

ВІДГУК

офіційного опонента Сахацького Віталія Дмитровича
на дисертаційну роботу Буссі Салам

«Електромагнітно – акустичні перетворювачі для ультразвукового контролю металовиробів»,

представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.11.13 – прилади і
методи контролю та визначення складу речовин

1. Актуальність теми дисертації

Ультразвуковий (УЗ) метод неруйнівного контролю є одним із найбільш поширених методів забезпечення високої якості контролю різноманітних виробів. При контролі металовиробів традиційне використовують контактний ультразвуковий контроль (УЗК), якій потребує додаткових затрат на очищення поверхні об'єкту контролю (ОК) від іржі, окалини, фарби та різноманітного бруду. Під час проведення такого контролю зношуються п'єзоелектричні перетворювачі та витрачається контактна рідина. Існуючі прилади ускладнюють можливість одночасно проводити діагностику гарячих та холодних ОК, контролювати вироби зі значною швидкістю переміщення.

Усунути недоліки контактного методу УЗК можливо за рахунок використання електромагнітно-акустичного (ЕМА) способу збудження і прийому ультразвукових імпульсів, якій не потребує спеціальної підготовки поверхні металовиробу. Контроль може здійснюватися через шар фарби або пластика, швидкість сканування виробу може багаторазово перевищувати аналогічний показник контактного методу контролю. Однак, ЕМА метод контролю має недостатню чутливість, що зменшує його ефективність при дефектоскопії, товщинометрії та визначення фізико-механічних характеристик матеріалів.

Тому у теперішній час ведуться дослідження і розробки по вдосконаленню електромагнітно-акустичних перетворювачів (ЕМАП) з метою підвищення їх чутливості, наприклад, за рахунок використання джерел поляризованих магнітних полів, конструкцій високочастотних котушок індуктивності при їх живленні пакетними імпульсами струму високої частоти.

Багато дослідників з різних країн виконують теоретичні, модельні та практичні дослідження, спрямовані на розробку ЕМАП. Однак рівень складності і різноманіття проблем, що виникають на сучасному виробництві настільки значні, що результати, досягнуті в минулому в цій області, не можуть бути достатніми.

Дисертаційна робота була виконана відповідно до наукових напрямків досліджень кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» згідно Закону України № 3715-VI від 05.12.2012 «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні», зокрема за напрямом «Приладобудування, як основа високотехнологічного оновлення всіх галузей виробницт-

ва» в рамках держбюджетної НДР МОН України “Дослідження можливості створення прототипів приладів неруйнівного контролю нового покоління з використанням енерго- та ресурсозберігаючих технологій” (ДР № 0111U002280).

Отже, тема дисертації, в якій за допомогою теоретичних та експериментальних досліджень, запропонованих методів розв’язується науково-практична задача створення нових типів ЕМАП, що дозволяє підвищити їх чутливість та розширити область застосування ультразвукового контролю на різноманітні по своїм характеристикам металовироби, безумовно актуальна.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі Буссі Салам, є високою й базується на аналізі науково-технічних джерел за даною проблемою, гармонійній постановці мети і задач дослідження, використанні сучасних методів дослідження. Теоретичні дослідження виконано із використанням фундаментальних засад теорії електротехніки та електродинаміки. При побудові математичних моделей та проведенні чисельних експериментів використанні сучасні стандартні програми, наприклад, пакет Comsol Multiphysics. Отримані результати відповідають результатам експериментальних досліджень, що підтверджує ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.

3. Достовірність результатів досліджень.

Достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечується коректністю постановок математичних задач, застосуванням стандартних процедур рішення диференціальних рівнянь, відповідністю змісту математичних моделей реальним конструкціям об’єктів, які досліджуються та фізичній суті процесів, які у них здійснюються. Можна стверджувати, що одержані результати логічно та математично аргументовані. Результати теоретичних досліджень, запропоновані методи ультразвукового електромагнітно – акустичного контролю феромагнітних виробів та побудови відповідних приладів контролю показали свою працездатність і впроваджені на виробничих підприємствах України та в навчальному процесі, про що свідчать акти впровадження.

4. Основні наукові результати дисертації

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

1. Вперше сформульовано та науково обґрунтовано концепцію створення ЕМАП з імпульсним джерелом поляризованого магнітного поля, яке реалізовано плоскою 3-х витковою котушкою намагнічування з низькою індуктивністю, що забезпечило збільшення потужності збуджуваних зсувних ультразвукових імпульсів нормально поверхні металовиробу за рахунок відмінних від інших методів побудови його елементів та суттєвого зменшення сили притягування

ЕМАП до феромагнітного металу.

Удосконалено метод ультразвукового електромагнітно – акустичного контролю металовиробів, використання якого забезпечило високу ефективність збудження та прийому зсувних пакетних ультразвукових імпульсів за рахунок запропонованого способу їх збудження в поверхневому шарі феромагнітного виробу та прийому інформаційних (відбитих з дефекту виробу) ультразвукових імпульсів у заданий період часу, якій визначається фізичними процесами їх збудження та розповсюдження.

5. Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.

Отримані здобувачем теоретичні результати є основою для нових методів створення ЕМАП, які дозволяють розширити його можливості та здійснювати більш достовірне визначення характеристик і параметрів об'єкту, якій контролюється.

Проведені дослідження на розроблених комп'ютерних математичних моделях показали, що високочастотні котушки індуктивності для феромагнітних і неферомагнітних ОК для обраної конфігурації імпульсного джерела магнітного поля мають різні геометричні розміри, що дозволяє виключити можливі похибки при розробки та проектуванні ЕМАП для таких об'єктів. Надані практичні рекомендації що до побудови ЕМАП для феромагнітних і неферомагнітних ОК зменшують час їх проектування.

У результаті теоретичних досліджень розроблено спосіб виключення завад у феромагнітному осерді джерела магнітного поля ЕМАП, які обумовлені ефектом Баркгаузена та магнітострикційним перетворенням електромагнітної енергії в ультразвукову при збудженні ультразвукових імпульсів.

Запропоновані схеми, макети і методика виготовлення стійких до пошкоджень плоских високочастотних котушок, генератора потужних високочастотних пакетних імпульсів струму для живлення ЕМАП, попереднього смугового підсилювача прийнятих ультразвукових імпульсів, блоку живлення ЕМАП мають високі технічні характеристики та дозволяють на їх основі у промисловому вигляді виготовити та прискорити процес впровадження результатів дослідження у промисловість.

Розроблені ЕМАП з плоскими котушками намагнічування та феромагнітним осердям можуть забезпечити ультразвуковий безконтактний контроль феромагнітних виробів тіньовим, дзеркально – тіньовим та луна методами з чутливістю, близькою до традиційних п'єзоелектричних перетворювачів.

При цьому амплітуда донних імпульсів досягає 38...40 дБ, а луна імпульсу відбитого від плоскодонного дефекту діаметром 3 мм, по відношенню до амплітуди завад досягає, 20 дБ, що дає можливість забезпечити більш якісний ультразвуковий контроль металовиробів.

Результати досліджень, які отримані при виконання дисертаційної роботи, впроваджені в ДП «Завод Електроважмаш», в Компанії УКРІНТЕХ та в На-

ціональному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут», що підтверджується відповідними актами впровадження.

6. Повнота викладення результатів в опублікованих працях

Основний зміст дисертації відображено у 15 наукових публікаціях, з них: 6 статей входять до переліку наукових фахових видань, які рекомендовані ДАК України (2 з них у виданнях, що входять до міжнародної науково-метричної бази Web of Science Core Collection), 2 патенти України на корисну модель та 7 праць у матеріалах науково-технічних конференцій.

Дисертація пройшла апробацію на 7 міжнародних і всеукраїнських науково-технічних конференціях.

Це дозволяє зробити висновок про ознайомлення широкого кола науковців з основними положеннями дисертаційної роботи. В опублікованих працях забезпечена повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи.

У цілому, рівень і кількість публікацій та апробації матеріалів дисертації на конференціях повністю відповідають вимогам МОН України.

7. Оцінка змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Буссі Салам викладена на 200 сторінках складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків, містить 120 сторінок основного тексту, 54 рисунки та 8 таблиць.

У **вступі** наведена загальна характеристика роботи, обґрунтовано актуальність досліджень, поставлено їх мету та задачі, наведені методи досліджень, викладена наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, вказано відомості про наукові публікації автора, апробацію результатів дослідження та їх впровадження.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасного стану досліджень і розробок ультразвукового електромагнітно- акустичного методу контролю та діагностики. Наведено основні положення щодо побудови ЕМАП, сучасні конструкції ЕМАП, які застосовують для контролю діелектричних та металевих виробів. Описані фізичні процеси що відбуваються при збудженні та прийому ультразвукових хвиль. Проаналізовано методи розрахунку конструкцій і електрофізичних характеристик ЕМАП.

Встановлено, що на сьогодні не існує узагальненої теорії ЕМА перетворення, яка б комплексно враховувала всі властивості контрольованого матеріалу, а також конструкцію елементів ЕМАП.

Визначено, що для ЕМАП з постійним поляризованим магнітним полем підвищення його чутливості можливо за рахунок збільшення величини магнітної індукції. Але це ускладнює сканування об'єкту контролю та веде до прискореного виходу з ладу ЕМАП.

При використанні імпульсних магнітних полів підвищення чутливості за рахунок збільшення амплітуди імпульсів обмежено можливостями високочас-

тотних котушок індуктивності ЕМАП за причини їх пробую імпульсами високої напруги.

Встановлено, що чутливість ЕМАП суттєво пов'язана з вихідними параметрами генератора зондуючих імпульсів та вхідними параметрами підсилювача прийнятих ультразвукових сигналів.

Обґрунтовано необхідність подальшого удосконалення ЕМА методів та засобів ультразвукового контролю з метою збільшення їх чутливості шляхом використання імпульсних магнітних полів.

Поставлені задачі розробки ЕМАП та засобів забезпечення його ефективної роботи.

Другий розділ присвячено визначенню принципів побудови джерела імпульсного магнітного поля ЕМАП, розробці комп'ютерної математичної моделі та модулюванню просторового розподілу магнітного поля, якій створено імпульсним джерелом ЕМАП. Розглянуто питання щодо визначення форми високочастотних котушок індуктивності ЕМАП, досліджено вплив зміни повітряного прошарку між ЕМАП і ОК на форму збуджуваного магнітного поля і його динаміку.

Розрахункова модель включала симетричний Ш-подібний сердечник з маловуглецевої сталі та одновиткову намагнічувальну котушку індуктивності, а також металевий об'єкт контролю. При розрахунках враховано явище гістерезису.

На основі чисельного експерименту встановлено, що для феромагнітних і парамагнітних металовиробів має місце різна конфігурації індукції магнітного поля, що вимагає створення для контролю таких об'єктів окремих відповідних їм конструкцій ЕМАП.

При контролі металовиробів, які знаходяться в стані близького до насичення, збуджуються нормальна та тангенціальна компоненти, що викликає одночасне збудження зсувної та поздовжньої хвиль і веде до помилок в оцінці якості ОК. Знайдено умови, які забезпечують більш рівномірний розподіл індукції магнітного поля під торцем осердя для феромагнітних і парамагнітних металовиробів.

Досліджено перехідні процеси під час намагнічування ОК імпульсом струму із близькою до прямокутної формою. Встановлено, що час наростання індукції магнітного поля при подачі імпульсу струму на котушку залежить від її індуктивності та виду матеріалу ОК. Для феромагнітних магнітних виробів він дорівнює 300...400 мкс, для парамагнітних матеріалів - 400...600 мкс. Причому, в сталевих виробках в порівнянні з алюмінієвими максимальна величина індукції магнітного поля майже в 2 рази більше. Це свідчить про доцільність використання в ЕМАП імпульсних джерел магнітного поля більш всього для контролю феромагнітних виробів.

Визначено шлях зменшення часу перехідних процесів при імпульсному намагнічуванні за рахунок суттєвого зменшення індуктивності котушки без зменшення індукції магнітного поля.

Третій розділ присвячено питанню підвищення чутливості ЕМАП та зменшенню його особистих завад.

Для цього розглянуто концепцію створення ЕМАП прямого типу, основу якого складає положення про використання низкоіндуктивних котушок намагнічування спеціальної конструкції, що забезпечує ефективність збудження і прийому імпульсів об'ємних зсувних ультразвукових коливань в об'єкті контролю.

Дослідження фізичних процесів, які протикають в ЕМАП різноманітної конструкції та його характеристик проведено експериментально за допомогою розробленої дослідної установки.

Для збільшення амплітуди донних імпульсів запропоновано використовувати дві низькочастотні намагнічувальні котушки з зустрічним напрямком векторів магнітної індукції, які діють на поверхневі шари ОК. При цьому короткий проміжок часу дії магнітного поля, якій поляризує, дозволяє ЕМАП не притягуватися до ОК.

Високочастотної котушки індуктивності мають дві робочі ділянки з зустрічним напрямком високочастотного струму. Взаємодія магнітного поля і високочастотного електромагнітного поля котушки в поверхневому шарі ОК призводить до збудження синфазних ультразвукових імпульсів, які поширюються в об'ємі ОК. Відбиті з ОК ультразвукові імпульси приймаються за рахунок зворотного ЕМА перетворення плоскою високочастотною котушкою індуктивності. В результаті експерименту показано, що амплітуда донних імпульсів збільшилася лише на 15...20 %.

Підвищити амплітуду корисних сигналів по відношенню до завад запропоновано за рахунок виготовлення низькочастотних малоіндуктивних котушок плоскої форми з двома вікнами. Ці котушки мають всередині отвори, що за розмірами співпадають з розмірами лінійних робочих ділянок паралельних провідників плоскої високочастотної котушки індуктивності, при цьому вони електрично з'єднані між собою зустрічно по магнітному полю. Результати експерименту показали, що кількість витків плоскої котушки індуктивності джерела магнітного поля ЕМАП раціонально вибирати не менше трьох.

З урахуванням розроблених положень, створено новий метод побудови ЕМАП з П- подібним шихтованим феромагнітним сердечником, якій зменшує перешкоди, які виникають за рахунок магніострикційного перетворення та ефекту Баркгаузена, для якого амплітуда донних імпульсів по відношенню до завад зростає до 38...40 дБ, що є достатнім для контролю лунаметодом. Ефективність запропонованого ЕМАП перевірено шляхом виявлення плоскодонних відбивачів діаметром 3, 5, і 8 мм в зразку зі сталі 09Г2С товщиною 40 мм. Дослідження виконані при частоті зондування 40 Гц, частоті ультразвукових коливань 2,3 МГц, тривалості імпульсу намагнічування 200 мкс, щільності струму намагнічування 600 А/мм². Результати досліджень показали, що досягнена чутливість розробленого ЕМАП дозволяє контролювати металовироби на фоні завад при незначній (менше 12 мм) «мертвій» зоні.

На основі проведених експериментальних досліджень з урахуванням теоретичних результатів, отриманих у другому розділі, розроблено новий метод ультразвукового електромагнітно-акустичного контролю феромагнітних виробів.

У четвертому розділі на підставі отриманих у розділі 3 результатів проведено удосконалення конструкції ЕМАП та покращено технічні характеристики основних пристроїв, які забезпечують роботу ЕМАП, за рахунок їх схематичних та конструктивних рішень. Зокрема збуджуючого генератора високочастотного струму, смугового посилювача прийнятих ультразвукових імпульсів, блоку живлення джерела імпульсного намагнічування.

Досягнуто зменшення неконтрольованої зони виробу за рахунок зменшення рівня перешкод, які могли виникнути одночасно з корисним сигналом в елементах перетворювача із-за збудження вихрових струмів або магнітострикційних ефектів, шляхом використання мінімальної кількості металевих деталей в робочій зоні індуктора ЕМАП або використання матеріалів з низьким коефіцієнтом ЕМА перетворення.

З метою підвищення чутливості ЕМАП розроблено одношарову плоску високочастотну котушку індуктивності, яка за допомогою конденсаторів та електронних ключів при збудженні ультразвукових імпульсів зменшує свій опір, що дозволяє отримати від генератору максимальний струм, а при прийомі ультразвукових імпульсів забезпечує на вході підсилювача максимальну корисну напругу.

Для забезпечення живлення високочастотної котушки індуктивності розроблено генератор високочастотних пакетних імпульсних струмів, який складається з двох основних блоків – формувача імпульсів з заданими параметрами, які регулюються, та посилювача потужності високочастотного струму.

За основу формування сигналу, якій зондує, обрано дві послідовності імпульсів, які зсунуті у часі протилежно по фазі.

Обрано варіант побудови підсилювача потужності у вигляді двотактної схеми, в якій всі каскади працюють в ключовому режимі, що з енергетичної точки зору є найбільш оптимальним. Це дозволило істотно збільшити струми, комутовані транзисторами вихідного каскаду і підвищити стійкість підсилювача до перешкод.

Розроблено схему пригнічення перехідних процесів в ЕМАП після закінчення дії високочастотного пакетного імпульсу, якій зондує. Це дозволило зменшити в 2...3 рази перехідні процеси в ЕМАП та відповідно зменшити «мертву зону» при контролі виробу.

Здійснено перевірку чутливості з виявлення моделей дефектів в вигляді плоскодонних відбивачів діаметром 2 мм у зразку зі сталі Ст.45. Результати експерименту показали, що величина амплітуди ультразвукових імпульсів збільшилася більше, ніж у 2 рази. Це підтвердило ефективність використання вдосконаленого збуджуючого генератора у складі приладу для ЕМА контролю металовиробів.

В момент генерації послідовності імпульсів зондування на вхід підсилювача, якій приймає відбитий від дефекту виробу слабкий сигнал, можуть надходити імпульси амплітудою до ± 10 В. З урахуванням цього розроблено смуговий підсилювач, в якому перший каскад виконаний на операційному підсилювачі з швидким часом відновлення. На цьому каскаді також побудовано схеми активної фільтрації, завдяки чому досягнуто скорочення часу відновлення роботи підсилювача при його перевантаженні. Це дозволило скоротити тривалість «мертвої» зони – часу на початку вимірювань, протягом якого рівень перешкод значно вище рівня корисного сигналу.

Абсолютна амплітуда власних перешкод на виході підсилювача складає $\pm 0,02$ В при максимальній амплітуді вихідного сигналу ± 5 В. Такий рівень перешкод можна вважати прийнятним.

Проведено технічне удосконалення блоку живлення джерела імпульсного намагнічування шляхом використання накопичувального елемента, який забезпечує швидке наростання струму намагнічування та дозволяє отримати значення його внутрішнього опору рівним 6 мОм і необхідну імпульсну густину струму до 600 А/мм².

У додатках наведено список опублікованих праць за темою дисертації та акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

Висновки до розділів та за результатами роботи сформульовані достатньо чітко і виразно та відповідають змісту дисертаційної роботи.

Список використаних джерел досить повний і охоплює сучасні вітчизняні та зарубіжні публікації із 140 найменувань.

Оформлення дисертаційної роботи відповідає встановленим вимогам.

Матеріал роботи викладено, за деяким виключенням, послідовно, грамотно, математично коректно з використанням загальноприйнятої термінології та з дотриманням сучасних правил подання наукової інформації. Дисертацію та автореферат оформлено згідно до вимог оформлення науково-технічної документації. Результати дослідження достатньо проілюстровані графічним матеріалом.

Автореферат ідентичний за змістом основним науковим положенням, висновкам та результатам дисертації та достатньо повно розкриває внесок здобувача в наукові результати та практичну цінність роботи.

Таким чином, дисертаційна робота та автореферат за змістом і оформленням відповідають вимогам ДАК вищої кваліфікації МОН України.

8. Зауваження за дисертацією

До недоліків дисертації можна віднести наступне:

1. Мету роботи сформульовано розпливчато.
2. Не вказано, до яких глибин у виробі збільшилося виявлення дефекту запропонованим методом в порівнянні з існуючими ЕМАП.
3. Не наведено порівняльну характеристику запропонованого методу контролю з розробленим ЕМАП з іншими методами.

4. Чисельний експеримент проведено для виробу з магнітною проникливістю, яка є постійна. Не враховано останні дослідження, які свідчать про те, що магнітна проникливість суттєво залежить від амплітуди та частоти поля, яке намагнічує металеві вироби (див. В.А. Сандовский, Е.М. Файншмидт Исследование магнитной проницаемости стальных образцов в однородном переменном поле при упругой деформации на растяжение // Изв. Вузов. Приборостроение.- 2013.- т.56.- №3.с. 58-64).

5. У розділі 1 основну увагу надано аналізу досліджень ультразвукового електромагнітно-акустичного методу контролю. Проте недостатньо проаналізовано інші методи контролю та перетворювачі, не надано їх області застосування, порівняльні характеристики по чутливості, точності та глибини зондування дефектів.

6. У розділі 2.2 при побудові математичної моделі вирішується тільки квазістатична задача. Розроблені математичні моделі є комп'ютерними і їх по Самарському О.А. та Михайлову О.П. можна віднести до моделей, які існують у тріадах: « модель (диференційні рівняння)- алгоритм- програма». Однак у роботі друга частина тріади – алгоритм не наведено.

7. У розділі 2.4 при вивченні динамічних характеристик джерела імпульсного магнітного поля використано для розрахунку індуктивності котушки та намагнічування з одного витка емпіричну формулу Віллари. Це неправомірно, оскільки для одного витка використовують іншу формулу, яка не відповідає формулі Віллари.

8. Не визначено вплив матеріалу об'єкту контролю на індуктивність котушки.

9. У розділі 3 при експериментальних дослідженнях ЕМАП не наведено методику проведення вимірів та оцінку невизначеності їх результатів.

10. В тексті дисертації зустрічаються деякі неточності. Так на стор. 41 та на рис 2.3 не вказано номер літературного посилання; на рис. 4.9 є зміщення позначень; позначення точок кривих на рис. 2.6-2.7, 2.12-2.17 слід було виконати кольоровими, що дало б можливість краще їх розрізнити. В висновках автореферату чомусь не наведено даних про розробку та отримання 2 патентів на корисну модель.

Але ці зауваження не торкаються принципових положень роботи і не знижують її позитивної оцінки.

9. Загальний висновок по дисертації

Дисертаційна робота Буссі Салам «Електромагнітно – акустичні перетворювачі для ультразвукового контролю металовиробів» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин.

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка вирішує важливу для господарства України науково-прикладну задачу створення високочу-

тливих електромагнітно – акустичних методів і засобів для якісного контролю технічного стану металовиробів.

Дисертаційна робота відповідає вимогам пп. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567 (зі змінами), а здобувач, Буссі Салам, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри
«Метрологія та безпека життєдіяльності»
Харківського національного
автомобільно-дорожнього університету

02.07.2020

В.Д. Сахацький

Підпис проф. Сахацького В.Д. засвідчую

Сасацького В.Д.
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
ЗАСВІДЧУЮТЬ ПРО
СЕРТИФІКАЦІЮ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
УКРАЇНИ
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
№ 02071168