnutrennih defektov metallozdeliy. Vozmozhnosti tolschinometrii (Obzor ch. 3) [Sensitivity of ultrasonic testing by electromagneto-acoustic technique at detection of natural internal defects of metal products. Possibilities of thickness measurement (Review p. 3)]. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, 2019, no. 2, pp. 51–57. <https://dx.doi.org/10.15407/tdnk2019.02.08>

## References

- Troitskiy V.A. Tehnologii i oborudovanie nerazrushayushogo kontrolya kachestva. Vvedenie v professiyu [Technologies and equipment for non-destructive quality testing. Introduction to the profession]. Kyiv, Interservice Publ., 2021. 182 p.
- Hirao M., Ogi H., Yasui H. Contactless measurement of bolt axial stress using a shear-wave electromagnetic acoustic transducer. *NDT & E International*, 2001, vol. 34, issue 3, pp. 179–183. [https://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695\(00\)00055-4](https://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695(00)00055-4)
- Blitz J., Simpson G. Ultrasonic Methods of Non-Destructive Testing. Springer-Verlag New York, 1991, LLC. ISBN 978-0-412-60470-6.
- Plesnetsov S.Yu. Rozvytok metodiv ta zasobiv dlia elektromahnitno-akustychnoho kontroliu stryzhnevnykh, trubchastykh ta lystovykh metalovyrobiv: