



УДК 658.562:620.179.16:620.179.17

Дослідження та розробка методу і засобу ультразвукового контролю феромагнітних виробів із підвищеною чутливістю

**Г.М. Сучков, Р.П. Мигущенко, О.Ю. Кропачек, М.Е. Кальницький,
Ю.Ю. Кошкарів, О.Г. Бобров**

*Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", вул. Кирпичова, 2, 61002, Харків, Україна
hpi.suchkov@gmail.com; mrp1@ukr.net; kropachek@ukr.net; kalnytsky94@gmail.com; bag18041966@gmail.com*

Анотація

Сучасні вимоги до якості металовиробів значною мірою забезпечуються методами неруйнівного контролю, серед яких провідним є ультразвуковий. Одним із перспективних ультразвукових методів оцінки якості є електромагнітно-акустичний (ЕМА), оскільки він не вимагає спеціальної підготовки поверхні об'єкта контролю (ОК) і не використовує контактну рідину, має високу продуктивність контролю. Проте вважається, що ЕМА метод має низьку чутливість. Частина фахівців вважає можливим підвищити чутливість ЕМА методу за рахунок використання імпульсного намагнічування ОК. Однак комплексного підходу щодо вирішення технічного і технологічного завдань у відомих публікаціях не виявлено. Тому авторами статті виконано актуальні дослідження та аналіз сучасних інформаційних джерел, у яких фрагментарно розглянуто деякі рішення з розробки методів і засобів для вимірювання, контролю та діагностики з застосуванням ультразвукових електромагнітно-акустичних перетворювачів (ЕМАП) з імпульсним намагнічуванням, які потенційно дають можливість підвищити чутливість ЕМАП за рахунок збільшення відношення амплітуди ультразвукового корисного сигналу до шуму. За результатами аналізу розроблено ЕМА метод неруйнівного ультразвукового контролю, який визначає операції, параметри та послідовність їх виконання при імпульсному намагнічуванні ОК. Визначено необхідність встановлення раціональних значень відносних часових положень імпульсів намагнічування та коротких високочастотних імпульсів живлення котушки індуктивності ЕМАП, що дає можливість суттєво (до 40%) підвищити ефективність перетворювача при оцінці якості виробів із феромагнітних матеріалів.

Для дослідження можливостей нового ЕМА методу виготовлено спеціальний засіб, який включав ЕМАП, генератор потужних високочастотних імпульсів струму, генератор потужних імпульсів струму намагнічування, підсилювач прийнятих ультразвукових імпульсів, параметри яких можливо регулювати в широких діапазонах, та цифровий двопроменевий осцилограф. За допомогою засобу експериментально показано, що використання нового ЕМА методу та засобу, що його реалізує, збільшує відношення амплітуд прийнятого ультразвукового сигналу та шуму по відношенню до використання традиційних ЕМАП перетворювачів на постійних магнітах.

Ключові слова: дослідження; метод контролю; ЕМАП; магнітне поле; імпульсний магніт; ультразвуковий; чутливість; вимірювання; контроль; феромагнітний.

Отримано: 21.03.2025

Відредаговано: 05.05.2025

Схвалено до друку: 08.05.2025

Вступ. Дослідження результатів інформаційних джерел за напрямком статті

Якість металовиробів, як у процесі виробництва, так і при їх експлуатації, значною мірою забезпечується шляхом використання методів неруйнівного контролю, серед яких найбільш поширеним є ультразвуковий [1–3]. Традиційний ультразвуковий контроль (УЗК) ви-

магає використання контактної рідини, зачистки поверхні металовиробу від бруду та захисних покриттів, а за наявності кривизни поверхні ультразвукові перетворювачі необхідно притирати, що призводить до значних матеріальних витрат [2].

На сьогодні розроблені та використовуються для вимірювань, дефектоскопії та діагностики ультразвукові електромагнітно-акустичні пере-

творювачі [4–8], які не мають недоліків, характерних для традиційних методів УЗК. Для забезпечення достатньої чутливості УЗК в ЕМАП використовують потужні джерела магнітного поля [2, 4, 6–9], що може призводити до пошкодження ЕМА перетворювачів при контролі феромагнітних металовиробів через сильне притягання та виникнення завад значної амплітуди від налипання на магніт окалини і металевих частинок.

Ряд фахівців у галузі ультразвукового контролю пропонують розв'язати вищенаведені проблеми ЕМА перетворювачів шляхом використання імпульсних джерел магнітного поля в складі ЕМАП [10–15]. Проте дані, що наведені у вказаних роботах, мають суттєві протиріччя. Так, у роботах [10–11] авторка стверджує, що кількість витків котушки намагнічування повинна дорівнювати трьом, а в статті [12] – тридцяти. У роботі [10] не передбачено запізнення високочастотного імпульсу щодо початку намагнічувального імпульсу, а в патенті [13] вказано, що така операція повинна бути. Для забезпечення температурного режиму ЕМАП імпульс намагнічування необхідно виключати примусово [11], а згідно з [12] імпульс намагнічування триває до повного розряду конденсаторів живлення. У статті [4] стверджується, що висота сердечника імпульсного магніту повинна бути суттєво більшою, ніж розмір перетину його полюса, що суперечить висновкам роботи [11]. З одної сторони, згідно з [14], тривалість імпульсу намагнічування повинна бути 400 мкс, а з другої сторони – кілька мілісекунд [12]. Автори статті [15] повідомляють, що вони в котушці імпульсного магніту створювали струм 1700 А, а в роботі [11] стверджується, що достатньо величини 600 А.

У наведених роботах динамічні процеси при збудженні та прийомі ультразвукових імпульсів у поверхневому шарі феромагнітного металовиробу не розглянуті авторами достатньою мірою, що не дає можливості розробити раціональний метод ЕМА контролю та визначити параметри засобу щодо підвищення чутливості ЕМАП. Тому дослідження у визначеному напрямку є актуальними.

Мета роботи

Підвищення чутливості ультразвукових прямих сумішених електромагнітно-акустичних перетворювачів з імпульсним намагнічуванням за рахунок збільшення відношення амплітуд корисного сигналу та шуму.

Розробка методу та засобу для ультразвукового електромагнітно-акустичного контролю феромагнітних виробів

Аналіз результатів досліджень відомих фахівців і власних праць авторів із використання імпульсних магнітів у складі ЕМАП [10–15] доз-

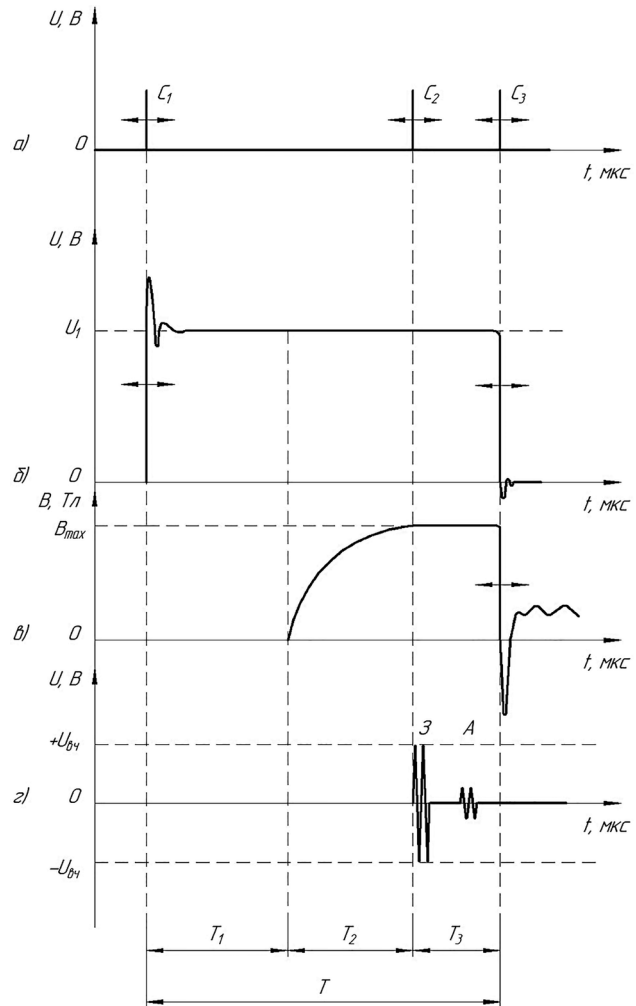


Рис. 1. Часові розгортки, які пояснюють розроблений чутливий метод УЗК феромагнітних електропровідних металовиробів

волив розробити метод УЗК з імпульсним магнітом у складі ЕМА перетворювача, суть якого пояснюється даними на рис. 1.

На рис.1 позначені:

- часова розгортка а: C_1 – синхронізуючий імпульс включення напруги живлення імпульсного магніту; C_2 – синхронізуючий імпульс включення напруги живлення високочастотної котушки індуктивності; C_3 – синхронізуючий імпульс виключення напруги живлення імпульсного магніту; t – час;
- часова розгортка б: U_1 – електрична напруга імпульсу живлення імпульсного магніту, величина якої може регулюватися для зміни потужності імпульсу магнітного поля;
- часова розгортка в: B_{max} – максимальне значення індукції магнітного поля, створеної імпульсним магнітом;
- часова розгортка г: $+U_{вч}/-U_{вч}$ – змінна напруга високочастотного пакетного імпульсу живлення високочастотної котушки індуктивності; $З$ – зондуєчий пакетний високочастотний імпульс; $А$ – імпульс, відбитий дефектом (або протилежною стороною металовиробу) з об'єму металовиробу; T – загальний час дії імпульсу намагнічування;

T_1 – час затримки від початку включення напруги живлення котушки імпульсного магніту електромагнітно-акустичного перетворювача до початку формування імпульсного магнітного поля в поверхні металовиробу; T_2 – час наростання індукції магнітного поля в ділянці поверхневого шару металовиробу до максимального робочого значення; T_3 – тривалість робочого часу дії стабільної величини індукції імпульсного магнітного поля, достатньої для збудження і прийому ультразвукових імпульсів.

Горизонтальними стрілками на рис. 1 показані зміни положення імпульсів у часі.

Реалізувати розроблений метод можливо за допомогою засобу, спрощену схему якого наведено на рис. 2.

На рис. 2 позначені: 1 – імпульсний магніт; 2 – шихтований сердечник імпульсного магніту, виготовлений із феромагнітних пластин з високою індукцією насичення; 3 – котушка імпульсного магніту; 4 – високочастотна котушка індуктивності; 5 – феромагнітний електропровідний металовиріб; 6 – локальна ділянка поверхневого шару металовиробу, в якій збуджуються ультразвукові імпульси; 7 – синхронізатор; 8 – блок живлення котушки імпульсного магніту; 9 – регулятор часу початку дії імпульсу намагнічування; 10 – регулятор часу завершення дії імпульсу намагнічування; 11 – генератор високочастотних пакетних імпульсів струму живлення високочастотної котушки індуктивності; 12 – регулятор часового положення високочастотних пакетних імпульсів струму живлення високочастотної котушки 4 індуктивності відносно часу початку дії імпульсу намагнічування; 13 – ультразвукові імпульси

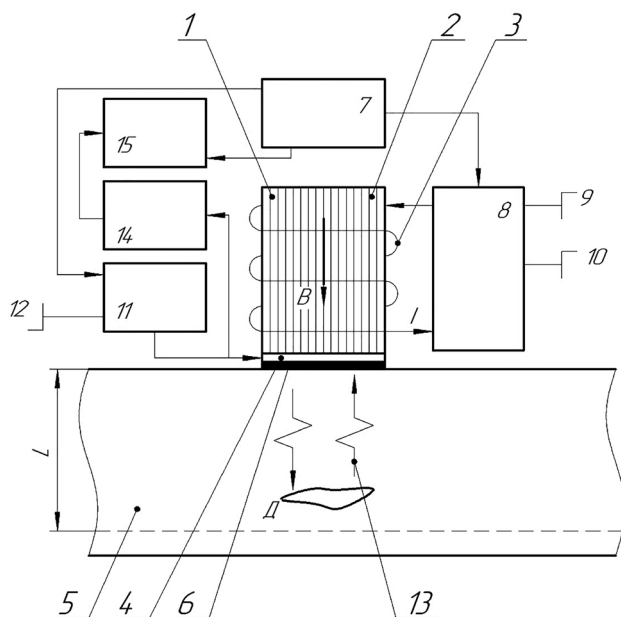


Рис. 2. Спрощена схема засобу з імпульсним намагнічуванням для реалізації розробленого методу ультразвукового ЕМА контролю

в об'ємі металовиробу; 14 – посилювач прийнятих ультразвукових імпульсів; 15 – блок обробки, реєстрації та відображення інформації; L – відстань від ділянки 6 поверхні зі збудженим імпульсним магнітним полем до кінця зони контролю в об'ємі металовиробу 5; I – струм у котушці 3 імпульсного магніту 1; B – індукція імпульсного магнітного поля; D – дефект у контрольованому об'ємі феромагнітного електропровідного металовиробу 5.

Розроблений ЕМА метод контролю реалізується таким чином (рис. 1 та рис. 2). Згідно з рис. 1 імпульсний магніт 1, виготовлений із шихтованого сердечника 2 імпульсного магніту та котушки 3 імпульсного магніту разом із високочастотною котушкою 4 індуктивності, розміщують над локальною ділянкою 6 поверхні феромагнітного електропровідного металовиробу 5. Синхронізатор 7 подає імпульс C_1 , рис. 1 (часова розгортка a) на блок 8 живлення котушки 3 імпульсного магніту 1, рис. 2. Блок 8 живлення котушки 3 імпульсного магніту 1 подає на котушку 3 напругу U_1 (рис. 1, часова розгортка b), за рахунок якої в котушці 3 формується потужний струм I , який може досягати кількох кА. Початок імпульсу намагнічування U_1 (рис. 1) визначається часом положення синхронізуючого імпульсу C_1 (часова розгортка a), який може встановлюватися регулятором 9 (рис. 2) часу початку дії імпульсу намагнічування U_1 на блоці 8. Тривалість T імпульсу намагнічування визначається часовим положенням синхронізуючого імпульсу C_3 , що формується синхронізатором 7, рис. 2, згідно з виразом $T=T_1+T_2+T_3$, де T_1 – час затримки від початку включення напруги U_1 живлення котушки 3 імпульсного магніту 1 до початку формування імпульсного магнітного поля B у локальній ділянці 6 поверхневого шару металовиробу 5, T_2 – час наростання індукції B магнітного поля до встановленої величини в локальній ділянці 6 поверхневого шару металовиробу 5 до максимального робочого значення B_{max} (рис. 1, розгортка b), а T_3 – стабільна тривалість робочого часу дії індукції B_{max} магнітного поля при прийомі ультразвукових імпульсів, яка визначається за виразом $T_3 \geq 2L/C$, де L – відстань від ділянки 6 поверхні металовиробу 5 зі збудженим імпульсним магнітним полем до кінця зони L контролю в об'ємі металовиробу, встановленої нормативно-технічною документацією на контроль, C – швидкість розповсюдження ультразвукових імпульсів 13, рис. 2, в матеріалі металовиробу 5. Величини T_1 і T_2 визначаються експериментально на зразку, виготовленому з матеріалу, який підлягає оцінюванню електромагнітно-акустичним перетворювачем, що використовується для проведення контролю. Часове положення завершення дії імпульсу

су намагнічування встановлюється регулятором 10 блоку 8 живлення котушки 3 імпульсного магніту 1. У результаті під дією імпульсу струму I намагнічування в локальній ділянці 6 поверхневого шару металовиробу 5 формується імпульсне магнітне поле B , від якого амплітуда імпульсів 13 відбитих з об'єму металовиробу 5 залежить квадратично. Через час T_1+T_2 величина індукції магнітного поля в локальній ділянці 6 поверхневого шару металовиробу 5 досягає максимального значення B_{max} (часова розгортка ϑ , рис. 1) і діє протягом часу T_3 , необхідного для прийому відбитих на відстанях L з об'єму металовиробу 1 ультразвукових імпульсів (рис. 1, розгортка ε , позиція A). При досягненні величини індукції магнітного поля B_{max} під дією синхронізуючого імпульсу C_2 на високочастотну котушку 4 подається напруга $+U_{вч}/-U_{вч}$ зондуючого пакетного високочастотного імпульсу 3 (часова розгортка ε , рис. 1), яка створює в локальній ділянці 6 поверхневого шару металовиробу 5 електромагнітне поле. Взаємодія імпульсного магнітного поля B_{max} із електромагнітним полем призводить до збудження імпульсів високочастотних пакетних ультразвукових коливань 13 у поверхневому шарі 6 металовиробу 5, які розповсюджуються в його об'ємі. Якщо в об'ємі металовиробу 5 до відстані L знаходиться дефект D , то ультразвуковий імпульс 13 від нього відбивається, імпульс A (розгортка ε , рис. 1), в напрямку локальної ділянки 6 поверхневого шару металовиробу 5 і приймається за рахунок зворотного електромагнітно-акустичного перетворення. Очевидно, що амплітуда відбитого від D імпульсу A буде суттєво залежати від B_{max} і, відповідно, визначати чутливість контролю розроблених методу та засобу за рахунок збільшення відношення амплітуди ультразвукових імпульсів до амплітуди шуму. Величину B_{max} буде визначати напруга U_1 живлення котушки 3 імпульсного магніту 1.

Прийнятий відбитий від дефекту D ультразвуковий імпульс A (рис. 1, позиція ε) посилюється посилювачем 14 (рис. 2) прийнятих ультразвукових імпульсів, обробляється блоком 15 обробки,

реєстрації та відображення інформації. За параметрами відбитих і прийнятих із металовиробу 5 ультразвукових імпульсів A або за їх відсутності приймається рішення щодо якості об'єкта контролю.

Експериментальну перевірку розроблених методу та реалізуючого засобу виконано з допомогою засобу, наведеного на рис. 2. Об'єктом дослідження був зразок із феромагнітної сталі ст. 45 товщиною 40 мм. При дослідженнях використані такі параметри: сердечник імпульсного магніту мав розміри $36 \times 36 \times 60$ мм і виготовлений із пластин трансформаторної сталі товщиною 0,5 мм; котушка намагнічування мала 20 витків із дроту 2,2 мм; тривалість імпульсу намагнічування 400 мкс; напруга живлення котушки намагнічування 30 В; пакетний високочастотний імпульс із тривалістю 3 періоди частоти заповнення 2,5 МГц мав напругу 600 В на плоскій котушці з 6 витків паралельно включених 10 ізольованих провідників.

Встановлено повну відсутність притягання ЕМАП до феромагнітного металовиробу, що покращує експлуатаційні можливості ЕМА перетворювача.

Результати експериментальних досліджень нового методу і засобу ЕМА контролю наведено на рис. 3.

На рис. 3 позначено: 1 – напруга імпульсу намагнічування; 2 – передній фронт імпульсу намагнічування; 3 – задній фронт імпульсу намагнічування; 4 – високочастотний пакетний імпульс; 5 – донні імпульси, багатократно відбиті з досліджуваного зразка.

Надалі за критерій оцінки ефективності розробленого методу приймемо зростання амплітуди прийнятого ультразвукового імпульсу щодо шуму, який за інших однакових умов контролю буде визначатися величиною індукції магнітного поля в поверхневому шарі металовиробу товщиною близько 0,1 мм (скін-шар).

Аналіз експериментальних даних, наведених на рис. 3, підтверджує ефективність методу ультразвукового ЕМА контролю. Тобто при нераціональних величинах затримки вклю-

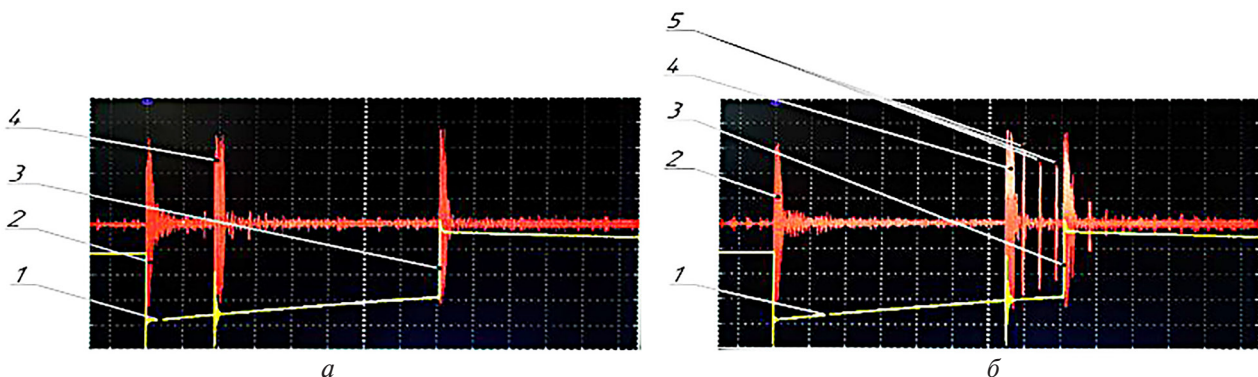


Рис. 3. Часові розгортки імпульсів намагнічування та вимірюваних імпульсів: *а* – розгортка при включенні високочастотного імпульсу через 90 мкс після включення імпульсу намагнічування; *б* – розгортка при включенні високочастотного імпульсу через 325 мкс після включення імпульсу намагнічування

Вплив величини затримки високочастотного сигналу щодо початку дії імпульсу намагнічування при ЕМА контролі на амплітуду A_1 донних імпульсів щодо амплітуди $A_{ш}$ шуму при різних напругах живлення імпульсного магніту

$U_1, \text{В}$	Затримка τ , мкс	0...90	150	200	250	300	350	380
30	$A_1/A_{ш}$, разів	0	5	7,5	12,5	15	15	16
20	$A_1/A_{ш}$, разів	0	2,5	4,5	6,5	7,5	10	12,5
15	$A_1/A_{ш}$, разів	0	0	1,5	3,5	5	7	7,5

чення високочастотного імпульсу амплітуда ультразвукового сигналу недостатня для проведення вимірювань, контролю та діагностики. Для підтвердження цього висновку проведені дослідження впливу величини затримки включення високочастотного імпульсу на величину відношення $A_1/A_{ш}$, де $A_{ш}$ – амплітуда шуму, A_1 – амплітуда першого донного ультразвукового сигналу при різних напругах U_1 живлення котушки намагнічування, і, відповідно, від величини індукції магнітного поля в поверхневому скін-шарі металовиробу. Результати досліджень наведено в табл. 1.

Аналіз результатів, наведених у табл. 1, показує, що при збільшенні величини затримки включення високочастотного імпульсу відношення $A_1/A_{ш}$ збільшується до певного значення і тримається певний час, який залежить від напруги U_1 живлення котушки намагнічування та ємності розрядних конденсаторів.

Підвищення напруги живлення котушки намагнічування приводить до збільшення $A_1/A_{ш}$, а також до зменшення часу затримки включення високочастотного імпульсу. Це визначає можливість зменшення тривалості імпульсу намагнічування і, в результаті, покращення температурного режиму ЕМА перетворювача.

Висновки

Розроблено метод визначення якості феромагнітних металовиробів, який враховує одночасний суттєвий вплив величини напруги

живлення котушки намагнічування і відносно-го часового положення імпульсу намагнічування та високочастотного імпульсу на відношення амплітуд корисного ультразвукового імпульсу та шуму.

Розроблено блок-схему засобу для реалізації методу, який включає: імпульсний магніт; високочастотну котушку індуктивності; синхронізатор; блок живлення котушки імпульсного магніту; генератор високочастотних пакетних імпульсів струму живлення високочастотної котушки індуктивності; посилювач прийнятих ультразвукових імпульсів та блок обробки, реєстрації та відображення інформації.

Визначено шляхи зменшення тривалості імпульсу намагнічування для забезпечення температурного режиму ЕМАП.

Встановлено вплив напруги та форми імпульсу намагнічування на відношення амплітуд корисного ультразвукового імпульсу та шуму.

Встановлено повну відсутність притягування ЕМАП до феромагнітного металовиробу, що покращує експлуатаційні можливості перетворювача.

Експериментально показано, що використання розробленого методу в порівнянні з відомими, які використовують постійні магнітні поля, за інших рівних умов має підвищену величину відношення амплітуд корисного ультразвукового імпульсу та шуму близько 40%. Це підтверджує значну ефективність використання розробленого методу та засобу його реалізації.

Study and development of a method and means for ultrasonic testing of ferromagnetic products with enhanced sensitivity

G. Suchkov, R. Mygushchenko, O. Kropachek, M. Kalnytskyi, Yu. Koshkarov, O. Bobrov

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kyrychova Str., 2, 61002, Kharkiv, Ukraine
hpi.suchkov@gmail.com; mrp1@ukr.net; kropachek@ukr.net; kalnytsky94@gmail.com; bag18041966@gmail.com

Abstract

Modern requirements for the quality of manufactured and operated metal products are largely ensured by non-destructive testing methods, among which ultrasonic testing is the most advanced one. One of the promising ultrasonic quality assessment methods is the electromagnetic-acoustic (EMA) method, as it does not require special surface preparation of the object under test (OUT), does not imply the use of contact liquids, and offers high testing productivity. However, it is generally believed that the EMA method has low sensitivity. Some specialists suggest that the sensitivity of the EMA method can be increased by using pulsed magnetization of the OUT. Nevertheless, a comprehensive approach to address the technical and technological challenges has not been found in the existing publications.

Therefore, the authors of this paper conducted relevant studies and analysed modern information sources, which only partially address some solutions related to the development of methods and measuring instruments, testing, and diagnostics using ultrasonic electromagnetic-acoustic transducers (EMATs) with pulsed magnetization. These developments potentially allow increased EMAT sensitivity by improving the signal-to-noise ratio of the ultrasonic signal.

As a result of the analysis, a new EMA method of non-destructive ultrasonic testing was developed. It defines the operations, parameters, and sequence of actions required during pulsed magnetization of the OUT. The necessity to determine optimal relative timing between the magnetizing pulses and the short high-frequency pulses supplying the EMAT coil was established, which makes it possible to significantly (up to 40%) improve the efficiency of the transducer when assessing the quality of ferromagnetic materials.

To study the potential of the new EMA method, a special test bench was created. It included an EMAT, a generator of powerful high-frequency current pulses, a generator of powerful magnetizing current pulses, an amplifier for received ultrasonic pulses (with parameters adjustable over wide ranges), and a digital dual-beam oscilloscope. Experimental results using this test bench demonstrated that the new EMA method and its supporting equipment improve the signal-to-noise ratio of the received ultrasonic signals compared to traditional EMATs based on permanent magnets. In other words, the efficiency of the EMAT has been enhanced.

Keywords: study; testing method; EMAT; magnetic field; pulsed magnet; ultrasonic; sensitivity; measurement; testing; ferromagnetic.

Список літератури

1. Троїцький В.О. Борис Патон фундатор науки з дефектоскопії та моніторингу конструкцій. Київ: Інтерсервіс, 2023. 60 с.
2. Український науково-дослідний інститут неруйнівного контролю. URL: <https://www.autondt.com/> (дата звернення: 18.01.2025).
3. Познякова М.Є. Ультразвуковий метод та засіб для виявлення внутрішніх дефектів залізничних осей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13. Харків, 2021. 24 с.
4. Сучков Г.М., Мигущенко Р.П., Плеснецов С.Ю., Плеснецов Ю.О. та ін. Підвищення чутливості електромагнітно-акустичних перетворювачів для контролю, вимірювання і діагностики феромагнітних металовиробів за рахунок збільшення величини індукції магнітного поля. Огляд. *Технічна електродинаміка*. 2025. № 2. С. 85–95. doi: <https://doi.org/10.15407/technd.2025.02.085>
5. Познякова М.Є., Сучков Г.М., Мигущенко Р.П., Кропачек О.Ю., Донченко А.В. Вдосконалення вимірювального ультразвукового електромагнітно-акустичного перетворювача. *Український метрологічний журнал*. 2023. № 1. С. 27–33. doi: 10.24027/2306-7039.1.2023.282540
6. Десятніченко О.В. Електромагнітно-акустичний товщиномір для контролю металовиробів з діелектричними покриттями: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13. Харків, 2015. 172 с.
7. Плеснецов С.Ю. Розвиток методів та засобів для електромагнітно-акустичного контролю стрижневих, трубчастих та листових металовиробів: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.11.13. Харків, 2021. 40 с.

8. Сайт канадської фірми Innerspec. URL: <https://www.innerspec.com/portable/emat-sensors> (Дата звернення: 19.09.2021).
9. Суворова М.Д. Розробка намагнічувальних джерел для ЕМА перетворювачів на основі потужних постійних магнітів. *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка*. 2019. № 1. С. 63–73.
10. 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. doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.4.2019.195956>
11. Салам Буссі. Електромагнітно-акустичні перетворювачі для ультразвукового контролю металовиробів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13. Харків, 2020. 25 с.
12. Mihajlov A.V., Gobov Ju.L., Smorodinskij Ja.G., Shherbinin S.V. Elektromagnitno-akusticheskij preobrazovatel s impulsnym podmagnichivaniem [Electromagnetic-acoustic transducer with pulse magnetization]. *Defektoskopiya*, 2015, no. 8, pp. 14–23.
13. Донченко А.В., Мигушенко Р.П., Сучков Г.М., Кропачек О.Ю. Накладний суміщений електромагнітно-акустичний перетворювач з імпульсним намагнічуванням для контролю ферромагнітних металовиробів. Патент на корисну модель № 156088. Заявка № U202304534 від 25.05.2023 р. Опубл. 08.05.2024. Бюл. № 19.
14. Heng Zhang, Ri-liang Su, Shu-juan Wang, Guo-fu Zhai, Lei Kang. Design of bulk wave EMAT using a pulsed electromagnet. *IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing (FENDT)*, Chengdu, China, 20–23 June 2014. doi: <https://doi.org/10.1109/FENDT.2014.6928272>
15. Suzhen Liu, Ke Chai, Chuang Zhang, Liang Jin, Qingxin Yang. Electromagnetic Acoustic Detection of Steel Plate Defects Based on High-Energy Pulse Excitation. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10(16), 5534. doi: <https://doi.org/10.3390/app10165534>
16. Pozniakova M.Ye. Ultrazvukovy metod ta zasib dlia vyvialnennia vnutrishnykh defektiv zaliznychnykh osei: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk [Ultrasonic method and tool for detecting internal defects in railway axles: abstract of PhD diss.]. Kharkiv, 2021. 24 p. (in Ukrainian).
17. Suchkov H.M., Myhushchenko R.P., Pliesnetsov S.Iu., Pliesnetsov Yu.O. et al. Pidvyshchennia chutlyvosti elektromagnitno-akustychnykh peretvoriuvachiv dlia kontroliu, vymiriuvannia i diahnozyky feromagnitnykh metalovyrobiv za rakhunok zbilshennia velychyny induktsii mahnitnoho polia. Ohliad [Sensitivity increase of electromagnetic-acoustic transducers in testing, measurement and diagnostics of ferromagnetic product by increasing the magnitude of the magnetic field induction. Review]. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2025, no. 2, pp. 85–95 (in Ukrainian).
18. Pozniakova M., Suchkov G., Myhushchenko R., Kropachek O., Donchenko A. Vdoskonalennia vymiriuvannia ultrazvukovoho elektromagnitno-akustychnoho peretvoriuvacha [Improvement of the measuring ultrasonic electromagnetic-acoustic transducer]. *Ukrainian Metrological Journal*, 2023, no. 1, pp. 27–33 (in Ukrainian). doi: [10.24027/2306-7039.1.2023.282540](https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2023.282540)
19. Desiatnichenko O.V. Elektromagnitno-akustychnyi tovshchynomir dlia kontroliu metalovyrobiv z dielektrychnymy pokryttiamy: dys. ... kand. tekhn. nauk [Electromagnetic-acoustic thickness gauge for checking metal products with dielectric coatings: PhD diss.]. Kharkiv, 2015. 172 p. (in Ukrainian).
20. Pliesnetsov S.Yu. Rozvytok metodiv ta zasobiv dlia elektromagnitno-akustychnoho kontroliu stryzhnevnykh, trubchastykh ta lystovykh metalovyrobiv: avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk [Development of methods and tools for electromagnetic-acoustic testing of rod, tubular and sheet metal products: abstract of d-r techn. sci. diss.]. Kharkiv, 2021. 40 p. (in Ukrainian).
21. Innerspec Website. Available at: <https://www.innerspec.com/portable/emat-sensors> (Access date: 19.09.2021).
22. Suvorova M.D. Rozrobka namahnichuvalnykh dzherel dlia EMA peretvoriuvachiv na osnovi potuzhnykh postiinykh mahnitiv [Development of magnetization sources for EMA converters based on powerful permanent magnets]. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Electricity and conversion technology*, 2019, no. 1, pp. 63–73 (in Ukrainian).
23. Salam Bussi, Suchkov G., Mygushchenko R., Kropachek O., Plesnetsov S. Electromagnetic-acoustic transducers for ultrasonic measurements, testing and diagnostics of ferromagnetic

References

- metal products. *Ukrainian Metrological Journal*, 2019, no.4, pp. 41–49. doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.4.2019.195956>
11. Salam Bussi. Elektromahnitno-akustychni peretvoriuvachi dlia ultrazvukovoho kontroliu metalovyrobiv: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk [Electromagnetic-acoustic transducers for ultrasonic testing of metal products: abstract of PhD diss.]. Kharkiv, 2020. 25 p. (in Ukrainian).
 12. Mihajlov A.V., Gobov Ju.L., Smorodinskij Ja.G., Shherbinin S.V. Elektromagnitno-akusticheskij preobrazovatel s impulsnym podmagnichivaniem [Electromagnetic-acoustic transducer with pulse magnetization]. *Defektoskopiya*, 2015, no. 8, pp. 14–23
 13. Donchenko A.V., Myhushchenko R.P., Suchkov H.M., Kropachek O.Yu. Nakladnyi sumishchenyi elektromahnitno-akustychnyi peretvoriuvach z impulsnym namahnichuvanniam dlia kontroliu feromahnit-nykh metalovyrobiv [Surface-mounted combined electromagnetic-acoustic transducer with pulsed magnetization for inspection of ferromagnetic metal products]. Useful model patent № 156088. Request № U202304534 from 25.05.2023. Publ. 08.05.2024. Bull. № 19 (in Ukrainian).
 14. Heng Zhang, Ri-liang Su, Shu-juan Wang, Guo-fu Zhai, Lei Kang. Design of bulk wave EMAT using a pulsed electromagnet. *IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing (FENDT)*, Chengdu, China, 20–23 June 2014. doi: <https://doi.org/10.1109/FENDT.2014.6928272>
 15. Suzhen Liu, Ke Chai, Chuang Zhang, Liang Jin, Qingxin Yang. Electromagnetic Acoustic Detection of Steel Plate Defects Based on High-Energy Pulse Excitation. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10(16), 5534. doi: <https://doi.org/10.3390/app10165534>