

# ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СУМІЩЕНИХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ПРЯМИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО–АКУСТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З ІМПУЛЬСНИМ НАМАГНІЧУВАННЯМ

Г.М. Сучков, М.Е. Кальницький, А.В. Донченко, О.І. Курандо, А.Г. Алексіїв, О.М. Бороденко, О.І. Бутенко, А.О. Рибалко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.  
E-mail: suchkov@gmail.com

На сьогодні відома велика кількість різноманітних конструкцій електромагнітно–акустичних перетворювачів, призначених для вимірювань, контролю якості та діагностики матеріалів і виробів. Такі перетворювачі збуджують і приймають імпульси всіх відомих ультразвукових хвиль у металовиробах як феромагнітного, так і неферомагнітного класу. Останнім часом інтенсивно розробляються перетворювачі, що використовують потужні імпульсні магнітні поля. З одного боку вони, за однакових інших умов, складніші за конструкцією, а з другого боку – мають суттєву перевагу при вимірюваннях характеристик феромагнітних об'єктів, оскільки для них практично відсутня сила взаємного притягання перетворювача та об'єкта контролю. Складність конструкцій електромагнітно–акустичних перетворювачів з імпульсним намагнічуванням обумовлює необхідність дослідження їхніх раціональних параметрів та використання нових методів функціонування з врахуванням одночасної взаємодії динамічного магнітного та високочастотного електромагнітного полів у поверхневому шарі металовиробу як при збудженні, так і при прийомі імпульсів ультразвукових хвиль. Особливо важливим є врахування такої взаємодії для широко використовуваних вимірювальних суміщених ультразвукових прямих електромагнітно–акустичних перетворювачів з імпульсним намагнічуванням. Причому доцільно виконати обов'язкові експериментальні дослідження для встановлення раціональних параметрів, оскільки відомі теоретичні роботи не дають достатньо точних результатів, необхідних для створення технологій і конструювання нових засобів вимірювань і контролю при імпульсному намагнічуванні. Бібліогр. 19, табл. 5, рис. 9.

*Ключові слова:* експериментальні дослідження, феромагнітний виріб, ультразвукові імпульси, електромагнітно–акустичний, вимірювання, контроль, діагностика, магнітне поле, електромагнітне поле, імпульсне намагнічування

**Вступ.** Ультразвукові методи вимірювань, контролю якості та діагностики є найпоширенішими в неруйнівному контролі (НК) [1, 2]. Традиційний контроль із використанням контактної рідини є не завжди прийнятним, оскільки вимагає постійних витрат на зачистку поверхні об'єкта досліджень і на контактну рідину [3, 4]. Також погіршується стан довкілля [2, 4].

Значно покращити ситуацію дозволяє використання електромагнітно–акустичних (ЕМА) методів і засобів НК [5–9]. Проте використання ЕМА перетворювачів (ЕМАП) з постійним намагнічуванням [5, 10] при дослідженні якості феромагнітних об'єктів контролю (ОК) призводить до пошкодження ЕМАП за рахунок сильного взаємного притягання та збудження когерентних завад від феромагнітних частинок, наприклад окалини. Вирішити вказані проблеми дозволяють ЕМАП з імпульсними магнітними полями [11–17]. Але такі прилади мають свої недоліки [15, 17]: недостатньо

досліджено динамічну взаємодію імпульсного магнітного поля та високочастотного магнітного поля в часі й просторі; недостатньо вивчено конструктивні та технологічні параметри ЕМА перетворювачів і засобів їх живлення, які суттєво впливають на результати контролю; не встановлено раціональні значення конструктивних і технологічних параметрів, у першу чергу, експериментальними методами. Особливо це важливо для приладів з портативними суміщеними прямими ЕМАП для товщинометрії та контролю імпульсами зсувних ультразвукових хвиль [9, 15] феромагнітних ОК, як при їх виготовленні, так і при експлуатації на підприємствах і в польових умовах [17].

**Мета досліджень** – підвищення ефективності ЕМАП для портативних ультразвукових приладів при збудженні та прийомі імпульсів зсувних ультразвукових хвиль нормально до поверхні феромагнітних ОК за рахунок імпульсного намагнічування.

Сучков Г.М. – <https://orcid.org/0000-0002-1805-0466>, Кальницький М.Е. – <https://orcid.org/0009-0000-5056-2085>,  
Донченко А.В. – <https://orcid.org/0009-0006-0559-0160>, Курандо О.І. <https://orcid.org/0009-0008-6687-3126>,  
Алексіїв А.Г. – <https://orcid.org/0009-0001-1878-526X>, Бороденко О.М. – <https://orcid.org/0009-0001-1878-526X>,  
Бутенко О.І. – <https://orcid.org/0009-0009-9636-8734>, Рибалко А.О. – <https://orcid.org/0009-0003-9560-4404>

© Г.М. Сучков, М.Е. Кальницький, А.В. Донченко, О.І. Курандо, А.Г. Алексіїв, О.М. Бороденко, О.І. Бутенко, А.О. Рибалко, 2025

**Експериментальні дослідження засобу імпульсного намагнічування в складі макету суцільного прямого ЕМАП для збудження та прийому зсувних пакетних ультразвукових імпульсів нормально до поверхні феромагнітного металовиробу.** У [18] було показано, що при використанні джерела постійного магнітного поля, виготовленого у вигляді паралелепіпеда, його раціональна висота повинна бути близько 60 мм, а розмір полюса, поверненого до ОК, повинен знаходитися в діапазоні  $30 \times 30 \dots 50 \times 50$  мм<sup>2</sup>. Відповідно в [14] шляхом моделювання показано, що при імпульсному намагнічуванні при забезпеченні квазістаціонарного часу дії магнітного поля впродовж заданого проміжку можна використати результати [18] щодо розмірів осердя імпульсного магніту. Але такі висновки необхідно підтверджувати експериментально. Для цього було розроблено спеціальний стенд [19], який передбачає регулювання основних характеристик ЕМАП з імпульсним намагнічуванням у процесі дослідження. При цьому високочастотна частина стенду залишається такою ж, як і для ЕМА перетворювача з постійним магнітним полем [3, 5, 18].

Реалізувати запропонований підхід можливо за допомогою дослідного портативного приладу, спрощений макет якого наведено на рис. 1, де: 1 – імпульсний магніт; 2 – шихтоване осердя імпульсного магніту, виготовлене з ізолюваних між собою феромагнітних пластин з високою індукцією насичення; 3 – котушка намагнічування; 4 – плоска високочастотна котушка індуктивності; 5 – феромагнітний електропровідний металовиріб; 6 – локальна ділянка поверхневого шару металовиробу, в якій збуджуються ультразвукові імпульси та відповідно приймаються з ОК; 7 – синхронізатор; 8 – блок живлення котушки намагнічування 3; 9 – регулятор встановлення часу початку дії імпульсу намагнічування; 10 – регулятор встановлення часу завершення дії імпульсу намагнічування; 11 – генератор потужних високочастотних пакетних імпульсів струму живлення високочастотної котушки індуктивності 4; 12 – регулятор часового положення високочастотних пакетних імпульсів струму живлення високочастотної котушки індуктивності відносно часу початку дії імпульсу намагнічування; 13 – ультразвукові імпульси, які розповсюджуються в об’ємі ОК 5; 14 – посилювач прийнятих ультразвукових імпульсів 13; 15 – блок обробки, реєстрації та відображення інформації;  $L$  – відстань від ділянки 6 поверхні зі збудженим імпульсним магнітним полем до кінця зони ультразвукового контролю в об’ємі ОК 5;  $I$  –

струм у котушці 3 імпульсного магніту 1;  $B$  – індукція імпульсного магнітного поля;  $D$  – дефект в об’ємі феромагнітного електропровідного металовиробу, що контролюється.

Враховуючи викладене вище, виберемо розміри шихтованого осердя імпульсного магніту  $36 \times 36 \times 60$  мм<sup>3</sup> із наведеного вище діапазону. При цьому слід звернути увагу на те, що виготовлення осердя імпульсного магніту шихтованим призводить до зменшення коефіцієнта його заповнення металом. Відповідно цей фактор призведе до зменшення величини індукції магнітного поля, що формується. Виникає протиріччя – з одного боку, наближення шихтованого осердя магніту до плоскої високочастотної котушки індуктивності має збільшити індукцію магнітного поля в поверхні ОК, а з другого – шихтування осердя призводить до зменшення індукції магнітного поля. Вплив цього фактора необхідно додатково дослідити експериментально.

У [11] показано, що для зменшення часу наростання імпульсу намагнічування, а, відповідно, й зменшення енергетичних витрат індуктивна складова імпульсного магніту повинна бути мінімальною. Виникає ще одне протиріччя. З одного боку, збільшення об’єму металу магнітного осердя та кількості витків котушки намагнічування [17] підвищують індуктивність котушки магніту, а з другого – для зменшення індуктивності джерела магнітного поля доцільно зменшити кількість витків котушки намагнічування. Оскільки з геометричними розмірами осердя імпульсного магніту ми визначилися, то змінювати його параметри можливо тільки за рахунок параметрів котушки намагнічу-

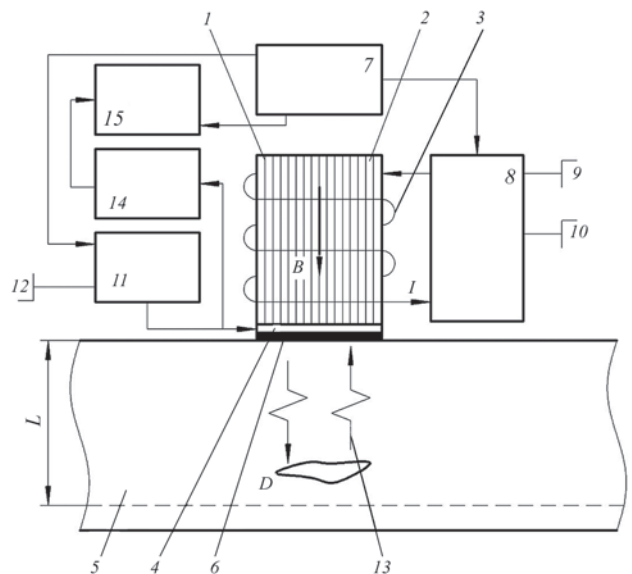


Рис. 1. Спрощений макет портативного ультразвукового приладу для дослідження характеристик ЕМАП та його елементів

вання, її розташування на осерді та характеристиками імпульсного струму живлення. Але тут також є протиріччя. У [12] вказано, що котушка намагнічування повинна охоплювати осердя по всій його висоті в 60 мм. З іншого боку, згідно з результатами [11], осердя магніту повинне охоплюватися котушкою намагнічування частково, що зменшує індуктивність джерела імпульсного магнітного поля. Таке протиріччя вимагає перевірки експериментальними дослідженнями висоти розташування котушки намагнічування по відношенню до висоти осердя при інших однакових умовах.

Таким чином, необхідно експериментально дослідити вплив на ефективність ЕМАП: параметрів котушки намагнічування; напруги живлення імпульсного магніту; відносних часових зв'язків імпульсу намагнічування та високочастотного сигналу тощо.

**Методика проведення експериментальних досліджень.** На першому етапі на осердя імпульсного магніту дротом діаметром 1,2 мм з лаковим покриттям намотувалася котушка до заповнення по всій висоті. Потім кількість витків зменшувалася, як це показано на рис. 2.

Всього було виготовлено мідним дротом діаметром 1,2 мм імпульсні магніти з кількістю витків котушки 45, 30, 15, 9 і 6 шт. Причому при



Рис. 2. Імпульсний магніт для ЕМАП з шихтованим осердям  $36 \times 36 \times 60 \text{ мм}^3$  з обмоткою 45 та 15 витків мідним дротом діаметром 1,2 мм

зменшенні кількості витків вони розташовувалися в нижній, по відношенню до ОК, частині осердя, як це пропонувалося в [11]. Дослідження проводилися на зразку зі сталі 09Г2С розмірами  $100 \times 100 \times 40 \text{ мм}^3$  без зачистки поверхонь від окалини. Ступінь максимальної шорсткості поверхонь зразка в деяких місцях досягала 0,5 мм.

Основними критеріями ефективності імпульсного магніту визначалися: величина магніторушійної сили [17] і тривалість квазіпостійної величини магнітного поля, достатньої для збудження та прийому ультразвукових імпульсів із феромагнітного зразка заданої товщини. У свою чергу, значення та тривалість квазіпостійної величини магнітного поля однозначно визначалася силою струму в котушці намагнічування.

При дослідженнях імпульсний магніт площиною одного полюса розташовували на поверхні зразка через лавсанову прокладку завтовшки 0,2 мм. На котушку намагнічування через електронний ключ подавалася напруга 30 В імпульсом тривалістю 400 мкс. Струм у ланцюгу вимірювався за допомогою шунта з ніхрому діаметром 1 мм з опором 0,13 Ом.

Приклади форми та величини сили струму в котушці намагнічування при різних напругах живлення розрядного ключового ланцюга наведено на рис. 3.

Аналіз даних, наведених на рис. 3, дозволяє зробити наступні висновки. При зменшенні кількості витків обмотки імпульсного магніту, по-перше, поступово формується «полиця» з часовою тривалістю, достатньою для вимірювання, контролю та діагностики ОК, а по-друге – швидкість наростання струму в котушці суттєво збільшується. Тобто є можливість скоротити тривалість імпульсу намагнічування і, відповідно, зменшити витрати енергії живлення батареї приладу та оптимізувати температурний режим імпульсного магніту.

Слід зауважити, що скоротити тривалість імпульсу намагнічування за рахунок зменшення ємності розрядних конденсаторів недоцільно, оскільки

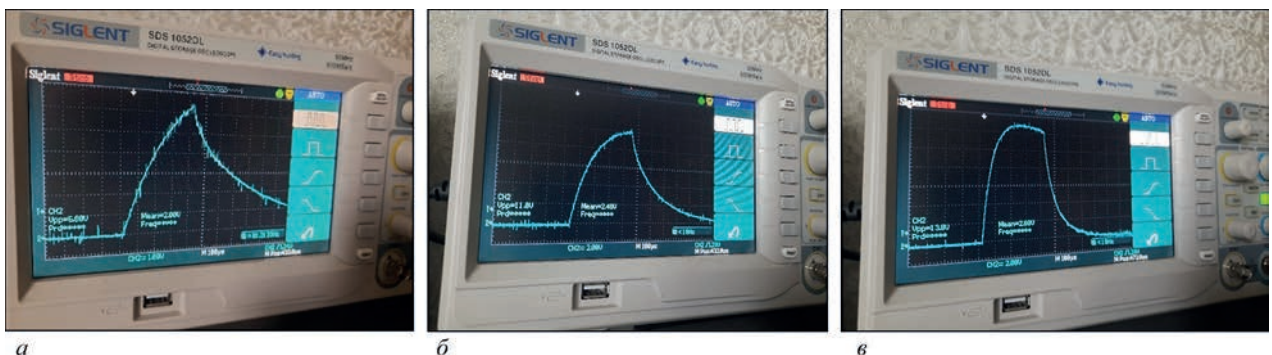


Рис. 3. Сигнали, еквівалентні струму в котушках імпульсного магніту залежно від кількості витків дроту діаметром 1,2 мм у нижній частині осердя: а – 15 витків, б – 9 витків, в – 6 витків

ки потрібно формувати робочу «полицю» з часовою тривалістю, достатньою для виконання вимірювань параметрів ОК. Тоді зменшення індуктивності котушки намагнічування можливе практично тільки за рахунок зменшення витків котушки магніту, при інших однакових умовах, і не можливе за рахунок зменшення об'єму металу осердя магніту оскільки це визначено [3, 5, 19] розмірами робочої ділянки височастотної котушки індуктивності ЕМАП, яка повинна бути максимально можливою [5].

Розрахунки магніторушійної сили (МРС), яку можливо використати в певному наближенні [17], для наведених варіантів імпульсних магнітів МРС складає: для 45 витків – 1575, для 30 витків – 3090, для 15 витків – 6000, для 9 витків – 5965, для 6 витків – 4800.

При проведенні експериментів встановлено, що розміщення малої кількості витків котушки намаг-

нічування імпульсного магніту по всій висоті осердя дає суттєвий приріст МРС. При цьому котушка намагнічування з не товстого дроту перегрівається навіть при малих кількостях зондувальних імпульсів. Тому для виключення вказаного фактору було виготовлено котушки індуктивності із мідної стрічки завширшки 60 мм і завтовшки 0,5 мм з кількістю витків 8,5 (рис. 4) та із мідної стрічки завширшки 60 мм і завтовшки 0,1 мм з кількістю витків 5,75 шт.

Для вимірювання струму в котушці намагнічування з малим опором було використано спеціально виготовлений шунт з опором 0,4 мОм, який калібрували за допомогою стандартного шунта 75ШСММ3-200-0,5 з опором 0,375 мОм. Опір котушки за рис. 4, що вимірювали на постійному струмі міліометром Е6-15, складав 1,51 мОм. Індуктивність обмотки складає 10 мГн (виміряної приладом Е7-22 на частоті 120 Гц, що можна умовно вважати близьким значенням до основної частоти імпульсного струму). Результати вимірювань сили струму і, відповідно, індукції магнітного поля котушок зі стрічок різної товщини наведено на рис. 5 при використанні шунта 0,4 мОм.

Аналіз даних, наведених на рис. 5, говорить про те, що максимальна МРС для таких котушок намагнічування перевищує 11000. Причому при кількості витків близько 6 робоча «поличка» квазіпостійної індукції магнітного поля формується раніше. Тобто необхідно зменшувати кількість витків котушки намагнічування. Але подальше зменшення кількості витків котушки від 6 шт. веде до зменшення величини МРС. Окрім того, виявився й недолік – погіршився тепловий режим імпульсного магніту, обумовлений недостатньою віддачею тепла внутрішніми витками котушки та його осердям.

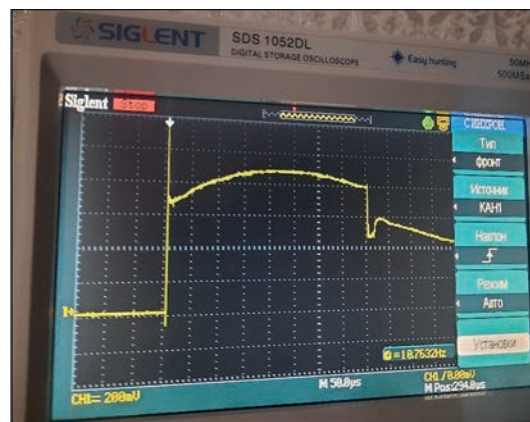
Для збереження МРС, зменшення активного опору та покращення температурного режиму котушка намагнічування була виготовлена з мідної



Рис. 4. Обмотка імпульсного магніту 8,5 витків, що виконана зі стрічки 60×0,5 мм<sup>2</sup> по висоті шихтованого осердя 60 мм розміром 36×36 мм<sup>2</sup>



а



б

Рис. 5. Напряга, еквівалентна струму, на шунті 0,4 мОм при обмотці імпульсного магніту: а – 8,5 витків стрічки розміром 60×0,5 мм<sup>2</sup>, б – 5,75 витків стрічки розміром 60×0,1 мм<sup>2</sup>. Напряга живлення розрядного ключа 30 В

шини  $10 \times 1 \text{ мм}^2$  (рис. 6). Індуктивність котушки на осерді дорівнювала  $0,008 \text{ мГн}$  (виміряна на частоті  $1 \text{ кГц}$ ). Опір котушки для постійного струму –  $40 \text{ мОм}$ . Така котушка намагнічування була використана для подальших досліджень.

Вплив напруги живлення ключового розрядного каскаду на результати вимірювань струму наведено на рис. 7. Його максимальне значення на робочій ділянці складало  $2,5 \text{ кА}$ . Відповідно МРС має значення близько  $16800$ , що значно більше за величину, визначену в [17], як достатньою для проведення контролю.

Порівняльний аналіз результатів, наведених на рис. 5 і 7, дає можливість зробити висновок, що для збільшення МРС кількість витків котушки намагнічування повинно бути близько  $5\text{--}6$  шт. Зменшення тривалості імпульсу намагнічування дає можливість економити енергію батарей портативних приладів і зменшувати термічне навантаження на імпульсний магніт. Відкрита поверхня котушки за рис. 6 збільшує тепловіддачу.



Рис. 6. Макет імпульсного магніту з котушкою з мідної шини  $10 \times 1 \text{ мм}^2$ ; 6,75 витків



Рис. 7. Струм у котушці намагнічування, еквівалентний магнітному полю, при живленні ключового каскаду напругою, В: а – 30; б – 20; в – 10. Тривалість імпульсу намагнічування  $400 \text{ мкс}$

Проте головною характеристикою ЕМАП з імпульсним намагнічуванням є величина амплітуди інформаційного сигналу [5, 11], за величиною якої визначається якість ОК. Для вимірювання інформаційного (донного) імпульсу ЕМА датчик встановлювався таким чином, щоб напрямок випромінювання ультразвукових імпульсів був перпендикулярним до площини зразка, тобто вимірювання проводилося по товщині  $40 \text{ мм}$ . Контроль проводився через лавсанову прокладку між ОК і ЕМАП завтовшки  $0,2 \text{ мм}$ .

При дослідженнях частота ультразвукових коливань складала  $2,3 \text{ МГц}$ , пакетний високочастотний імпульс зондування мав тривалість у 3 періоди частоти заповнення, сила пікового струму в плоскій високочастотній котушці індуктивності складала  $400 \text{ А}$ . Напруга живлення ключового каскаду стенду (рис. 1) складала  $30 \text{ В}$ . Імпульс намагнічування тривав  $400 \text{ мкс}$ . Результати вимірювань наведено на рис. 8.

Аналіз результатів, наведених на рис. 8, підтверджує високу ефективність збудження та прийому ультразвукових імпульсів ЕМА перетворювачем з імпульсним намагнічуванням. Відношення амплітуди першого донного імпульсу до амплітуди завад перевищує  $30$  разів, що більш ніж достатньо для ефективною роботи ультразвукового товщиноміра [5] або дефектоскопа [3, 16]. Фіксація значної кількості донних імпульсів говорить про достатню тривалість «робочої ділянки» збудженого в імпульсній котушці сили струму. Слід зазначити, що отримані результати не оброблялися будь-яким методом, тобто є початковими.

При проведенні досліджень встановлено вплив дуже важливого фактора. Прийнятна величина донних імпульсів фіксується осцилографом не відразу після початку дії імпульсу намагнічування. Спочатку донні імпульси, в залежності від запізнення часу збудження високочастотного імпульсу від початку імпульсу намагнічування, відсутні на мінімальному рівні, а потім поступово їхня амплітуда збільшується (табл. 1).

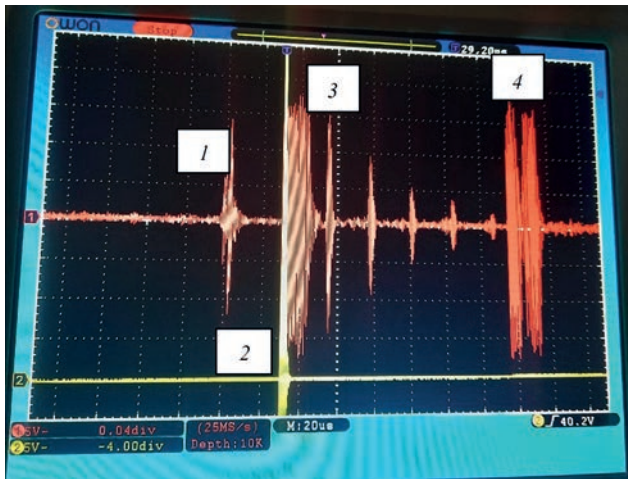


Рис. 8. Часова розгортка з відбитими з ОК донними імпульсами, що отримана при роботі ЕМАП з імпульсним намагнічуванням на екрані двопробеневого осцилографа на зразку зі сталі 09Г2С завтовшки 40 м: 1 – наведений сигнал початку імпульсу намагнічування; 2 – зонduючий високочастотний пакетний імпульс тривалістю 3 періоди частоти заповнення 2,3 МГц; 3 – відбитий зі зразка перший донний імпульс, за яким послідовно фіксуються другий, третій, четвертий та п'ятий перевідбиті в ОК донні імпульси; 4 – наведений сигнал від закінчення імпульсу намагнічування

При проведенні досліджень для котушки намагнічування 5,75 витків розміром 60×1,0 мм<sup>2</sup> використана напруга живлення розрядного ключа 30 В, шунт 0,4 мОм. Сформована «робоча полиця» струму в котушці імпульсного магніту є ефективною, починаючи від 200 мкс з початку імпульсу намагнічування. Максимальна амплітуда імпульсу високочастотного струму складала 400 А тривалістю 3 періоди заповнення частотою 2,3 МГц.

Таким чином, доцільно вибрати кількість витків котушки намагнічування близько 6 шт. при шихтованому осерді розміром 60×36×36 мм<sup>3</sup>, виготовленому з трансформаторної сталі пластинами завтовшки 0,5 мм або тонше, що забезпечує відсутність когерентних завад з осердя імпульсного магніту.

З аналізу даних, наведених у табл. 1, також робимо висновок про доцільність зменшення тривалості імпульсу намагнічування, що дає можливість еконо-

мити енергію батареї живлення приладу та покращити температурний режим імпульсного магніту.

Результати впливу напруги живлення ключового каскаду на результати досліджень, при попередніх умовах, наведено в табл. 2. Тривалість імпульсу намагнічування зменшено до 225 мкс. Форма такого імпульсу намагнічування показана на рис. 9.

Аналіз даних, наведених в табл. 2 та на рис. 7, дають підстави стверджувати, що збільшення напруги живлення котушки намагнічування збільшує швидкість наростання імпульсного магнітного поля, що, в свою чергу, дає можливість скорочувати тривалість імпульсу намагнічування. При цьому МРС зростає майже до 13000 ампер-витків.

При виконанні експериментальних досліджень встановлено, що максимум струму намагнічування однозначно корелює з максимумом індукції магнітного поля в поверхневому шарі металу, який визначає максимум амплітуди ультразвукових інформаційних (донних) імпульсів.

Ефективною перевагою ЕМА перетворювачів є можливість вимірювань і контролю через шар діелектричного покриття, наприклад фарбового. Товщина такого покриття, як правило, може досягати 1...2 мм. Тому виконано дослідження впливу діелектричних прошарків між ЕМАП і ОК (табл. 3), а також між осердям імпульсного магніту та високочастотною котушкою індуктивності (табл. 4). Товщина діелектричної основи, в якій вмонтовано високочастотну котушку, складала 3 мм.

Дані, наведені в табл. 3, говорять про те, що вплив відстані між ЕМАП і поверхнею ОК на амплітуду ультразвукових імпульсів доволі суттєвий. Проте при типових товщинах фарбових покриттів 0,1...0,3 мм ЕМАП розробленого типу буде працювати ефективно.

При виконанні вищенаведених досліджень частота високочастотних пакетних імпульсів складала 2,3 МГц, частота зондування – 4 Гц, максимальний струм у котушці намагнічування – 2250 А,

Таблиця 1. Залежність амплітуди донних імпульсів  $A_1$  від часу затримки високочастотного пакетного імпульсу по відношенню до початку імпульсу намагнічування тривалістю 400 мкс при живленні вихідного ключового каскаду напругою 30 В

| Параметр   | Час затримки високочастотного імпульсу відносно початку імпульсу намагнічування |     |     |     |     |     |     |     |
|--|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|  | 50  | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 390 |
| Амплітуда першого донного імпульсу $A_1$ по відношенню до рівня завад, разів | 8   | 18  | 26  | 34  | 34  | 34  | 34  | 34  |

Таблиця 2. Залежність амплітуди донних імпульсів  $A_1$  та максимальної сили струму в котушці намагнічування від напруги живлення ключового каскаду при тривалості імпульсу намагнічування 225 мкс

| Параметр   | Величина параметра |     |      |      |      |      |
|--|--------------------|-----|------|------|------|------|
|  | 5                  | 10  | 15   | 20   | 25   | 30   |
| Напруга живлення вихідного ключового каскаду, В                              | 2                  | 10  | 19   | 28   | 32   | 36   |
| Амплітуда першого донного імпульсу $A_1$ по відношенню до рівня завад, разів | 325                | 775 | 1100 | 1600 | 2000 | 2250 |
| Максимальна сила струму в котушці намагнічування, А                          |                    |     |      |      |      |      |

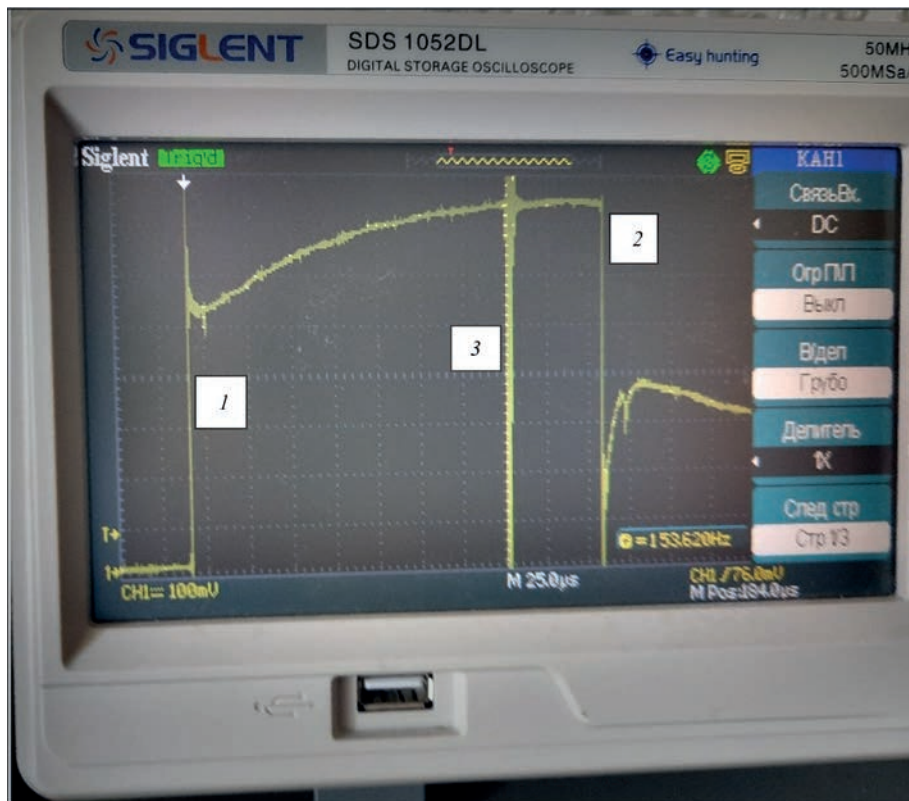


Рис.9. Форма імпульсу намагнічування тривалістю 225 мкс з наведеним високочастотним імпульсом: 1 – початок імпульсу намагнічування; 2 – кінець імпульсу намагнічування; 3 – високочастотний імпульс

Таблиця 3. Вплив товщини діелектричного прошарку на металі на амплітуду першого ультразвукового донного імпульсу

| Параметр   | Величина параметру |     |     |     |
|--|--------------------|-----|-----|-----|
| Товщина діелектричного прошарку між металом і ЕМАП, мм                         | 0,2                | 1,5 | 2,2 | 3,7 |
| Амплітуда першого донного імпульсу $A_1$ , по відношенню до рівня завод, разів | 34                 | 28  | 26  | 24  |

Таблиця 4. Вплив товщини діелектричного прошарку між осердям і високочастотною котушкою індуктивності ЕМАП на амплітуду ультразвукових донних імпульсів

| Параметр   | Величина параметру |     |     |     |     |     |     |
|--|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Товщина діелектричного прошарку між осердям і високочастотною котушкою індуктивності, мм | 0,2                | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,7 |
| Амплітуда першого донного імпульсу $A_1$ , по відношенню до рівня завод, разів           | 34                 | 34  | 32  | 32  | 30  | 30  | 26  |

кількість періодів частоти заповнення в пакетному імпульсі – 3, тривалість імпульсу намагнічування – 225 мкс, час затримки високочастотного імпульсу відносно початку імпульсу намагнічування – 175 мкс, напруга живлення вихідного ключового каскаду – 30 В.

Аналіз даних, наведених у табл. 4, дає можливість зробити висновок, що відстань від осердя імпульсного магніту до високочастотної котушки впливає на величину амплітуди ультразвукових імпульсів не сильно. Але цю відстань необхідно встановлювати мінімальною. «Дзвін» після зондуючого високочастотного імпульсу не змінюється при збільшенні відстані від осердя до високочастотної котушки.

Проте при збільшенні товщини діелектричного прошарку між ЕМАП і ОК з 0,2 до 1,7 мм збільшується величина «дзвону» і, відповідно, «мертва зона» з 18 до близько 35 мм. Це є суттєвим для оцінки якості металовиробу, тому необхідно розробляти пристрої для ефективнішого пригнічення амплітуди та тривалості «дзвону».

Ще одним параметром, що може впливати на амплітуду ультразвукових імпульсів, є тривалість високочастотного пакету, який визначається кількістю періодів частоти заповнення. Результати дослідження цього параметру наведено в табл. 5.

Аналіз даних, наведених в табл. 5, говорить про те, що для збудження та прийому ультразвукових імпульсів достатньо використовувати па-

Таблиця 5. Вплив тривалості пакету високочастотного імпульсу на амплітуду донного ультразвукового сигналу

| Параметр   | Величина параметру |    |    |    |    |    |
|--|--------------------|----|----|----|----|----|
| Кількість періодів частоти заповнення пакетного імпульсу живлення високочастотної котушки, шт. | 1                  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  |
| Амплітуда першого донного імпульсу $A_1$ , по відношенню до рівня завод, разів                 | 26                 | 34 | 35 | 36 | 36 | 36 |

кетний високочастотний імпульс тривалістю 3 або більше періодів заповнення частоти при встановлених вище величині та тривалості імпульсу намагнічування.

## Висновки

Розроблено стенд для експериментальних досліджень факторів, які визначають ефективність приладу для ультразвукового контролю феромагнітних матеріалів при імпульсному намагнічуванні ЕМАП.

Виконані дослідження показали, що величина корисного сигналу суттєво залежить від часового положення високочастотного імпульсу по відношенню до початку імпульсу намагнічування. Величина затримки високочастотного імпульсу повинна визначатися експериментально для конкретного феромагнітного матеріалу ОК.

Доведено, що індуктивність імпульсного магніту повинна бути мінімальною, активний опір котушки намагнічування також повинен бути мінімальним. У результаті тривалість імпульсу намагнічування не перевищує 200...300 мкс, з робочою частиною імпульсу намагнічування, яка забезпечує вимірювання, контроль і діагностику феромагнітних сталевих металовиробів завтовшки до 150...200 мм. Для портативних ЕМА приладів витрати енергії живлення будуть мінімальними.

Показано, що ефективний імпульсний магніт ЕМА перетворювача доцільно виготовляти з пластин трансформаторної сталі, так щоб площини пластин були нормальними по відношенню до робочої частини провідників високочастотної котушки. Розмір осердя доцільно вибирати 30×30×60...50×50×60 мм<sup>3</sup>. При цьому кількість витків котушки імпульсного магніту приблизно повинна складати 6 шт. з розміром провідника 10×1 мм<sup>2</sup>.

Збільшення напруги живлення імпульсного магніту суттєво зменшує час наростання магнітного поля і, відповідно, зменшує тривалість імпульсу намагнічування, що важливо для підтримки температурного режиму ЕМАП.

## Список літератури

1. Лютак І.З. (2011) *Контроль пружних властивостей металу стінки магістральних трубопроводів акустичними методами*: дис. ... докт. техн. наук: 05.11.13. Івано-Франківськ.
2. Цапенко В.К., Куц Ю.В. (2010) *Основи ультразвукового неруйнівного контролю*. Підручник. Київ.
3. Плеснецов С. Ю. (2021) *Розвиток методів та засобів для електромагнітно-акустичного контролю стрижневих, трубчастих та листових металовиробів*: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.11.13. Харків.
4. Карпаш М.О., Рибіцький І.В., Котурбаш Т.Т., Бондаренко О.Г., Карпаш О.М. (2012) *Акустичний контроль конструкцій та устаткування у нафтогазовій галузі. Монографія*. Івано-Франківськ, ІФНТУНГ.

5. Десятніченко О.В. (2015) *Електромагнітно-акустичний товщиномір для контролю металовиробів з діелектричними покриттями*: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13. Харків.
6. Сайт компанії NORDINKRAFT [електронний ресурс]. Режим доступу: [www.nordinkraft.de/](http://www.nordinkraft.de/). (Дата звернення: 08.05.2020).
7. Kogia, M., Gan, T.H., Balachandran, W., Livadas, M., Kappatos, V., Szabo, I., Mohimi, A., Round, A. (2016) High temperature shear horizontal electromagnetic acoustic transducer for guided wave inspection. *Sensors*, 16(4), 582. DOI: <https://doi.org/10.3390/s16040582>
8. Mirkhani, K., Chaggares, C., Masterson, C., Jastrzebski, M., Dusatko, T., Sinclair, A., Shapoorabadi, R.J., Konrad, A., Papini, M. (2004) Optimal design of EMAT transmitters. *NDT E Int.*, 37, 181–193. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2003.09.005>
9. Boughedda, H., Hacib, T., Chelabi, M., Acikgoz, H., Le Bihan, Y. (2015) Electromagnetic Acoustic Transducer for Cracks Detection in Conductive Material. In: *Proc. of 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. pp. 1–4. IEEE Conference Publications. DOI: <https://doi.org/10.1109/INTEE.2015.7416717>
10. Суворова М.Д. (2019) Розробка намагнічувальних джерел для ЕМА перетворювачів на основі потужних постійних магнітів. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка*, 1, 63–73. <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/b622d95b-faa3-4ee4-afce-ae6a33c54c67/content>
11. Буссі Салам (2020) *Електромагнітно-акустичні перетворювачі для ультразвукового контролю металовиробів*: дис. ... канд. техн. наук, НТУ «ХПІ».
12. Донченко А.В., Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Кропачек О.Ю. (2024) *Накладний суміщений електромагнітно-акустичний перетворювач з імпульсним намагнічуванням для контролю феромагнітних металовиробів*. Патент України на корисну модель №156088. Заявка №U202304534 від 25.05.2023 р. Опубл. 08.05.2024. Бюл. №19.
13. Fortunko, C.N. Maclauchlan, D. *Pulsed electromagnets for EMATS*. Fracture and Deformation Division National Bureau of Standards Boulder, CO 80303.
14. Сучков Г.М., Мигущенко Р.П., Плеснецов С.Ю., Кошкарів Ю.Ю., Кальницький М.Е. (2024) Моделювання імпульсних джерел магнітного поля портативних ультразвукових електромагнітно-акустичних перетворювачів для вимірювань, контролю та діагностики. *Метрологія та прилади*, 1, 28–31. DOI: <https://doi.org/10.30837/2663-9564.2024.1.06>
15. Сучков Г.М., Мигущенко Р.П., Кошкарів Ю.Ю., Бойко В.М., Донченко А.В. (2023) Стан розвитку портативних електромагнітно-акустичних перетворювачів для вимірювань, контролю та діагностики феромагнітних металовиробів (огляд). *Подільський вісник: сільськогосподарські, технічні, економічні і ветеринарні науки*, 4(41), 54–61. DOI: <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-4.8>
16. Сучков Г.М., Донченко А.В. (2023) Удосконалення електромагнітно-акустичних перетворювачів для ультразвукового контролю якості феромагнітних металовиробів. *Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: зб. тез доповідей міжнародної наукової інтернет-конференції*, 6–7 лютого 2023 р., Тернопіль–Перевоцьк, Вип. 74, сс. 192–194.
17. Сучков Г.М., Мигущенко Р.П., Плеснецов С.Ю. та ін. (2025) Підвищення чутливості електромагнітно-акустичних перетворювачів для контролю, вимірювання і діагностики феромагнітних металовиробів за рахунок збільшення величини індукції магнітного поля (огляд). *Технічна електродинаміка*, 2, 85–95. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2025.02.085>
18. Bolyukh, V.F., Suchkov, G.M., Mygushchenko, R.P., Kalnytskyi, M.E. (2025) Determination of parameters of an autonomous source of a constant magnetic field for a portable electromagnetic-acoustic transducer. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 4, 72–79. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.4.09>
19. Сучков Г., Кальницький М., Дмитренко М., Бобров О. (2025) Універсальний стенд та обладнання для дослід-

ження електромагнітно-акустичних перетворювачів з імпульсним джерелом поляризованого магнітного поля. *Методи та прилади контролю якості*, 1(54), 13–28. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2025-1\(54\)-13-28](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2025-1(54)-13-28)

## References

- Liutak, I.Z. (2011) *Control of elastic properties of the metal wall of main pipelines by acoustic methods*: PhD Thesis: 05.11.13. Ivano-Frankivsk [in Ukrainian].
- Tsapenko, V.K., Kuts, Yu.V. (2010) *Fundamentals of ultrasonic nondestructive testing*. Textbook. Kyiv [in Ukrainian].
- Pliesnetsov, S.Yu. (2021) *Development of methods and means for electromagnetic and acoustic inspection of rod, tube and sheet metal products*: PhD Thesis: 05.11.13. Kharkiv [in Ukrainian].
- Karpash, M.O., Rybitskyi, I.V., Koturbash, T.T., Bondarenko, O.H., Karpash, O.M. (2012) *Acoustic control of structures and equipment in the oil and gas industry*. Monograph. Ivano-Frankivsk, IFNTUOG [in Ukrainian].
- Desiatnichenko, O.V. (2015) *Electromagnetic and acoustic thickness gauge for inspection of metal products with dielectric coatings*: PhD Disc.: 05.11.13. Kharkiv [in Ukrainian].
- NORDINKRAFT. The quality guard. [www.nordinkraft.de/](http://www.nordinkraft.de/). (Application Date: 08.05.2020).
- Kogia, M., Gan, T.H., Balachandran, W. et al. (2016) High temperature shear horizontal electromagnetic acoustic transducer for guided wave inspection. *Sensors*, 16(4), 582. DOI: <https://doi.org/10.3390/s16040582>
- Mirkhani, K., Chaggares, C., Masterson, C. et al. (2004) Optimal design of EMAT transmitters. *NDTE Int.*, 37, 181–193. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2003.09.005>
- Boughedda, H., Hacib, T., Chelabi, M. et al. (2015) Electromagnetic Acoustic Transducer for Cracks Detection in Conductive Material. In: *Proc. of 4th Intern. Conf. on Electrical Engineering (ICEE)*, 1–4. IEEE Conference Publications. DOI: <https://doi.org/10.1109/INTEE.2015.7416717>
- Suvorova, M.D. (2019) Development of magnetic sources for EMO converters on the basis of powerful permanent magnets. *Visnyk NTU KhPI. Seriya: Elektroenergetyka ta Peretvoriuvalna Tekhnika*, 1, 63–73 [in Ukrainian]. <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/b622d95b-faa3-4ee4-afce-ae6a33c54c67/content>
- Bussi Salam (2020) *Electromagnetic and acoustic transducers for ultrasonic inspection of metal products*. PhD Thesis, NTU KhPI [in Ukrainian].
- Donchenko, A.V., Myhushchenko, R.P., Suchkov, H.M., Kropachek O.Yu. (2024) *Surface-mounted combined electro-*
- magnetic and acoustic transducer with pulse magnetization for control of ferromagnetic metal products*. Patent UA for utility model 156088. Application U202304534, 25.05.2023. Publ. 08.05.2024 [in Ukrainian].
- Fortunko, C.N., Maclauchlan, D. *Pulsed electromagnets for EMATS*. Fracture and Deformation Division National Bureau of Standards Boulder, CO 80303.
- Suchkov, H.M., Myhushchenko, R.P., Pliesnetsov, S.Yu., Koshkarov, Yu.Yu., Kalnytskyi, M.E. (2024) Modelling of pulsed magnetic field sources of portable ultrasonic electromagnetic-acoustic transducers for measurement, control and diagnostics. *Metrolohiia ta Prylady*, 1, 28–31 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.30837/2663-9564.2024.1.06>
- Suchkov, H.M., Myhushchenko, R.P., Koshkarov, Yu.Yu., Boiko, V.M., Donchenko, A.V. (2023) The state of development of portable electromagnetic-acoustic transducers for measurement, control and diagnostics of ferromagnetic metal products (Review). *Podilskyi Visnyk: Silske Hospodarstvo, Tekhnika, Ekonomika. Silskohospodarski, Tekhnichni, Ekonomichni i Veterynarni Nauky*, 4(41), 54–61 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-4.8>
- Suchkov, H.M., Donchenko, A.V. (2023) Improvement of electromagnetic-acoustic transducers for ultrasonic quality control of ferromagnetic metal products. In: *Technological, Economic and Technical Aspects of Formation In: Abstr. of Papers of Intern. Sci. Internet Conf.*, 6–7 February 2023, Ternopil-Perevorsk, Issue 74, 192–194 [in Ukrainian].
- Suchkov H.M., Myhushchenko R.P., Pliesnetsov S.Iu., Pliesnetsov Yu.O., Kurando O.I., Aleksiiiv A.H., Borodenko O.M., Butenko O.I., Rybalko A.O. (2025) Increasing the sensitivity of electromagnetic-acoustic transducers for testing, measurement and diagnostics of ferromagnetic metal products via increase in the value of magnetic field induction (overview). *Tekhnichna elektrodynamika*, 2, 85–95 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2025.02.085>
- Bolyukh, V.F., Suchkov, G.M., Mygushchenko, R.P., Kalnytskyi, M.E. (2025) Determination of parameters of an autonomous source of a constant magnetic field for a portable electromagnetic-acoustic transducer. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 4, 72–79. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.4.09>
- Suchkov, H., Kalnytskyi, M., Dmytrenko, M., Bobrov, O. (2025) Universal test bench and equipment for studying electromagnetic-acoustic transducers with a pulsed source of polarizing magnetic field. *Metody ta Prylady Kontroliu Yakosti*, 1(54), 13–28 [in Ukrainian]. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2025-1\(54\)-13-28](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2025-1(54)-13-28)

## EXPERIMENTAL STUDIES OF MEASURING COMBINED ULTRASONIC STRAIGHT ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC TRANSDUCERS WITH PULSED MAGNETIZATION.

G.M. Suchkov, M.E. Kalnytskyi, A.V. Donchenko, O.I. Kurando, A.H. Aleksiiiv, O.M. Borodenko, O.I. Butenko, A.O. Rybalko

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». 61002, Kharkiv, Kyrpychova Str., 2. E-mail: [suchkov@gmail.com](mailto:suchkov@gmail.com)

At present, a wide variety of designs for electromagnetic-acoustic transducers (EMATs) are known, which are intended for measurements, quality control, and diagnostics of materials and products. Such transducers generate and receive pulses of all known ultrasonic wave types in metal products, both ferromagnetic and non-ferromagnetic. Recently, there has been intensive development of transducers that use powerful pulsed magnetic fields. On one hand, these are structurally more complex under the same conditions, but on the other hand, they offer a significant advantage when measuring characteristics of ferromagnetic objects, since they practically eliminate mutual attraction forces. The complexity of EMAT designs with pulsed magnetization necessitates research into optimal parameters and the application of new operating methods, considering the simultaneous interaction of dynamic magnetic and high-frequency electromagnetic fields in the surface layer of the metal product – during both the excitation and reception of ultrasonic wave pulses. It is especially important to account for such interaction in widely used measuring combined ultrasonic straight EMATs with pulsed magnetization. Therefore, it is advisable to conduct mandatory experimental studies to determine the optimal parameters, as the available theoretical works do not provide sufficiently accurate results needed for the development of technologies and the design of new measurement and control tools operating with pulsed magnetization. 19 Ref., 5 Tabl., 9 Fig.

*Keywords: experimental research, ferromagnetic product, ultrasonic pulses, electromagnetic-acoustic, measurement, control, diagnostics, magnetic field, electromagnetic field, pulsed magnetization*

Отримано 07.07.25

Отримано у переглянутому вигляді 07.08.25

Прийнято 15.09.25