

ПІДВИЩЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ, ВИМІРЮВАННЯ І ДІАГНОСТИКИ ФЕРОМАГНІТНИХ МЕТАЛОВИРОБІВ ЗА РАХУНОК ЗБІЛЬШЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ (ОГЛЯД)

Г.М. Сучков¹, докт.техн.наук, Р.П. Мигущенко², докт.техн.наук, С.Ю. Плєснецов³, докт.техн.наук., Ю.О. Плєснецов⁴, канд.техн.наук., О.І. Курандо⁵, А.Г. Алексїїв⁶, О.М. Бороденко⁷, О.І. Бутенко⁸, А.О. Рибалко

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна.

Е-mail: hpi.suchkov@gmail.com; mrp1@ukr.net; serhii.pliesnetsov@khpi.edu.ua;
yurii.pliesnetsov@khpi.edu.ua.

Виконано аналіз інформаційних джерел з питання розробки та використання електромагнітно-акустичних методів і засобів ультразвукового контролю, вимірювань та діагностики. Показано, що електромагнітно-акустичні (ЕМА) перетворювачі (ЕМАП) з постійними магнітами у порівнянні з п'єзоелектричними перетворювачами мають не тільки значні переваги, але і недоліки особливо під час діагностики феромагнітних металовиробів як в нормальному, так і гарячому стані, особливо у разі їхнього використання в портативних ультразвукових приладах. Багато фахівців пропонують виключити недоліки ЕМАП з постійними магнітами за рахунок використання імпульсного намагнічування. Такий напрямок досліджень є перспективним, особливо під час контролю гарячого металу, оскільки дає змогу створювати імпульсні магнітні поля з піковим значенням 2...3 і навіть 10 Тл, що дає можливість суттєво підвищити чутливість контролю, оскільки коефіцієнт перетворення електромагнітної енергії в ультразвукову і навпаки залежить від індукції магнітного поля квадратично. Але до цього часу даних про широке використання імпульсного намагнічування в портативних ЕМАП не встановлено. Такий стан обумовлений малим зазором між ЕМАП і металом, недостатніми розробками технологій функціонування ЕМАП, складністю апаратної реалізації, труднощами у боротьбі з завадами, що виникають під час збудження імпульсного магнітного поля тощо. Тому задля впровадження такого перспективного напрямку розвитку чутливих ЕМА перетворювачів слід виконати теоретичні і практичні розробки, що дасть можливість впровадити у виробництво високотехнологічні засоби контролю, вимірювань і діагностики. Бібл. 31, рис. 9.

Ключові слова: ультразвук, чутливість, вимірювання, контроль, діагностика, ЕМАП, імпульсний магніт, феромагнітний металовиріб.

Вступ. Для вимірювань, контролю та діагностики металовиробів використовують різні методи [1]. Найбільш поширений з них є ультразвуковий. При цьому, як правило, використовують методи, для яких обов'язкове використання контактної рідини. Для цього необхідно видалити з поверхні об'єкту контролю (ОК) бруд, іржу, зменшити шорсткість тощо, що вимагає суттєвих витрат часу та інструменту. Труднощі мають місце під час контролю ОК із значною кривизною поверхні, в нагрітому або охолодженому стані. Продуктивність автоматичної діагностики труб, листів заготовок тощо не перевищує 1 м/с, а у разі ручного контролю – не більше 100 мм/с, тобто є недостатньою.

© Сучков Г.М., Мигущенко Р.П., Плєснецов С.Ю., Плєснецов Ю.О., Курандо О.І., Алексїїв А.Г., Бороденко О.М., Бутенко О.І., Рибалко А.О., 2025

ORCID: ¹ <https://orcid.org/0000-0002-1805-0466>; ² <https://orcid.org/0000-0002-3287-9772>;

³ <https://orcid.org/0000-0001-8428-5426>; ⁴ <https://orcid.org/0000-0002-4782-263X>;

⁵ <https://orcid.org/0009-0008-6687-3126>; ⁶ <https://orcid.org/0009-0001-1878-526X>;

⁷ <https://orcid.org/0009-0007-4264-1534>; ⁸ <https://orcid.org/0009-0009-9636-8734>;

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2025



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Вирішити проблему можливо за рахунок використання електромагнітно-акустичного (ЕМА) способу збудження і прийому ультразвукових імпульсів [2–4]. Ультразвукові портативні прилади з електромагнітно-акустичними перетворювачами (ЕМАП) більш складні за конструкцією і технологією використання [3]. Окрім того багато фахівців вважають, що ЕМА перетворювачі мають недостатню чутливість [5] (відношення амплітуди ультразвукового імпульсу до амплітуди завад). Проте складність реалізації ЕМА методу компенсується разовими витратами на розробку, в той час як контактний метод ультразвукового контролю потребує постійних економічних витрат на зачистку поверхні кожного виробу, знос інструменту і п'єзоелектричних перетворювачів (ПЕП), а також витрат на контактну рідину [2]. Тому з економічної точки зору він значно вигідніший [2]. Проте, ЕМА перетворювачі мають не тільки переваги, але і недоліки.

Метою роботи є визначення напрямку підвищення чутливості електромагнітно-акустичних перетворювачів для портативних ультразвукових приладів під час збудження і прийому ультразвукових імпульсів за рахунок збільшення величини індукції магнітного поля.

Ультразвукові ЕМА методи і прилади, які використовують в складі ЕМАП джерела постійного магнітного поля. Переваги ЕМА методів і приладів заключаються в наступному [2–4, 6, 7]: ЕМА метод дає можливість реалізувати всі відомі методи ультразвукового контролю, вимірювань та діагностики. ЕМА способом можливо збуджувати та приймати ультразвукові коливання усіх відомих типів хвиль: об'ємні зсувні та поздовжні, горизонтально поляризовані *SH* хвилі, хвилі Релея та Лемба. Він забезпечує збудження та прийом зсувних ультразвукових імпульсів нормально до поверхні ОК незалежно від її кривизни. Поляризація таких імпульсів може бути як лінійною, так і радіальною. Збуджувані ЕМАП зсувні ультразвукові імпульси мають набагато вищу чутливість [8] щодо виявлення надтонких розшарувань, наприклад, в листах, залізничних рейках, трубах тощо; чутливість до корисного сигналу для ЕМАП вища, ніж для п'єзоелектричних перетворювачів (ПЕП) за низьких температур ОК. ЕМАП дають змогу виконувати ультразвуковий контроль в сталях з температурою до 1200⁰С, що неможливо для ПЕП. Зсувні імпульси мають приблизно вдвічі меншу швидкість розповсюдження у матеріалі у порівнянні з поздовжніми, що надає значну перевагу при товщинометрії та вимірюванні роздільної здатності щодо визначення координат дефектів [3], які розташовані поряд. ЕМАП може збуджувати та приймати зсувні ультразвукові коливання в широкому діапазоні частот, що дає можливість збільшити точність вимірювань у порівнянні з стандартними ПЕП. Одним ЕМАП можливо збуджувати і приймати одночасно кілька видів ультразвукових хвиль, що неможливо ПЕП. Змінюючи частоту імпульсів живлення одного ЕМА перетворювача можливо сканувати об'єм виробу під різними кутами введення ультразвукових променів [2]. ЕМА метод дає змогу проводити контроль через діелектричні покриття товщиною до 20 мм [9] та електропровідні прошарки товщиною кілька десятків міліметра. Іржа, невідлущена нетовста окалина, шар рідини та бруду, шорсткість поверхні ОК не впливають на результати вимірювань об'ємними зсувними хвилями, збуджених ЕМАП. ЕМАП не навантажує акустично поверхню ОК, що виключає проблеми, які пов'язані з ревербераційними процесами в шарі контактної або імерсійної рідини у випадку використання ПЕП. Економічні витрати за рахунок виключення зачистки поверхні ОК у випадку використання ЕМАП зменшуються майже у 2 рази [2]. ЕМА метод забезпечує можливість виявлення відшарування діелектричного покриття за рахунок збудження і прийому ультразвукових імпульсів ЕМАП виключно в поверхневому шарі металевго ОК. За рахунок форми високочастотної котушки індуктивності ЕМАП [4] забезпечується можливість фокусувати ультразвукове поле в заданому місці поверхневого шару або в об'ємі ОК. ЕМА метод дає можливість виконувати ультразвуковий контроль та дефектометрію зсувними ультразвуковими імпульсами без неконтрольованого поверхневого шару металу ОК [2]. За певних умов ЕМАП дають можливість проводити ультразвуковий контроль феромагнітних металовиробів за індукції магнітного поля 0,2...0,3 Тл [2]. ЕМА методом ефективно вимірюються фізико-механічні характеристики поверхні та об'єму матеріалів [10].

З іншої точки зору прилади з ЕМАП (з постійним магнітним полем), як вважається деякими фахівцями, мають свої недоліки, особливо під час контролю феромагнітних матеріалів: порівняно низька чутливість щодо корисного сигналу [5]; значний вплив зміни величини зазору між ЕМАП і металічною поверхнею ОК [2–4]. У разі контролю феромагнітних ОК зазор між ЕМАП і металовиробом заповнюється іржею, окалиною, частинками металу тощо, що приводить до зниження чутливості (екранування), а також до появи когерентних імпульсів завад зі значною амплітудою [2]. У разі ручного контролю ЕМАП з постійними магнітами складно видаляти металічні частинки з

ферромагнітного матеріалу, що налипають на перетворювач [2]. Необхідність надійно захищати перетворювач від електромагнітних завад; ЕМАП сильно притискається до ферромагнітного ОК [2]. Для ЕМАП з потужними постійними магнітами необхідно використовувати механічні системи для сканування, що ускладнює його конструкцію; можливе збудження ультразвукових когерентних завад в металічних елементах ЕМАП та в магніті [2, 11].

В той же час встановлено значний інтерес до розвитку ЕМА перетворювачів та методів контролю, оскільки, наприклад, на сьогоднішній день навіть в навчальній літературі є відповідні розділи [12]. В портативних приладах його можливості обмежені складністю реалізації, необхідністю створювати значну величину індукції магнітного поля і силу струмів в високочастотних котушках індуктивності перетворювачів. Проте потреба в таких портативних приладах значна [2, 11].

Проблема живленням високочастотних котушок індуктивності короткими пакетними імпульсами у вигляді пуга з часовою тривалістю кілька мікросекунд струмами силою в сотні ампер вирішується шляхом використання сучасних високочастотних напівпровідникових польових елементів [3, 4].

Проблеми, пов'язані з магнітним полем ЕМАП, набагато складніші. Відомі роботи, в яких йдеться про створення джерел потужних імпульсних магнітних полів на час порядку декількох мілісекунд, наприклад, [13], результати яких можливо використати під час побудови вузлів для використання в складі ЕМА перетворювачів.

Аналіз розробок ЕМАП з використанням джерел імпульсного намагнічування. Багато дослідників стверджують [14–31], що величини магнітної індукції, які створюються імпульсними електромагнітами, можуть перевищувати в кілька разів значення, що формуються магнітними системами портативних приладів з використанням постійних магнітів. Таким чином можливо суттєво збільшити чутливість ЕМАП. Проте використання імпульсних магнітів в складі ЕМА перетворювачів напевне мають особливості, оскільки є одночасна взаємодія котушки імпульсного намагнічування і високочастотної котушки індуктивності через вплив матеріалу ОК та відносного положення ЕМАП і металу.



Рис. 1. Зображення в подробицях ЕМАП ультразвукового портативного товщиноміра з джерелом імпульсного намагнічування [14 фіг.6], наведеного в огляді дисертації [15, рис. 1.9]

Так в роботі [14, фіг. 6] використано дані з роботи Alekhin S.G. за результатами розробки ЕМА товщиноміра з перетворювачем, який має імпульсне джерело поляризованого магнітного поля. Використано технологію збудження і прийому поперечних ультразвукових імпульсів. Моделювання магнітного поля ЕМАП виконав Alekhin S.G. в дисертації з використанням пакетів програм COMSOL Multiphysics. Зображення розробленого ЕМАП наведено на рис. 1.

Для виконання одного циклу зондування розробленим товщиноміром у разі конфігурації магнітної системи у вигляді розімкнутого броньового осердя (рис. 1) в площині діаметром 7 мм (акустична апертура ЕМАП) задля формування величини магнітної індукції величиною не менше 0,6 Тл витрачається близько 0,7 Дж енергії. Загальна тривалість одного зондування становить близько 0,9 мс (в іншому місці роботи говориться про 320 мкс). Імпульсна потужність складає 1 кВт. За частоти повторень 20 Гц середня потужність споживання системою імпульсного підмагнічування становитиме близько

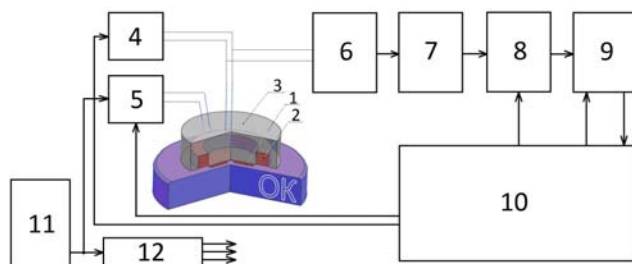


Рис. 2. Узагальнена блок-схема ручного портативного товщиноміра з імпульсним намагнічуванням ОК

14 Вт. Така потужність призводить до нагрівання магнітопроводу перетворювача і буде змінювати магнітні характеристики його матеріалу, що недопустимо.

Блок-схему товщиноміра наведено на рис. 2 (дисертація Alekhin S.G.). Очевидно, що цей ЕМА товщиномір суттєво складніший, ніж традиційний [3] як за конструкцією, так і за алгоритмом роботи. Прилад складається з наступних блоків: 1 – високочастотна котушка індуктивності; 2 – котушка пристрою

намагнічування; 3 – магнітопровід пристрою намагнічування; 4 – генератор зондувального високочастотного імпульсу; 5 – генератор імпульсного струму намагнічування; 6 – вхідний обмежувач напруги; 7 – вхідний підсилювач; 8 – регульований підсилювач; 9 – аналого-цифровий перетворювач; 10 – блок управління та обробки сигналів; 11 – акумулятор; 12 – блок живлення. В загальному таку схему доцільно взяти за основу.

Генератор зондувального високо частотного імпульсу, призначений для формування струму порядку 50-100 ампер в високочастотній котушці індуктивності, виконаний за ключовою схемою та забезпечує формування прямокутного імпульсу тривалістю, що дорівнює половині періоду робочої частоти.

Такий підхід не є оптимальним, оскільки, згідно з роботами [5–7, 15–17], короткий імпульс збуджуючий ЕМАП має широку частотну смугу, що приводить до суттєвого зниження відношення амплітуд донних імпульсів і завад. Окрім того з рис. 1 можна зробити висновок про формування в металічних елементах перетворювача когерентних завад, які дуже складно придушити. Тобто, чутливість такого приладу є недостатньою.

В роботі [17] наведено макет ЕМА перетворювача (рис. 3), в якому вектор індукції магнітного поля направлений переважно вздовж поверхні метало-виробу задля збудження імпульсів позовжніх хвиль, хвиль Релея та Лемба.



Рис. 3. Макет ЕМАП для збудження і прийому хвиль Релея, Лемба та хвиль нормального типу [17]

Розроблений імпульсний магніт [17] має котушку з 30 витків, яку намотано дротом діаметром 1 мм на сердечнику товщиною більше 3,6 мм з набору пластин електротехнічної сталі (що доцільно використовувати під час побудови джерела намагнічування ЕМАП) товщиною 60 мкм. Відстань між полюсами магніту 70 мм. Розміри полюсів магніту повинні бути більше 40x10 мм².

Під час досліджень з використанням магніто-стрикційного механізму збудження ультразвукових імпульсів магніт живився імпульсами струму 80 А тривалістю 100 мкс, що забезпечувало отримання МРС порядку 3000 ампер-витків. В результаті створено магнітні поля з напруженістю до $350 \cdot 10^2$ А/м у скін-шарі масивного феромагнітного матеріалу з урахуванням його нелінійних властивостей при зазорах до 1,5 мм, що важливо у процесі сканування ОК.

Високочастотна котушка індуктивності ЕМАП живилася цугом 5...10 періодів частоти 0,5 МГц. Але конкретних результатів з отримання ультразвукових імпульсів хвиль Релея, Лемба або нормальних поперечних хвиль (*SH*), що декларують автори, не наведено. Це знижує цінність наведених в роботі результатів і не дає можливості оцінити чутливість такого приладу.

Окрім того, не розглянуто важливе питання стабільності температурного режиму такого імпульсного магніту.

Автори роботи [18] спроектували ЕМАП (рис. 4) з вузлом імпульсного намагнічування з часовою тривалістю намагнічування 400 мкс, використавши моделювання з використанням пакету програм COMSOL Multiphysics, двомірної моделі кінцевих елементів для об'ємної зсувної хвилі. Як і в

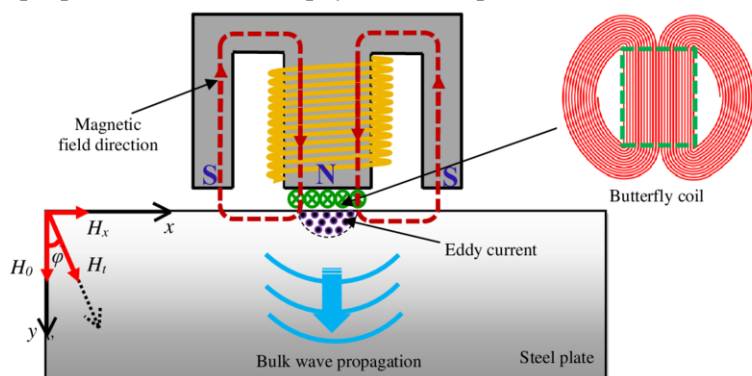


Рис. 4. Схематичне зображення ЕМАП з джерелом імпульсного намагнічування та високочастотної котушки індуктивності і його взаємодія з ОК [18]

попередніх випадках, магнітна система має П-подібну форму, що однозначно обумовлює сильну залежність ультразвукового сигналу від зазору між ЕМАП і поверхнею ОК. Як стверджують автори, розроблений перетворювач показав свою ефективність у порівнянні з ЕМАП на постійних магнітах, але конкретних результатів порівняння не наведено.

Значну кількість досліджень складають публікації, які присвячені

контролю, вимірюванням і діагностики матеріалів і виробів в гарячому стані [19–22]. В основному використовуються ЕМАП з імпульсним намагнічуванням з охолодженням повітрям або рідиною. З наведених публікацій, на наш погляд, має значний інтерес приклад використання ЕМАП з джерелом імпульсного магнітного поля, яке не має сердечника [22]. Перевагою такого варіанту є слабка залежність характеристик ЕМАП від температури та простота конструкції. Проте очевидно, що отримати значні величини індукції магнітного поля складніше.

Автори [22] дослідили ЕМАП з циліндричними імпульсними котушками намагнічування без феромагнітних сердечників і отримали донні імпульси, які за амплітудою ультразвукових сигналів (чутливістю) можуть використовуватися для товщинометрії парамагнітних металовиробів (рис. 5) при зазорі 0,25 мм. За ствердженнями авторів під час досліджень імпульсне магнітне поле досягало майже 2 Тл за струму в котушці намагнічування близько 3 кА. Автори не навели даних, в якому об'ємі формується таке поле та яка тривалість робочої зони імпульсу магнітного поля. Під час досліджень за температури 500°C використана високо-частотна котушка з 30 витків дроту діаметром 0,1 мм з чистого срібла. Даних по котушці намагнічування автори не навели, окрім загальних зовнішніх розмірів 45x20 мм² з внутрішнім діаметром 15 мм.

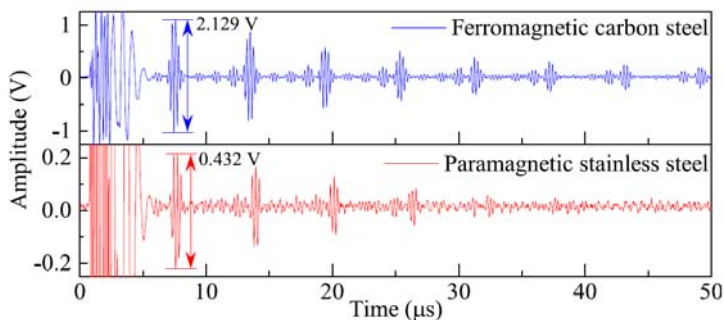


Рис. 5. Часові розгортки з донними імпульсами з зразків феромагнітної і парамагнітної (нержавіючої) сталі, що отримані з використанням імпульсного електромагніту в складі ЕМАП [22]

Слід звернути увагу, що відношення амплітуд донних імпульсів до завад (чутливість), як і для випадку використання постійних магнітів, для нержавіючої сталі суттєво гірше, ніж для феромагнітної сталі.

Ще більш важливим є те, що чутливість, отримана авторами роботи [22] за імпульсного намагнічування полем 2 Тл і зазорі 0,25 мм значно менша, ніж у разі використання постійного магніту і зазорі 2 мм (поле близько 0,7 Тл) [3, 9] (рис. 6).

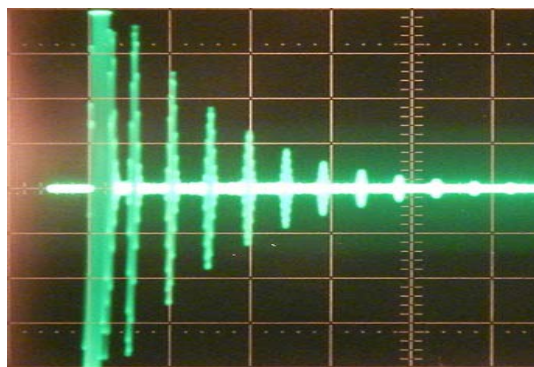


Рис. 6. Порівняльна часова розгортка з донними імпульсами з сталевого зразка, ст.45 товщиною 40 мм, при використанні ЕМАП з постійним намагнічуванням зазор 2 мм (плюс протектор 1,5 мм) [3, 9]

постійного намагнічування.

У багатьох роботах [21–26] розглянуто питання технології та конструкцій ЕМАП для контролю об'ємними хвилями металовиробів під час імпульсного намагнічування.

Так, у процесі використання нормальних хвиль задля виявлення дефектів в тонких металовиробах встановлено, що діагностика модами *A0* має більшу чутливість, ніж модами типу *S0* [24]. Такі результати слід використовувати.

Доволі глибоко розглянуто питання побудови ЕМАП з імпульсними магнітами [15, 27] як шляхом моделювання і з використанням пакету програм COMSOL Multiphysics, так і експериментально.

В той же час в роботі [21] шляхом моделювання з використанням пакету програм COMSOL Multiphysics і експериментально було досліджено можливості контролю якості сталі та алюмінію в нагрітому до 200...300 °С стані. За експериментальними дослідженнями стверджується, що амплітуда ультразвукового сигналу перевищує аналогічний для постійних магнітів більш, ніж в 3 рази. Проте конкретних даних, за яких умовах отримано результати, не наведено.

Очевидна невідповідність декларації щодо підвищення чутливості, враховуючі квадратичну залежність ультразвукового сигналу від індукції магнітного поля. Тому порівняння наведених результатів вимагає додаткових теоретичних і експериментальних досліджень задля виявлення причин неоднозначної відповідності результатів використання імпульсного і

На рис. 7 наведено розроблений авторкою оригінальний варіант макету ЕМАП з джерелом імпульсного намагнічування [15], де позначено: 1 – корпус; 2 – плоска високочастотна котушка індуктивності; 3 – джерело магнітного поляризуючого поля; 4 і 5 – електричні з'єднувачі; 6 – протектор; 7 – отвір в плоскій високочастотній котушці індуктивності; 8 і 9 – лінійні робочі ділянки паралельних провідників плоскої високочастотної котушки індуктивності; 10 – плоска котушка індуктивності; 11 і 12 – прямокутні отвори в плоскій котушці індуктивності; 13 – шихтований П-подібний феромагнітний сердечник; 14 і 15 – торці феромагнітного сердечника; 16 – ізолюючі прокладки між витками плоскої котушки індуктивності джерела магнітного поляризуючого поля; 17 – ОК. Стрілками показано напрямок поширення збуджених синфазних лінійно поляризованих ультразвукових імпульсів нормально поверхні виробу.

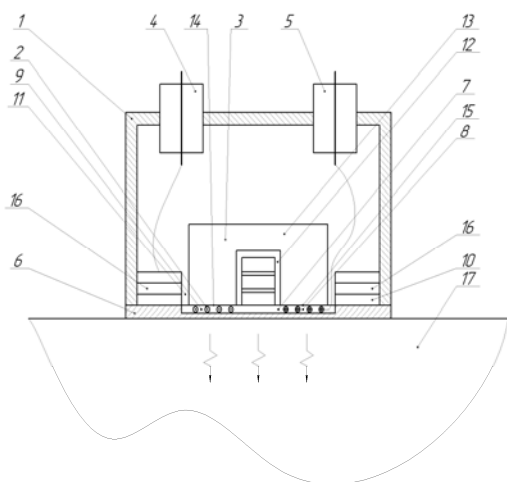


Рис. 7. Спрощене зображення конструкції ЕМАП з джерелом імпульсного намагнічування [15] на поверхні ОК

Авторка встановила шляхом моделювання та експериментально, що котушка джерела намагнічування повинна бути плоскою, двовіконною, з трьома витками та виготовленою з цільної пластини високоелектропровідного і теплопровідного матеріалу, наприклад, міді товщиною 1...1,5 мм. Вона має використовуватися разом з плоскою високочастотною котушкою індуктивності еліптичного типу з двома лінійними робочими ділянками. Вікна котушки індуктивності джерела магнітного поля повинні розташовуватися над робочими ділянками котушки. Доцільно використання феромагнітного осердя за умови усунення завад, обумовлених магнітострикційним перетворенням електромагнітної енергії в ультразвукову і навпаки під час прийому відбитих від виробу імпульсів.

Поставлена задача вирішується наступним чином. В корпусі ЕМАП розташовують плоску високочастотну котушку індуктивності, джерело магнітного поляризуючого поля, електричні з'єднувачі та протектор (рис. 7). Плоска високочастотна котушка індуктивності виконана еліптичної форми з отвором посередині з двома лінійними робочими ділянками паралельних провідників діаметром 0,2 мм, що встановлені зустрічно по електромагнітному полю. Джерело поляризуючого магнітного поля [15] виготовлено з плоскої котушки індуктивності, виконаної із цільної частини мідної пластини у формі вісімки з ізольованих в площині витків з двома прямокутними симетричними отворами, що за розмірами близькі до розмірів лінійних робочих ділянок паралельних провідників плоскої високочастотної котушки індуктивності. Витки плоскої котушки індуктивності джерела магнітного поля орієнтовані так, що вектори індукції поляризуючого магнітного поля (поле поляризації?) в отворах формуються в протилежних напрямках. Осердя джерела поляризуючого магнітного поля виготовлено шихтованим П-подібної форми з трансформаторної сталі. Пластины сердечника орієнтовані перпендикулярно провідникам робочих ділянок плоскої високочастотної котушки індуктивності. При цьому торці феромагнітного осердя розміщені в отворах цієї котушки над лінійними робочими ділянками паралельних провідників плоскої високочастотної котушки індуктивності частково.

Приклад розташування елементів джерела імпульсного магнітного поля та високочастотної

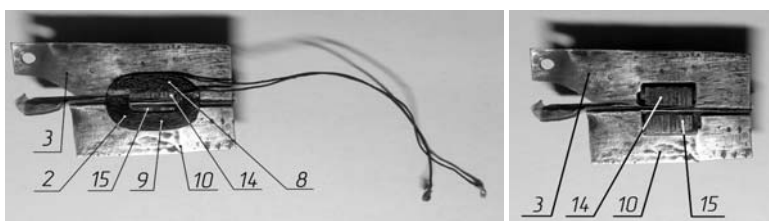


Рис. 8. Розташування елементів джерела поляризуючого магнітного поля і високочастотної котушки індуктивності мініатюрного ЕМАП: а – з високочастотною котушкою індуктивності; б – без котушки [15]

котушки індуктивності ЕМАП наведено на рис. 8, де позначено: 2 – плоска високочастотна котушка індуктивності; 3 – джерело магнітного поляризуючого поля; 8 і 9 – лінійні робочі ділянки паралельних провідників плоскої високочастотної котушки індуктивності; 10 – плоска котушка індуктивності; 14 і 15 – торці феромагнітного сердечника.

Технологію роботи такого сумісного ЕМАП описано в роботах [16, 28]. Згідно з [15, 16] такий перетворювач

масою менше 50 гр. при зазорі 0,2 мм дає можливість виявляти моделі плоскодонних відбивачів діаметром 2 мм на відстані 50 мм в феромагнітному виробі з акустично прозорого матеріалу без зачистки поверхні, що говорить про доволі чутливий контроль таким приладом. Сила струму в котушці намагнічування за тривалості 100 мкс складала 600 А, в високочастотній котушці – 100 А (пікове значення). Частота зондування складала 100 Гц. При цьому, що дуже важливо, задля охолодження котушки намагнічування достатньо струменя повітря.

Слід зазначити, що Буссі Салам у порівнянні з іншими розробниками виконала побудову доволі ефективних конструкцій ЕМАП і, що дуже важливо, визначила технологічні аспекти роботи перетворювачів з імпульсним намагнічуванням, про що більшість дослідників і фахівців не повідомляють.

Суттєвим недоліком розробленого ЕМАП є те, що він може працювати лише з зазорами до 0,2 мм. Тобто недостатньо реалізується головна перевага перетворювача – проведення діагностики без видалення більшості діелектричних покриттів з поверхні ОК.

Важливі положення для техніки і технологій ЕМА методів визначили Fortunko C.N. та Maclauchlan D. [29]. Ними було встановлено, що задля ефективної роботи ЕМАП високочастотний імпульс збудження ультразвукових хвиль необхідно включати із запізненням після збудження струму в котушці імпульсного магніту. Автори вказують, що необхідно використовувати ефект динамічної концентрації імпульсного магнітного поля. Показана ефективність ЕМА контролю зразка з алюмінію за температури 400° С. Під час досліджень часова тривалість імпульсу струму намагнічування складала 10^{-2} с, що дуже багато з врахуванням теплових характеристик джерела магнітного поля. Максимальне значення індукції імпульсного магнітного поля знаходилося в інтервалі 0,8...1,4 Тл. Для алюмінієвих зразків затримка високочастотного імпульсу відносно початку імпульсу намагнічування складала 4-4,5 ms. Використано спіральну високочастотну котушку індуктивності. Автори стверджують, що для моделювання магнітної системи можна застосовувати ті ж підходи, що і для постійних електромагнітів, наприклад, з використанням пакетів програм COMSOL Multiphysics, ANSYS тощо. Очевидно, що це можливо у разі формування протягом заданого часу дії імпульсу намагнічування, за якого створене магнітне поле можна вважати квазістаціонарним.

З результатів виконаних досліджень зроблено висновок щодо раціональності використання тангенціального магнітного імпульсного поля, що виключає діагностику за наявності діелектричних покриттів на феромагнітних виробах. Слід звернути увагу на те, що набагато частіше на практиці використовують об'ємні зсувні ультразвукові імпульси.

В роботі [30] доведено, що ЕМАП нового типу можуть збуджувати і приймати імпульси горизонтально поляризованих ультразвукових коливань, що практично неможливо традиційними методами.

Пружні характеристики металів також ефективно визначаються шляхом використання перетворювачів з імпульсним намагнічуванням [10].

Технологічні особливості роботи джерела імпульсного магнітного поля експериментально досліджено в [31]. Встановлено, що залежно від індуктивності котушки намагнічування, її ємності,

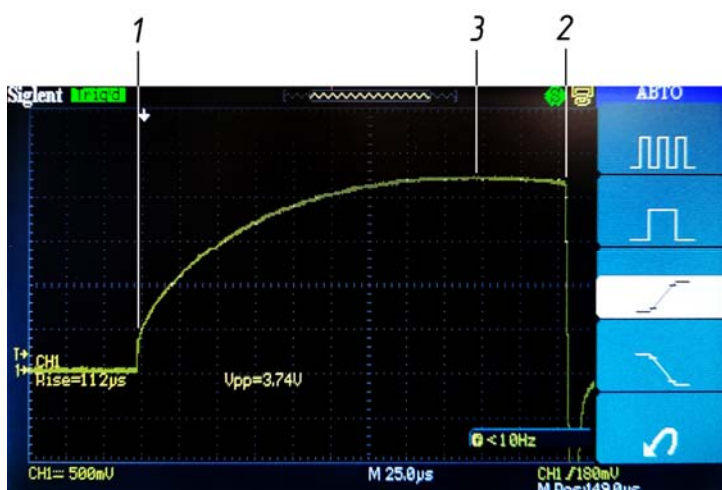


Рис. 9. Раціональна форма імпульсного струму намагнічування в котушці ЕМАП [31]

характеристик металу поверхневого шару ОК, залежать часові моменти включення та виключення струму в котушці намагнічування по відношенню до моменту включення імпульсу живлення високочастотної котушки індуктивності. Причому форма імпульсу намагнічування повинна мати практично горизонтальну ділянку, яка б давала можливість за мінімальної тривалості стабільно збуджувати і приймати з ОК ультразвукові імпульси, як це показано, наприклад, на рис. 9, позиція 3, де позначено: 1 – початок дії імпульсу намагнічування; 2 – завершення дії імпульсу намагнічування; 3 – робоча ділянка імпульсу намагнічування. Тривалість робочої ділянки визначається товщиною ОК під час контролю об'ємними хвилями або довжиною метало-

виробу під час контролю хвилями Релея, Лемба або нормальними хвилями. Наприклад, за тривалості робочої ділянки 100 мкс і використанні зсувних ультразвукових коливань (швидкість розповсюдження в більшості сталей складає близько 3,2 мм/мкс) забезпечується проведення вимірювань і контролю ОК товщиною 160 мм. Тобто, за невеликих товщин ОК (труби, листа, оболонки тощо) тривалість імпульсу намагнічування доцільно зменшувати, покращуючи тепловий режим ЕМАП.

Аналіз джерел інформації, присвячених дослідженням і розробці ЕМА перетворювачів та технологій їхньої роботи, дав можливість зробити наступні висновки.

Висновки. В результаті аналізу інформаційних джерел встановлено, що основним напрямком дослідження і розробок задля підвищення чутливості ЕМА перетворювачів портативних приладів для контролю, вимірювань та діагностики феромагнітних металовиробів є використання імпульсних джерел намагнічування. Такий підхід дає можливість збільшити індукцію магнітного поля в 2...3 рази у порівнянні з ЕМАП, джерело магнітного поля якого виготовляється з постійних магнітів. Таким чином суттєво підвищується чутливість контролю (виявляються моделі плоскодонних відбивачів діаметром 2 мм на відстані 50 мм) та вимірювань за рахунок збільшення відношення амплітуд ультразвукових імпульсів і завад, виключається сильне притягування ЕМАП до об'єкта контролю та налипання феромагнітних часток до перетворювача.

Поєднання досягнень різних фахівців дає можливість сформулювати основні вимоги до ЕМАП та його імпульсного джерела магнітного поля:

- формувати в поверхневому шарі металовиробу імпульсне магнітне поле з полицею квазіпостійного значення, часова тривалість якої залежно від товщини об'єкта контролю і фізичних властивостей металу має знаходитися в інтервалі 0,1...1 мс;
- включення магнітного поля необхідно виконувати раніше ніж високочастотний зондуєчий імпульс на 30... 250 мкс;
- у разі використанні сердечників кількість витків котушки намагнічування повинна бути мінімальною в інтервалі 3... 30 шт.;
- задля забезпечення теплового режиму джерела імпульсного магнітного поля котушка намагнічування повинна мати розвинену поверхню, наприклад, виконана тонкою, 0,1...2 мм, мідною стрічкою;
- піковий струм намагнічування повинен перевищувати 2 кА;
- висота імпульсного магніту має перевищувати розмір перетину його робочого полюса не менше ніж у 1,2 рази;
- пластини наборного сердечника повинні бути орієнтовані нормально лінійним ділянкам високочастотної котушки індуктивності в вертикальній і горизонтальній площині.

Високочастотний зондуєчий імпульс як фактор, що суттєво впливає на чутливість і який діє разом з намагнічувальним в поверхневому шарі металу, повинен бути тривалістю 1...10 періодів частоти заповнення пакета і піковою силою струму більше 100 А.

1. Троїцький В.О. Борис Патон фундатор науки з дефектоскопії та моніторингу конструкцій. Київ: Інтерсервіс, 2023. 60 с.
2. Сучков Г.М. Розвиток теорії і практики створення приладів для електромагнітно-акустичного контролю металовиробів: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.11.13. НТУ ХП. Харків. 2005. 37 с.
3. Десятніченко О.В. Електромагнітно-акустичний товщиномір для контролю металовиробів з діелектричними покриттями: дис. канд. техн. наук: 05.11.13. Харків. 2015. 172 с.
4. Плєснецов С.Ю. Розвиток методів та засобів для електромагнітно-акустичного контролю стрижневих, трубчастих та листових металовиробів: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.11.13. Харків. 2021. 40 с.
5. Ермолов И.Н., Ланге Ю. В. Неразрушающий контроль: справочник: В 8 т. Т.3 Ультразвуковой контроль. Под ред. В.В. Клюева. 2008. М. Машиностроение. 864 с.
6. Плєснецов С.Ю., Сучков Г.М., Корж Д.И., Суворова М.Д., Новые теоретические исследования и разработки в области электромагнитно-акустического преобразования. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2018. № 2. С. 24-31. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2018.02.24>
7. Сучков Г.М., Плєснецов С.Ю., Мещеряков С.Ю., Юданова Н.Н. Новые разработки электромагнитно-акустических преобразователей. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2018. № 3. С. 27-34. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2018.03.03>.
8. Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Плєснецов С.Ю. Чувствительность ультразвукового контроля ЭМА способом при выявлении естественных внутренних дефектов металлоизделий. Возможности ЭМА толщинометрии. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2019. № 2. С. 51-57. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2019.02.051>
9. Мигушенко Р.П., Сучков Г.М., Радев Х.К., Петрищев О.Н., Десятніченко А.В. Електромагнітно-

акустический преобразователь для ультразвуковой толщинометрии ферромагнитных металлоизделий без удаления диэлектрического покрытия. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 2. С. 78–82. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.02.078>.

10. Muraveva O.V., Murav'ev A.F., Basharova (Brester) A.F. Thermal Treatment Effect and Structural State of Rod-Shaped Assortment 40Kh Steel on the Speed of Ultrasound Waves and Poisson Coefficient. *Steel in Translation*. 2020. Vol. 50. No 8. Pp. 579–584.

11. NORDINKRAFT. The quality guard. URL: www.nordinkraft.de/ (дата звернення: 08.05.2020).

12. Цапенко В.К., Куц Ю.В. Основы ультразвукового неруйнівного контролю: підручник. Київ: НТУУ КПІ, 2010. 448 с.

13. Болюх В.Ф., Кочерга О.І., Щукін І.С. Порівняльний аналіз конструктивних типів комбінованих лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачів. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 4. С. 84–88. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.084>.

14. Shevaldykin V.G., Bobrov V.T., Alekhin S.G. EMAT transformation in pulsed magnetic field and its use in portable instruments for acoustic measurements. 16th World Conference on *Nondestructive Testing*. Montréal, Canada. August 30 – September 3, 2004. Book of Abstracts. TS3.24.3. 88 p.

15. Салам Буссі. Електромагнітно-акустичні перетворювачі для ультразвукового контролю металовиробів: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13. НТУ «ХПІ». Харків. 2020. 158 с.

16. Салам Буссі, Плеснецов С.Ю. Практичні розробки електромагнітно-акустичних перетворювачів. *Вісник Національного технічного університету ХПІ*. 2019. № 26 (1351). С. 57–65.

17. Михайлов А.В., Гобов Ю.Л., Смородинский Я.Г., Щербинин С.В. Электромагнитно-акустический преобразователь с импульсным подмагничиванием. *Дефектоскопия*. 2015. № 8. С. 14–23.

18. Heng Zhang, Shu-juan Wang, Guo-fu Zhai, Ri-liang Su. 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>.

19. Hernandez-Valle F., Dixon S. Pulsed electromagnet EMAT for ultrasonic measurements at elevated temperatures. *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitori*. 2011. Vol. 53. Issue 2. Pp. 96–99. DOI: <https://doi.org/10.1784/insi.2011.53.2.96>.

20. Ogata S., Uchimoto T., Takagi T., Dobmann G. Development and performance evaluation of a high-temperature electromagnetic acoustic transducer for monitoring metal processing. *Int. J. Appl. Electrom*. 2018. Vol. 58. No 3. Pp. 309–318. DOI: <https://doi.org/10.3233/JAE-180016>.

21. Hernandez-valle F., Dixon S. Initial tests for designing a high temperature EMAT with pulsed electromagnet. *NDT&E International*. 2010. Vol. 4. Issue 2. Pp. 171–175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.10.009>.

22. Guofu Zhai, Bao Liang, Xi Li, Yuhang Ge, Shujuan Wang. High-temperature EMAT with double-coil configuration generates shear and longitudinal wave modes in paramagnetic steel. *NDT & E International*. 2022. Vol. 125. Pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2021.102572>.

23. Salam Bussi, Suchkov G., Mygushchenko R., Kropachek O., Plesnetsov S. (2019). Electromagnetic-acoustic Transducers for Ultrasonic Measurements, Testing and Diagnostics of Ferromagnetic Metal Products. *Український метрологічний журнал*. 2019. № 4. С. 41–49. DOI: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.4.2019.195956>.

24. Suzhen Liu, Ke Chai, Chuang Zhang, Liang Jin and Qingxin Yang. Electromagnetic Acoustic Detection of Steel Plate Defects Based on High-Energy Pulse Excitation. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10(16). Article ID 5534. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10165534>.

25. Донченко А.В., Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Кропачек О.Ю. Накладний суміщений електромагнітно-акустичний перетворювач з імпульсним намагнічуванням для контролю феромагнітних металовиробів. Патент України на корисну модель №156088. 2024.

26. Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Серпухов О.В., Кошкаров Ю.Ю., Тимофеев В.Д., Бобров О.Г. Электромагнитно-акустичний перетворювач для діагностики сталеві броні ультразвуковими імпульсами. Патент України на корисну модель №156101. 2024.

27. Сучков Г.М., Салам Буссі ЕП, Мішель Кассаблі. Моделювання поляризованого магнітного поля електромагнітно-акустичного перетворювача електромагнітної енергії в ультразвукову. Тези 19 міжнародної науково-технічної конференції *Проблеми інформатики та моделювання (ПІМ-2019)*, Україна, Харків – Одеса, 11-16 вересня 2019 р. С. 79.

28. Сучков Г.М., Салам Буссі. Електромагнітно-акустичні перетворювачі з імпульсними джерелами поляризованого магнітного поля. *Технічна діагностика і неруйнівний контроль*. 2020. № 1. С. 1–6.

29. Fortunko C.N., Maclauchlan D. Pulsed electromagnets for EMATS. Fracture and Deformation Division National Bureau of Standards Boulder, CO 80303.

30. Ambuj K. Gautam, Ching-Chung Yin, Bishakh Bhattacharya. A new chevron electromagnetic acoustic transducer design for generating shear horizontal guided wave. *Ultrasonics*. 2023. Vol. 135. Pp.107–137.

31. Сучков Г.М., Донченко А.В. Удосконалення електромагнітно-акустичних перетворювачів для ультразвукового контролю якості феромагнітних металовиробів. *Збірник тез доповідей Міжнародної наукової інтернет-конференції Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення* (Тернопіль, Україна – Переворськ, Польща). 6-7 лютого 2023. Вип. 74. С. 192-194.

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)

G.M. Suchkov, R.P. Mygushchenko, S.Yu. Pliesnetsov, Yu.O. Pliesnetsov, O.I. Kurando, A.H. Aleksiiv, O.M. Borodenko, O.I. Butenko, A.O. Rybalko

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute",

2, Kirpichova str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

E-mail: hpi.suchkov@gmail.com; mrp1@ukr.net; serhii.pliesnetsov@khpi.edu.ua; yurii.pliesnetsov@khpi.edu.ua.

The analysis of information sources on the development and usage of electromagnetic-acoustic methods and means of ultrasonic inspection, measurements and diagnostics was performed. It is shown that electromagnetic-acoustic (EMA) transducers (EMAT) with permanent magnets have significant advantages compared to piezoelectric transducers, but also have disadvantages, especially in the inspection of ferromagnetic metal products, both in normal and hot conditions, especially when using them in portable ultrasonic devices. Many experts suggest eliminating the disadvantages of EMAT with permanent magnets by using pulsed magnetization. This direction of research is promising, especially when testing hot metal, because it allows for creation of pulsed magnetic fields with a peak value of 2...3 and even 10 T, making it possible to significantly increase the sensitivity of testing, since the coefficient of conversion of electromagnetic energy into ultrasonic and vice versa depends on the induction of magnetic fields squared. But until now, data on the widespread use of pulsed magnetization in portable EMATs has not been established. This situation is caused by a small gap between the EMAT and the metal, insufficient development of the EMAT functioning technologies, the complexity of the hardware implementation, difficulties in dealing with interferences that occur during the excitation of pulsed magnetic field, etc. Therefore, for the implementation of such a promising direction of development of sensitive EMA transducers, theoretical and practical developments are to be carried out, which is to make it possible to introduce high-tech means of inspection, measurements and diagnostics into production. References 31, figures 9.

Key words: ultrasound, sensitivity, measurement, testing, diagnostics, EMAT, pulse magnet, ferromagnetic metal product.

1. Troitskyi V.O. Borys Paton – the founder of the science of flaw detection and structure monitoring. NK inform. Kyiv: Vydavnytstvo Interservis, 2023. 60 p. (Ukr)
2. Suchkov H.M. Development of the theory and practice of creating devices for electromagnetic-acoustic control of metal products: author's abstract of Dr. tech. sci. diss.: 05.11.13. National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute. Kharkiv. 2005. 37 p. (Ukr)
3. Desiatnichenko O.V. Electromagnetic-acoustic thickness gauge for checking metal products with dielectric coatings: Ph.D. dissertation: 05.11.13. National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute. Kharkiv. 2015. 172 p. (Ukr)
4. Pliesnetsov S.Yu. Development of methods and means for electromagnetic-acoustic control of rod, tube and sheet metal products: author's abstract of Dr. tech. sci. diss.: 05.11.13. National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute. Kharkiv. 2021. 40 p. (Ukr)
5. Ermolov I.N., Lange Ju. V. Nondestructive testing: handbook: in 8 vols. Vol. 3 Ultrasonic testing. Ed. V.V. Kljuev. 2008. Moscow. Mashinostroenie. 864 p. (Rus)
6. Pliesnetsov S.Yu., Suchkov H.M., Korzh D.I., Suvorova M.D. New theoretical research and developments in the field of electromagnetic-acoustic transformation (Review)). *Tekhnicheskaja diagnostika i nerazrushaiushchii kontrol*. 2018. No 2. Pp. 24–31. (Rus)
7. Suchkov H.M., Pliesnetsov S.Yu., Meshcheriakov S.Yu., Yudanov N.N. New developments in electromagnetic-acoustic transducers (Review). *Tekhnicheskaja diagnostika i nerazrushaiushchii kontrol*. 2018. No 3. Pp. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2018.03.03>. (Rus)
8. Suchkov H.M., Petryshchev O.N., Pliesnetsov S.Yu. Sensitivity of ultrasonic testing by EMA method in detection of natural internal defects of metal products. Possibilities of EMA thickness measurement (Review of Part 3)). *Tekhnicheskaja diagnostika i nerazrushaiushchii kontrol*. 2019. No 2. Pp. 51–57. (Rus)
9. Myhushchenko R.P., Suchkov H.M., Radev Kh.K., Petryshchev O.M., Desiatnichenko O.V. Electromagnetic-acoustic transducer for ultrasonic thickness measurement of ferromagnetic metal products without removing the dielectric coating. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2016. No 2. Pp. 78–82. DOI: <https://doi.org/10.15407/technd2016.02.078>. (Rus)
10. Muraveva O.V., Murav'ev A.F., Basharova (Brester) A.F. Thermal Treatment Effect and Structural State of Rod-Shaped Assortment 40Kh Steel on the Speed of Ultrasound Waves and Poisson Coefficient. *Steel in Translation*. 2020. Vol. 50. No 8. Pp. 579–584.
11. NORDINKRAFT. The quality guard. URL: www.nordinkraft.de/ (accessed at 08.05.2020).

12. Tsapenko V.K., Kuts Yu.V. Fundamentals of non-destructive testing: handbook. Kyiv: National Technical University of Ukraine Kiev Polytechnic Institute, 2010. 448 p. (Ukr)
13. Boliukh V.F., Kocherha O.I., Shchukin I.S. Comparative analysis of structural types of combined linear pulse electromechanical converters. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. No 4. Pp. 84–88. DOI: <https://doi.org/10.15407/tehnmed2018.04.084>. (Ukr)
14. Shevaldykin V.G., Bobrov V.T., Alekhin S.G. EMAT transformation in pulsed magnetic field and its use in portable instruments for acoustic measurements. 16th World Conference on *Nondestructive Testing*. Montréal, Canada. August 30 – September 3, 2004. Book of Abstracts. TS3.24.3. 88 p.
15. Salam Bussi. Electromagnetic-acoustic transducer for ultrasonic metalware inspection: PhD dissertation: 05.11.13. National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute. Kharkiv. 2020. 158 p. (Ukr)
16. Salam Bussi, Plesnietsov S.Yu. Practical developments of electromagnetic-acoustic transducers. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. 2019. No 26 (1351). Pp. 57–65. (Ukr)
17. Mihajlov A.V., Gobov Ju.L., Smorodinskij Ja.G., Shherbinin S.V. Electromagnetic-acoustic transducer with pulsed magnetization. *Defektoskopija*. 2015. No 8. Pp. 14–23. (Rus)..
18. Heng Zhang, Shu-juan Wang, Guo-fu Zhai, Ri-liang Su. 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>.
19. Hernandez-Valle F., Dixon S. Pulsed electromagnet EMAT for ultrasonic measurements at elevated temperatures. *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitori*. 2011. Vol. 53. Issue 2. Pp. 96–99. DOI: <https://doi.org/10.1784/insi.2011.53.2.96>.
20. Ogata S., Uchimoto T., Takagi T., Dobmann G. Development and performance evaluation of a high-temperature electromagnetic acoustic transducer for monitoring metal processing. *Int. J. Appl. Electrom*. 2018. Vol. 58. No 3. Pp. 309–318. DOI: <https://doi.org/10.3233/JAE-180016>.
21. Hernandez-valle F., Dixon S. Initial tests for designing a high temperature EMAT with pulsed electromagnet. *NDT&E International*. 2010. Vol. 4. Issue 2. Pp. 171–175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.10.009>
22. Guofu Zhai, Bao Liang, Xi Li, Yuhang Ge, Shujuan Wang. High-temperature EMAT with double-coil configuration generates shear and longitudinal wave modes in paramagnetic steel. *NDT & E International*. 2022. Vol. 125. Pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2021.102572>.
23. Salam Bussi, Suchkov G., Mygushchenko R., Kropachek O., Plesnietsov S. Electromagnetic-acoustic Transducers for Ultrasonic Measurements, Testing and Diagnostics of Ferromagnetic Metal Products. *Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal*. No 4. Pp. 41–49. DOI: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.4.2019.195956>.
24. Suzhen Liu, Ke Chai, Chuang Zhang, Liang Jin and Qingxin Yang. Electromagnetic Acoustic Detection of Steel Plate Defects Based on High-Energy Pulse Excitation. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10(16). Article ID 5534. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10165534>.
25. Donchenko A.V., Myhushchenko R.P. Suchkov H.M., Kropachek O.Yu. Cover combined electromagnetic-acoustic transducer with pulsed magnetization for ferromagnetic metalware inspection. Patent UA №156088. 2024. (Ukr)
26. Myhushchenko R.P., Suchkov H.M., Serpukhov O.V., Koshkarov Yu.Iu., Tymofiev V.D., Bobrov O.H. Electromagnetic-acoustic transducer for diagnostics of metal armor via ultrasonic pulses. Patent UA №156101. 2024. (Ukr)
27. Suchkov H.M., Salam Bussi. Modeling of the polarizing magnetic field of the electromagnetic-acoustic converter of electromagnetic energy into ultrasound). *Tezy 19 mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii Problemy informatyky ta modeliuvannia (PIM-2019)*, Ukraine, Kharkiv – Odesa, 11–16 September 2019. P. 79. (Ukr)
28. Suchkov H.M., Salam Bussi. Electromagnetic-acoustic transducers with pulsed sources of polarizing magnetic field). *Tekhnichna diahnostyka i neruinivnyi kontrol*. 2020. No 1. Pp. 1–6. (Ukr)
29. Fortunko C.N. Maclauchlan D. Ruised electromagnets for EMATS. Fracture and Deformation Division. National Bureau of Standards. Boulder, CO 80303.
30. Ambuj K. Gautam, Ching-Chung Yin, Bishakh Bhattacharya. A new chevron electromagnetic acoustic transducer design for generating shear horizontal guided wave. *Ultrasonics*. 2023. Vol. 135. Pp. 107-137.
31. Suchkov H.M., Donchenko A.V. Improvement of electromagnetic-acoustic transducers for ultrasonic quality control of ferromagnetic metal products). *Zbirnyk tez dopovidei Mizhnarodnoi naukovoï internet-konferentsii Informatsiine suspilstvo: tekhnolohichni, ekonomichni ta tekhnichni aspekty stanovlennia* (Ternopil, Ukraine – Pervorsk, Poland). February 6-7, 2023. Vyp. 74. Pp. 192–194. (Ukr)

Надійшла 16.07.2024
Остаточний варіант 30.09.2024