

МОДЕЛЮВАННЯ ІМПУЛЬСНИХ ДЖЕРЕЛ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПОРТАТИВНИХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО- АКУСТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАНЬ, КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ

Г.М. Сучков, Р.П. Мигущенко, С.Ю. Плєснецов, Ю.Ю. Кошкаров, М.Е. Кальницький
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інституту», м. Харків, Україна.

Анотація

Для контролю феромагнітних металовиробів використовують ультразвукові електромагнітно – акустичні перетворювачі (ЕМАП) з постійними магнітами. Це призводить до сильного притискання ЕМАП до металу, його зносу, появи значних когерентних завад за рахунок налипання феромагнітних часток, що часто приводить до неможливості виконання вимірювань, контролю та діагностики. Вирішити вказані недоліки можливо за рахунок використання імпульсних магнітів, що підтверджує актуальність роботи. Мета роботи визначити раціональні геометричні параметри імпульсного магніту для ЕМАП. Для досягнення вказаної мети сформульована фізико-математична задача і виконано моделювання з використанням пакету Comsol Multiphysics. Встановлено, що для забезпечення ефективної роботи ЕМАП доцільно висоту імпульсного магніту вибирати з діапазону 50...60 мм, розміри полюса 30х30...50х50 мм. Такі параметри забезпечують отримання величину індукції квазістаціонарного магнітного поля не менше 0,35 Тл в інтервалі ± 10 мм від центру полюса імпульсного магніту.

Ключові слова: контроль, вимірювання, діагностика, ультразвук, електромагнітно – акустичний перетворювач, імпульсне джерело магнітного поля

1. Вступ

На цей час розроблені і випускаються електромагнітно – акустичні (ЕМА) перетворювачі (ЕМАП) в складі яких використовують джерела постійного магнітного поля [1-2]. Такі ЕМАП мають два основні суттєві недоліки – сильне притягування до феромагнітних виробів і потужні когерентні завади, які виникають із-за налипання до перетворювача феромагнітних часточок та окалини.

В роботах [3-6] запропоновані магнітні системи, які використовують імпульсні електромагніти, що створюють потужне магнітне поле на час порядку декількох мілісекунд, тому притягування ЕМАП до феромагнітних матеріалів практично відсутнє. Як стверджується деякими фахівцями, значення індукції, створеної імпульсними електромагнітами можуть перевищувати в кілька разів значення, що формуються магнітними джерелами на постійних магнітах. Так, Альохін С.Г. [7] вважає, що нормальна компонента імпульсного магнітного поля повинна бути не менше 0,6 Тл при часовій тривалості 70 ... 300 мкс. В іншій частині дисертації він стверджує, що тривалість імпульсу намагнічування повинен бути не менше 1 мс? В той же час для постійних магнітів індукція магнітного поля досягає 1,2 Тл [5-7]. Тобто є невідповідності в побудові ЕМАП з імпульсним намагнічуванні, в порівнянні з перетворювачами з постійним намагнічуванням, які потрібно досліджувати.

Мета роботи. Визначити раціональні значення параметрів конструкції джерела імпульсного намагнічування прямого ЕМАП для ультразвукового контролю, вимірювання і діагностики.

2. Моделювання джерела імпульсного магнітного поля накладного

суміщеного електромагнітно – акустичного перетворювача для контролю феромагнітних металовиробів

На сьогоднішній день відомі два основні способи теоретичного розрахунку магнітних та геометричних параметрів магнітних ланцюгів: розв'язання системи рівнянь Максвелла та розрахунки з використанням магнітних аналогів законів повного струму, Ома та Кірхгофа [8-9].

Найчастіше для розрахунку пристроїв неруйнівного контролю використовують саме другу методику розрахунків [9-10]. Цей спосіб розрахунку передбачає ряд припущень, і вважається, що отримані результати є оціночними. Для завдань магнітостатики (в нашому випадку квазімагнітостатики), в яких амплітуда поля не змінюється в часі впродовж заданого часу t , напруженість H магнітного поля і магнітну індукцію B можна описати наступними виразами

$$\nabla \times H = j + \partial D / \partial t = J, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot B = 0, \quad (2)$$

$$B = \mu_0 \mu H, \quad (3)$$

де: j - щільність електричного струму (щільність струму провідності), А/м²; J - щільність повного струму (сума щільності електричного струму провідності та щільності струму зміщення), А/м²; D - електрична індукція, Кл/м²; t - час, с; μ - відносна магнітна проникність матеріалу; μ_0 - магнітна проникність вакууму, $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

При нелінійних властивостях матеріалу виробу магнітна проникність буде функцією від H :

$$\mu(H) = B(H) / \mu_0 H \quad (4)$$

Для розрахунку магнітних кіл доцільно виразити поле, що задовольняє рівнянням (1) - (3)

через векторний магнітний потенціал $\mathbf{A}$. Густина магнітного потоку визначається через векторний магнітний потенціал як:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (5)$$

Тоді вираз (1) можна переписати наступним чином:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A} / \mu(\mathbf{H})) = \mu_0 \mathbf{J}. \quad (6)$$

Для лінійного ізотропного матеріалу (вважаючи, що $\nabla \times \mathbf{A} = 0$) вираз (6) буде мати вигляд:

$$\nabla^2 \mathbf{A} = \mu_0 \mathbf{J}. \quad (7)$$

За допомогою виразу (1) можуть бути вирішені задачі квазімагнітостатики з урахуванням нелінійної залежності $\mathbf{B}(\mathbf{H})$. У загальному тривимірному випадку векторний потенціал $\mathbf{A}$ є вектором з трьома компонентами. Для двовимірного випадку плоских та осесиметричних задач два з трьох компонентів дорівнюють нулю, і для вирішення задачі залишається визначити лише одну компоненту.

Для розрахунку магнітного ланцюга необхідно обчислити всю сукупність точок в заданому об'ємі, вирішуючи в кожній з них рівняння (1) - (7). Для вирішення цієї задачі часто використовують метод кінцевих елементів.

Комп'ютерне моделювання є нині найважливішою складовою процесу проектування пристроїв різних типів, що пояснюється необхідністю скорочення термінів розробки нових пристроїв, а також наявністю ефективних алгоритмів та програм комп'ютерного моделювання електричних та магнітних ланцюгів. Для цього нами використано пакет програм Comsol Multiphysics. При дослідженнях будемо враховувати наступне: в якості ОК розглянемо виріб у вигляді напівплощини, виготовлений з феромагнітного матеріалу, рис.1; для зменшення габаритів розробці підлягає суміщений ЕМАП, що збуджує і приймає імпульси зсувних ультразвукових коливань, які мають високу виявляємість внутрішніх дефектів ОК; імпульсне джерело магнітного поля ультразвукового перетворювача повинне формувати в поверхневому шарі ОК силові лінії нормально його поверхні; магнітне поле в поверхневому шарі ОК повинне бути квазістабільним на протязі заданого проміжку часу при збудженні і прийомі ультразвукових імпульсів.

Враховуючи викладене розглянемо фізичну модель ЕМАП з імпульсним джерелом магнітного поля, яка необхідна для розрахунку магнітного поля, рис. 1. Оскільки коефіцієнт перетворення електромагнітної енергії в ультразвукову і навпаки має залежність від індукції магнітного поля квадратичну, то надалі будемо розглядати параметри джерела квазіпостійного магнітного поля. При цьому вважатимемо, що імпульс намагнічування досягає максимального значення і підтримується на протязі заданого часу, необхідного для збудження і прийому ультразвукових імпульсів з ОК.

На рис. 1 позначені: 1 – корпус; 2 – протектор; 3 – джерело магнітного поля; 4 – сердечник джерела магнітного поля; 5 – котушка намагнічування; 6 –

полюс джерела магнітного поля; 7 – плоска високо частотна котушка індуктивності; 8 – набір ізолюваних між собою тонких феромагнітних пластин; 9 – торці ізолюваних між собою тонких феромагнітних пластин; 10 – ОК. H_1 – висота пластин сердечника джерела імпульсного магнітного поля; H_2 – ширина стрічки котушки намагнічування. D – внутрішній дефект в ОК.

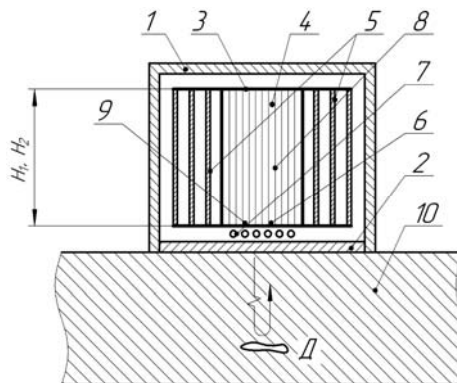


Рис. 1. Фізична схема збудження і прийому ультразвукових імпульсів електромагнітно-акустичним перетворювачем з імпульсним намагнічуванням в феромагнітному виробі

Виконання сердечника 4 з набору 8 ізолюваних між собою тонких феромагнітних пластин так, що висота H_1 пластин набагато більша ніж їх ширина, дозволяє підвищити величину індукції магнітного поля, збільшити таким чином потужність збуджених ультразвукових імпульсів та чутливість ЕМАП.

Виготовлення котушки 5 намагнічування джерела 3 магнітного поля з широкої тонкої стрічки, матеріал якої неферомагнітний і має високу електропровідність, при цьому ширина H_2 стрічки дорівнює висоті H_1 наборного сердечника 4 джерела 3 магнітного поля, що додатково збільшує величину індукції магнітного поля за рахунок перерозподілу струму по ширині котушки 5 намагнічування.

Для забезпечення гострої діаграми спрямованості ультразвукового поля зсувних лінійно поляризованих ультразвукових хвиль в об'ємі ОК нормально його поверхні робоча зона плоскої високо частотної котушки індуктивності (поз.7 рис.1), як правило [12], має розмір $30 \times 15 \text{ мм}^2$. Тому мінімальний розмір торця (полюса) сердечника імпульсного електромагніту повинен бути не менше $30 \times 30 \text{ мм}^2$. З іншої сторони максимальний розмір полюса сердечника імпульсного електромагніту повинен бути не більше $50 \times 50 \text{ мм}^2$, що визначається умовами проведення сканування поверхні ОК оператором ультразвукового портативного ЕМА приладу. При розрахунках ширина полюса магніту (в перетині) була в діапазоні 30...60 мм, висота сердечника 10...100 мм при змінній відстані від магніту до поверхні ОК.

Встановлено, що величина амплітуди ультразвукового сигналу зростає для висоти сердечника H_1 (рис.1) близько 50...60 мм. Надалі його зростання практично припиняється. Приклад отриманих результатів наведено на рис.2.

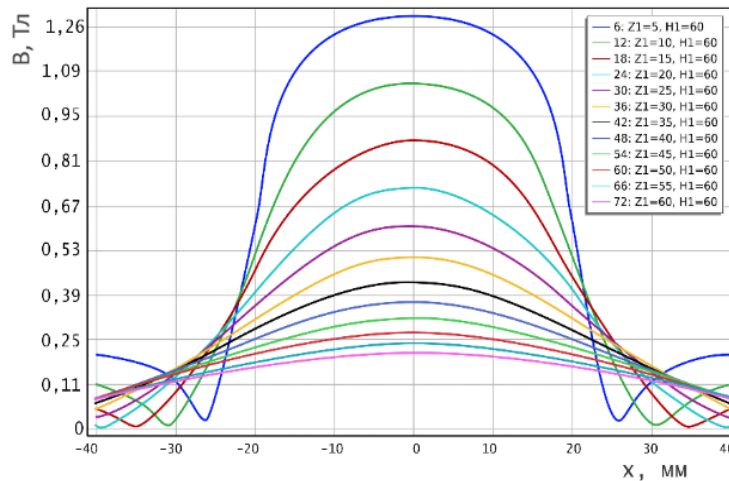


Рис. 2. Розрахунковий розподіл величини нормальної компоненти індукції квазіпостійного магнітного поля під полюсом ЕМАП в залежності від величини зазору між металом і об'єктом контролю

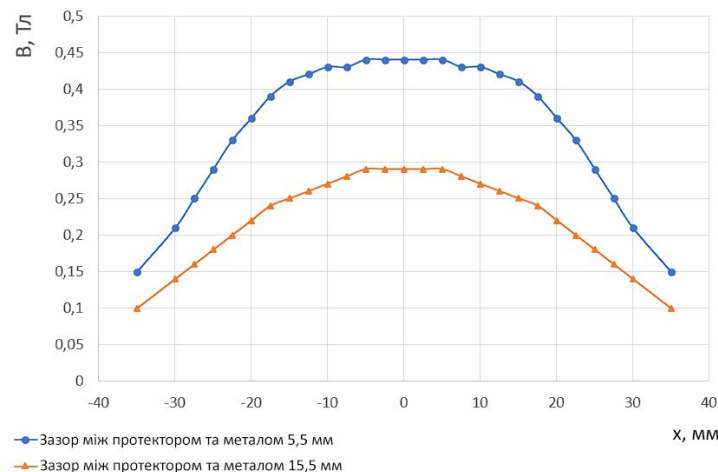


Рис.3. Розподіл величин нормальної компоненти індукції квазістаціонарного магнітного поля від центра полюса при висоті сердечника магніту 60 мм при різних зазорах від полюса до поверхні ОК, які отримані експериментально

Експериментальна перевірка результатів моделювання виконана для сердечника імпульсного магніту висотою 60 мм та розмірів його полюсів $50 \times 50 \text{ мм}^2$. Один із результатів вимірювань наведено на рис. 3.

Аналіз отриманих експериментальних результатів якісно підтверджує дані моделювання. Проте збільшення індукції квазістаціонарного магнітного поля не настільки велике, як можна було чекати. Цей ефект скоріш за все обумовлений насиченням металу сердечника магніту нелінійним чином.

3. Висновки

Аналіз даних, отриманих при моделюванні, дозволяє зробити наступні висновки: для отримання достатньої для роботи ЕМАП величини нормальної

компоненти індукції квазістаціонарного магнітного поля (не менше 0,35 Тл) на відстані $Z1$ між полюсом магніту і ОК рівного 30 мм висоту магніту слід вибирати в діапазоні 50...60 мм; величина нормальної компоненти індукції магнітного поля B межах ± 10 мм від центру полюса магніту (активна зона ЕМАП) не змінюється більш, ніж на 10%, що є достатнім для формування в ОК діаграми спрямованості ультразвукового поля при прийомі та випромінюванні імпульсів ультразвукових коливань; при збільшенні зазору $Z1$ (рис.2) ширина залежності нормальної компоненти індукції магнітного поля на границі його максимального значення також збільшується, що дає можливість формувати більш гостру діаграму спрямованості ультразвукового поля за інших рівних умов.

Список літератури

1. Суворова М.Д. Розробка намагнічувальних джерел для ЕМА перетворювачів на основі потужних постійних магнітів // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. № 1. 2019. 63-73.
2. Сайт канадської фірми Innerspec [електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.innerspec.com/portable/emat-sensors>. (Дата звернення: 19.09.2021).
3. 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;331(1):112991. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112991>.

4. Сучков Г.М., Салам Буссі. Моделирование поляризуемого магнитного поля электромагнитно-акустического перетворювача електромагнітної енергії в ультразвукову / Тези 19 міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатики та моделювання». 11-16 вересня 2019 р. – Кароліно-Бугаз. – С. 79.
5. 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 ферромагнітних металовиробів. Заявка №U202304534 від 25.05.2023 р. Опубл. 08.05.2024. Бюл. №19.
6. Ambuj K. Gautam, Ching-Chung Yin, Bishakh Bhattacharya. A new chevron electromagnetic acoustic transducer design for generating shear horizontal guided wave // *Ultrasonics*. 2023. V. 135. Pp.107-137.
7. 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.
8. Mihajlov A.V., Gobov Ju.L., Smorodinskij Ja.G., Shherbinin S.V. Pulsed magneto-acoustic transducer // *Defektoskopija*. 2015. №8. С. 14-23.
9. Suchkov G.M., Bolyukh V.F., Kocherga A.I., Mygushchenko R.P., Kropachek O.Yu. Increasing the Efficiency of the Surface-Mounted Ultrasonic Electromagnetic-Acoustic Transducer Due to the Magnetic Field Source. *Технічна електродинаміка*. № 2, 2023, С. 3–8. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.02.003>.
10. Thomas, S.; Muazu, H.; Zarma, T.A.; Galadima, A. Finite Element Analysis of EMAT Using Comsol Multiphysics. In Proceedings of the 2017 13th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO), Abuja, Nigeria, 28–29 November 2017.
11. Буссі Салам. Електромагнітно – акустичні перетворювачі для ультразвукового контролю металовиробів. Дис. к.т.н. 2020. НТУ «ХПІ». 158 с.
12. Плєснецов С.Ю. Розвиток методів та засобів для електромагнітно-акустичного контролю стрижневих, трубчастих та листових металовиробів: автореф. дис. д-ра техн. наук. Харків, 2021. 40 с.

Надійшла (Received) 15.09.2024

Прийнята до друку (accepted for publication) 21.10.2024

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ABOUT THE AUTHORS

Сучков Григорій – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ»), E-mail: hpi.suchkov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1805-0466>.

Suchkov Hryhorii – doctor of Science, Professor, Professor of computer and radioelectronic systems for testing and diagnostics department, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” (NTU “KhPI”), E-mail: hpi.suchkov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1805-0466>.

Мигущенко Руслан – доктор технічних наук, професор, проректор НТУ «ХПІ», E-mail: mrp1@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3287-9772>.

Mygushchenko Ruslan – doctor of Science, Professor, vice-rector of the NTU “KhPI”, E-mail: mrp1@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3287-9772>.

Плєснецов Сергій – доктор технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики НТУ «ХПІ»; E-mail: rastrelly@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8428-5426>

Pliesnetsov Serhii – doctor of Science, Docent of computer and radioelectronic systems for testing and diagnostics department, NTU “KhPI”, E-mail: rastrelly@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8428-5426>

Кошкаров Юрій – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник науково-дослідної лабораторії факультету озброєння та військової техніки НТУ «ХПІ», E-mail: koshkarov@meta.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1430-0154>.

Koshkarov Yurii – PhD, senior researcher leading researcher of the research laboratory of Faculty of Weapons and Military Technology Higher Educational Institution NTU “KhPI”, E-mail: koshkarov@meta.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1430-0154>.

Кальницький Максим — аспірант кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики НТУ «ХПІ», E-mail: kalnytsky94@gmail.com.

Kalnytsky Maksym — postgraduate student of computer and radioelectronic systems for testing and diagnostics department, NTU “KhPI”, E-mail: kalnytsky94@gmail.com.

Simulation of pulse magnetic field sources of portable ultrasound electromagnetic-acoustic transducer for measurements, control and diagnostics

Suchkov H.M. Mygushchenko R.P., Pliesnetsov S.Yu. Koshkarov Yu.Yu., Kalnytsky M.E.

Abstract

Ultrasonic electromagnetic-acoustic transducers (EMAT) with permanent magnets are used in ferromagnetic metal products inspection. This leads to a strong pressing of the EMAT to the metal, its wear, the appearance of significant coherent interference due to the sticking of ferromagnetic particles, which often leads to the impossibility of performing measurements, testing and diagnostics. It is possible to solve the indicated shortcomings via introduction of pulse magnets confirming the relevance of the work. The purpose of the work is to determine the rational geometric parameters of the pulse magnet for EMAT. To achieve this goal, a physical and mathematical problem was formulated and simulations were performed using the Comsol Multiphysics package. It has been established that to ensure the effective operation of the EMAT it is advisable to set the height of the pulse magnet within the range of 50...60 mm, the dimensions of the pole 30x30...50x50 mm. Such parameters ensure that the induction value of the quasi-stationary magnetic field is not less than 0.35 T in an interval of ± 10 mm from the center of the pulse magnet pole.

Key words: testing, measurement, diagnostics, ultrasound, electromagnetic-acoustic transducer, pulsed magnetic field source.