УДК 620.179.16: 620.179.17

М. Д. СУВОРОВА

РОЗРОБКА НАМАГНІЧУВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ДЛЯ ЕМА ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ ПОТУЖНИХ ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ

Виконані експериментальні дослідження, що направлені на розробку електромагнітно-акустичних перетворювачів з потужними джерелами магнітного поля. Розглянуто основні схеми конструкції та формування електромагнітного поял основними типами ЕМА перетварювачів. Шляхом моделювання стандартними пакетами програм встановлена можливість створення магнітного поляризуючого поля джерел електромагнітно-акустичних перетворювачів до 2…3 Тл. Виконані модельні експерименти для аналізу характеристик ЕМА перетворювачів. Наведено опис використаних методолгічних засобів. Розглянуто схеми підмагнічування. Виконано моделювання для ортогональної та паралельної схем підмагнічування. Розроблено концептуальні підходи щодо побудови постійних магнітів з не колінеарною орієнтацією векторів магнітної індукції. Запропоновано реалізацію підмагнічування на базі П-образного магніту. Наведено принципи формування потужних магнітних полів на базі постійного намагнічування. Визначено оптимальні геометричні та фізико-механічні параметри для моделі П-образного магніту. Розроблено макетний зразок потужного джерела магнітного поля для електромагнітно-акустичних перетворювачів. Наведено результати перевірки даних моделювання на макетному зразку.

Ключові слова: електромагнітно – акустичний перетворювач, моделювання, намагнічування, матеріал для досліджень, контроль, діагностика, товщинометрія.

М. Д. СУВОРОВА

РАЗРАБОТКА НАМАГНИЧИВАЮЩЕГО ЛИТЕРАТУРЫ ДЛЯ ЕМА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МОЩНЫХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Выполнены экспериментальные исследования, направленные на разработку электромагнитно - акустических преобразователей с мощными источниками магнитного поля. Рассмотрены основные схемы конструкции и формирования электромагнитного поля основными типами ЕМА преобразователей. Путем моделирования стандартными пакетами программ установлена возможность создания магнитного поляризующего поля источников электромагнитно - акустических преобразователей до 2 ... 3 Тл. Выполнены модельные эксперименты для анализа характеристик ЕМА преобразователей. Приведено описание использованных методологических средств. Рассмотрены схемы подмагничивания. Выполнено моделирование для ортогональной и параллельной схем подмагничивания. Разработаны концептуальные подходы к построению постоянных магнитов с не коллинеарны ориентацией векторов магнитной индукции. Предложена реализация подмагничивания на базе П-образного магнита. Приведены принципы формирования мощных магнитных полей на базе постоянного намагничивания. Определены оптимальные геометрические и физико-механические параметры модели П-образного магнита. Разработан макетный образец мощного источника магнитного поля для электромагнитно - акустических преобразователей. Приведены результаты проверки данных моделирования на макетном образцу.

Ключевые слова: электромагнитно – акустический преобразователь, моделирование, намагничивания, материал для исследований, контроль, диагностика, толщинометрия.

M. D. SUVOROVA

DEVELOPMENT OF MAGNETIC SOURCES FOR EMO CONVERTERS ON THE BASIS OF POWERFUL PERMANENT MAGNETS

Experimental studies aimed at the development of electromagnetic - acoustic transducers with powerful sources of magnetic field. The basic schemes of the design and formation of electromagnetic transducers are considered by the main types of EMA to be repetitive. By modeling standard software packages, the possibility of creating a magnetic polarizing field of sources of electromagnetic - acoustic transducers up to 2 ... 3 T. Model experiments were performed to analyze the characteristics of EMA converters. The description of the used methodological tools is given. Magnetization schemes are considered. Simulation was performed for orthogonal and parallel magnetization circuits. Conceptual approaches to the construction of permanent magnets with non-collinear orientation of the magnetic induction vectors have been developed. The implementation of magnetization based on a U-shaped magnet is proposed. The principles of the formation of powerful magnetic fields based on constant magnetization are given. The optimal geometric and physical and mechanical parameters of the U-shaped magnet model are determined. A prototype of a powerful source of a magnetic field for electromagnetic - acoustic transducers is developed. The results of verification of simulation data on a prototype are presented.

Key words: electromagnetic – acoustic converter, modeling, magnetization, research material, control, diagnostics, thickness gauge.

Вступ. В порівнянні з традиційним використанням контактного ультразвукового методу контролю електромагнітно – акустичний (ЕМА) метод ультразвукового контролю [1] має ряд переваг, в першу чергу економічних [2–3]. Проте для його ефективної роботи необхідні потужні джерела магнітного поля. Відомі джерела дозволяють отримувати індукцію 0,6…0,7 Тл [1], що недостатньо для проведення якісної оцінки металовиробів при товщинометрії, дефектоскопії та діагностиці. Тому дослідження, що направлені на вирішення проблеми підвищення величини індукції поляризуючого магнітного поля джерела ЕМАП є актуальними.

Метою роботи є вдосконалення ЕМАП, обладнаних постійними джерелами магнітного поляризуючого поля.

1. Експериментальне дослідження залежності ефективності збудження і прийому ультразвукових хвиль ЕМА способом від величини поляризуючого поля. Експериментально дослідженню ефективності подвійного ЕМА перетворення в залежності від величини поляризуючого поля проводились на установці,що дозволяє створювати як паралельні, так і ортогональні по відношенню до поверхні феромагнетика постійні магнітні поля з регульованою амплітудою. Схема установки приведена на рис. 1. Паралельне поверхні об’єкта контролю поляризуюче поле створювалося за допомогою П-подібного електромагніту, на полюси якого була встановлена сталева феромагнітна плита. Для ортогонального намагнічування застосовувалася система з постійних магнітів, що створює в матеріалі об’єкта контролю магнітну індукцію близько 1,2 Тл при зазорі між намагничивающей системою і поверхнею феромагнетика 10 мм. Первинні ЕМА перетворювачі розташовувалися на поверхні сталевої плити між полюсами електромагнітта,а також в зазорі між системою з постійних магнітів і поверхнею плити.

© М. Д. Суворова, 2019

© М. Д. Суворова. 2019

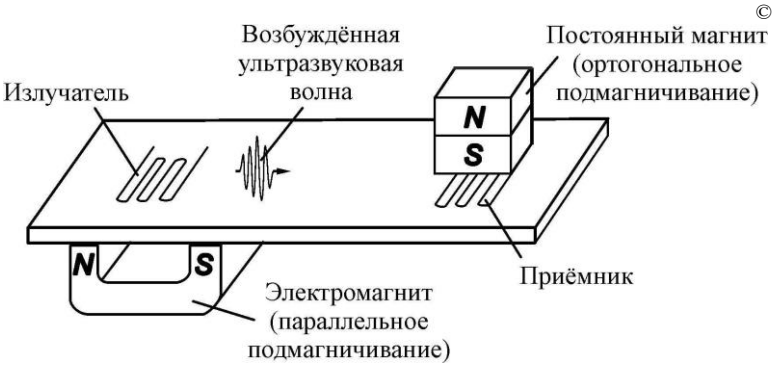

Рис. 1 – Спрощена схема експериментальної установки

На рис. 2 представлена отримана експериментальна залежність ефективності ЕМА перетворення від зміни паралельного поляризуючого поля. Графік 1 на рис. 2 отриманий при приміщенні випромінювача над електромагнітом, що створює паралельне поляризуючи поле, а приймач розташовувався під намагнічуючою системою, що створює ортогональне поляризуюче поле. Регулювання амплітуди паралельного поляризуючого поля в цьому експерименті проводилася зміною струму в обмотці електромагніту. При цьому створювана системою з постійних магнітів магнітна індукція лишалася незмінною (відстань до поверхні пластини не змінювалося) і становила 1,2 Тл. Графік 2 на рисунку 2 отриманий при заміні місцями приймального та випромінювального первинних ЕМА перетворювачів: випромінювач розташовувався в ортогональному поляризуючому полі, а приймач в паралельному.

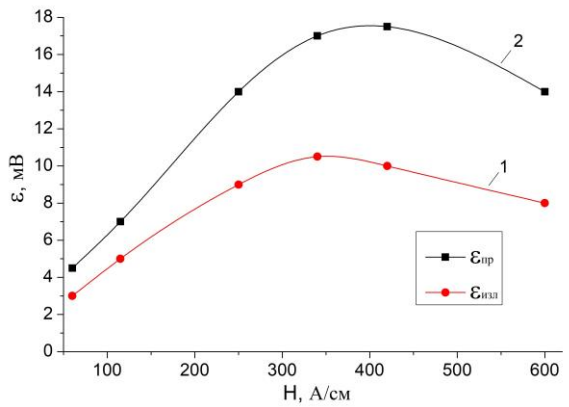

Рис. 2 – Залежність ефективності ЕМА перетворення від зміни паралельного поляризуючого магнітного поля

На рис. 3 представлена залежність ефективності ЕМА перетворення від зміни ортогонального поляризуюче поля. Як і в попередньому експерименті, графік 1 на рис. 3 отриманий при приміщенні випромінювача в паралельне поверхні феромагнетика поляризуюче поле. Приймач розташовувався під системою з постійних магнітів, що створює ортогональне поляризуюче поле. Зміна величини ортогонального поляризуючого поля проводилося шляхом зміни зазору між системою з постійних магнітів і поверхнею пластини. Графік 2 на рисунку 3 отримано для випадку, коли випромінювач і приймач мінялися місцями. Напруженість паралельного поляризуючого поля залишалася постійною і рівною 300 А / см.

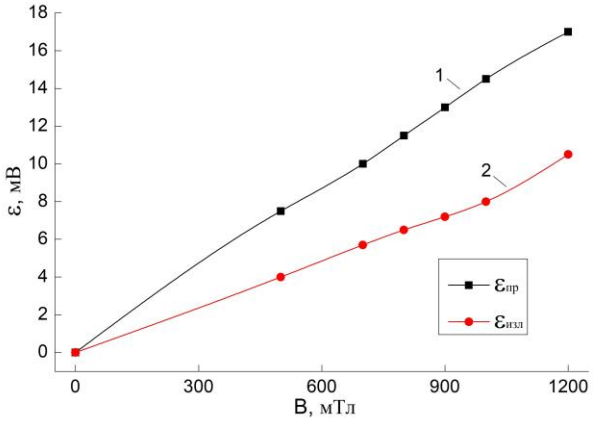

Рис. 3 – Залежність ефективності ЕМА перетворення від зміни ортогонального поляризуючого поля

Вимірювання амплітуди магнітного поля в процесі експериментів проводилося мілітесламетром в місцях розташування первинних ЕМА перетворювачів (приймача і випромінювача).

За результатами проведених експериментів можна зробити наступні висновки. Оптимальною амплітудою поля при паралельному намагнічуванні є величина 300 – 400 А / см. При напруженості поля менш 250 А / см рівень сигналу падає більш ніж в 5 разів як при порушенні, так і при прийомі ультразвукових сигналів.

Для ефективного збудження і прийому ультразвукових хвиль ЕМА методом при ортогональному намагнічуванні необхідно створити в

матеріалі феромагнетика магнітну індукцію понад 0,9 Тл. Отримані експериментальні дані відповідають даним, отриманих авторами в роботі [4]

2. Математичне моделювання намагнічувального джерела ЕМА перетворювачів. Конструкція ЕМА перетворювачів включає в себе намагнічує систему, яка створює поляризуюче поле, необхідне для ЕМА перетворення. Під робочою зоною розуміється область, в якій відбувається ЕМА перетворення, тобто в ній створюється поляризуюче поле і розташовується ЕМА перетворювач. Відомо, що як для електродинамічного, так і для магнітострикційного механізмів ЕМА перетворення зазвичай застосовуються П-подібні постійні магніти або електромагніти.

При електродинамічному механізмі первинні ЕМА перетворювачі розташовуються між полюсами електромагніту, а при електродинамічному механізмі – в зазорі між полюсами П-образного магніту і поверхнею об'єкта контролю. Геометричні параметри П-подібних магнітів для різних механізмів ЕМА перетворення істотно розрізняються. Для електродинамічного механізму необхідно збільшити величину зазору між полю самі магніту і поверхнею об'єкта, збільшити поперечний переріз полюсів до розмірів необхідної робочої зони (розмірів первинних ЕМА перетворювачів), а міжполюсне доцільно зменшити; при магнітострикційному механізмі необхідно, щоб міжполюса відстань була достатньою для розміщення первинних ЕМА перетворювачів. При цьому поперечний переріз полюсів і величину зазору між полюсами магніту і поверхнею об'єкта контролю можна зменшити.

З вищесказаного випливає, що П-подібна намагнічуюча система вимагає визначення геометричних і магнітних властивостей для конкретного випадку її використання. Розрахунок магнітних і геометричних параметрів П-подібних намагнічуючих систем аналітичним методом є нетривіальним завданням. Тому розрахунок конструктивно більш складних систем з великою часткою ймовірності стає неможливим. Розвиток останнім часом комп'ютерної техніки, об'єднання ЕОМ в кластери для створення великих обчислювальних потужностей, а також поява потужних програмних пакетів для чисельного моделювання магнітних полів, таких як ANSYS і Femm, дозволяють розрахувати магнітні та геометричні параметри намагнічувальних системи будь-якої складності.

3. Типові схеми намагнічування. У техніці зазвичай застосовуються намагнічуючі системи ЕМА перетворювачів, що представляють собою або постійний магніт з вектором намагніченості, спрямованим по нормалі до поверхні об'єкта контролю для електродинамічного механізму ЕМА перетворення, або П-подібні постійні магніти (або електромагніти) для магнітострикційного механізму ЕМА перетворення. Використання в автоматизованих ЕМА системах для діагностики довгомірних феромагнітних об'єктів намагнічують систем з постійних магнітів краще, так як в цьому випадку знижується енергоспоживання і вирішується завдання утримання системи на поверхні феромагнетика.

3.1. Ортогональне підмагнічування (електродинамічний механізм ЕМА перетворення). Як було показано раніше, для ефективного ЕМА перетворення необхідно, щоб намагнічує система ЕМА перетворювача створювала магнітну індукцію близько 2 Тл для ортогонального намагнічування і напруженість магнітного поля близько 300 А / см для випадку паралельного намагічування. Результати моделювання в програмних комплексах Femm і ANSYS показали, що створюване типовими намагнічуватися системами поляризуюче поле при товщині об'єкта контролю більше 16 мм недостатньо для ефективного ЕМА перетворення. Так, намагнічуюча система, що представляє собою одиночний постійний магніт з напрямком намагнічування, перпендикулярним до поверхні об'єкта контролю (рис. 4) здатна створювати магнітну індукцію, що не перевищує 0,8–0,9 Тл при зазорі між намагнічуючою системою і поверхнею об'єкта 10 мм. При цьому розміри системи складають 100×100×100 мм при масі близько 8 кг.

При спробі зменшити розміри системи або падає величина магнітної індукції, або істотно зменшуються розміри робочої зони: в максимальному і однорідному полі знаходиться лише мала частина первинного ЕМА перетворювача (рис. 5).

Якщо розглядати П-подібний магніт (рисунок 6 то при тій же масі він створює при зазорі 10 мм ще меншу магнітну індукцію, спрямовану по нормалі до поверхні намагнічуватися об'єкта, тому для електродинамічного способу ЕМА перетворення П-подібний магніт підходить в найменшій мірі.

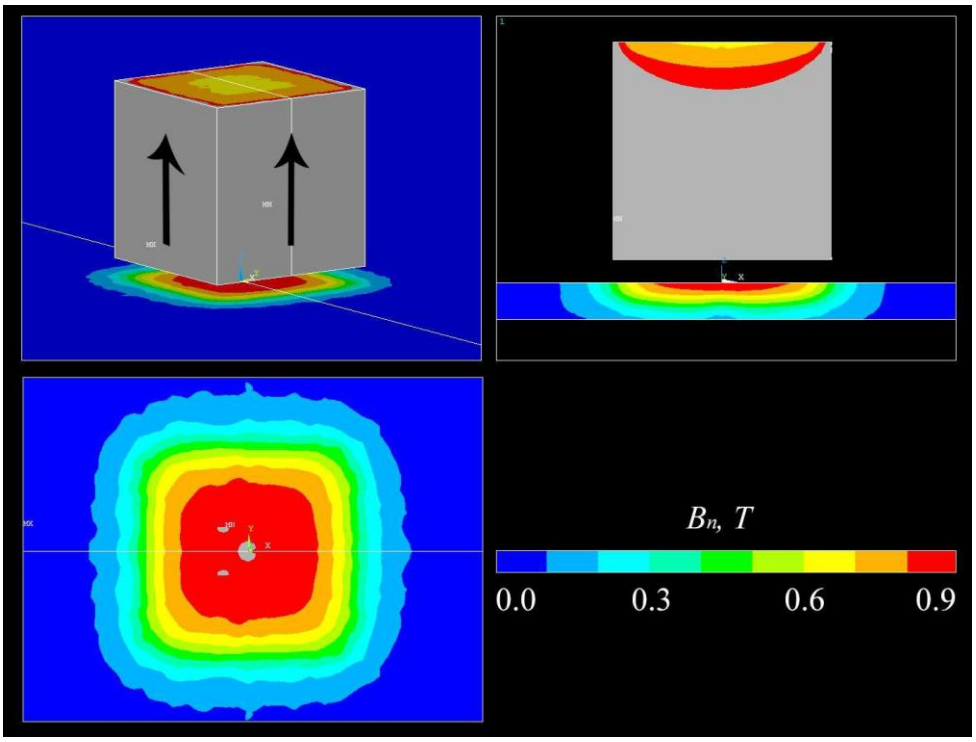

Рис. 4 – Розподіл нормальної складової магнітної індукції на поверхні об’єкта контролю в робочій зоні постійного магніту розмірами 100×100×100 мм з вектором намагніченості, спрямованим по нормалі до об’єкта контролю

3.2. Паралельне намагнічування (магнітострикційний механізм ЕМА перетворення). Для паралельного підмагнічування також можна використовувати одиночний магніт, напрямок поляризації магніту паралельно поверхні об’єкта контролю. Результати моделювання одиночного магніту розмірами 100×200×45 і масою близько 8 кг представлені на рис. 7

Аналіз рис. 7 показує, що максимальне значення тангенціальної складової магнітного поля в робочій зоні намагнічувальної системи не перевищує 20 А / см. При цьому поле істотно неоднорідне і використовувати таку намагнічуючу систему для ЕМА перетворювачів малоефективно.

На рисунку 8 представлений розрахунок П-подібної намагнічувальної системи з постійних магнітів, маса системи складає близько 6 кг. Міжполюсна відстань становить 60 мм, воно було вибрано виходячи з розмірів первинних ЕМА перетворювачів для збудження і прийому хвиль Лемба і Релея. Поле в робочій зоні намагнічувальної системи досить однорідне, але значення напруженості магнітного поля не перевищує 10 А / см.

Таким чином, для ортогонального намагнічування об’єкта контролю з товщиною стінки більше 16 мм можна використовувати намагнічуючу систему, що представляє собою одиночний магніт з напрямком поляризації,перпендикулярним до поверхні об’єкта контролю, але така система буде мати велику масу і недостатнім для максимально ефективного ЕМА перетворення поляризуючим полем. Застосування типових намагнічують систем з постійних магнітів для паралельного намагнічування об’єктів з товщиною стінки більше 16 мм не є доцільним з огляду на те, що вони не здатні забезпечити напруженість магнітного поля 300 А / см без істотного збільшення маси намагнічувальної системи.

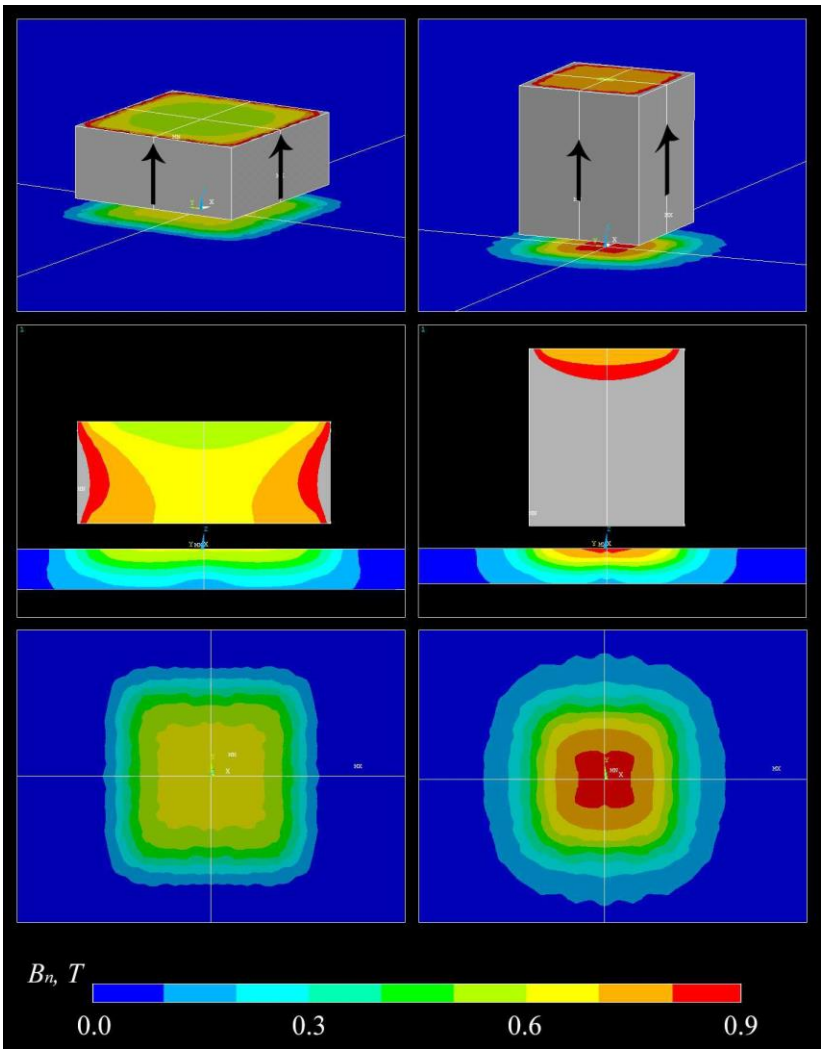

Рис. 5 – Розподіл нормальної складової магнітної індукції на поверхні об’єкта контролю в робочих зонах постійних магнітів розмірами 100×100×40 мм і 70×70×80 мм з векторами намагніченості,спрямованими по нормалі до об’єкту контролю

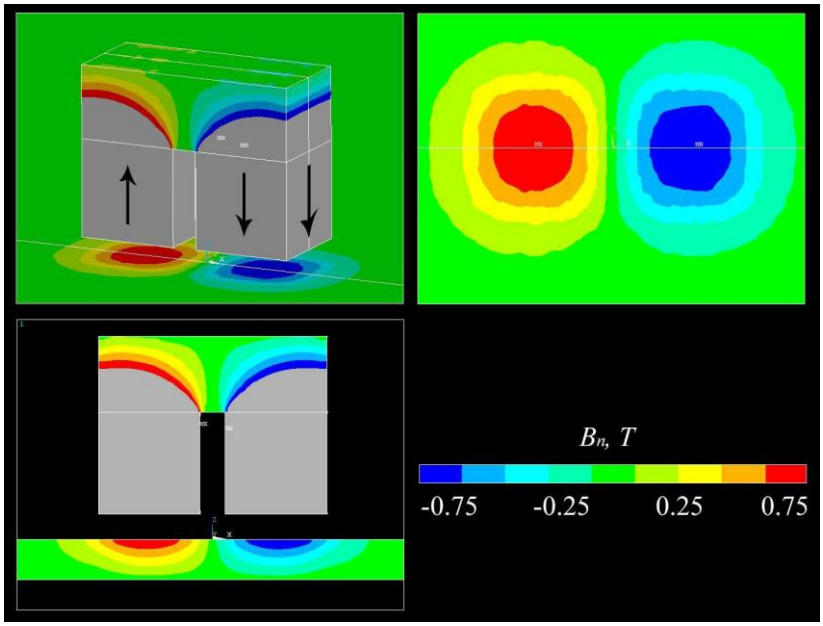

Рис. 6 – Розподіл нормальної складової магнітної індукції на поверхні об’єкта контролю в робочих зонах постійного П-подібного магніту

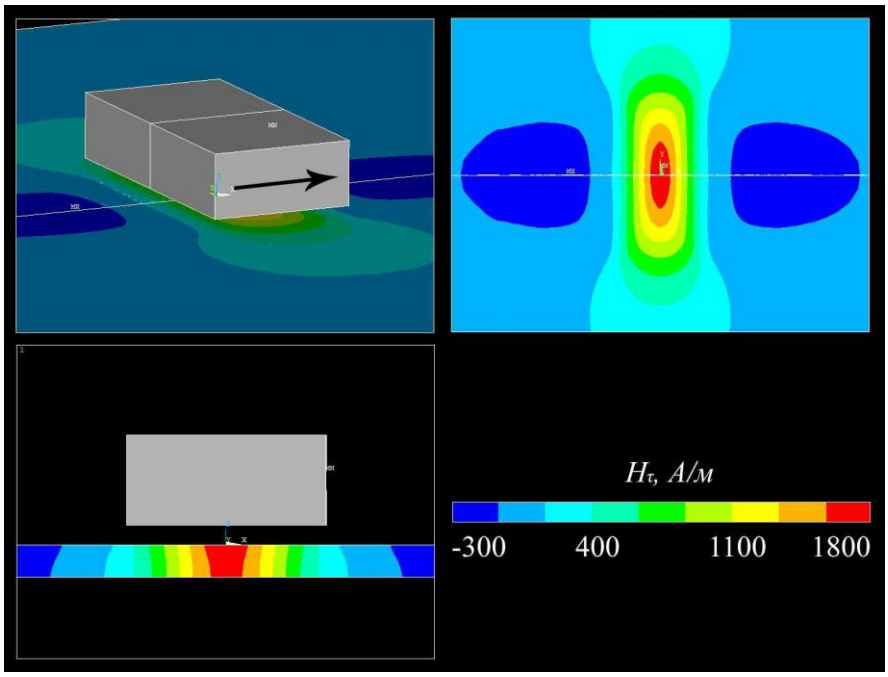

Рис. 7 – Розподіл тангенціальної складової напруженості магнітного поля від намагнічувальної системи, що представляє собою одиночний магніт з розмірами 100×200×45 мм

4. Оптимізація геометричних і магнітних властивостей джерела на основі П-подібного постійного магніту. Для вирішення завдання створення ортогонального і паралельного поляризуєтьсяючої поля на об'єктах контролю з товщиною стінки більше 16 мм за допомогою П-образної намагничивающей системи з постійних магнітів була проведена серія розрахунків в система ANSYS. Геометрія і розміри намагничивающей системи були оптимізовані з метою мінімізації її маси при досягненні оптимальної величини паралельного і ортогонального поляризують полів**.**

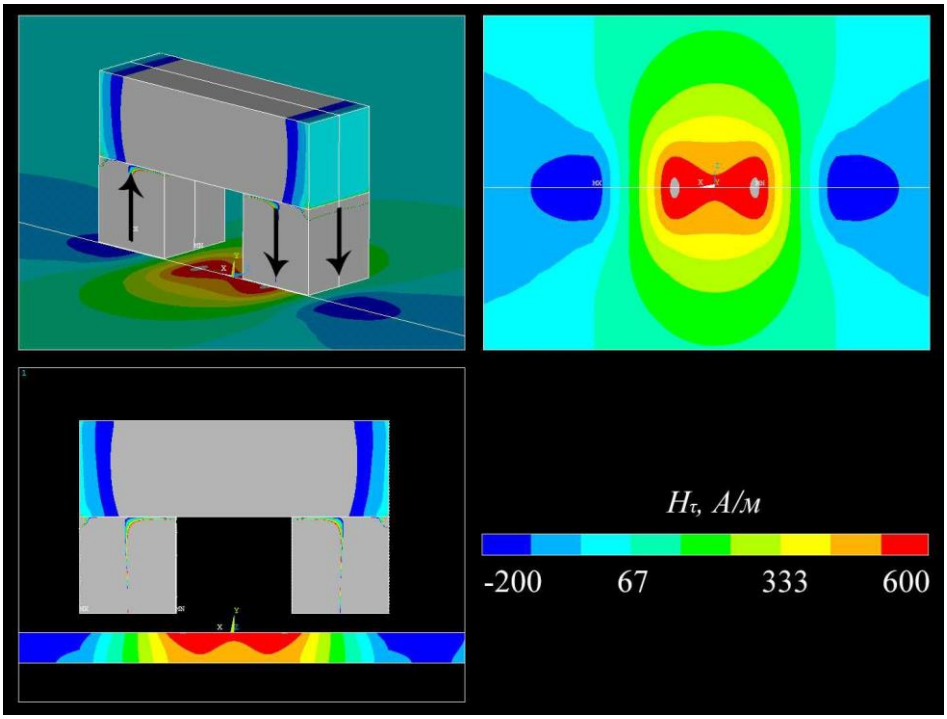

Рис. 8 – Розподіл тангенціальної складової напруженості магнітного поля від П-подібної системи з постійних магнітів

На рис. 9 наведено зовнішній вигляд моделі П-подібної намагнічувальної системи. Система складається з двох полюсів, виконаних з сучасних постійних магнітів, а також включає в себе ярмо з магнітом'якого матеріалу (пермендюр). Напрямку поляризації магнітів показано стрілочками.

Таку намагнічувальну систему можна використовувати як для магнітострикційного (паралельне поверхні феромагнетика магнітне поле), так і для електродинамічного (ортогональне магнітне поле) механізмів ЕМА перетворення. Результати розрахунків і оптимізації представлені на рис. 10 робоча область відзначена на рисунку 10 рамкою.

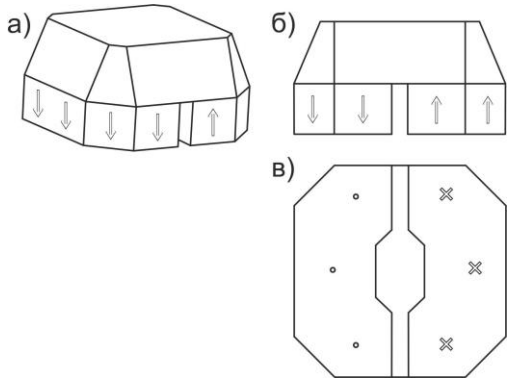

Рис. 9 – Зовнішній вигляд оптимізованої П-подібної намагнічувальної системи:а – тривимірне представлення, б – вид збоку, в – вид знизу

Тангенціальна по відношенню до поверхні феромагнетика складова напруженості магнітного поля в робочій області між полюсами П-подібного магніту для даної намагнічувальної системи становить близько 350 А / см (рисунок 10а). Нормальна складова індукції в зазорі між полюсом П-подібного магніту і поверхнею феромагнетика складає близько 1 Тл (рисунок 10б). При цьому маса системи становить 15 кг. Величина таких поляризують полів достатня для ефективного збудження і прийому ультразвуку в металах, але велика маса намагнічувальної системи ускладнює її застосування в ручних і автоматизованих засобах ЕМА діагностики.

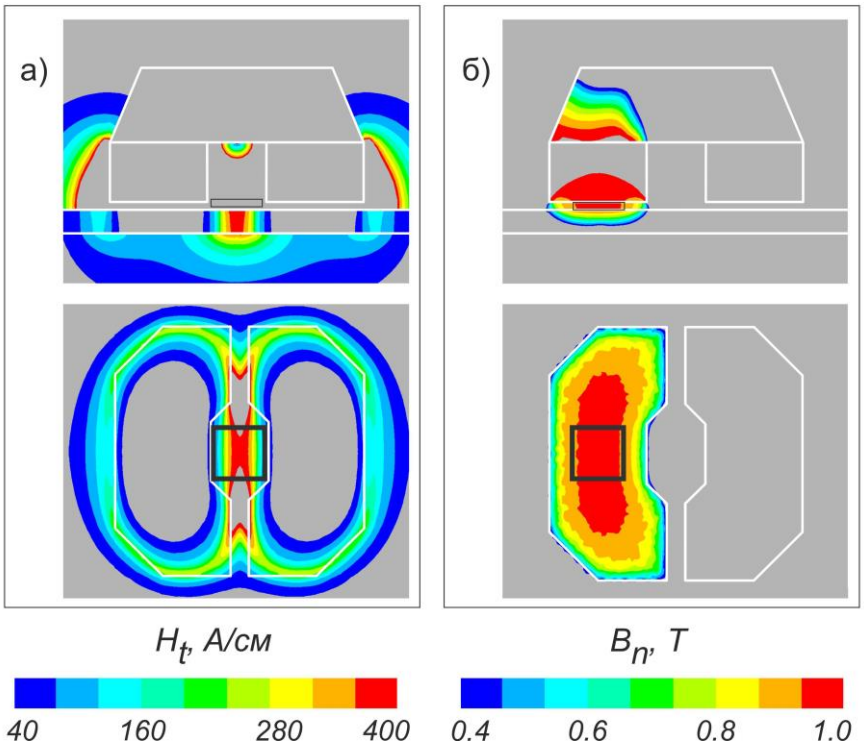

Рис. 10 – Розподілу магнітного поля від П-подібної намагнічувальної системи: *а* – розподіл тангенціальної складової напруженості магнітного поля Ht, вид збоку і зверху; *б* – розподіл нормальної складової індукції Bn ,вид збоку і зверху

4.1. Створення сильних магнітних полів за допомогою сучасних постійних магнітів. Ще відносно недавно отримання високих полів було можливо тільки за допомогою надпровідних або охолоджуваних соленоїдів. Однак відкриття в області нових магнітних матеріалів, заснованих на рідкоземельних металах, дозволили створити намагнічуючі системи з сильними магнітними полями. Основною відмінною рисою таких намагнічують систем є неколінеарне розташування магнітів – поля від постійних магнітів, спрямованих зустрічно, накладаються один на одного і підсумовуються, при цьому магніти не руйнуються і не розмагнічуються. Цей ефект став можливий завдяки гігантській магнітної анізотропії сучасних постійних магнітів – коерцитивної сила по намагніченості у сучасних постійних магнітів може становити більше 2,6·106А / м.

Більш докладно метод створення сильних магнітних полів описаний в роботі К. Хальбаха [5]. Суть методу полягає в розташуванні постійних магнітів навколо центрального обсягу простору, в якому «концентрується» поле, і в знаходженні таких напрямків поляризації постійних магнітів, при яких поле в заданому об'ємі простору буде максимальним (рисунок 11). Згідно [6] оптимальний напрямок поляризації кожного магніту можна обчислити з рівняння:

$$B_z = \left(\frac{\mu_0}{4\pi r^3}\right) \cdot M \cdot (2cos\theta cos\phi + sin\theta sin\phi), \quad (1)$$

де: Bz – результуюча магнітна індукція, Тл, створювана магнітом, з напрямком поляризації відповідно з рисунком 12

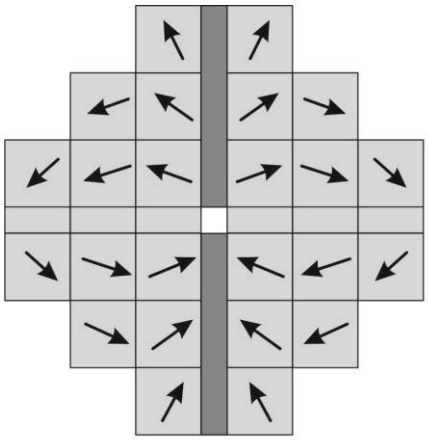

Рис. 11 – Схема намагнічувальної системи, що створює індукцію 4,5 Тл (стрілками вказані напрямки поляризації магнітів)

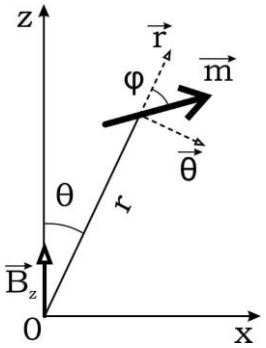

Рис. 12 – Внесок магнітного моменту **m** у полі B_z в центральній точці O

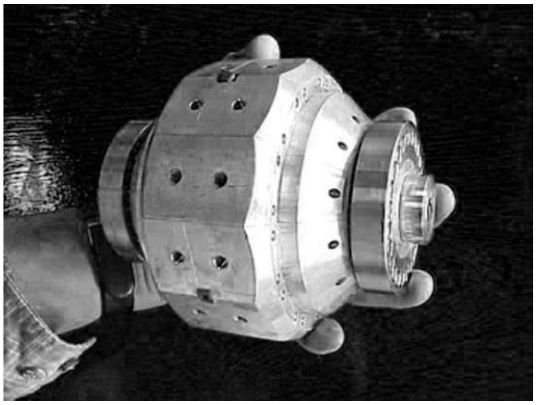

Рис. 13 – Зовнішній вигляд намагнічувальної системи, що створює індукцію 4,5 Тл

Тоді результуюча магнітна індукція Bz буде максимальна при

$$tg\theta = \frac{1}{2}tg\phi. \quad (2)$$

Система створює в локальній області магнітну індукцію понад 4,5 Тл. Напрямок поляризації кожного магніту в цій системі вибиралося виходячи з умови, що така поляризація дає максимально можливе вертикальне поле в центральній точці намагнічувальної системи.

4.2. Визначення оптимальних геометричних і магнітних властивостей неколінеарної намагнічувальної системи з ортогональним постійним поляризуючим полем. Намагнічувальна система для ЕМА перетворювача повинна створювати поляризуюче поле на поверхні сталевої пластини (або труби) і знаходитися на відстані 8 – 10 мм від поверхні. Таким чином, від намагнічувальної системи, показаної на рисунку 11, можливо використовувати тільки половину (наприклад, верхню), розташувавши її на відстані 8 – 10 мм від поверхні сталевої пластини. Але в такому випадку напрямок поляризації кожного магніту вже не буде оптимальним. Рівняння (2) – це не що інше, як рівняння силових ліній від точкового диполя. Дійсно,поле уздовж силової лінії більше поля уздовж будь-якого іншого напряму. Таким чином, якщо в точці, де передбачається створити максимальне поле, помістити точковий диполь з поляризацією вздовж створюваного поля, то силові лінії цього диполя вкажуть оптимальний напрямок поляризації магнітів, які створюють необхідний поле (рис. 14).

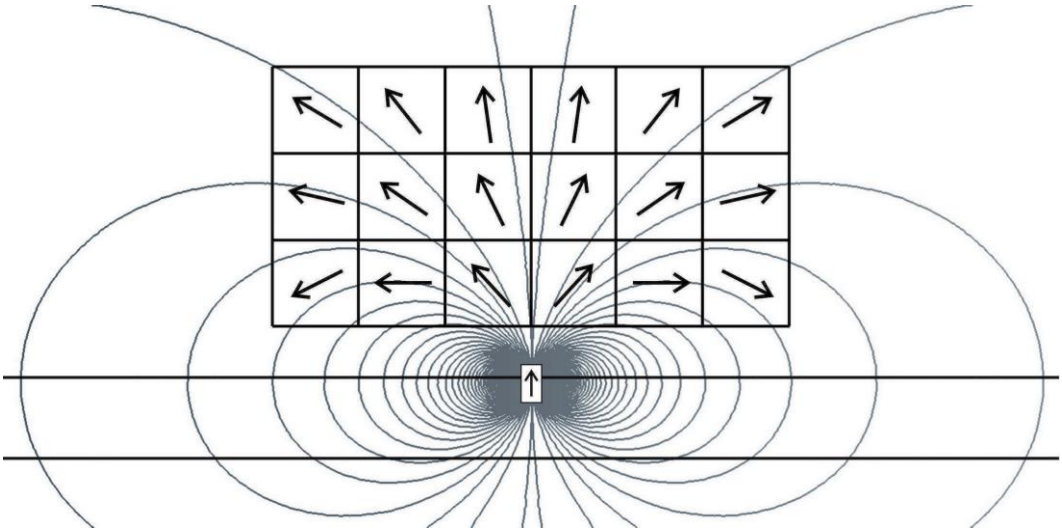

Рис. 14 – Напрямки поляризації магнітів, збудовані вздовж силових ліній диполя

На рис. 15 показано розподіл магнітного поля від намагнічувальної системи з оптимальними напрямами поляризації магнітів. Результати отримані в програмі Femm 4.2.

Як видно з рис. 15, така, що намагнічує система здатна намагнітити матеріал феромагнетика до індукції, що перевищує 2 Тл.

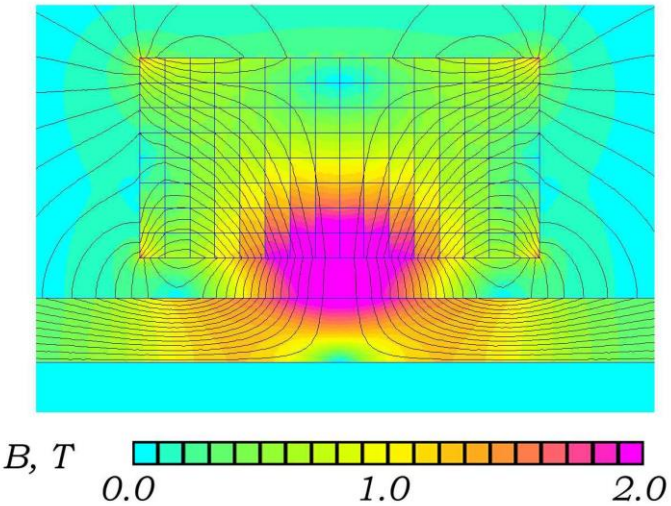

Рис. 15 – Розподіл магнітного поля від «ідеальної» намагнічувальної системи з оптимальними напрямами поляризації магнітів

Необхідно врахувати, що індукція в центральних магнітах також перевищує значення 2 Тл, тому велика ймовірність їх розмагнічування, і в реальному виробі необхідно використовувати магніти з високою коерцитивної силою по на намагніченість. На рисунку16 крива 1 показує розподіл нормальної складової індукції у феромагнетику в робочій області під ідеальної намагнічувальної системою (рисунок 15). Пунктирними лініями позначена межа робочої зони, в якій розташовуються первинні ЕМА перетворювачі (40×40 мм).

З графіка видно, що магнітна індукція, створювана такий намагнічуючою системою, становить близько 2 Тл. Таким чином, дана намагнічує система підходить для оптимального збудження і прийому ультразвукових хвиль в металах. Але виготовити таку систему досить складно: необхідні десятки видів магнітів з різними напрямками поляризації і складні оправлення для збірки. Шляхом послідовного зменшення кількості елементів і усереднення напрямків поляризації магнітів в кожному елементі була отримана система, показана на рис. 17 Залежність нормальної складової індукції у феромагнетику від відстані до центру системи намагнічування демонструє крива 2 на рис. 16.

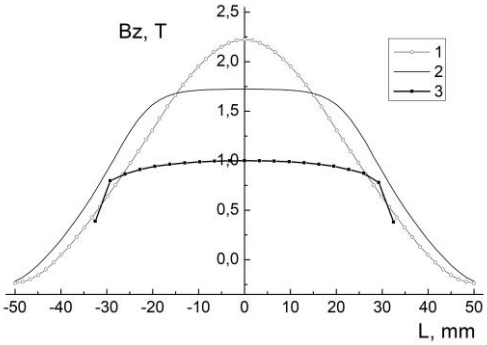

Рис. 16 – Розподіл нормальної складової індукції по відношенню до поверхні об'єкта контролю в робочих областях систем намагнічування, межі робочих областей показані пунктирними лініями: 1 – «ідеальна» намагнічуюча система (рисунок 15; 2 – спрощена система намагнічування (рисунок 17; 3 – П-подібна намагнічуюча система (робоча область розташовується під полюсом)

Як видно з рисунків, індукція в робочій області під такою намагнічуючою системою становить 1,55 Тл, а поле досить однорідне. Для порівняння, крива 3 на рисунку 16 показує залежність нормальної складової індукції у феромагнетику від відстані до центру полюса П-подібного магніту, показаного на рисунках 9 і 10. Маса спрощеної системи намагнічування складає 3 кг, а простота конструкції відкриває великі можливості для промислового виготовлення.

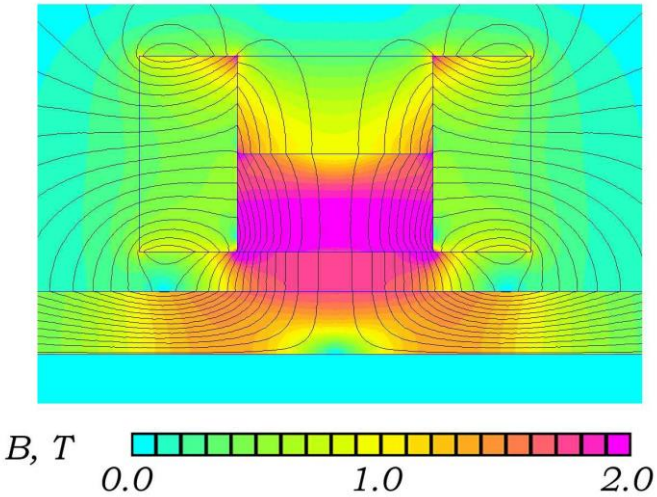

Рис. 17 – Розподіл магнітного поля від спрощеної системи намагнічування, придатної для промислового виготовлення

4.3. Експериментальна перевірка ефективності оптимізованої системи намагнічування з ортогональним постійним поляризуючим полем. Намагнічує система, аналогічна показаної на рисунку 17 була виготовлена з магнітів прямокутної форми. Магнітна система представляє собою сердечник з магнітом'якого матеріалу (пермендюр) кубічноїформи 40×40×40 мм, оточений з усіх боків, за винятком робочої, постійними високоенергетичних магнітами так, що напрямки поляризації магнітів були спрямовані всередину сердечника. Схема і фотографія системи представлені на рисунках 18 і 19 відповідно. Розміри системи складають 90×90×40 мм, а вага без оправлення не перевищує 2,8 кг. Магнітне поле в робочій області сягає 1,3 Тл, що добре узгоджується з розрахунками. Таким чином, для ЕМА перетворювачів з ортогональним підмагнічуванням можна використовувати неколінеарну конфігурацію сучасних постійних магнітів. Така конфігурація дозволяє знизити масу намагнічувальної системи ЕМА перетворювача до 3 кг, при цьому ефективність ЕМА перетворення з використанням цієї системи буде перевершувати ефективність з використанням П-подібної системи.

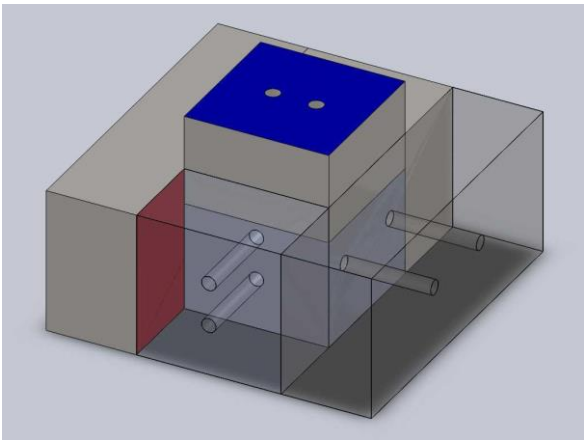

Рис. 18 – Схема реальної джерела намагнічування ЕМА перетворювача

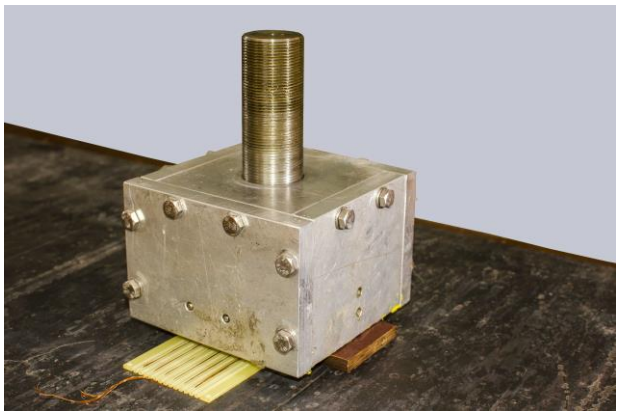

Рис. 19 – Фотографія макета намагнічувальної системи ЕМА перетворювача

Висновки

1. Встановлено, що типові намагнічуючі системи ЕМА перетворювачів мають неоптимальні, завищені значеннями масогабаритних характеристик і силами магнітного тяжіння до феромагнітного об'єкту контролю. Крім цього, вони не забезпечують створення в матеріалі феромагнетика необхідного для ефективного ЕМА перетворення поляризуючого поля.

2. Для ортогонального підмагнічування доцільно використовувати намагнічуючі системи з постійних магнітів, побудовані за принципом неколінеарного розташування постійних магнітів з гігантською магнітною анізотропією, для паралельного – альтернативні способи створення поляризуючого поля, наприклад імпульсне намагнічування.

3. На підставі чисельного моделювання та експериментальних досліджень запропоновано конструкція намагнічуючого пристрою, заснованого на неколінеарній конфігурації постійних магнітів, що дозволяє отримати ортогональне до поверхні феромагнетика однорідне магнітних поле у всій робочій області ЕМА перетворювача. При цьому в феромагнетику незалежно від його товщини можливе створення магнітної індукції до 2 Тл при масі намагнічувальної системи не більше 3-х кг, що забезпечує майже десятикратне збільшення співвідношення сигнал / завада при генерації і прийомі ультразвукових хвиль ЕМА методом в порівнянні з типовими системами намагнічування.

Список літератури

1. Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Т. 3: Ультразвуковой контроль. В. В. Клюев (ред). Москва, Машиностроение. 2004.
2. Судакова К.В., Казюкевич И.Л. О повышении эффективности контроля качества металлургической продукции. В мире неразрушающего контроля. №3, С. 8–10.
3. Семеренко А.В. Применение ЭМАП для контроля коррозии и эрозии паронагревателей котельных установок. Территория NDT. 1, 2014. С. 42–43.
4. Ильясов Р.С., Бабкин С.Э., Комаров В.А. О механизме ЭМА преобразования волн Рэлея в ферромагнетиках при различных частотах // Дефектоскопия. 1988. №10. С. 77–82.
5. Halbach K. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material // Nuclear instruments and methods. 1980. Vol. 169. P. 1–10.
6. Жаков С.В. Получение максимальных магнитных полей с помощью постоянных магнитов // Физика металлов и металловедение. 2003. Т.96. №6. С. 18–22.

References(transliterated)

1. Ermolov I. N., Lange Yu. V. Nerazrushayushij kontrol: Spravochnik: V 7 v. Vol 3: Ultrazvukovoj kontrol. V. V. Klyuev (red). Moscow, Mashinostroenie. 2004.
2. Sudakova K.V., Kazyukevich I.L. O povyshenii effektivnosti kontrolya kachestva metallurgicheskoj produkcii. V mire nerazrushayushego kontrolya. No3, P. 8–10.
3. Semerenko A.V. Primenenie EMAP dlya kontrolya korrozii i erozii paronagrevatelej kotelnyh ustanovok. Territoriya NDT. 1, 2014. P. 42–43.
4. Ilyasov R.S., Babkin S.E., Komarov V.A. O mehanizme EMA preobrazovaniya voln Releya v ferromagnetikah pri razlichnyh chastotah // Defektoskopiya. 1988. No10. P.77–82.
5. Halbach K. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material // Nuclear instruments and methods. 1980. Vol. 169. P.1–10.
6. Zhakov S.V. Poluchenie maksimalnyh magnitnyh polej s pomoshyu postoyannyh magnitov // Fizika metallov i metallovedenie. 2003. Vol.96. – No6. – P. 18–22.

Поступила (received) 25.11.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Суворова Марія Денісовна (Суворова Мария Денисовна, Suvorova Maria Denisivna) – магістрант кафедри «Комп'ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна