



Методи і засоби неруйнівного контролю

Прийнято 11.05.2025. Прорецензовано 17.06.2025. Опубліковано 27.06.2025.

УДК 697.85

DOI: 10.31471/1993-9981-2025-1(54)-13-28

УНІВЕРСАЛЬНИЙ СТЕНД ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З ІМПУЛЬСНИМ ДЖЕРЕЛОМ ПОЛЯРИЗУЮЧОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Сучков Г. М.

Доктор технічних наук, професор
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
61002, вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-1805-0466>
e-mail: hpi.suchkov@gmail.com

Кальницький М. Е.

Аспірант
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
61002, вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна
<https://orcid.org/0009-0000-5056-2085>
e-mail: kalnytsky94@gmail.com

Дмитренко М. В.

Старший викладач
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
61002, вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна
<https://orcid.org/0009-0004-2075-5619>
e-mail: mvdxim@gmail.com

Бобров О. Г.

Старший науковий співробітник
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
61002, вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-8840-6405>
e-mail: bobrov_ag@ukr.net

Запропоноване посилання: Сучков, Г. М., Кальницький, М. Е., Дмитренко, М. В. & Бобров, О. Г. (2025). Універсальний стенд та обладнання для дослідження електромагнітно-акустичних перетворювачів з імпульсним джерелом поляризованого магнітного поля. Методи та прилади контролю якості, 1(54), 13-28. doi: 10.31471/1993-9981-2025-1(54)-13-28

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Анотація. Дослідження направлене на підвищення чутливості електромагнітно-акустичних перетворювачів (ЕМАП) шляхом формування потужного імпульсного магнітного квазістаціонарного поля, форма якого має рівномірне значення величини індукції магнітного поля в заданому проміжку часу, який визначається розміром H металовиробу, що підлягає контролю, тобто $t_p = 2H/C_t$, де t_p – робочий час дії імпульсу намагнічування; C_t – швидкість розповсюдження зсувних ультразвукових хвиль в матеріалі металовиробу. Метою дослідження є визначення ефективних параметрів дії імпульсів намагнічування та високочастотних імпульсів живлення котушки індуктивності ЕМАП. Новизною роботи є розроблення засобів, які забезпечують зміну параметрів високочастотних імпульсів, імпульсів намагнічування та їх відносної взаємодії в заданому проміжку часу. Результати досліджень показали доцільність вибору як критерію оцінки чутливості ЕМАП, величини відношення амплітуд корисного сигналу до амплітуди завад. Завдяки такому підходу визначено раціональні величини тривалості імпульсів намагнічування, що, з однієї сторони, забезпечують мінімально необхідну величину індукції магнітного поля, а, з іншої, допустимий температурний режим роботи імпульсного магніту. Встановлено сильний вплив на величину амплітуди корисного сигналу величини затримки включення високочастотного імпульсу по відношенню до початку дії імпульсу намагнічування. Причому величина затримки залежить від сили струму в котушці намагнічування. Тобто, чим більша сила струму живлення імпульсного магніту, тим менша величина затримки і, відповідно, можна вибирати меншу тривалість імпульсу струму намагнічування, покращуючи температурний режим перетворювача.

Ключові слова: дослідження; вимірювання; контроль; діагностика; ультразвукові імпульси; ЕМАП; чутливість; феромагнітний виріб; магнітне поле; імпульсне магнітне поле; генератор; підсилювач; струм намагнічування; високочастотні пакетні імпульси струму; електромагнітне поле.

Вступ

Одним із ефективних напрямків розвитку методів і засобів ультразвукового контролю, вимірювань та діагностики є електромагнітно-акустичний (ЕМА). Його основними перевагами є висока швидкість контролю, відсутність необхідності зачищення поверхні металовиробу, широкий температурний діапазон об'єкта дослідження тощо.

Для забезпечення достатньої чутливості ЕМА перетворювачів, при інших однакових умовах, необхідно створювати індукцію поляризовуючого магнітного поля значної величини, від якої чутливість залежить квадратично.

Використання потужного постійного магнітного поля [1] під час контролю феромагнітних металовиробів створює інші проблеми – сильне притягання ЕМАП до контрольованого об'єкта, налипання феромагнітних часток тощо.

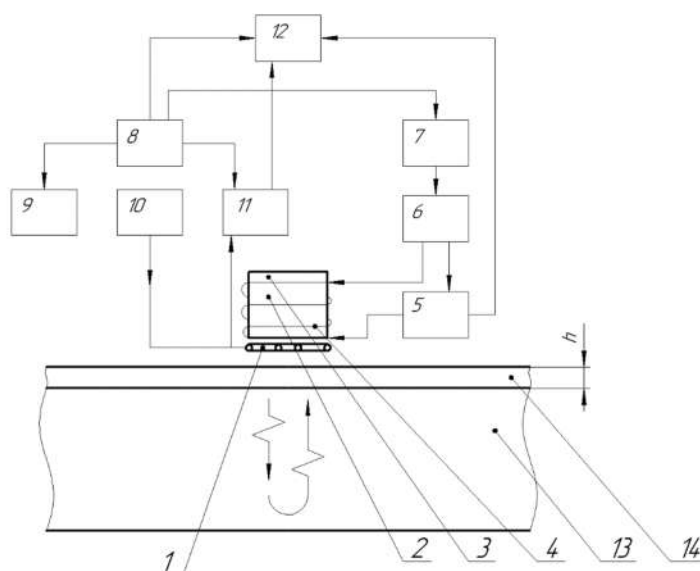
Вирішити проблему можливо шляхом збудження імпульсних короткочасних потужних магнітних полів. Проте засобів для дослідження комплексного взаємного впливу імпульсного магнітного поля і високочастотних пакетних імпульсів до цього часу не створено. Тому робота в даному напрямку є актуальною.

Мета роботи – розроблення стенду для дослідження ЕМАП з імпульсним намагні-

чуванням і встановлення раціональних технічних та технологічних характеристик роботи перетворювачів при контролі феромагнітних об'єктів з підвищеною чутливістю.

Аналіз сучасних вітчизняних і закордонних досліджень та публікацій за визначеним напрямком

Більшість відомих досліджень виконано в напрямку створення ЕМАП з імпульсним намагнічуванням [2-15]. Так, в роботах [2-3] автори пішли шляхом моделювання особливостей перетворювачів з імпульсним намагнічуванням. При цьому вони зробили припущення, що при досягненні максимальної індукції магнітного поля можливе використання підходів, характерних для постійних магнітних полів. Авторка роботи [2] для перевірки модельних розрахунків використала спрощений стенд для досліджень, що вирішує проблему лише частково. У доповіді [4] наведено дані про використання імпульсного намагнічування в складі ЕМА товщиноміру, проте результати взаємодії імпульсів намагнічування і високочастотних сигналів не наведено. Серед відомих даних багато протиріч. Так, в роботах [4-6] стверджується, що тривалість імпульсу намагнічування повинна бути кілька мілісекунд, а згідно з даними праць [2, 7, 10] тривалість імпульсу намагнічування повинна бути кілька сотень мікросекунд.



1 – плоска високочастотна котушка індуктивності; 2 – джерело імпульсного магнітного поля; 3 – сердечник джерела імпульсного магнітного поля; 4 – котушка намагнічування джерела імпульсного магнітного поля; 5 – шунт для вимірювання імпульсного струму намагнічування; 6 – потужний посилювач імпульсу струму намагнічування; 7 – формувач імпульсу струму намагнічування; 8 – синхронізатор; 9 – формувач пакетного високочастотного імпульсу живлення плоскої високочастотної котушки індуктивності; 10 – потужний посилювач пакетного високочастотного імпульсу живлення плоскої високочастотної котушки індуктивності; 11 – малошумний смуговий посилювач прийнятих з об'єкту контролю ультразвукових пакетних високочастотних імпульсів; 12 – двоканальний цифровий осцилограф; 13 – об'єкт контролю; 14 – шар діелектричного покриття товщиною h на поверхні ОК

Рисунок 1 – Спрощена блок-схема стенду для досліджень характеристик ЕМАП та засобів забезпечення його роботи

В роботах [2, 4] не повідомляється про необхідність затримки високочастотного імпульсу по відношенню до початку намагнічувального, а в працях [7-9] стверджується про таку необхідність. Але про час такої затримки не повідомляється.

Частота зондування виробів також різна. В дисертації [2] стверджується, що вона може бути 100 Гц при повітряному охолодженні ЕМАП, а в доповіді [4] – тільки 20 Гц.

В інформаційних джерелах [11-15] фрагментарно розглянуто конструкції ЕМАП і деякі методичні положення щодо використання перетворювачів з імпульсним намагнічуванням металовиробів.

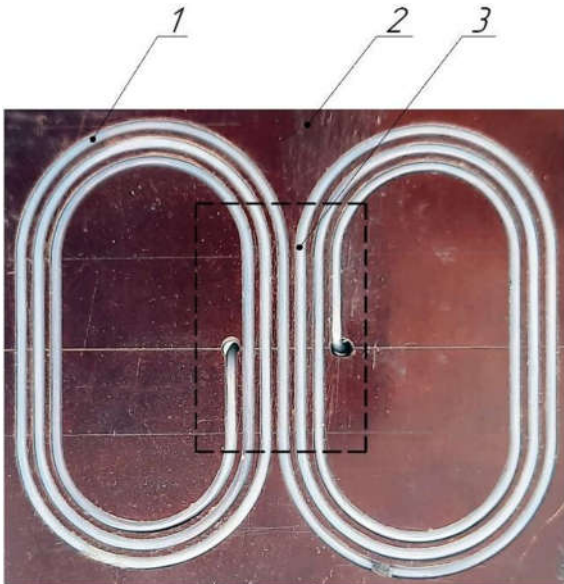
Деякі узагальнення щодо технічних і технологічних можливостей ЕМА перетворювачів наведено в статті [16].

Розробка макету універсального стенду для виконання досліджень ЕМАП з імпульсним джерелом магнітного поля, призначених для контролю феромагнітних металовиробів

На основі аналізу відомих результатів досліджень і розробок автори дійшли висновку, що універсальний стенд для досліджень технічних і технологічних характеристик електромагнітно-акустичних перетворювачів і засобів, необхідних для забезпечення їх роботи, може мати наступну побудову (рис. 1).

В стенді використана плоска високочастотна котушка 1 індуктивності (рис. 2).

Джерело 2 імпульсного магнітного поляризуючого поля було виготовлено на осерді розміром $60 \times 37 \times 35 \text{ мм}^3$, шихтованим з пластин 3 трансформаторної сталі товщиною 0,5 мм. Для досліджень різні котушки намагнічування 4, виготовлялися: мідним дротом діаметром 1,2 мм з кількістю витків 45; 15 та 6 з повним та неповним заповненням осердя, як це рекомендовано в роботі [2], дротом 2,2 мм



1 – провідники плоскої високочастотної котушки індуктивності; 2 – діелектрична основа; 3 – робоча частина котушки індуктивності

Рисунок 2 – Плоска високочастотна котушка індуктивності ЕМАП у формі крил «метелика»



Рисунок 3 – Котушка намагнічування з мідної стрічки 60x0,5 мм² (8,5 витків)

з кількістю витків 20 та 9, мідними стрічками 60x0,1 мм² та 60x0,5 мм², 8,5 витків, а також мідною шиною 10x1 мм² з кількістю витків 6. Приклад котушки намагнічування зображено на рис. 3.

Діелектричне покриття 14 імітувалося пластинами різної товщини з склотекстоліту.

В якості синхронізатора 8 було використано багатофункціональний генератор FУ6800, який формував синхроімпульс тривалістю від 1 мкс напругою 5 В з регульованою частотою зондування 1–1000 Гц.

Обладнання стенду. Блок формування імпульсу намагнічування

Блок формування тривалості імпульсу намагнічування виготовлено на базі мікросхеми 1533АГЗ, на якій зібрано чекаючий мультивібратор (рис. 4).

Тривалість імпульсу намагнічування визначається ланцюгом C_x і R_x після запуску схеми синхронізуючим імпульсом тривалістю 1 мкс напругою 5 В з заданою частотою зондування. З виходу чекаючого мультивібратора імпульс подається на посилювач струму, виконаний на мікросхемі 74НС245, в якій паралельно включені по 8 входів і, відповідно, 8 виходів. Тривалість імпульсу намагнічування регулюється в діапазоні від десятків мікросекунд до десятків мілісекунд.

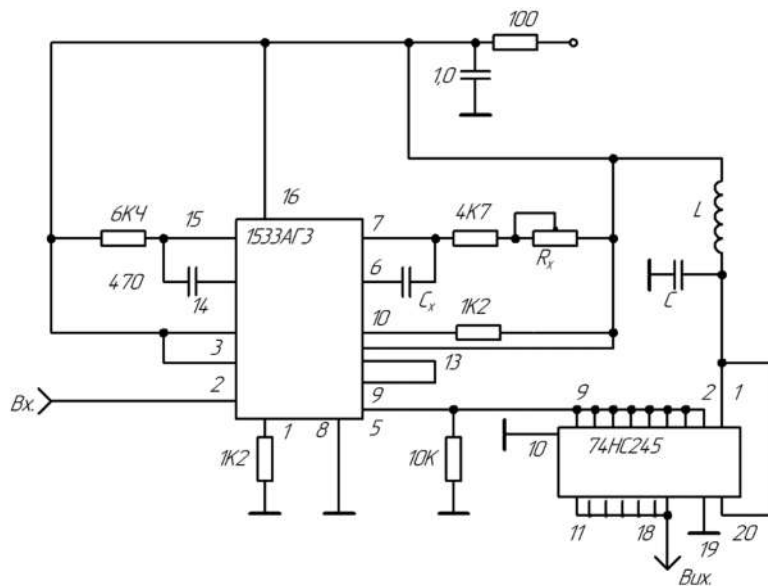


Рисунок 4 – Принципова електрична схема формування тривалості імпульсу намагнічування

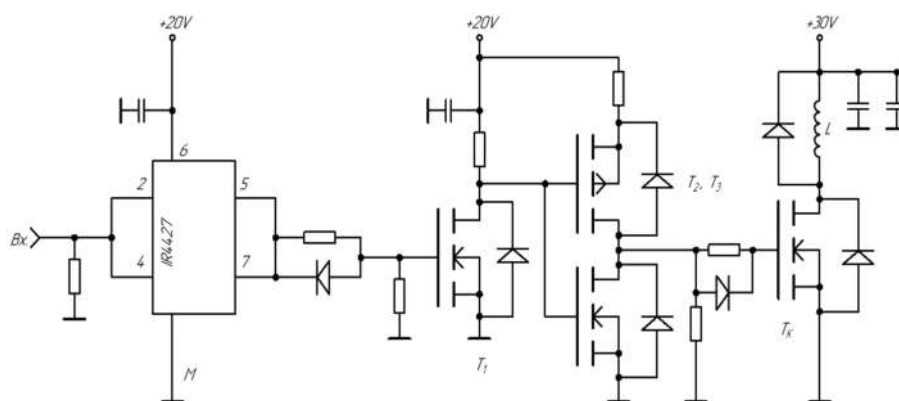


Рисунок 5 – Принципова електрична схема посилювача потужності імпульсу струму намагнічування

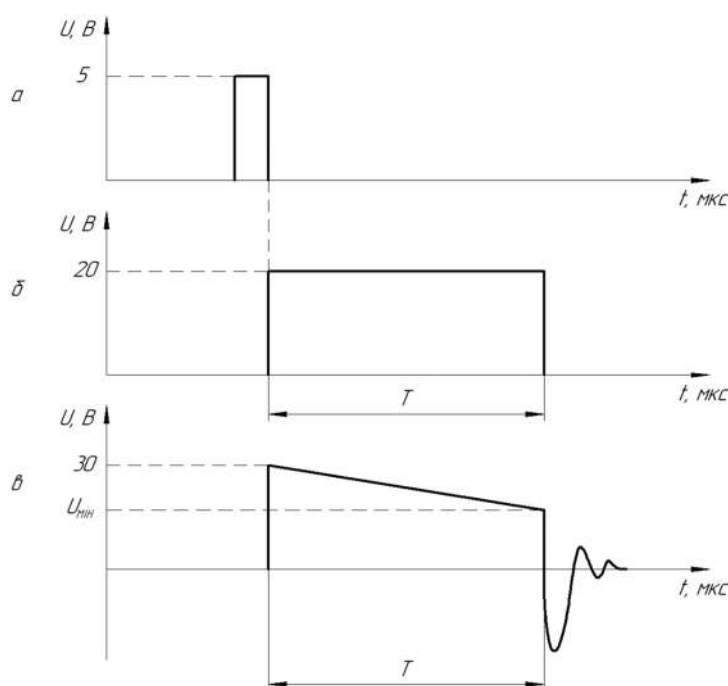


Рисунок 6 – Часова діаграма формування імпульсу струму намагнічування в котушці імпульсного електромагніту (один цикл зондування виробу ЕМАП)

Сформований імпульс струму намагнічування напругою 5 В надалі подається на посилювач напруги та потужності, схема якого наведена на рис. 5.

Обладнання стенду. Блок формування напруги та потужності імпульсу намагнічування

За рис. 5 мікросхема М та транзистори $T_1...T_3$ підвищують напругу до величини 20 В та струм живлення, що необхідні для ключової роботи вихідного транзистора T_k . Транзистор T_k відкривається на час тривалості імпульсу намагнічування, який сформований попереднім каскадом (рис. 4). В результаті в котушці L імпульсного магніту може проходити макси-

мальний струм у декілька тисяч ампер з регульованою тривалістю, створюючи імпульс магнітного поля, необхідного за величиною для роботи ЕМАП у режимі збудження і прийому ультразвукових імпульсів. Транзистор T_K та котушка намагнічування L захищені від зворотної напруги потужними діодами.

Функціональна схема роботи синхронізатора 8 разом із формувачем 7 імпульсу струму намагнічування та посилювача 6 його потужності (див. рис. 1) наведена на рис. 6.

Як бачимо, спочатку формується синхронізаційний імпульс тривалістю 1 мкс, розгортка a , який запускає мультивібратор, що формує імпульс тривалістю

T (позиція δ), тривалість якого регулюється резистором R_x (рис. 4). В результаті на котушці L намагнічування формується напруга (позиція ϵ), і в котушці L протікає імпульсний струм значної сили. Величина струму в котушці намагнічування вимірювалася за допомогою шунта 5 (рис. 1), 75ШСММ3-200-0,5 з опором 375 мкОм.

Для забезпечення енергетичної складової джерела живлення імпульсного магніту виготовлено батарею з паралельно з'єднаних низькоімпедансних електролітичних конденсаторів загальною ємністю 42000 мкФ, розрахованих на напругу 50 В. При цьому індуктивність L котушки повинна мати мінімальну індуктивність [2], а розрядний ключ T_k пристрою – низький опір.

Таким чином, малий опір електронного ключа і котушки намагнічування, низький імпеданс накопичувальної батареї конденсаторів та мала індуктивність котушки намагнічування дають можливість формувати в котушці намагнічування імпульсні струми величиною в декілька кА.

Обладнання стенду. Розроблення макету блоку формування пакетних високочастотних імпульсів для живлення плоскої високочастотної котушки індуктивності ЕМАП

Одночасно зі збудженням імпульсу намагнічування синхронізатор 8 подає імпульс на формувач 9 (рис. 1) пакетного високочастотного імпульсу живлення плоскої високочастотної котушки 1 індуктивності, який складається з послідовно включених: генератора Г5-63 та формувача (рис. 7).

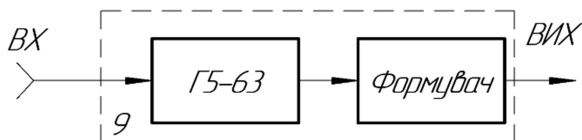


Рисунок 7 – Блок-схема формувача пакетного високочастотного імпульсу живлення плоскої високочастотної котушки індуктивності

Формувач пакетного високочастотного імпульсу живлення плоскої високо частотної котушки індуктивності працює за

наступною часовою діаграмою (рис. 8). Імпульси, які він формує, наведені на рис. 9. Їх кількість регулюється в діапазоні 1–10 пар.

Згідно з рис. 8 на вхід формувача 9 (рис. 1) надходить синхронізуючий імпульс (позиція a) з генератора FY6800. Генератор Г5-63 виробляє другий синхронізуючий імпульс (позиція δ) з регульованою затримкою t_1 . Цей імпульс запускає формувач (рис. 7), який виробляє дві послідовності (рис. 8) з фазою 0° (позиція ϵ) і з фазою 180° (позиція z). Ці дві послідовності (рис. 9), забезпечують роботу посилювача потужності 10 (рис. 1), пакетного високочастотного імпульсу живлення плоскої високочастотної котушки індуктивності ЕМАП 1.

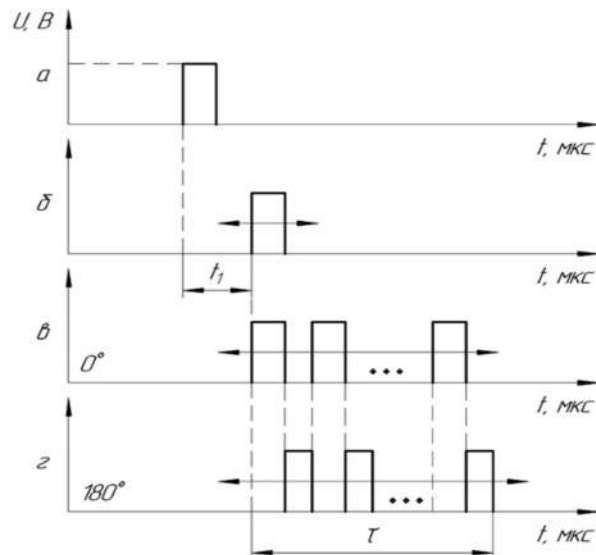


Рисунок 8 – Часова діаграма формування високочастотних пакетних імпульсів для живлення плоскої високочастотної котушки індуктивності ЕМАП

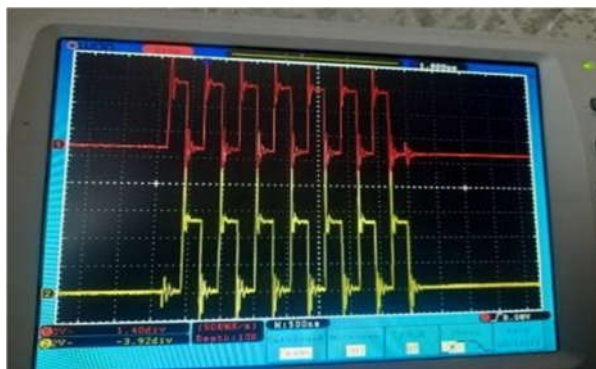


Рисунок 9 – Осцилограма послідовностей високочастотних пакетних імпульсів з фазами, зсунутими на 180° відносно один від одного

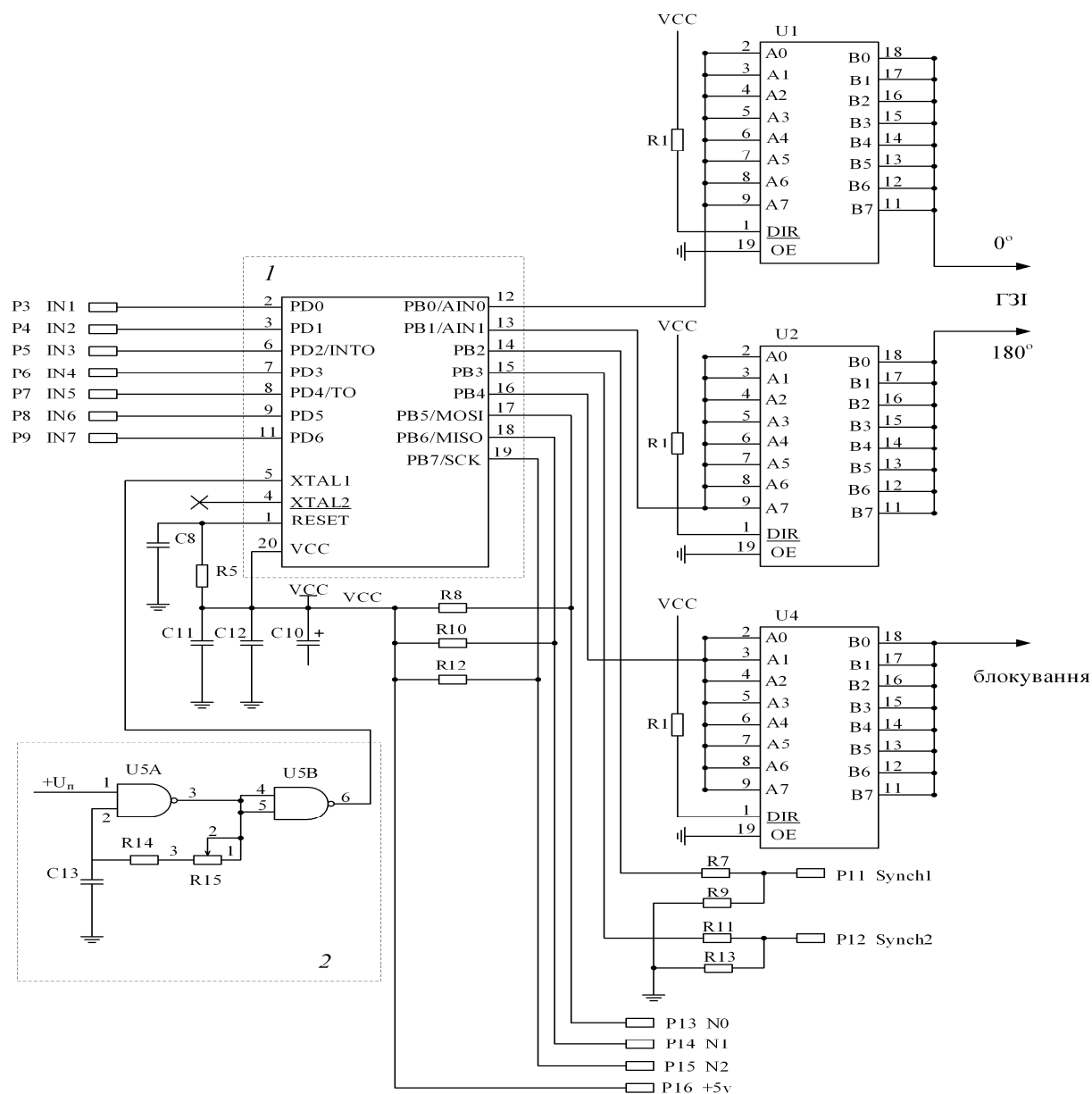


Рисунок 10 – Принципова електрична схема формувача послідовностей двох пакетних імпульсів із фазами, зсунутими на 180°

Формувач послідовностей двох пакетних імпульсів із фазами, зсунутими на 180° для живлення генератора зонduючих імпульсів (ГЗІ) виконано на базі мікропроцесора AT90S1200-12PI.

Тривалість τ пакетного імпульсу регулюється формувачем окремо.

Принципова електрична схема формувача послідовностей пакетних імпульсів наведена на рис. 10, а його зовнішній вигляд – на рис. 11.

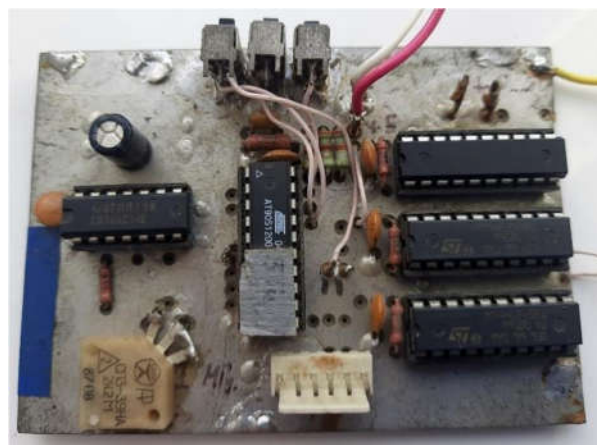


Рисунок 11 – Макет формувача послідовностей пакетних імпульсів із фазами, зсунутими на 180°

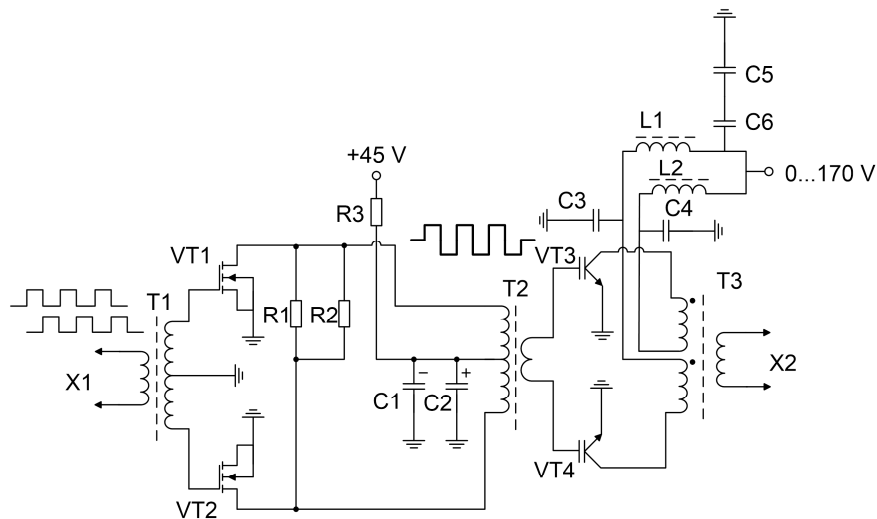


Рисунок 12 – Спрощена принципова електрична схема ГЗІ для живлення високочастотної котушки ЕМАП з імпульсним джерелом живлення

Обладнання стенду. Розроблення макету потужного генератора зонduючих пакетних високочастотних імпульсів струму для живлення плоскої високочастотної котушки індуктивності ЕМАП

Створені високочастотні пакетні послідовності, зсунуті на 180° , подаються на вхід генератора зонduючих імпульсів (ГЗІ), принципова електрична схема якого наведена на рис. 12. ГЗІ розроблено на базі даних статті [17].

ГЗІ поєднує дві послідовності імпульсів (рис. 8 та рис. 9) та підсилює імпульси формувача до потужності, необхідної для живлення ЕМАП пакетним високочастотним струмом, за величиною, достатньою для отримання амплітуди ультразвукових імпульсів товщиноміру, дефектоскопу або іншого приладу.

Із двох сигналів, зсунутих протифазно, трансформатором Т1 формуються два сигнали, які діють на затвори польових транзисторів VT1 і VT2 (IRF540) також протифазно. Транзистори по черзі відкриваються і закриваються, формуючи в імпульсному трансформаторі Т2 сумарний підсилений струм. З виходу трансформатора Т2 (1 виток) напруга прикладається до затворів IGBT транзисторів VT3 і VT4. Транзистори по черзі швидко включаються і виключаються. Через узгоджуючий трансформатор Т3 сформовані пакети потужного струму збуджуються в високочастотній котушці ЕМАП. Для

боротьби з імпульсними завадами в колекторні ланцюги транзисторів VT3 і VT4 вмонтовано індуктивності L1 і L2.

Особливістю роботи ГЗІ є те, що вихідні транзистори працюють у закритичному режимі. Це стало можливим через формування достатньо короткого за тривалістю зонduючого пакету (кілька мікросекунд), а також за рахунок ключового режиму роботи як вихідного ланцюга, так і ланцюга включення ізолюваних затворів вихідних IGBT транзисторів. Очевидно, що для забезпечення ультразвукового контролю в широкій смузі частот ГЗІ повинен мати широку смугу частот. Результати вимірювання амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) використаного макету ГЗІ наведено на рис. 13.

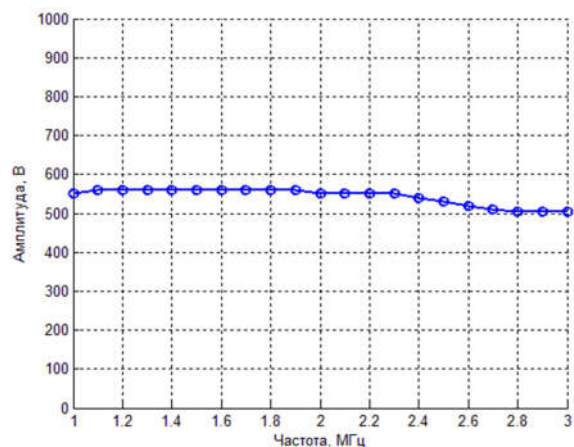


Рисунок 13 – АЧХ ГЗІ при навантаженні на опір 50 Ом

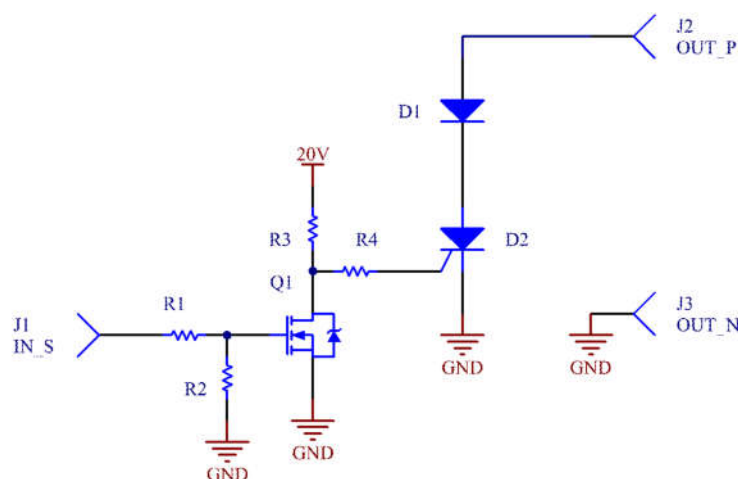
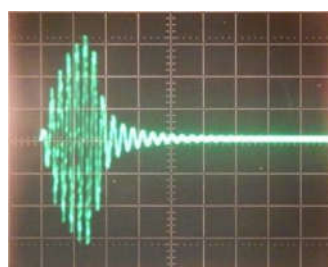
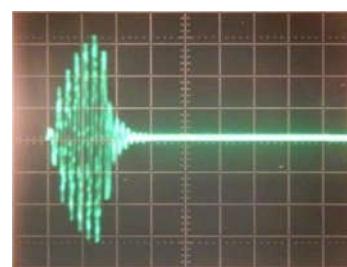


Рисунок 14 – Принципова електрична схема макета блока заглушення «дзвону» після завершення дії імпульсу ГЗІ



а)



б)

Рисунок 15 – Тривалість зонduючого імпульсу на ЕМАП без заглушення «дзвону» (а) та із заглушенням «дзвону» (б)

Аналіз даних, наведених на рис. 13, вказує на те, що в діапазоні частот, які найбільш часто використовують для вимірювань, АЧХ майже однакова і достатня для використання в дослідженнях і в промисловості. При навантаженні ГЗІ на ЕМАП, який має резонансну АЧХ з низькою добротністю, напруга на його вході має когерентні вільні коливання – «дзвін», що приводить до появи приповерхневої неконтрольованої зони металу. Для зменшення тривалості «дзвону» використано заглушувач (рис. 14), розроблений у дисертації [18].

Використання пристрою за схемою рис. 14 дало можливість зменшити тривалість «дзвону» приблизно в 3 рази (рис. 15).

Встановлено, що часова тривалість «дзвону» збільшується зі збільшенням відстані від ЕМАП до поверхні металу [18].

Аналіз даних, наведених на рис. 15, вказує на необхідність у подальшому додаткового зменшення загасаючих вільних електричних коливань в ЕМАП після завершення зонduючого імпульсу.

Обладнання стенду. Посилувач прийнятих ЕМАП з металовиробу ультразвукових імпульсів

Вимоги до посилювача прийнятих ультразвукових сигналів (ПУС) надзвичайно високі. На вхід ПУС під час роботи ГЗІ можуть надходити імпульси амплітудою в декілька десятків вольт. Це потребує відповідного захисту від дії високовольтних імпульсів, що надходять з ЕМАП. В той же час амплітуда корисних імпульсів, які надходять з перетворювача, може складати лише кілька мікрвольт. Це потребує створення ПУС з низьким коефіцієнтом завад щодо входу ПУС. Особливо це стосується першого каскаду підсилення, який може вийти з ладу від дії

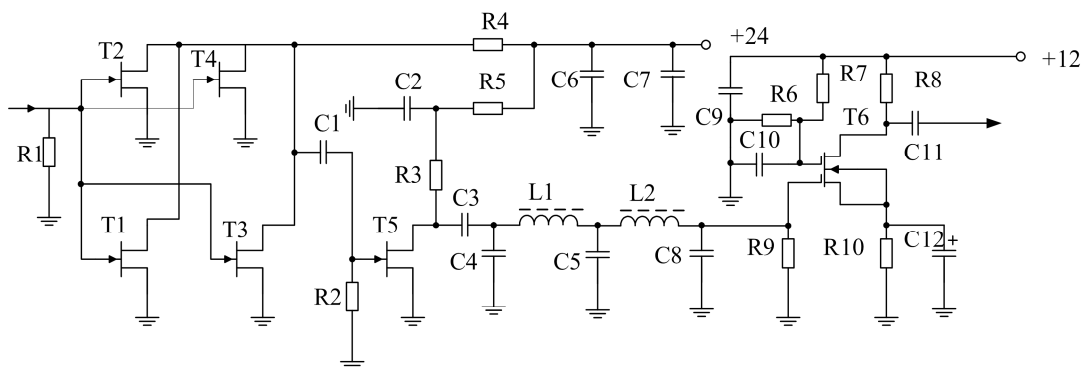


Рисунок 16 – Принципова електрична схема макета ПУС

напруги значної величини на вході ПУС. Вибір посилюючих елементів для першого каскаду ПУС повинен бути ретельним. Як показали дослідження, підсилюючі елементи першого каскаду не повинні мати коефіцієнт шуму більше $1 \text{ нВ/Гц}^{0,5}$, а коефіцієнт підсилення першого каскаду ПУС повинен складати близько 10. Час відновлення ПУС після дії зондуючого імпульсу повинен бути мінімальним, інакше тривалий час після дії зондуючого імпульсу ПУС не буде чутливим щодо корисного сигналу і, відповідно, “мертва зона” контролю металовиробу буде значною. Для цього входна ємність ПУС повинна бути мінімальною. В той же час входний опір посилювача повинен бути значним [17] для зменшення демпфування виходу ЕМАП, що може знизити його чутливість. Смуга робочого діапазону частот ПУС повинна мати інтервал $1 \dots 5 \text{ МГц}$ при центральній частоті ЕМАП $2 \dots 2,5 \text{ МГц}$, який, з одного боку, не повинен суттєво зменшувати енергію ультразвукового імпульсу, що приймається, а з іншого, не повинен пропускати додаткові завади. Раціональним, окрім того, діапазон посилення частот ПУС повинен відповідати діапазону частот ЕМАП і, відповідно, частотам, що використовуються для контролю ультразвукових імпульсів.

Значні протиріччя щодо вимог до ПУС вдалося подолати, і в результаті був розроблений макет підсилювача, схема якого наведена на рис. 16.

Опишемо роботу ПУС. Після проходження зондуючого імпульсу корисний сигнал з ЕМАП надходить на транзистори першого каскаду. Перший каскад побудований із чотирьох паралельно включених високовольтних польових транзисторів T1-T4 з низькою входною ємністю. Таким включенням досягається низький рівень завад, значний динамічний діапазон і коефіцієнт підсилення близький до 10. Смуга пропускання каскаду визначається його навантаженням. Тому для забезпечення широкосмуговості і для узгодження з наступним каскадом в якості навантаження першого каскаду використано повторювач на польовому транзисторі T5. Для забезпечення заданої смуги ПУС далі встановлено LC фільтр для виділення прийнятого ультразвукового сигналу з шуму та завад. Центральна величина фільтру відповідає частоті ультразвукового імпульсу, який збуджується ЕМАП. Діапазон смугового фільтру від центрального значення частоти ЕМАП складає близько $\pm 2,5 \text{ МГц}$. Основне підсилення виділеного корисного сигналу виконується каскадом на подвоєному польовому транзисторі T6. Каскад виготовлено за каскодною схемою, що дозволило збільшити коефіцієнт підсилення ще в 100 разів. Загальний коефіцієнт підсилення ПУС складає близько 60 дБ (1000 разів). Після ПУС посилений прийнятий ультразвуковий імпульс може подаватися, наприклад, на вхід стандартного товщиноміру, дефектоскопу або іншого приладу ультразвукового контролю.

Обладнання стенду. Розробка макету поєднаного прямого ЕМАП з джерелом імпульсного поляризованого магнітного поля для збудження і прийому зсувних пакетних ультразвукових імпульсів нормально поверхні феромагнітного металовиробу

В роботах [2, 4, 8] встановлено та підтверджено, що імпульсні магніти для портативних ЕМАП повинні мати осердя, що виготовлені з тонких пластин металу з високою індукцією насичення. Товщина пластин повинна бути такою, що в ній не будуть збуджуватися нормальні хвилі в діапазоні частот, на які налаштовано ЕМАП. Причому згідно з результатами роботи [16], його висота повинна бути за розміром більшою, ніж ширина або діаметр полюса, поверненого до поверхні ОК, що діагностується. Приклад розташування площин шихтованого осердя імпульсного магніту по відношенню до провідників робочої ділянки високочастотної котушки індуктивності (рис. 2 позиція 3) такого осердя наведено на рис. 17.

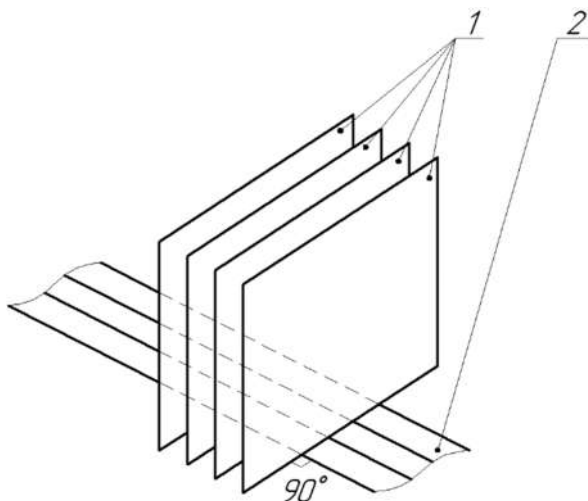


Рисунок 17 – Орієнтація пластин шихтованого осердя імпульсного магніту ЕМАП відносно робочих провідників високочастотної котушки індуктивності

Переваги шихтованого осердя ЕМАП полягають у відсутності вихрових струмів у його полюсі. Тому полюс осердя може бути розміщений максимально близько до плоскої високочастотної котушки індуктивності, що дає можливість

підвищити величину індукції в порівнянні з використанням постійного магніту, як це наведено в роботі [8], в якій вказано про необхідність збільшувати відстань між полюсом постійного магніту з електромагнітним екраном, розташованим на його поверхні, і плоскою високочастотною котушкою індуктивності, щоб виключити збудження когерентних завад.

Слід звернути увагу на те, що виготовлення осердя імпульсного магніту шихтованим приводить 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 іншого, шихтування осердя призводить до зменшення індукції магнітного поля. Вплив цього фактора слід додатково дослідити експериментально.

Зменшення коефіцієнта заповнення металом осердя джерела магнітного поля вимагає збільшення площі полюсного наконечника в порівнянні з ЕМАП з постійними магнітами.

В роботі [13] показано, що для зменшення часу наростання імпульсу намагнічування, а, відповідно, і зменшення енергетичних втрат, індуктивна складова імпульсного магніту повинна бути мінімальною. Виникає ще одне протиріччя. З одного боку, збільшення об'єму металу магнітного осердя і кількості витків котушки намагнічування підвищують індуктивність магніту, а, з іншого, індуктивність джерела магнітного поля можливо зменшити тільки зменшенням кількості витків котушки намагнічування. В той же час, для забезпечення часової тривалості імпульсу намагнічування, необхідної для діагностування і вимірювання, кількість витків котушки намагнічування доцільно збільшувати [6]. Використання в роботі [6] резонансного збудження імпульсного магніту не дозволяє виконувати контроль товстих або

довгих металовиробів, як це передбачено метою роботи. Причому, в одній і тій же роботі декларується, що тривалість імпульсу намагнічування повинна бути не менше 1 мс, а далі по тексту 100 мкс.

Більш складним є питання вибору параметрів котушки намагнічування джерела магнітного поля ЕМАП. Оскільки за основу було взято оптимізовані параметри моделювання постійного магніту при умові, що осердя імпульсного магніту буде знаходитися у стані, коли струм в котушці намагнічування стабілізується, залежно від товщини ОК, на заданий час [19], то котушка повинна охоплювати осердя по всій його висоті в 60 мм. З іншого боку, згідно з результатами роботи [2] осердя магніту повинно охоплюватися котушкою намагнічування частково, що зменшує індуктивність джерела імпульсного магнітного поля. Таке протиріччя вимагає перевірки експериментальними дослідженнями висоти котушки намагнічування по відношенню до висоти осердя.

Для проведення експериментів стенд був забезпечений ЕМАП з імпульсними магнітами різних модифікацій, один з яких для прикладу наведено на рис. 18.



**Рисунок 18 – Макет ЕМАП.
Обладнання стенду. Зразки для досліджень**

Для досліджень стенд був забезпечений зразками з феромагнітних сталей, в тому числі без зачищення поверхні від окалини. Використано зразок зі сталі ст.45 розміром $100 \times 100 \times 40$ мм³. Ступінь максимальної шорсткості поверхонь зразка в деяких місцях досягала 0,5 мм. Використовувався зразок із незачищеними поверхнями.

При дослідженнях ЕМА датчик встановлювався таким чином, щоб напрямок випромінювання ультразвукових імпульсів був перпендикулярним більшій площині зразка, тобто вимірювання проводилося по товщині близько 40 мм. Контроль проводився через лавсанову прокладку товщиною 0,2 мм.

Висновки

Визначені та обґрунтовані основні технічні та технологічні характеристики електромагнітно-акустичних перетворювачів з імпульсним намагнічуванням, які необхідно регулювати для забезпечення їх ефективності:

- розроблено стенд для експериментальних досліджень ЕМАП, в складі якого: блок формування імпульсу намагнічування; блок формування напруги та потужності імпульсу намагнічування; блок-схема формувача пакетного високочастотного пакетного імпульсу живлення плоскої високочастотної котушки індуктивності; блок формування пакетних високочастотних імпульсів для живлення плоскої високочастотної котушки індуктивності ЕМАП; принципова електрична схема формувача послідовностей двох пакетних імпульсів з фазами, зсунутими на 180° ; потужного генератора зондуючих пакетних високочастотних імпульсів струму для живлення плоскої високочастотної котушки індуктивності ЕМАП; посилювач прийнятих ЕМАП з металовиробу ультразвукових імпульсів;

- показано, що осердя імпульсного магніту необхідно виготовляти шихтованим із трансформаторної сталі товщиною 0,5 мм та орієнтувати його пластини нормально до провідників високочастотної котушки індуктивності, а розміри доцільно встановити близько $60 \times 37 \times 35$ мм³;

- встановлена необхідність раціонального вибору кількості витків котушки намагнічування та її розташування на осерді імпульсного магніту;

– обґрунтована необхідність використання в складі ЕМАП плоскої високочастотної котушки індуктивності з багатьох паралельно включених ізольованих провідників, виготовленої у формі крил метелика.

Розроблені:

– часова діаграма формування високочастотних пакетних імпульсів для живлення плоскої високочастотної котушки індуктивності ЕМАП;

– часова діаграма формування імпульсу струму намагнічування в котушці імпульсного електромагніту (один цикл зондування виробу ЕМАП).

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. 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. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/49379>
2. Буссі Салам. Електромагнітно – акустичні перетворювачі для ультразвукового контролю металовиробів. Дис. к.т.н. 2020. НТУ «ХПІ». 158 с.
3. Сучков Г.М., Мигущенко Р.П., Плєснецов С.Ю., Кошкарів Ю.Ю., Кальницький М.Е. Моделювання імпульсних джерел магнітного поля портативних ультразвукових електромагнітно-акустичних перетворювачів для вимірювань, контролю та діагностики. *Метрологія та прилади*. 2024. №1. С. 28-31. DOI: [10.30837/2663-9564.2024.1.06](https://doi.org/10.30837/2663-9564.2024.1.06)
4. 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. P. 88. URL: https://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/noncontact_ultrasonics/256_shevaldykin.pdf
5. 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. P. 579-584. doi: [10.3103/S0967091220080082](https://doi.org/10.3103/S0967091220080082)
6. Trushkevych O., Edwards R.S. Characterisation of small defects using miniaturised EMAT system. *July 2019. NDT & E International* 107:102140. DOI: [10.1016/j.ndteint.2019.102140](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.102140)
7. Сучков Г. М., Донченко А. В. 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–Перево́рськ (Польща). Вип. 74. Україна. 2023. С. 192-194. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/81062>
8. Донченко А.В., Мигущенко Р.П. Сучков Г.М., Кропачек О.Ю. Патент на корисну модель №156088. Накладний суміщений електромагнітно – акустичний перетворювач з імпульсним намагнічуванням для контролю феромагнітних металовиробів. Заявка №U202304534 від 25.05.2023 р. Опубл. 08.05.2024. Бюл. №19.
9. Fortunko C. N. Maclauchlan D. Pulsed electromagnets for EMATS. Fracture and Deformation Division National Bureau of Standards Boulder, CO 80303. <https://core.ac.uk/download/pdf/38925797>
10. Heng Zhang, Shu-juan Wang, Guo-fu Zhai, Ri-liang Su. Design of bulk wave EMAT using a pulsed electromagnet. Conference: 2014 IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing (FENDT). doi: [10.1109/FENDT.2014.6928272](https://doi.org/10.1109/FENDT.2014.6928272).
11. Xie C, Liu T, Pei C, Jin Y, Chen Z. A new longitudinal mode guided-wave EMAT with periodic pulsed electromagnets for non-ferromagnetic pipe. *Sensor Actuat APhys*. 2021. Vol. 331(1). doi: [10.1016/j.sna.2021.112991](https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112991)
12. Hernandez-valle F, Dixon S. Initial tests for designing a high temperature EMAT with pulsed electromagnet. *NDT&E Int*. 2010. Vol.43. P.171–175. doi: [10.1016/J.NDTEINT.2009.10.009](https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2009.10.009)
13. 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 and E International*. 2022. Vol.125. P. 1-12. doi: [10.1016/j.ndteint.2021.102572](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2021.102572)

14. Hao K., Huang S., Zhao W. and Duan R.J. Analytical modelling and calculation of pulsed magnetic field and input impedance for EMATs with planar spiral coils. *NDT & E International*. 2011. Vol. 44. No. 3. P. 274-280. DOI: [10.1016/j.ndteint.2011.01.001](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.01.001)

15. 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. 5534. doi: [10.3390/app10165534](https://doi.org/10.3390/app10165534)

16. Сучков Г.М., Мигущенко Р.П., Плєснецов С.Ю., Плєснецов Ю.О., Курандо О.І., Алексїїв А.Г., Борошенко О.М., Бутенко О.І., Рибалко А.О. 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: [10.15407/techned2025.02.085](https://doi.org/10.15407/techned2025.02.085)

17. Салам Буссі, Сучков Г.М., Плєснецов С.Ю., Мигущенко Р.П., Кропачек О.Ю., Плєснецов Ю.О. Генератор потужних височастотних пакетних імпульсів струму для живлення ультразвукових електромагнітно-акустичних перетворювачів. *Методи та прилади контролю якості*. 2019. № 2. С. 88-95. doi: [10.31471/1993-9981-2019-2\(43\)-88-95](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2019-2(43)-88-95)

18. Десятніченко О. В. Електромагнітно-акустичний товщиномір для контролю металовиробів з діелектричними покриттями: дис. канд. техн. наук: 05.11.13. Харків. 2015. 172 с.

19. Салам Буссі. Потужний електромагнітно-акустичний перетворювач для ультразвукового контролю металовиробів. Матеріали 3-ї конференції з міжнародною участю «Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському союзі». 17-19 вересня 2019. Київ: НТУУ «КПІ». С. 50 -51.

References

1. Suvorova M.D. Rozrobka namahnichuvalnykh dzherel dlia EMA peretvoriuvachiv na osnovi potuzhnykh postiinykh mahnitiv. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Elektroenerhetyka ta peretvoriuvalna tekhnika*. № 1. 2019. P. 63-73. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/49379> [in Ukrainian]

2. Bussi Salam. Elektromahnitno – akustychni peretvoriuvachi dlia ultrazukovoho kontroliu metalovyrobiv. Dys. k.t.n. 2020. NTU «KhPI». 158 p.

3. Suchkov H.M., Myhushchenko R.P., Pliesnetsov S.Iu., Koshkarov Yu.Iu., Kalnytskyi M.E. Modeliuvannia impulsnykh dzherel mahnitnoho polia portatyvnykh ultrazukovykh elektromahnitno-akustychnykh peretvoriuvachiv dlia vymiriuvan, kontroliu ta diahnostryky. *Metrolohiia ta prylady*. 2024. №1. P. 28-31. doi: [10.30837/2663-9564.2024.1.06](https://doi.org/10.30837/2663-9564.2024.1.06) [in Ukrainian]

4. 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. P. 88. URL: https://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/noncontact_ultrasonics/256_shevaldykin.pdf

5. 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. P. 579-584. doi: [10.3103/S0967091220080082](https://doi.org/10.3103/S0967091220080082)

6. Trushkevych O. Edwards R.S. Characterisation of small defects using miniaturised EMAT system. July 2019. *NDT & E International* 107:102140. DOI:[10.1016/j.ndteint.2019.102140](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.102140)

7. Suchkov H. M., Donchenko A. V. Udoskonalennia elektromahnitno – akustychnykh peretvoriuvachiv dlia ultrazukovoho kontroliu yakosti feromahnitnykh metalovyrobiv. Informatsiine suspilstvo: tekhnolohichni, ekonomichni ta tekhnichni aspekty stanovlennia: zb. tez dopovidei mizhnarodnoi naukovoï internet- konferentsii, 6–7 liutoho 2023 r., Ternopil–Perevorsk (Polshcha). Vol. 74. Ukraina, 2023. P. 192-194. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/81062> [in Ukrainian]

8. Donchenko A.V., Myhushchenko R.P. Suchkov H.M., Kropachek O.Iu. Patent na korysnu model №156088. Nakladnyi sumishchenyi elektromahnitno – akustychnyi peretvoriuvach z impulsnym namahnichuvanniam dlia kontroliu feromahnitnykh metalovyrobiv. Zaiavka №U202304534 vid 25.05.2023 r. Opubl. 08.05.2024. Biul. №19. [in Ukrainian]

9. Fortunko C. N. Maclauchlan D. Pulsed electromagnets for EMATS. Fracture and Deformation Division National Bureau of Standards Boulder, CO 80303. <https://core.ac.uk/download/pdf/38925797>

10. Heng Zhang, Shu-juan Wang, Guo-fu Zhai, Ri-liang Su. Design of bulk wave EMAT using a pulsed electromagnet // Conference: 2014 IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing (FENDT). doi:[10.1109/FENDT.2014.6928272](https://doi.org/10.1109/FENDT.2014.6928272).
11. Xie C, Liu T, Pei C, Jin Y, Chen Z. A new longitudinal mode guided-wave EMAT with periodic pulsed electromagnets for non-ferromagnetic pipe. *Sensor Actuat APhys*. 2021. Vol. 331(1). doi: [10.1016/j.sna.2021.112991](https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112991)
12. Hernandez-valle F, Dixon S. Initial tests for designing a high temperature EMAT with pulsed electromagnet. *NDT&E Int*. 2010. Vol.43. P.171–175. doi: [10.1016/J.NDTEINT.2009.10.009](https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2009.10.009)
13. 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 and E International*. 2022. Vol.125. P. 1-12. doi: [10.1016/j.ndteint.2021.102572](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2021.102572)
14. Hao K., Huang S., Zhao W. and Duan R.J. Analytical modelling and calculation of pulsed magnetic field and input impedance for EMATs with planar spiral coils. *NDT & E International*. 2011. Vol. 44. No. 3. P. 274-280. doi: [10.1016/j.ndteint.2011.01.001](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.01.001)
15. 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. 5534. doi: [10.3390/app10165534](https://doi.org/10.3390/app10165534)
16. Suchkov H.M., Myhushchenko R.P., Pliesnetsov S.Yu., Pliesnetsov Yu.O., Kurando O.I., Aleksiiv A.H., Borodenko O.M., Butenko O.I., Rybalko A.O. Pidvyshchennia chutlyvosti elektromahnitno-akustychnykh peretvoriuvachiv dlia kontroliu, vymiriuvannia i diahnostryky feromahnitnykh metalovyrobiv za rakhunok zbilshennia velychyny induktsii mahnitnoho polia (ohliad). *Tekhnichna elektrodynamika*. 2025. №2. P. 85-95. doi: [10.15407/techned2025.02.085](https://doi.org/10.15407/techned2025.02.085) [in Ukrainian]
17. Salam Bussi, Suchkov H.M., Pliesnetsov S.Iu., Myhushchenko R.P., Kropachek O.Iu., Pliesnetsov Yu.O. Henerator potuzhnykh vysokochastotnykh paketnykh impulsiv strumu dlia zhyvlennia ultrazvukovykh elektromahnitno-akustychnykh peretvoriuvachiv. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*. 2019. № 2. P. 88-95. doi: [10.31471/1993-9981-2019-2\(43\)-88-95](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2019-2(43)-88-95) [in Ukrainian]
18. Desiatnichenko O. V. Elektromahnitno-akustychnyi tovshchynomir dlia kontroliu metalovyrobiv z dielektrychnymy pokryttiamy: dys. kand. tekhn. nauk: 05.11.13. Kharkiv. 2015. 172 p. [in Ukrainian]
19. Salam Bussi. Potuzhnyi elektromahnitno-akustychnyi peretvoriuvach dlia ultrazvukovoho kontroliu metalovyrobiv. Materialy 3-yi konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu «Neruinivnyi kontrol v konteksti asotsiiovanoho chlenstva Ukrainy v Yevropeiskomu soiuzi». 17 19 veresnia 2019. Kyiv: NTUU «KPI». P. 50–51. [in Ukrainian]

UNIVERSAL TEST BENCH AND EQUIPMENT FOR STUDYING ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC TRANSDUCERS WITH A PULSED SOURCE OF POLARIZING MAGNETIC FIELD

Suchkov G. M.

Doctor of Technical Sciences, Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
61002, 2 Kirpychova St., Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1805-0466>
e-mail: hpi.suchkov@gmail.com

Kalnytyski M. E.

Postgraduate Student
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
61002, 2 Kirpychova St., Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0000-5056-2085>
e-mail: kalnytyski94@gmail.com

Dmytrenko M. V.

Senior Lecturer

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

61002, 2 Kirpychova St., Kharkiv, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0004-2075-5619>

e-mail: mvdxim@gmail.com

Bobrov O. G.

Senior Researcher

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

61002, Kirpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-8840-6405>

e-mail: bobrov_ag@ukr.net

Abstract. The research is aimed at increasing the sensitivity of electromagnetic-acoustic transducers (EMAT) by forming a powerful pulsed magnetic quasi-stationary field, the shape of which has a uniform value of the magnetic field induction value in a given time interval, which is determined by the size H of the metal product to be controlled, i.e. $t_p = 2H/C_t$, where t_p is the operating time of the magnetization pulse; C_t is the propagation speed of shear ultrasonic waves in the metal product material. The purpose of the research is to determine the effective parameters of the action of magnetization pulses and high-frequency pulses supplying the EMAT inductance coil. The novelty of the work is the development of means that provide a change in the parameters of high-frequency pulses, magnetization pulses and their relative interaction in a given time interval. The research results showed the feasibility of choosing, as a criterion for assessing the sensitivity of EMAT, the value of the ratio of the amplitudes of the useful signal to the amplitude of the interference. Thanks to this approach, rational values of the duration of magnetization pulses have been determined, which, on the one hand, provide the minimum required value of the magnetic field induction, and on the other hand, the permissible temperature regime of the pulse magnet. It has been established that the magnitude of the delay in switching on the high-frequency pulse relative to the beginning of the magnetization pulse has a strong influence on the amplitude of the useful signal. Moreover, the magnitude of the delay depends on the current strength in the magnetization coil. That is, the greater the power current strength of the pulse magnet, the smaller the delay value and, accordingly, it is possible to choose a shorter duration of the magnetization current pulse, improving the temperature regime of the converter.

Keywords: research, measurement, inspection, diagnostics, ultrasonic pulses, EMAT, sensitivity, ferromagnetic product, magnetic field, pulsed magnetic field, generator, amplifier, magnetizing current, high-frequency pulsed current packets, electromagnetic field.