

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

ПЛЕСНЕЦОВ Сергій Юрійович



УДК 620.179.16

**РОЗВИТОК МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-
АКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ СТРИЖНЕВИХ, ТРУБЧАСТИХ ТА
ЛИСТОВИХ МЕТАЛОВИРОБІВ**

Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю
та визначення складу речовин

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант доктор технічних наук, професор
Сучков Григорій Михайлович,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Тараненко Юрій Карлович,
пенсіонер;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Лопатін Валерій Володимирович,
Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, м. Дніпро, старший науковий співробітник відділу гірничої термоаеродинаміки та автоматизованих систем;

доктор технічних наук, професор
Защепкіна Наталія Миколаївна
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій.

Захист відбудеться «16» грудня 2021 р. о 14:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.09 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий «12» листопада 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради



Іван КОСТЮКОВ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Контроль металовиробів з використанням ультразвукових коливань є одним з найпоширеніших видів неруйнівного контролю. Існує широкий спектр досліджень і розробок, спрямованих на використання методів ультразвукового контролю (УЗК). Наявні методи дозволяють здійснювати вимірювання геометричних параметрів виробів, фізико-механічних характеристик (пружності, твердості, межі текучості тощо), виконувати пошук дефектів та оцінку характеристик дефектів (просторове розташування, форма, розміри). УЗК є невід'ємним елементом промислового виробництва, будівництва та інших галузей промисловості.

В той же час суттєвим недоліком традиційних методів УЗК є те, що вони у більшості є контактними. Це означає, що перетворювач, за допомогою якого здійснюється контроль, має вступати в безпосередній контакт з виробом, параметри якого контролюються. Такий контакт вимагає виконання кількох істотних умов для забезпечення якості контролю та точного виявлення досліджуваних характеристик. По-перше, контакт має бути стабільним. Це вимагає притискання перетворювача до виробу, що збільшує швидкість його зношування та може приводити до пошкоджень об'єкту контролю, також у багатьох випадках вимогою є використання контактної рідини, яка забезпечить стабільність акустичного контакту. По-друге, форма перетворювача має бути сумісною з формою металовиробу. Викривлення поверхні, шорсткість, різні види покриття можуть призводити до втрати, порушення чи погіршення якості акустичного контакту, ускладнюючи та знижуючи точність або унеможливаючи контроль. Це може призводити до необхідності проводити підготовку поверхні, включаючи зняття покриттів або зачищення (шлифування або інші форми зачищення).

Ємнісний та електромагнітно-акустичний методи є найбільш розповсюдженими видами безконтактного неруйнівного контролю. Ємнісний метод реалізується через використання електричних полів, електромагнітно-акустичний (ЕМА) заснований на електромагнітній взаємодії з виробом, що контролюється. Основним недоліком ємнісного методу контролю вважається низька інтенсивність механічних коливань, що збуджуються в досліджуваному виробі. Електромагнітно-акустичний метод вважають таким, що відрізняється відносно низькою чутливістю перетворювачів, заснованих на закладених в цьому методі фізичних принципах. У той же час ЕМА-метод забезпечує високу інтенсивність збудженого в об'єкті контролю сигналу, значно спрощує задачі автоматизації контролю та дозволяє значно знизити витрати на контроль за рахунок можливості відмовлення від попередньої обробки поверхні та використання контактної рідини.

Тому актуальною задачею є проведення комплексних досліджень, спрямованих на вирішення відомих недоліків теоретичних та практичних аспектів проектування перетворювачів, заснованих на електромагнітно-акустичному методі як у випадку режиму збудження механічних коливань, так і у випадку їх прийому.

Одним зі способів ефективного позбавлення ряду істотних недоліків традиційних методів УЗК є використання безконтактних методів контролю, які дозволяють збуджувати ультразвуковий сигнал в контрольованому виробі із значним повітряним чи діелектричним прошарком, фактично ліквідуючи необхідність прямої механічної взаємодії перетворювача та об'єкту контролю.

Електромагнітно-акустичний спосіб збудження і прийому ультразвукових імпульсів є ефективним безконтактним методом контролю виробів зі складною (забрудненою, кородованою) поверхнею, у складних температурних умовах, у тому числі при контролі трубчастих, стрижневих та листових металовиробів тощо. Метод може використовуватись у товщинометрії, дефектоскопії та для визначення властивостей матеріалів.

Водночас створення приладів і пристроїв, в яких використовується ЕМА-метод, суттєво ускладнюється недостатньою дослідженістю та надмірною складністю наявних рішень для розрахунку та урахування ефектів, пов'язаних з феромагнетизмом, електромагнітно-акустичним перетворенням, термо- та електродинамікою. Опис цих ефектів необхідний для точного та ефективного розрахунку та проектування ЕМА-перетворювачів. Особливої уваги потребує питання збудження та прийому ультразвукових хвиль при використанні ЕМА-методу, в особливості таких типів хвиль, як хвилі Релея, Лемба, крутильні тощо.

Сучасні дослідження ЕМА-методу відмічають його недостатню чутливість для виявлення малогабаритних дефектів або дефектів, розташованих на значній відстані. Підвищення чутливості ЕМА-перетворювачів (ЕМАП) дозволяє реалізовувати потенціал безконтактних методів контролю без втрати чутливості.

При цьому в промисловості існує стабільний попит на безконтактні високочутливі засоби контролю та діагностики, задовольнити який можливо за допомогою розробки методів та засобів для високочутливого ЕМА-контролю. Масове виробництво стрижневих, трубчастих та листових заготовок особливо потребує швидкісних та точних методів контролю на виробництві з урахуванням їх широкої розповсюдженості у вітчизняній промисловості.

Комбінація переваг використання та складності реалізації призводить до виникнення важливої науково-практичної проблеми, що полягає у необхідності створення основних положень збудження та прийому імпульсів ультразвукових поверхневих та нормальних хвиль в листах, трубах та стрижнях, виготовлених переважно з феромагнітного матеріалу, методів та засобів для їх контролю та діагностики.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Роботу виконано на кафедрі 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 виробництва», при безпосередній участі здобувача в рамках наступних науково-дослідних робіт НТУ «ХПІ»: НДДКР «Розвиток основ створення методів та засобів для електромагнітно-акустичного контролю

стрижневих, трубчастих та листових металовиробів» (2017–2018), ДР № 0117U004881 (НТУ «ХПІ», 2017–2018 рр.) «Удосконалення технічних систем та пристроїв за рахунок імпульсних електромеханічних перетворювачів та електрофізичних технологій» (здобувач – виконавець окремих розділів); договір №52/234-2019 від 15.01.2019 «Розвиток основ створення методів та засобів для електромагнітно-акустичного контролю стрижневих, трубчастих та листових металовиробів», установа-партнер «Automotive Solution Company» SRL (Румунія) (здобувач–виконавець окремих розділів).

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – моделювання та розвиток на його основі положень, методів і засобів для електромагнітно-акустичного збудження та прийому ультразвукових хвиль, які забезпечують підвищену чутливість при дослідженні стрижневих, трубчастих та листових виробів.

Для досягнення мети поставлено і вирішено наступні завдання:

1. Провести аналіз існуючих теоретичних, модельних та експериментальних досліджень, методів та засобів безконтактного ультразвукового електромагнітно-акустичного контролю металовиробів.

2. Розробити математичну модель електромагнітно-акустичного перетворення електромагнітної енергії в ультразвукову для випадку дослідження стрижневих, трубчастих та листових виробів крутильними хвилями та хвилями Релея і Лемба.

3. Виконати модельні дослідження, на основі яких сформулювати основні положення побудови електромагнітно-акустичних перетворювачів для ультразвукового контролю стрижневих, трубчастих та листових виробів крутильними хвилями та хвилями Релея і Лемба.

4. Знайти математичну модель для опису вимушених крутильних коливань в електропровідному феромагнітному стрижні, яка враховує повний набір геометричних і фізико-механічних властивостей матеріалу полого феромагнітного стрижня, котушок і центрального провідника електричного струму.

5. Дослідити ефекти збудження та прийому ультразвукових хвиль Релея в широкому частотному діапазоні в залежності від різних характеристик електромагнітно-акустичних перетворювачів, оцінити вплив компонентів електромагнітної взаємодії ЕМАП і виробу.

6. Розробити макети генератора зондуючих імпульсів підвищеної потужності, малошумлячого резонансного підсилювача прийнятих ультразвукових імпульсів та ЕМА перетворювачів різного призначення.

7. Сформулювати фізичні основи створення безконтактних ультразвукових частотних сенсорів, виконати експериментальні дослідження розроблених ЕМАП та методів їх використання, встановити характеристику чутливості розроблених ЕМА перетворювачів.

8. Розробити нові конструкції ЕМАП та методи контролю, призначені для безконтактної ультразвукової дефектоскопії металовиробів імпульсами поверхневих хвиль та визначення фізико-механічних властивостей поверхневих шарів металів за допомогою хвиль Релея.

Методи дослідження. В дослідженні використано аналітичний метод для створення математичної моделі. Побудова теоретичної моделі проводилася з використанням методів аналітичного і чисельного диференціювання та інтегрування. Використані положення теорії пружності та теорії магнітострикції. Для побудови, обчислення та уточнення теоретичної моделі використано метод послідовних наближень у математичному моделюванні. При аналізі та верифікації моделі застосовано метод комп'ютерного моделювання методом кінцевих елементів. Для оцінки достовірності теоретичної моделі використані метод модельного багатофакторного експерименту та методи статистичної оцінки достовірності результатів досліджень. При оцінці результатів та верифікації модельного експерименту використано луна-метод та луна-тіньовий метод контролю. Застосовані теоретичні та електронні засоби підсилення інформаційної складової сигналу.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше розроблено математичну модель електромагнітно-акустичного перетворення електромагнітної енергії в акустичну переважно для феромагнітних металів, що містить пов'язані між собою хвильове рівняння, рівняння Максвелла і узагальнений закон Ома в диференціальній формі. У математичній моделі комплексно враховані характеристики електромагнітно-акустичного перетворювача, параметри збуджуваних сигналів і властивості досліджуваного матеріалу. На підставі встановлених зав'язків сформульовані концептуальні підходи щодо вирішення завдання конструювання ЕМА перетворювачів для збудження і прийому ультразвукових коливань. Це надає можливість точного розрахунку параметрів ЕМА-перетворювача для його подальшого технічного проектування.

2. Вперше проведено математичне моделювання прохідного електромагнітно-акустичного перетворювача для збудження крутильних недиспергуючих пружних коливань в трубчатоподібних феромагнітних виробках з урахуванням характеристик перетворювача, властивостей об'єкта досліджень і взаємного розташування ЕМАП і виробу. Ним показана необхідність поетапного знаходження взаємопов'язаних електромагнітних полів в різних областях моделі ЕМАП з урахуванням всіх факторів, що впливають на конструкцію прохідного перетворювача. Знайдено рішення загального диференціального рівняння шляхом визначення значень електромагнітних полів в області між котушкою збудження перетворювача і трубчастим виробом. Визначена хвильова характеристика джерела змінного магнітного поля ЕМАП. У сукупності отримані результати надають можливість розрахунку параметрів збуджуваного сигналу та електромагнітного поля, що збуджує сигнал, а також дозволяє розробляти конструктивні рішення перетворювачів.

3. Вперше знайдено рішення диференціального рівняння вимушених крутильних коливань в електропровідному феромагнітному стрижні (трубці), попередньо намагніченому в окружному напрямку, у вигляді виразу для лінійної щільності зовнішніх моментів, що крутять. Отримано вираз для розрахунку амплітуд кутів поворотів поперечних перерізів у фронті

недиспергуючої крутильної хвилі, що розповсюджується, через абсолютну чутливість, коефіцієнт інтерференційних втрат і коефіцієнт втрат ефективності збудження крутильних хвиль, обумовлений вихровими струмами (скін-ефектом). Вираз враховує повний набір геометричних і фізико-механічних властивостей матеріалу полого феромагнітного стрижня, котушок і центрального провідника електричного струму, що дозволяє проектувати електромеханічні перетворювачі з урахуванням особливостей контролюваного матеріалу. Показано можливість налаштування системи для компенсації впливу зміни фізико-механічних властивостей металу шляхом регулювання частоти високочастотного струму.

4. Вперше розроблено фізико-математичну модель прохідного електромагнітно-акустичного перетворювача для збудження (прийому) крутильних недиспергуючих пружних коливань. Основу моделі складають дві зустрічно включених за магнітним полем котушки і джерело магнітного поля у вигляді провідника зі струмом. У розробленій моделі враховано вплив геометричних розмірів котушок перетворювача і виробу, їх взаємного розташування, а також фізико-механічних характеристик матеріалу досліджуваного металовиробу. Така модель є інструментом в розрахунку конструктивних параметрів ЕМА-перетворювачів, в особливості – геометричних параметрів котушок перетворювачів.

5. Вперше показано, що основний внесок у фізичне перетворення вносять пондеромоторні сили електромагнітного поля і сили Джоуля, які відповідають пружним деформаціям, що виникають в результаті прояву прямого магнітострикційного ефекту в мікротовщинному шарі феромагнітного металу. Встановлено, що при оптимальному виборі величини постійного поля підмагнічування, сили Джоуля практично на чотири порядки перевершують пондеромоторні сили, створювані електромагнітним полем.

При цьому обернено пропорційний зв'язок частоти електромагнітного поля і товщини скін-шару феромагнітного матеріалу, в якому відбувається перетворення, дозволяє здійснювати пошаровий контроль і визначати фізичні і пружні властивості матеріалу шляхом зміни частоти струму, що живить сенсор.

Отримані дані дозволяють спрощувати розрахункові вирази при оцінці параметрів перетворювача.

6. Встановлено, що радіально орієнтовані сили Джоуля в аксіально намагніченому тонкому поверхневому шарі феромагнетика на частотах порядку одного мегагерцу практично в 30 разів перевершують аксіально орієнтовані сили, тобто є домінуючими при формуванні ультразвукових високочастотних коливань. Ці дані дозволяють спрощувати розрахункові вирази при проектуванні перетворювачів для дослідження трубчастих та круглих у перерізі металовиробів, які можуть бути досліджені крутильними хвилями.

7. Вперше оцінено збільшення механічної жорсткості попередньо намагніченого феромагнетика за рахунок пов'язаної дії сил пружності і сил магнітної взаємодії між полюсами доменів у деформуємому тонкому шарі феромагнетика (ΔE -ефект). Визначено межі, при яких ΔE -ефект можна не враховувати в практичних розрахунках. На підставі оцінок числових значень

ΔE -ефекту запропоновано метод послідовних наближень для розв'язання граничної задачі про перетворення високочастотного електромагнітного поля в поле пружних хвиль в мікротовщинних шарах металів феромагнітної групи. Це дозволяє використовувати ЕМА-метод у твердометрії.

8. Вперше створено алгоритми перетворення сигналів, які реалізуються в процесі прийому (реєстрації) ультразвукових хвиль в металах електромагнітним способом. Доведено теореми про наведений магнітний потік для металів неферомагнітної групи і феромагнетиків. На підставі цих теорем побудовані математичні моделі процесів реєстрації ультразвукових хвиль електромагнітним способом, що відкриває можливість алгоритмізації та спрощення задач візуалізації і аналізу сигналу, отриманого ЕМА-методом. Розроблено 11 методів ЕМА-контролю металовиробів: метод ЕМА контролю ОК зі значною площею поверхні одним комплектом збуджувального та приймаючого перетворювачів ультразвукових імпульсів хвиль Релея; метод максимізації збуджуваного імпульсу на кромці ОК; метод для виявлення поверхневих і підповерхневих дефектів з використанням імпульсів хвиль Релея; метод ультразвукового контролю крутильними хвилями виробу з неферомагнітного матеріалу; метод ультразвукового електромагнітно – акустичного контролю феромагнітних металовиробів зі складною формою перетину з невеликим розміром; метод безконтактного ультразвукового ЕМА контролю металічних виробів імпульсами поверхневих хвиль; метод ультразвукового контролю пружних характеристик металу тонкостінних виробів імпульсами хвиль Лемба; метод ультразвукового контролю твердості металовиробу; метод ультразвукового контролю твердості металу протяжного виробу імпульсами хвиль Релея; метод поточного імпульсного ультразвукового електромагнітно – акустичного контролю прокатаних феромагнітних виробів; метод ультразвукового електромагнітно – акустичного контролю луна методом.

9. Вперше визначена роль внутрішнього магнітного поля в процесі формування рівня електричного сигналу на виході перетворювача-приймача ультразвукових хвиль. Показано, що ігнорування факту існування внутрішнього магнітного поля може привести до підвищеної (в десятки разів) оцінки рівня вихідного електричного сигналу перетворювача електромагнітного типу. Сукупність викладених принципів і методів становить теоретичну основу розрахунку перетворювачів електромагнітного типу в режимах збудження і прийому ультразвукових хвиль у феромагнітних металах і в металах неферомагнітної групи.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Реалізовано теоретичну модель, яка дозволяє виконувати розрахунки параметрів і характеристик електромагнітно-акустичних перетворювачів суміщеного та роздільного типу.

2. Розроблено, виготовлено та випробувано стендові макети електромагнітно-акустичних перетворювачів, що практично реалізують теоретичну модель та доводять її ефективність.

3. Розроблено електромагнітно-акустичні перетворювачі для контролю різних зразків в межах сортamentів стрижневих, трубчастих та листових

металовиробів для різних типів та етапів виробництва та експлуатації з використанням контролю крутильними хвилями, хвилями Релея та Лемба на поверхні та всередині об'єктів контролю.

4. Створено методики контролю з застосуванням розроблених перетворювачів та практичні рекомендації з їх використання: спосіб ультразвукового контролю твердості металу протяжного виробу хвилями Релея; спосіб ультразвукового контролю пружних характеристик металу тонкостінних виробів хвилями Лемба; спосіб ультразвукового електромагнітно-акустичного контролю протяжних трубчатих феромагнітних металовиробів з складною формою перерізу; спосіб поточного ультразвукового контролю луна-методом; спосіб ультразвукового контролю твердості металовиробу; спосіб визначення коефіцієнта Пуассона матеріалу неферомагнітних електропровідних виробів ультразвуковим електромагнітно-акустичним методом; спосіб імпульсного ультразвукового електромагнітно-акустичного контролю прокатаних феромагнітних виробів; спосіб ультразвукового контролю якості скріплення діелектричного покриття з поверхневим прошарком металовиробу; спосіб безконтактного збудження коротких імпульсів ультразвукових хвиль Релея; спосіб високочутливого безконтактного ультразвукового виявлення тріщин поверхневого шару металовиробів; спосіб імпульсного ультразвукового електромагнітно-акустичного контролю феромагнітних виробів з значною площею поверхні; спосіб імпульсного продуктивного ультразвукового контролю довгих феромагнітних виробів.

5. Розроблено та впроваджено технічні рішення, спрямовані на використання електромагнітно-акустичного методу у виробництві: роздільно-поєднаний електромагнітно-акустичний перетворювач для контролю імпульсами хвиль Релея та Лемба; ультразвуковий роздільно-поєднаний електромагнітно-акустичний перетворювач для контролю феромагнітних металовиробів; електромагнітно-акустичний перетворювач для контролю трубчатих неферомагнітних металовиробів з перетином у вигляді кола; комбінований електромагнітно-акустичний перетворювач для контролю імпульсами ультразвукових поверхневих хвиль; суміщений електромагнітно-акустичний перетворювач для контролю металовиробів імпульсами ультразвукових поверхневих хвиль; суміщений електромагнітно-акустичний перетворювач для контролю металовиробів імпульсами високочастотних ультразвукових хвиль; роздільно-поєднаний ультразвуковий перетворювач електромагнітного типу для контролю імпульсами хвиль Релея; роздільно-поєднаний електромагнітно-акустичний перетворювач для ультразвукового контролю імпульсами поверхневих хвиль; пристрій для електромагнітно-акустичного збудження імпульсних ультразвукових коливань; роздільно-поєднаний безконтактний ультразвуковий перетворювач для контролю імпульсами поверхневих хвиль; роздільно-поєднаний безконтактний ультразвуковий перетворювач для контролю імпульсами поверхневих хвиль; пристрій для установки автоматичного ультразвукового безконтактного контролю протяжних феромагнітних металовиробів; комбінований роздільно-поєднаний

електромагнітно-акустичний перетворювач для неруйнівного ультразвукового контролю.

Результати роботи впроваджено:

1) «Automotive Solution Company» SRL, Румунія – для контролю стрижневих, трубчастих і листових металовиробів ЕМА-методом в інтервалі товщин 7–25 мм на етапі підготовки до виробництва і для контролю готової продукції. Застосування впроваджених методів забезпечило зниження рівню браку. Акт впровадження від 17.01.2019.

2) ТОВ «Харківський електромашинобудівний завод», Україна – для контролю електромагнітно-акустичним методом якості стрижневих та трубчастих металовиробів, призначених для виготовлення генераторів, трансформаторів та електродвигунів на етапі підготовки до виробництва і контролю готової продукції. Застосування впроваджених методів забезпечило зниження рівня браку. Акт впровадження від 07.07.2020 р.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи здобувачем отримано особисто. У роботах із співавторами здобувачу належать наступні результати: виконано теоретично-розрахункові дослідження в межах певних розділів; визначено існуючі рішення аналітичних та пошукових задач при побудові огляду, включаючи пошук, спрямований на аналіз сучасного стану ЕМА-перетворювачів та пов'язаних з ними досліджень; виконано дослідження та аналітично-розрахункові операції при проектуванні та розробці електромагнітно-акустичних перетворювачів та експериментальних стендів та макетів приладів; виконано розрахунково-аналітичні дослідження стосовно питань збудження та прийому ультразвукової хвилі в надтонких прошарках матеріалу, в стрижневих та листових зразках, включаючи теоретичний аналіз фізичних основ процесу збудження коливань у полікристалічних матеріалах; виконано розробку системи генерації пакетних імпульсів збудження; проведено розробку теоретичних положень та практичну оцінку методології контролю виробів зі складною формою поверхні; прийнято участь у створенні технічної реалізації перетворювачів, в тому числі у розробці схем розміщення та визначення параметрів котушки індуктивності, розробці систем аналізу та обробки прийнятого сигналу, розробці способів та засобів виявлення дефектів в стрижневих, листових та трубчастих металовиробах.

Апробація матеріалів дисертації. Матеріали даної дисертаційної роботи доповідались на наступних конференціях: міжнародній науково-технічній конференції «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії» (Харків, 2016, 2017, 2018 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Фізичні та комп'ютерні технології», (Харків, 2016 р.); International Scientific Symposium «Metrology and Metrology Assurance 2017», (Созополь, Болгарія, 2017 р.); міжнародній науково-практичній конференції MicroCAD «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2017, 2018 р.); «Сучасні тенденції розвитку української науки: всеукраїнська наукова конференція», (Переяслав-Хмельницький, 2017 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Приладобудування: стан і перспективи» (Київ, 2017 р.); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування», (Тернопіль, 2017 р.); міжнародній науковій конференції

«Фізичні явища в твердих тілах» (Харків, 2017 р.); міжнародній науково-практичній конференції магістрантів та аспірантів (Харків, 2018 р.); міжнародній конференції «Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики» (Одеса, 2018 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Приладобудування: стан і перспективи» (Київ, 2018 р.); «Актуальні проблеми автоматики та приладобудування: міжнародна науково-технічна конференція», (Харків, 2018 р.); науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування» (Київ, 2019 р.).

Публікації. Результати виконаних науково-дослідних робіт опубліковано у 72 наукових працях, серед яких: 1 монографія, 27 статей у фахових наукових виданнях та періодичних виданнях інших держав (з них включено до наукометричних баз: 9 – до SCOPUS та 5 – до Web of Science Core Collection); 1 патент на винахід; 25 патентів на корисну модель; 17 тез доповідей на міжнародних та вітчизняних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел інформації і додатків. Повний об'єм дисертації складає 329 сторінок, 149 рисунків та 2 таблиці за текстом, список використаних джерел з 326 найменувань на 37 сторінках; 2 додатки на 13 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми досліджень і необхідність розробки нових ультразвукових перетворювачів електромагнітно-акустичного типу та методів і засобів безконтактного ультразвукового контролю металовиробів. Визначена наукова новизна, практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, вказано відомості щодо апробації результатів дисертації, їх публікації та впровадження. Сформульована науково-практична проблема роботи.

У першому розділі наведено аналіз існуючих досліджень за темою роботи, обґрунтовано неможливість їх використання для побудови повної моделі електромагнітно-акустичного перетворення для досліджуваних типів металовиробів, виявлено недоліки існуючих рішень в теоретичних та практичних аспектах проектування ЕМАП та пов'язаних з ними систем, показано актуальність та потрібність досліджень у даному напрямку.

У другому розділі наведено сукупність теоретичних досліджень, виконаних для досягнення мети та вирішення задач роботи.

Показано, що процес збудження УЗК різними ЕМАП можна описати певною послідовністю перетворень. До високочастотної котушки (індуктора) прикладається змінна напруга $U_{ex}(t)$. У індукторі формується струм $I^*(t)$, який створює змінне магнітне поле з вектором напруженості $\vec{H}^*(x_k, t)$. Змінне магнітне поле взаємодіє з обмеженою областю металу. До цієї ж області металу прикладається постійне поляризуюче поле з вектором напруженості $\vec{H}^0(x_k)$. Для металів неферомагнітної групи орієнтація $\vec{H}^0(x_k)$ визначає напрямок вектора об'ємної щільності сил Лоренца в точці. Для феромагнітного матеріалу вектор $\vec{H}^0(x_k)$ визначає структуру матриці п'єземагнітних констант. У

зазначеній області металу в результаті взаємодії магнітних полів $\vec{H}^*(x_k, t)$ та $\vec{H}^0(x_k)$ формуються деформації. Енергія з області збудження передається ультразвуковими коливаннями з вектором зміщення $\vec{u}(x_m, t)$.

Якщо на електричному вході ЕМАП діє напруга $U_{\text{вх}} = U_0 e^{i\omega t}$, де U_0 – амплітудне значення, то на його механічному виході формується відлуння $\vec{u}(x_k, t) = \vec{u}(x_k, \omega) e^{i\omega t}$, де $\vec{u}(x_k, \omega)$ – амплітуда вектора зміщення матеріальних часток, яка гармонійно змінюється в часі. При цьому між амплітудами збудженого і прийнятого сигналу перетворювача існує лінійна залежність.

Задачею теоретичного аналізу визначено пошук частотної характеристики $\vec{W}(x_k, \omega, P)$, яка може бути розглянута для кількох типів процесів збудження механічних коливань у зразках: збудження крутильних коливань у стрижні або трубчастому зразку, збудження поверхневих коливань у листовому чи стрижневому зразку, збудження поздовжніх або зсувних коливань у об'ємному зразку.

На рис. 1 наведено схему прохідного котушкового електромагнітно-акустичного перетворювача. Перетворювач складається з джерела 1 змінного магнітного поля (котушки з N кільцевих витків дроту), джерела 2 постійного поля підмагнічування, розташованого на осі симетрії котушки центрального провідника, по якому протікає постійний струм і певного об'єму феромагнітного полого стрижня 3, в якому відбувається перетворення електромагнітної енергії в енергію пружних коливань часток матеріалу стрижня.

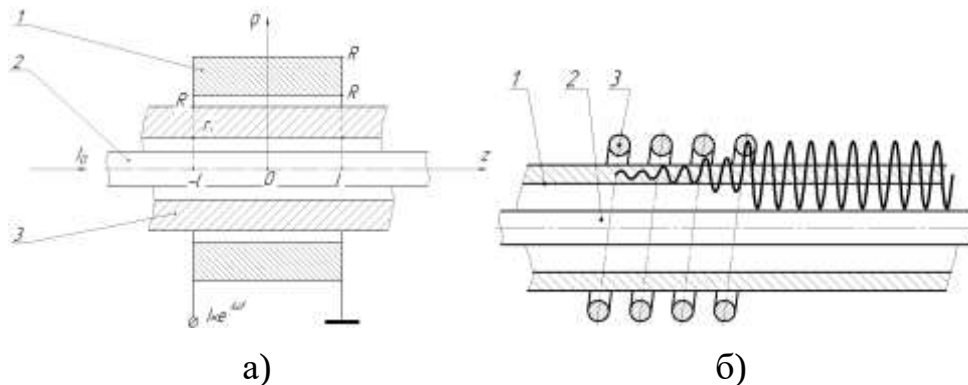


Рисунок 1 – Схема прохідного котушкового електромагнітно-акустичного перетворювача: а) ескізна схема; б) принцип дії

Було визначено, що для обчислення кутів поворотів поперечних перерізів необхідно визначити параметри змінного магнітного поля котушки в об'ємі феромагнітного стрижня. При виконанні розрахунків безкінечну область ($0 \leq \rho < \infty$, $-\infty < z < \infty$) було розбито на підобласті:

- область №1 ($R \leq \rho < \infty$, $0 \leq \vartheta \leq 2\pi$, $-\infty < z < \infty$) – повітряний зазор під витками котушки;
- область №2 ($r_1 \leq \rho \leq R$, $0 \leq \vartheta \leq 2\pi$, $-\infty < z < \infty$) – об'єм електропровідної феромагнітної трубки;
- область №3 ($R_0 \leq \rho \leq r_1$, $0 \leq \vartheta \leq 2\pi$, $-\infty < z < \infty$) – повітряний зазор між внутрішньою поверхнею трубки і бічною поверхнею провідника електричного

струму;

– область №4 ($0 \leq \rho \leq R_0$, $0 \leq \vartheta \leq 2\pi$, $-\infty < z < \infty$) – об'єм провідника електричного струму.

Для розрахунків введено визначення

$$A_g(\rho, \pm k_s) = [A + A(\rho)] I_1(k_s \rho) + [B + B(\rho)] K_1(k_s \rho). \quad (1)$$

Для того, щоб забезпечити виконання умови сходження рівняння, визначено константу A в виразі (1):

$$A = A_0 = -A(R_2) = \frac{\mu_0 I^* N}{R_2 - R_1} \frac{\sin k_s \ell}{k_s \ell}. \quad (2)$$

$$\int_{R_1}^{R_2} \rho K_1(k_s \rho) d\rho = \frac{\mu_0 I^* N}{k_s} W_k(\ell, R, k_s),$$

де $W_k(\ell, R, k_s)$ – хвильова характеристика джерела змінного магнітного поля, тобто котушки, причому $W_k(\ell, R, k_s) = \frac{\sin k_s \ell}{k_s \ell} R(k_s)$; функція $R(k_s)$ визначає вплив товщини укладання витків котушки на амплітуду порушуваних крутильних хвиль.

На рис. 2 показаний характер зміни модуля функції $W_k(\ell, R, k_s)$ для двох фіксованих довжин котушки $\ell = 0$ (рис. 2а) і $\ell = R$ (рис. 2, б). Менший радіус укладання витків котушки $R_1 = 1,05R$. Змінним параметром сімейства кривих

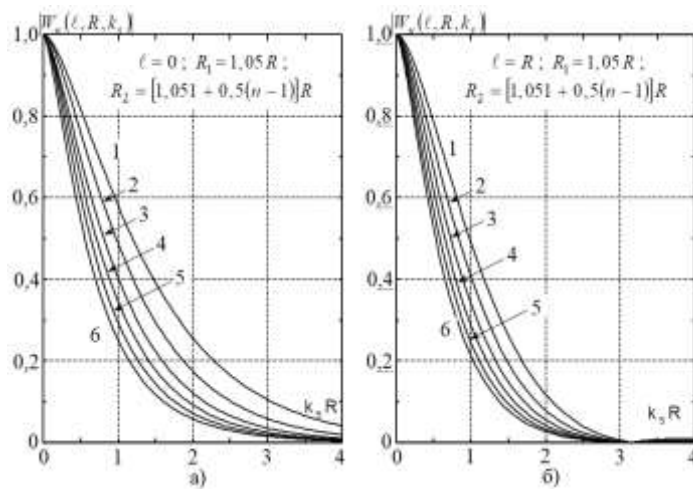


Рисунок 2 – Характер зміни модуля функції W_k для фіксованих довжин ℓ котушки: а) $\ell = 0$; б) $\ell = R$

на рис. 2 є радіус $R_2 = [1,051 + 0,5(n - 1)]R$, де n – номер кривої.

Збільшення розмірів котушки призводить до звуження смуги частот, в якій відбувається ефективне збудження крутильних ультразвукових хвиль.

Вираз для розрахунку амплітуд $\Phi^{(\pm)}$ кутів поворотів поперечних перерізів у фронті недиспергуючої крутильної хвилі

$$\Phi^{(\pm)} = \Phi_0 W_k(\ell, R, k_s) \cdot W_{em}(k_s, \Pi), \quad (3)$$

де Φ_0 – абсолютна чутливість

моделі ЕМАП в режимі збудження недиспергуючих крутильних хвиль; $W_k(\ell, R, k_s)$ – хвильова характеристика джерела змінного магнітного поля або коефіцієнт інтерференційних втрат; $W_{em}(k_s, \Pi)$ – коефіцієнт втрат ефективності збудження крутильних хвиль, обумовлений вихровими струмами (скін-ефектом); символом Π в списку аргументів позначений набір геометричних і фізико-механічних властивостей матеріалу полого феромагнітного стрижня і центрального провідника електричного струму.

Абсолютна чутливість Φ_0 визначається виразом

$$\Phi_0 = \frac{(m_1 - m_2)\mu_0}{4\mu_1^\varepsilon [GJ_p]^B} I_0 I^* R^2 N. \quad (4)$$

Для випадку, коли $m_1 = 0,5 \text{ Гн/м}$; $m_2 = -0,25 \text{ Гн/м}$; $\mu_1^\varepsilon = 30\mu_0$; $I_0 = 10 \text{ А}$; $I^* = 1 \text{ А}$; $R = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $r_1 = 10^{-3} \text{ м}$; $G = 70 \text{ ГПа}$ и $N = 10$, абсолютна чутливість $\Phi_0 = 6,063 \cdot 10^{-6} \text{ рад}$, що складає 1,25 дугових секунд.

Коефіцієнт втрат на вихрові струми $W_{em}(k_s, \Pi)$ розраховується за формулою

$$W_{em}(k_s, \Pi) = \frac{1}{(k_s R) \Delta_0} \left\{ \frac{1}{\zeta R} [C_{11} I_1(\zeta R) + D_{11} K_1(\zeta R)] - \frac{(r_1/R)^2}{\zeta r_1} [C_{11} I_1(\zeta r_1) + D_{11} K_1(\zeta r_1)] + \frac{1}{R} \int_{r_1}^R \rho \operatorname{div} \vec{H}^*(\rho, \pm k_s) d\rho \right\}. \quad (5)$$

На рис. 3 наведені результати розрахунків за формулою (5) частотно залежної зміни коефіцієнта $W_{em}(k_s, \Pi)$ втрат ефективності збудження крутильних хвиль через скін-ефект. По осях абсцис відкладені значення безрозмірного хвильового числа $k_s R$.

На рис. 4 наведені графіки модуля функції $W_{\text{зан}}(k_s, \Pi) = W_{\kappa}(\ell, R, k_s) W_{em}(k_s, \Pi)$, яка враховує всі втрати ефективності збудження крутильних хвиль перетворювачем, схему якого наведено на рис. 1. Функцію $W_{\text{зан}}(k_s, \Pi)$ будемо називати передавальною (частотною) характеристикою ЕМАП в режимі збудження недиспергуючих крутильних хвиль.

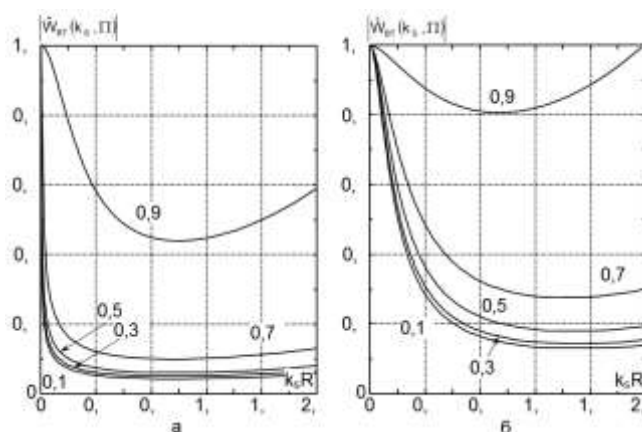


Рисунок 3 – Зміна коефіцієнта втрат ефективності збудження крутильних хвиль через скін-ефект
а) $r_2 = 14,3 \text{ МСм/м}$; б) $r_2 = 1 \text{ См/м}$

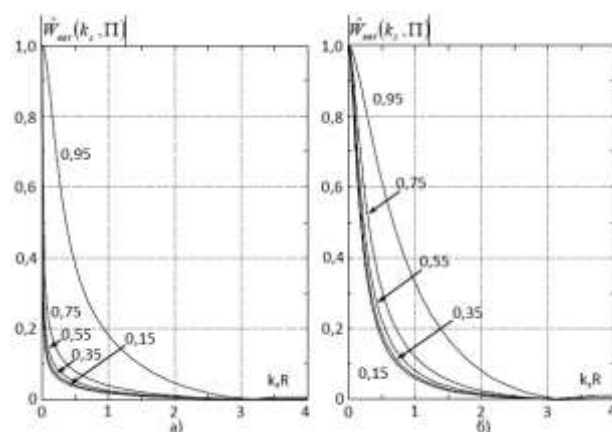


Рисунок 4 – Графіки модуля функції, яка враховує втрати ефективності збудження крутильних хвиль перетворювачем: а) $r_2 = 14,3 \text{ МСм/м}$; б) $r_2 = 1 \text{ См/м}$

На основі аналізу наведених даних було встановлено, що в порожніх феромагнітних стрижнях з товстими стінками індуються істотні вихрові струми, які вже на порівняно низьких частотах істотно зменшують амплітудні значення радіального компоненту $H_\rho^*(\rho, z)$ змінного магнітного поля в об'ємі і на поверхні порожнього феромагнітного стрижня. Зменшення значень $H_\rho^*(\rho, z)$

супроводжується збільшенням області, де можна спостерігати помітні значення радіальних компонентів змінного магнітного поля, що призводить до різкого зменшення лінійної щільності зовнішніх обертових моментів при збільшенні частоти зміни знаку змінного магнітного поля.

Граничний перехід показує, що при $k_s = 0$ ($\omega = 0$) передавальна характеристика випромінювача $W_{\text{зан}}^{(2)}(0, \Pi) = 0$. Це дозволяє стверджувати, що наведений на рис. 5 варіант прохідного ЕМАП є самоузгодженим для випадків випромінювання і прийому крутильних коливань, тому ефект електромагнітно-акустичного перетворення є оборотним. Для проведення вимірювань та діагностики не буде потрібно використання двох перетворювачів.

Встановлено, що маніпулюючи геометричними параметрами моделі з двох зустрічно включених однакових котушок, можна управляти положенням максимального значення передавальної характеристики $W_{\text{зан}}^{(2)}(k_s, \Pi)$ на осі частот (безрозмірних хвильових чисел $k_s R$), збільшивши таким чином чутливість ЕМАП.

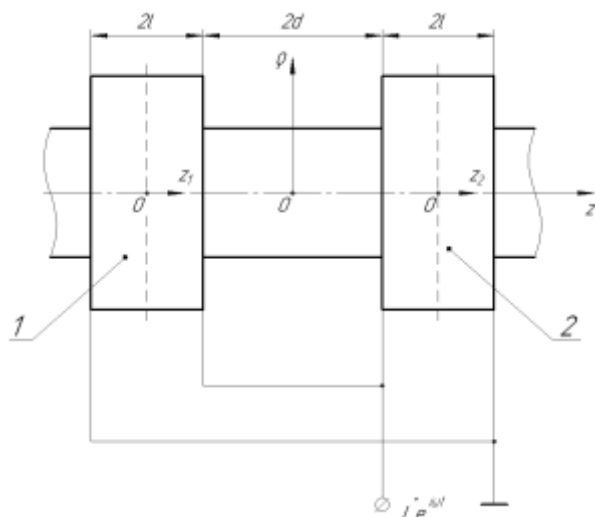


Рисунок 5 – Конструкція самоузгодженого прохідного ЕМАП: 1, 2 — котушки

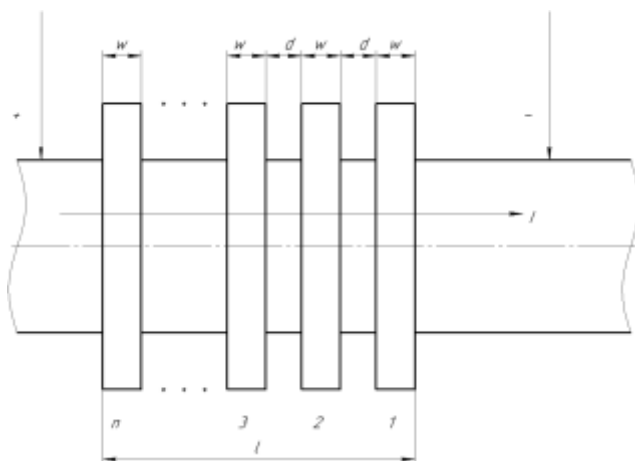


Рисунок 6 – ЕМА-перетворювач для збудження підсиленого сигналу

Збільшення кількості пар котушок в складі ЕМА перетворювача, включених згідно до змінного магнітного поля (інформаційного сигналу), що приймається, може додатково підвищити його чутливість.

Даний аналіз дозволяє сформулювати пропозиції щодо побудови ЕМА-перетворювача, заснованого на наведених принципах (рис. 6). Так, з аналізу результатів виконаних теоретичних досліджень випливає, що розміщення котушок,

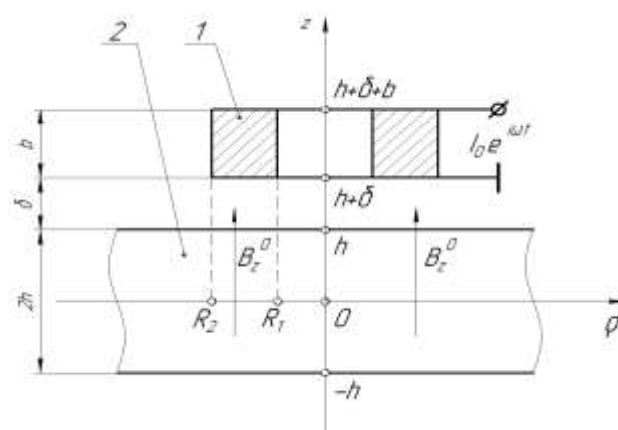


Рисунок 7 – Модель перетворювача електромагнітного типу:

1 – джерело змінного магнітного поля; 2 – шар з феромагнітного металу

Теоретичний аналіз частково виконано на основі моделі перетворювача електромагнітного типу (рис. 7), в якому джерело змінного магнітного поля утворене з витків дроту, який концентричними колами покладений в плоску котушку. Висота котушки – b , внутрішній і зовнішній радіуси укладання витків – R_1 та R_2 відповідно.

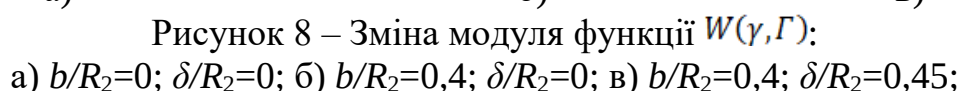
Інтегральному образу $A_\phi(\gamma, z)$ відповідає оригінал $A_\phi(\rho, z)$, який визначається за відомою величиною $A_\phi(\gamma, z)$ в результаті виконання зворотного інтегрального перетворення Ханкеля такого вигляду

за наступних граничних умов:

Отримано рівняння (6), яке задовольняє граничним умовам (7), має такий вигляд

де $A_0 = -\mu_0 I_0 N W(\gamma, \Gamma) e^{-\gamma h} / (2\gamma^2)$; $W(\gamma, \Gamma)$ – функція, яка визначає вплив геометричних параметрів (символ Γ) котушки на характер розподілу змінного магнітного поля в просторі. Ця функція визначається наступним виразом

На рис. 8 показані графіки модуля функції $W(\gamma, \Gamma)$, який визначався при різних значеннях $\mathcal{R}_2$, тобто безрозмірного параметра інтегрального перетворення.



Для накладного перетворювача (рис. 9) стан магнітного поля отриманий через розкладання вектору напруженості на складові. Рівняння Максвелла в обсязі струмопровідного феромагнетика записуються в наступному вигляді

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H}^*(\rho, z) &= \vec{J}^*(\rho, z), \\ \operatorname{rot} \vec{E}^*(\rho, z) &= -i\omega \vec{B}^*(\rho, z), \end{aligned} \quad (10)$$

де $\vec{J}^*(\rho, z) = \vec{e}_\phi J_\phi^*(\rho, z)$ – амплітудне значення вектора щільності вихрового струму провідності; $\vec{E}^*(\rho, z)$ – амплітуда вектора напруженості вихрового електричного поля; $\vec{B}^*(\rho, z) = \vec{e}_\lambda \mu_{\lambda\beta}^\varepsilon H_\beta^*(\rho, z)$ ($\beta, \lambda = \rho, z$; $\rho \Leftrightarrow 1$; $z \Leftrightarrow 3$) – амплітудне значення вектора магнітної індукції; $\vec{e}_\lambda$ – одиничний вектор (орт) циліндричної системи координат.

На основі інтегральних образів отриманий вираз:

$$H_\rho^*(\gamma, z) = C e^{\zeta z} + D e^{-\zeta z}, \quad (11)$$

де C і D – константи, що підлягають визначенню.

Для розрахунку дійсної частини комплексної величини $J_\phi^*(\rho, z')$ було отримано такий вираз:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} J_\phi^*(\rho, z') &\cong \\ &\cong \int_0^{x_{\max}} \operatorname{Re} \left[\frac{(\zeta^{*2} - \mu_1^\varepsilon x^2 / \mu_3^\varepsilon)}{(\zeta^* + \mu_1^\varepsilon x / \mu_0)} e^{\zeta^* z^*} \right] \cdot W(x, \Gamma^*) J_1(x \rho^*) dx \end{aligned} \quad (12)$$

На рис. 10 показані результати обчислень за формулою (12). З наведених даних можна зробити висновок, що координата z'_{0J} площини нульових значень дійсної частини комплексної щільності вихрового струму провідності не збігається з координатою z'_0 площини інверсії знаку дійсних значень компонентів вектора напруженості змінного магнітного поля.

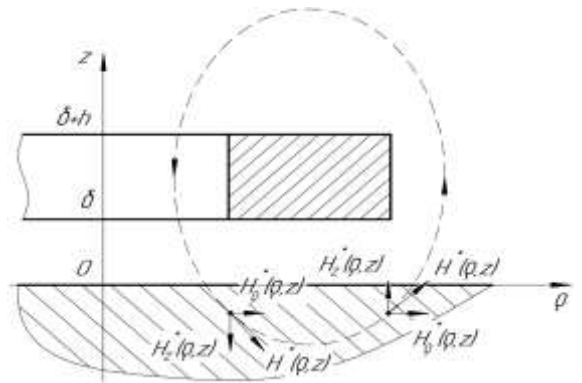


Рисунок 9 – Зміна в просторі значень компонентів вектора напруженості магнітного поля

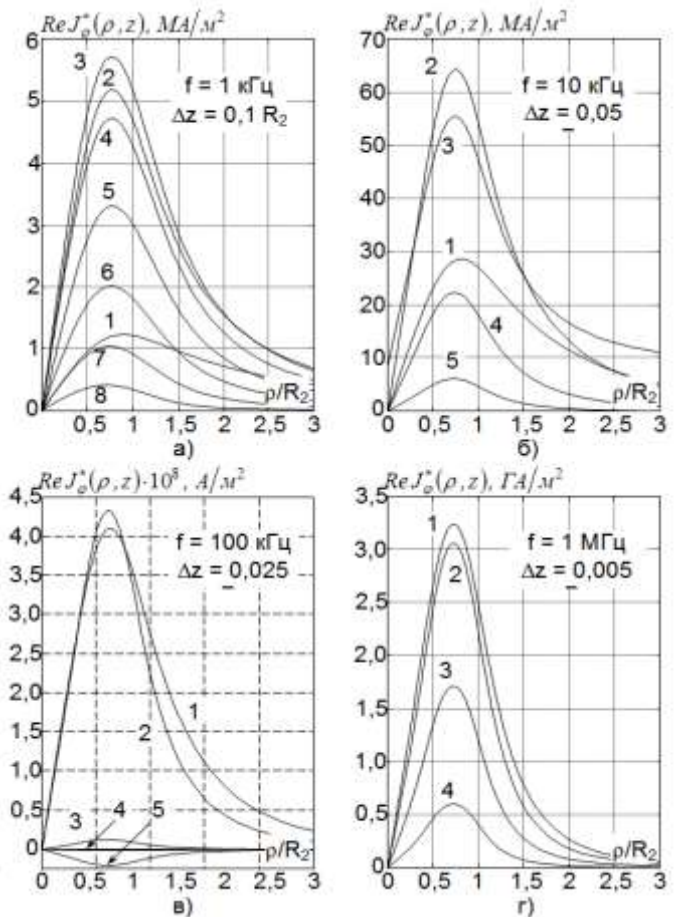


Рисунок 10 – Розподіл вихрового струму провідності всередині виробу і на поверхні

а) $f=1$ кГц; $\Delta z=0,1R_2$; б) $f=10$ кГц; $\Delta z=0,05R_2$; в) $f=100$ кГц; $\Delta z=0,025R_2$; г) $f=1$ МГц; $\Delta z=0,005R_2$;

В обсязі феромагнетика сили Джоуля характеризуються вектором об'ємної щільності $\vec{f}^D(\rho, z')e^{i\omega t}$, амплітудні значення компонентів якого визначаються наступними виразами:

$$f_\rho^D(\rho, z) = \frac{\partial \sigma_{\rho\rho}^D(\rho, z)}{\partial \rho} + \frac{\partial \sigma_{\rho z}^D(\rho, z)}{\partial z} + \frac{1}{\rho} [\sigma_{\rho\rho}^D(\rho, z) - \sigma_{\phi\phi}^D(\rho, z)], \quad (13)$$

$$f_z^D(\rho, z) = \frac{\partial \sigma_{z\rho}^D(\rho, z)}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \sigma_{z\rho}^D(\rho, z) + \frac{\partial \sigma_{zz}^D(\rho, z)}{\partial z}. \quad (14)$$

Для розрахунку інтегральних образів силових факторів, які діють в скіншарі і в об'ємі намагніченого, тобто анізотропного за магнітними властивостями металу, і які є джерелами ультразвукових хвиль використано наступні розрахункові вирази:

а) пондеромоторні сили електромагнітного поля:

$$\sigma_{z\rho}^M(\gamma, 0) = \frac{I_0 N B_z^0}{\gamma} \cdot \frac{\zeta W(\gamma, \Gamma)}{(\zeta + \mu_1^\varepsilon \gamma / \mu_0)},$$

$$\sigma_{zz}^M(\gamma, 0) = -\frac{I_0 N B_z^0}{\gamma} \cdot \frac{\mu_1^\varepsilon \gamma / \mu_3^\varepsilon}{(\zeta + \mu_1^\varepsilon \gamma / \mu_0)} W(\gamma, \Gamma), \quad (15)$$

$$f_\rho^L(\gamma, z) = \frac{I_0 N B_z^0}{\gamma} \cdot \frac{i\omega r_2 \mu_1^\varepsilon}{(\zeta + \mu_1^\varepsilon \gamma / \mu_0)} W(\gamma, \Gamma) e^{\zeta z}, \quad f_z^L(\gamma, z) = 0; \quad (16)$$

б) поверхневі та об'ємні сили Джоуля:

$$\sigma_{z\rho}^D(\gamma) = \frac{(m_1 - m_2) I_0 N B_z^0}{2\mu_2^\varepsilon} \cdot \frac{\zeta W(\gamma, \Gamma)}{\gamma (\zeta + \mu_1^\varepsilon \gamma / \mu_0)}, \quad \sigma_{zz}^D(\gamma) = -\frac{m_1 I_0 N B_z^0}{\mu_2^\varepsilon} \cdot \frac{\mu_1^\varepsilon \gamma / \mu_3^\varepsilon}{\gamma (\zeta + \mu_1^\varepsilon \gamma / \mu_0)} W(\gamma, \Gamma), \quad (17)$$

$$f_\rho^D(\gamma, z') \approx \frac{(m_1 - m_2)}{2\mu_3^\varepsilon} B_z^0 \frac{\zeta}{\gamma} I_0 N W_K(\gamma, \Gamma) e^{\zeta z'}, \quad (18)$$

$$f_z^D(\gamma, z') \approx \left[\frac{(m_1 - m_2)}{2\mu_3^\varepsilon} - \frac{m_1 \mu_1^\varepsilon}{(\mu_3^\varepsilon)^2} \right] B_z^0 I_0 N W_K(\gamma, \Gamma) e^{\zeta z'}. \quad (19)$$

На рис. 11 показані графіки зміни радіального (рис. 11, а, б) і аксіального (рис. 11, в, г) компонентів вектору об'ємної щільності сил Джоуля, які розраховувалися за формулами (18) та (19) при тих же значеннях параметрів впливів індуктора, що і криві, наведені на рис. 10.

В режимі прийому ультразвукових хвиль, що поширюються в феромагнетик, поляризованому постійним магнітним полем $\vec{H}^0(x_k)$, реалізується наступний ланцюжок перетворень

$$\vec{u}(x_k) e^{i\omega t} \Rightarrow \vec{M}(x_k) e^{i\omega t} \Rightarrow \Phi e^{i\omega t} \Rightarrow U_0(\omega) e^{i\omega t}, \quad (20)$$

Якщо метал, що деформується, не є феромагнетиком, тоді реалізується дещо інший ланцюг перетворень

$$\vec{u}(x_k) e^{i\omega t} \Rightarrow \vec{j}^*(x_k) e^{i\omega t} \Rightarrow \vec{H}(x_k) e^{i\omega t} \Rightarrow \Phi e^{i\omega t} \Rightarrow U_0(\omega) e^{i\omega t}, \quad (21)$$

Амплітуда $U_{\text{вих}}(\omega)$ вихідного сигналу приймача визначається (рис. 11) як

$$U_{\text{вих}}(\omega) = \frac{U_0(\omega)Z_n}{Z_{np} + Z_n}, \quad (22)$$

де Z_{np} – комплексний електричний опір електричного контуру перетворювача електромагнітного типу.

Компоненти вектора $\vec{H}(\rho, z)$ напруженості внутрішнього магнітного поля повністю визначаються наступними формулами

$$H_\rho(\rho, z) = -iP \frac{\mu_3^\varepsilon \gamma I_1(\xi \rho)}{\mu_1^\varepsilon \xi F(\gamma, \xi)} e^{-i\gamma z},$$

$$H_z(\rho, z) = -P \frac{I_0(\xi \rho)}{F(\gamma, \xi)} e^{-i\gamma z}. \quad (23)$$

Компоненти вектора $\vec{M}(\rho, z)$ динамічної намагніченості поздовжньо намагніченого феромагнітного стрижня визначаються наступними розрахунковими формулами

$$M_\rho(\rho, z) = M_\rho(\rho) e^{-i\gamma z} = \left(\frac{\mu_1^\varepsilon}{\mu_0} - 1 \right) H_\rho(\rho) e^{-i\gamma z}, \quad (24)$$

$$M_z(\rho, z) = M_z(\rho) e^{-i\gamma z} = \left\{ \frac{1}{\mu_0} B_z^v(\rho) + \left(\frac{\mu_3^\varepsilon}{\mu_0} - 1 \right) H_z(\rho) \right\} e^{-i\gamma z}. \quad (25)$$

З наведеного в роботі було визначено можливість підсилення прийнятого сигналу з використанням послідовності приймальних котушок, розміщення та розмір яких пов'язані з характеристиками сигналу, що приймається (і, відповідно, збуджується) відповідно до схеми, наведеної на рис. 12.

Так, прийнятий сигнал підсилюється кожною наступною секцією обмотки, що дозволяє істотно підсилити амплітудну характеристику

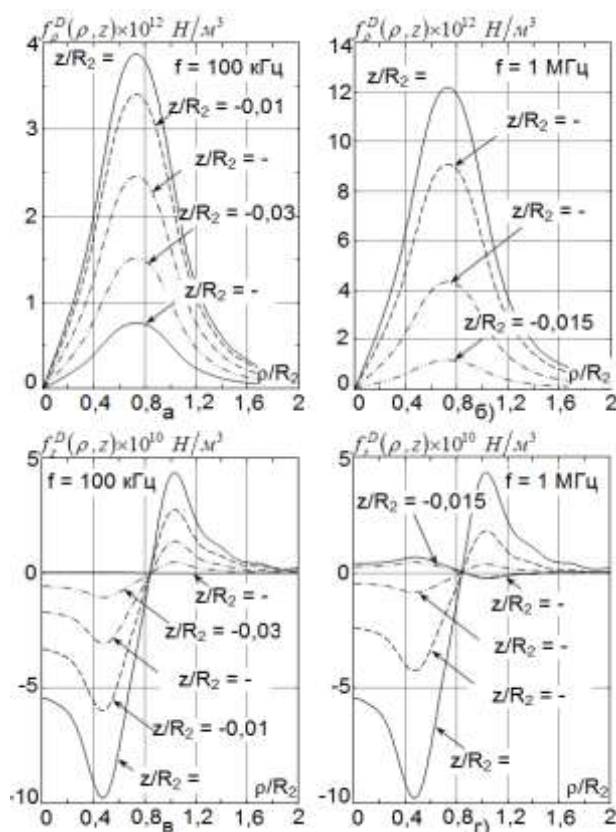


Рисунок 11 – Компоненти вектора об'ємної щільності сил Джоуля
а) радіальний компонент, $f = 100 \text{ кГц}$; б) радіальний компонент, $f = 1 \text{ МГц}$; в) аксіальний компонент, $f = 100 \text{ кГц}$; г) аксіальний компонент, $f = 1 \text{ МГц}$;

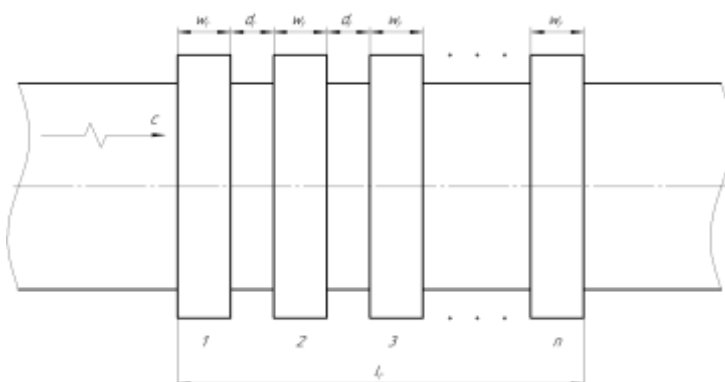


Рисунок 12 – Схема підсилення прийнятого сигналу системою приймальних котушок, розташованих з урахуванням характеристик сигналу

інформаційної частини прийнятого сигналу відносно завад, які апріорно не можуть знаходитись у геометричній узгодженості з приймальним контуром.

Таким чином стає можливим налаштування шляхом регулювання частоти високочастотного струму для компенсації впливу зміни фізико-механічних властивостей металу.

У третьому розділі наведено дані про хід та результати експериментальних досліджень.

Для проведення експериментальних досліджень було розроблено макет засобу для збудження і прийому поверхневих високочастотних ультразвукових імпульсів ЕМА способом. В роботі перетворювачів ЕМА типу зазвичай використовуються котушки, такі, як наведено на рис. 13 (1 – для трубчастих виробів та стрижнів; 2 – для листів та труб великого діаметру, резервуарів тощо).

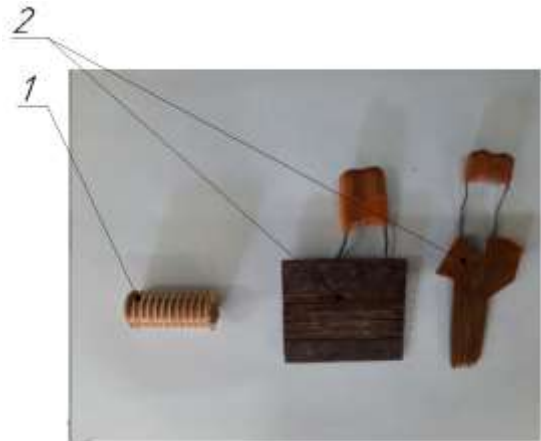


Рисунок 13 – Зображення котушок індуктивності, які використано при експериментальних дослідженнях: 1 – для трубчастих виробів та стрижнів; 2 – для листів

Розроблений стенд, рис. 14, включає формувач 1, який збуджує пакетний радіоімпульс з заданою високою частотою заповнення, заданою тривалістю цього імпульсу та заданою частотою повторювання зондування. Вихідний сигнал блоку 1 посилюється широкосмуговим пристроєм, який формує імпульсний високочастотний піковий струм в індукторі ЕМАП 2 величиною до 200 А, таким чином в об'єкті контролю (ОК, 3) формується сигнал. Сигнал приймається через підсилювач (4) та виводиться на екран осцилографа 5.



Рисунок 14 – Стенд для збудження і прийому поверхневих ультразвукових імпульсів ЕМА способом

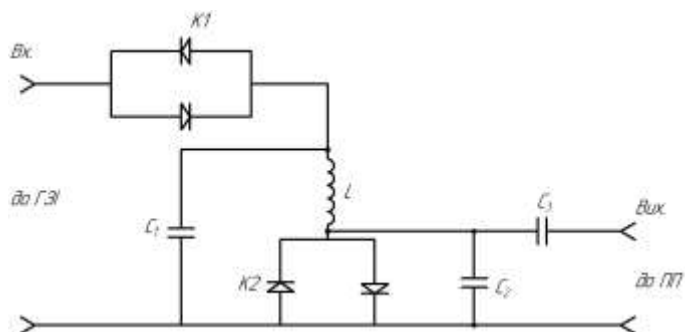


Рисунок 15 – Електрична принципова схема підключення високочастотної котушки індуктивності ЕМА перетворювача

На рис. 16, а позначені: 1 – корпус; 2 і 3 – джерела постійного магнітного поля; 4 і 5 – високочастотні котушки індуктивності; 6 – неелектропровідна неферромагнітна основа; 7 – протектор; 8 і 9 – електромагнітні екрани; 10 і 11 – з'єднувальні провідники; 12 і 13 – з'єднувачі; ОК – об'єкт контролю.

На рис. 16, б наведено розташування високочастотних котушок індуктивності роздільно-поєднаного електромагнітно-акустичного перетворювача для контролю імпульсами хвиль Релея та Лемба в неелектропровідній неферромагнітній основі ЕМАП.

Визначено, що відносне значення завад складає 0,2 (рис. 17). Визначене відносне значення першого прийнятого відбитого імпульсу складає 7,93. Таким чином для першого відбитого імпульсу відношення сигналу до завад складає 39,65. Для другого відбитого імпульсу (відносне значення амплітуди 4,03) це значення складає 20,15.

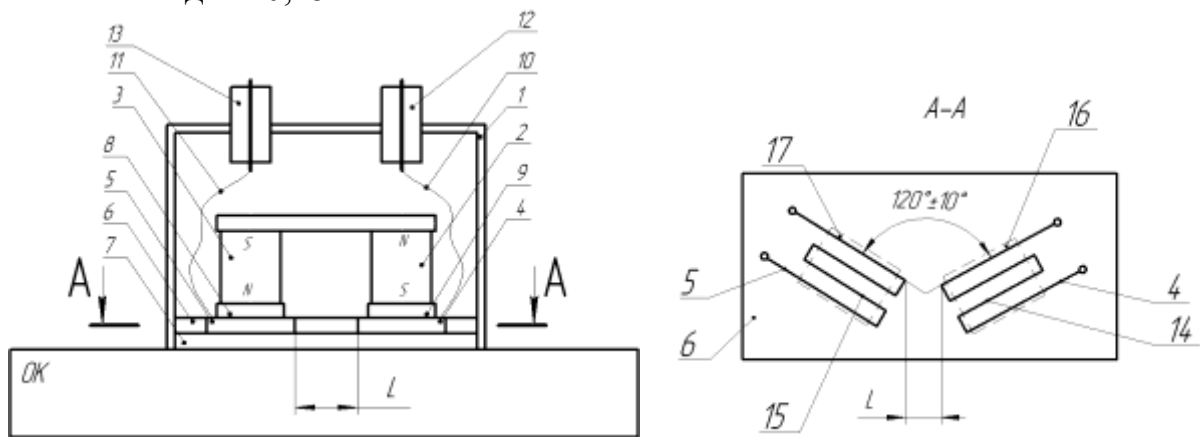


Рисунок 16 – Роздільно-суміщений ЕМА перетворювач для ультразвукового контролю імпульсами хвиль Релея або Лемба

Було визначено, що для отримання максимальної величини стуму живлення в збуджуючій котушці індуктивності, при тій же потужності генератора зондуючи імпульсів, створювався резонансний контур шляхом підключення конденсатора. Важливим аспектом розрахунку є необхідність відповідності кроку s розташування робочих ділянок котушки індуктивності резонансній частоті створеного контуру та частоті струму живлення, збуджуваного генератором зондуючих пакетів імпульсів, що обчислюється як

$$s = \frac{c_r}{f} = C_r / \left(2\pi \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \right), \quad (26)$$

де C_r – швидкість розповсюдження хвиль Релея в матеріалі, який контролюється; f – частота заповнення пакетних імпульсів струму живлення ЕМАП; L – індуктивність збуджуючої високочастотної котушки з урахуванням провідників підключення та вихідної індуктивності генератора живлення та з урахуванням розташування високочастотної котушки біля поверхні електропровідного матеріалу; C – ємність контуру з урахуванням провідників підключення та вихідної ємності генератора живлення та з урахуванням розташування високочастотної котушки біля поверхні електропровідного матеріалу; R – електричний опір контуру з урахуванням провідників підключення та вихідного опору генератора живлення та з урахуванням

розташування високочастотної котушки біля поверхні електропровідного матеріалу.

Кількість робочих секцій високочастотних котушок індуктивності для збільшення амплітуди корисного сигналу доцільно обирати як можна більшою. При значному збільшенні амплітуда відбитого від дефекту сигналу практично не зростає, а неконтрольована («мертва») зона біля перетворювача збільшується. При

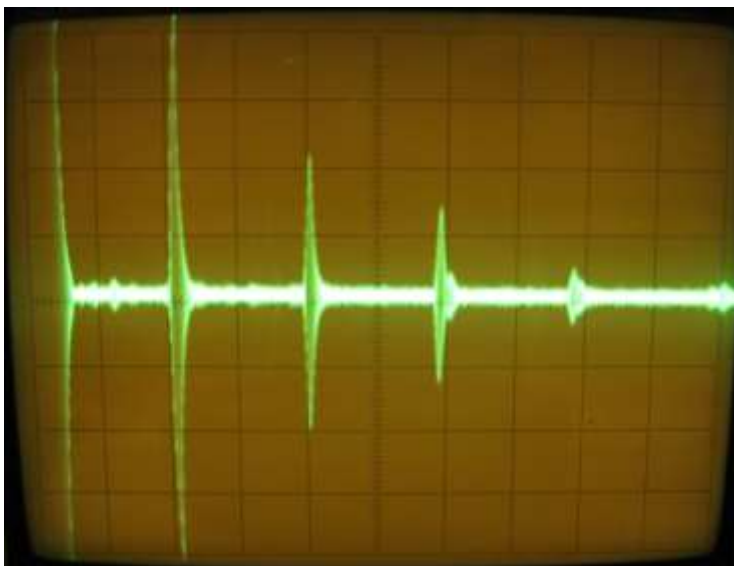


Рисунок 17 – Часова розгортка на екрані осцилографа при багатократному оббіганні поверхні труби

дослідженнях частота ультразвукових коливань становила 0,9 МГц, струм в збуджуючій котушці 60 А, максимальна тривалість

зонduючого імпульсу – 16 періодів частоти заповнення пакету (частоти ультразвукових хвиль). Товщина протектора – 0,5 мм. Кількість витків дроту в кожній секції збуджуючій котушці – 10, а в кожній секції приймаючої котушки – 20.

Встановлено, що кількості робочих секцій високочастотних котушок в розробленому ЕМАП не повинні перевищувати 6, оскільки амплітуда відбитого від дефекту сигналу практично не зростає, а неконтрольована («мертва») зона біля перетворювача збільшується. Амплітуда прийнятого сигналу в основному залежить від кількості витків в котушці. Так, для збуджуючої котушки, де кількість витків в кожній секції менше, кількість секцій може бути більше. В приймаючій котушці, де кількість витків у кожній секції більше, кількість секцій повинна бути менше.

Часова тривалість зонduючих ультразвукових імпульсів встановлювалася за кількістю періодів частоти заповнення. Для встановлення раціонального значення тривалості пакетних зонduючих імпульсів було виконано експериментальні дослідження. Для визначення впливу потужності ГЗІ на величину корисного сигналу виконано дослідження для кількості імпульсів n на трьох фіксованих відстанях між ЕМАП і відбивачем ($l = 50, 100$ і 150 мм). Застосований ГЗІ дозволяє змінювати потужність сигналу збудження поступово з кроком в 20%.

Подальші дослідження були спрямовані на визначення впливу величини зазору h і кутів перекосів α перетворювача щодо стандартного зразка на рівень прийнятого корисного сигналу. Залежність прийнятого корисного сигналу від

величини зазору h на відстані $l = 100$ мм, при $n = 6$, $W = 100\%$ і $f = 0,9$ МГц наведено на рис. 18. На рис. 19 наведено залежність напруги і струму на ЕМАП від потужності генератора зондуючих імпульсів. На рис. 20 наведено залежність амплітуди корисного сигналу від потужності генератора зондуючих імпульсів. На рис. 21 наведено залежність величини корисного сигналу від діелектричного (повітряного) прошарку між протектором ЕМАП і поверхнею виробу. З аналізу наведених даних можна зробити висновок, що збільшення величини зазору призводить до зменшення амплітуди прийнятого сигналу. Це пояснюється ефектом експоненціального послаблення електромагнітних полів, сформованих високочастотною котушкою ЕМА перетворювача при віддаленні від джерела. Традиційним методом боротьби з цією похибкою є використання заходів зі стабілізації встановленої величини зазору.

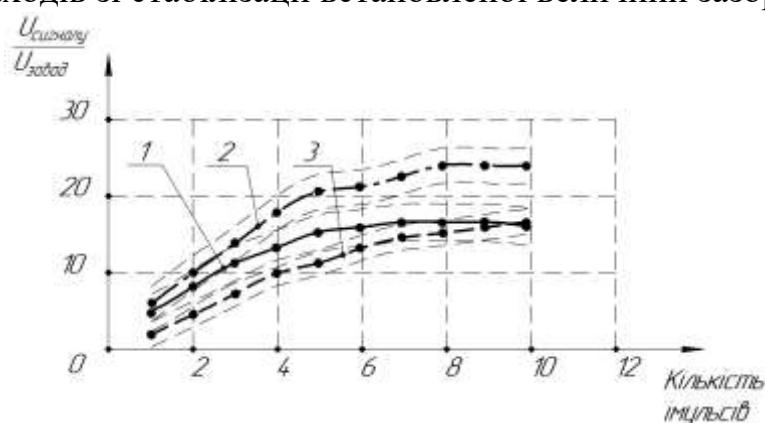


Рисунок 18 – Експериментальна залежність амплітуди відбитого сигналу від кількості періодів частоти заповнення в пакеті при різних відстанях до моделі дефекту: 1 – $L = 50$ мм; 2 – $L = 100$ мм; 3 – $L = 150$ мм

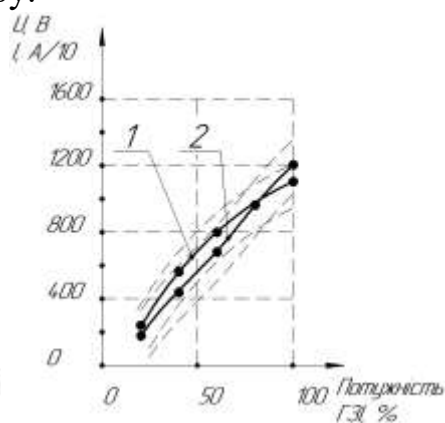


Рисунок 19 – Залежність напруги і струму на ЕМАП від потужності генератора зондуючих імпульсів: 1 – напруга, прикладена до перетворювача; 2 – струм, що протікає через перетворювач

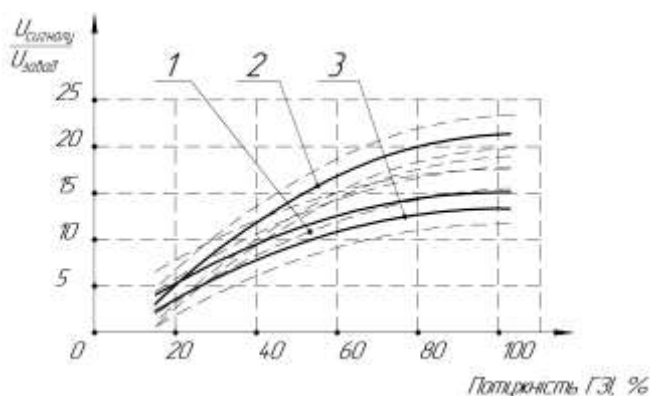


Рисунок 20 – Залежність амплітуди корисного сигналу від потужності генератора зондуючих імпульсів: 1 – $L = 50$ мм; 2 – $L = 100$ мм; 3 – $L = 150$ мм

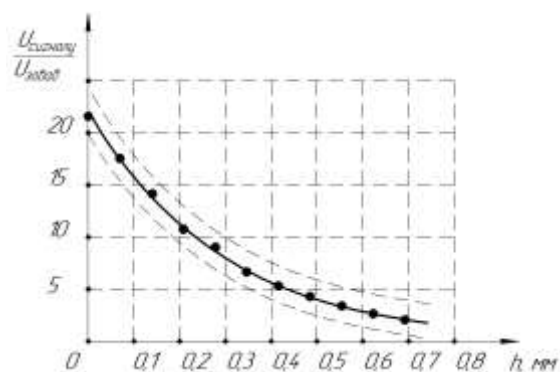


Рисунок 21 – Залежність величини корисного сигналу від повітряного прошарку між протектором ЕМАП і поверхнею ОК

Розкриття діаграми спрямованості на рівні 0,7 не перевищує 5° (рис. 22). Оскільки максимальний сигнал від моделі дефекту з'являється в напрямку центрального променя, то бокові пелюстки діаграми спрямованості, амплітуда

від яких приблизно в 10 разів менше, не будуть впливати на здатність виявляти дефекти поверхні об'єкта контролю (ОК).

Для аналізу ефективності роботи ЕМА перетворювача розробленого типу при ультразвуковому контролі різних виробів, різної форми з різних матеріалів був розроблений і виготовлений новий стенд, блок-схема якого показана на рис. 23. Він містить задаючий генератор (ЗГ) 1, який з'єднаний з генератором зондуючих імпульсів (ГЗІ) 2. ГЗІ 2 з'єднаний з входом електромагнітно-акустичного перетворювача (ЕМАП) 3, що розташовується над ОК 4. Вихід ЕМАП 3 з'єднаний з малошумливим попереднім підсилювачем (ПУ) 5. Вихід ПУ 5 з'єднаний з входом осцилографа 6, який синхронізується сигналом з ЗГ 1. ЗГ 1 також з'єднаний з блоком джерела магнітного поля імпульсного магніту (БДМПІМ) 7, підключеного до входу обмотки імпульсного магніту ЕМАП 3.

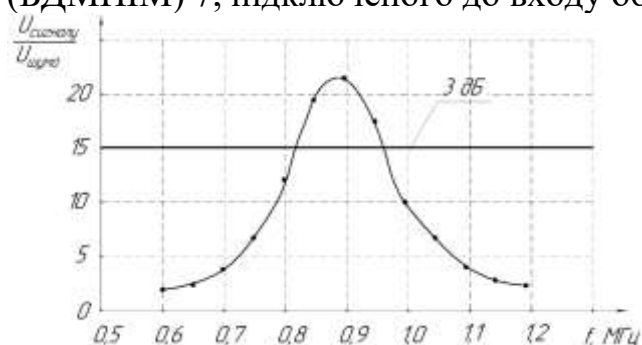


Рисунок 22 – Амплітудно-частотна характеристика суміщеного ЕМАП для збудження і прийому пакетних імпульсних поверхневих ультразвукових хвиль

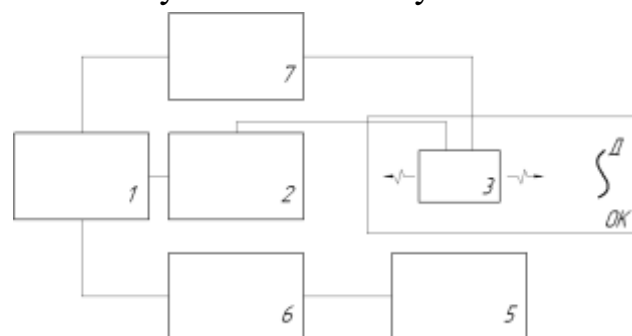


Рисунок 23 – Блок-схема стенду для експериментальних досліджень при ультразвуковому контролі ОК з великими площами поверхні

Була досліджена дальність поширення хвиль Релея на незачищених поверхнях виробів в стані після прокатки і після експлуатації на частотах в діапазоні 0,2...1 МГц. Сигнал, достатній за амплітудою для оцінки якості поверхні, приймається на відстанях до 3...5 м як на плоскій поверхні (лист з іржавою поверхнею), рис. 24, а, так і на поверхні з кривизною (труба), рис. 24, б. Частота в обох випадках складала частота 0,9 МГц. Отже, при кожному зондуванні ультразвуковим імпульсом можна контролювати значну площу виробу, підвищуючи тим самим якість і продуктивність ультразвукового контролю.

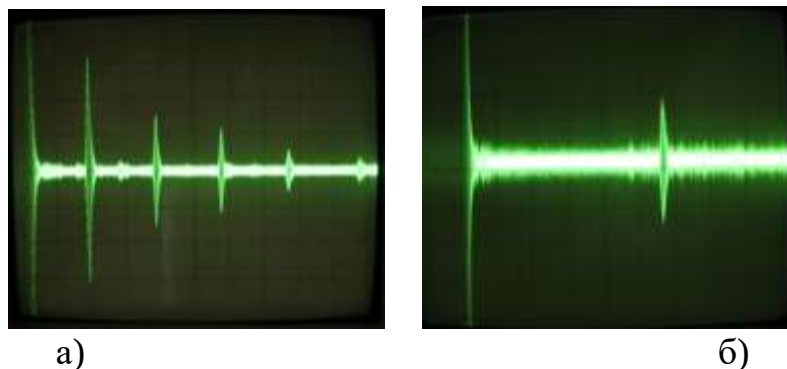


Рисунок 24 – Сигнали, отримані: а) від торця плоскої поверхні листа; б) на поверхні периметра круглої заготовки 170 мм

Стенд для ультразвукового контролю листових виробів показаний на рис. 25. Стенд у застосуванні до листового виробу показаний на рис. 25, а. Реалізація сигналу для випадку бездефектної ділянки наведена на рис. 25, б.

Випадок реалізації за наявності поверхневого дефекту у вигляді риски розмірами $35 \times 1 \times 2,2$ мм (рис. 25, в) наведено на рис. 25, г. У наведених дослідженнях використана більш низька частота ультразвукових імпульсів (частота заповнення в пакеті імпульсів збудження дорівнює 300 кГц), оскільки поверхня листа була вражена корозією. На рис. 25, б, г і відповідно на всіх наступних рисунках з часовими розгортками на екрані осцилографа цифрою 1 позначений зондуєчий імпульс, 2 – імпульс від торця виробу і 3 – імпульс від моделі дефекту.

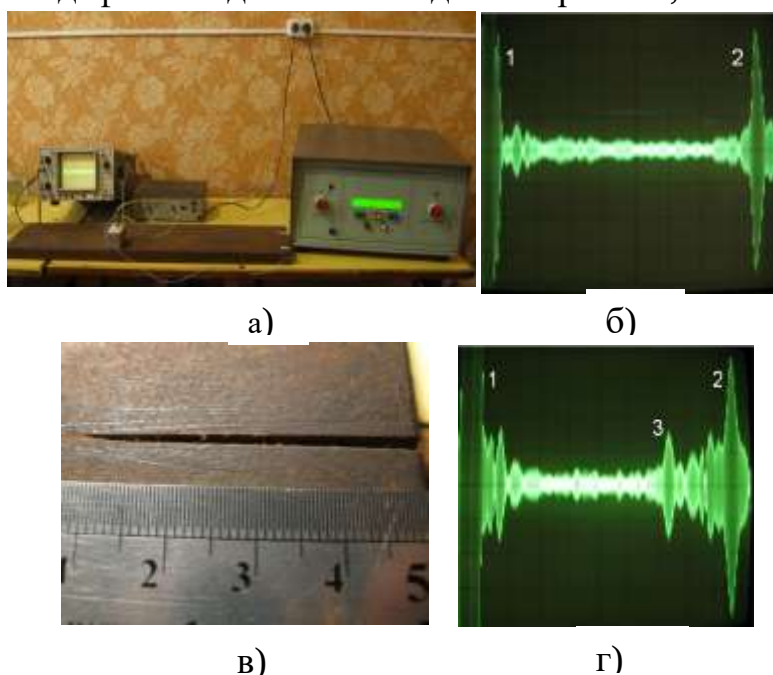


Рисунок 25 – УЗК листових виробів:
а) стенд; б) реалізація для бездефектної ділянки; в) поверхневий дефект риска $35 \times 1 \times 2,2$ мм;
г) реалізація для дефектної ділянки

Фото дефектів і відповідні їм часові розгортки для випадків наявності поверхневих дефектів у вигляді риски розмірами $60 \times 0,2 \times 1$ мм, отвори діаметром 2,8 мм, забоїни, глибиною до 0,4 мм, наведено відповідно на рис. 26, а, б, в.

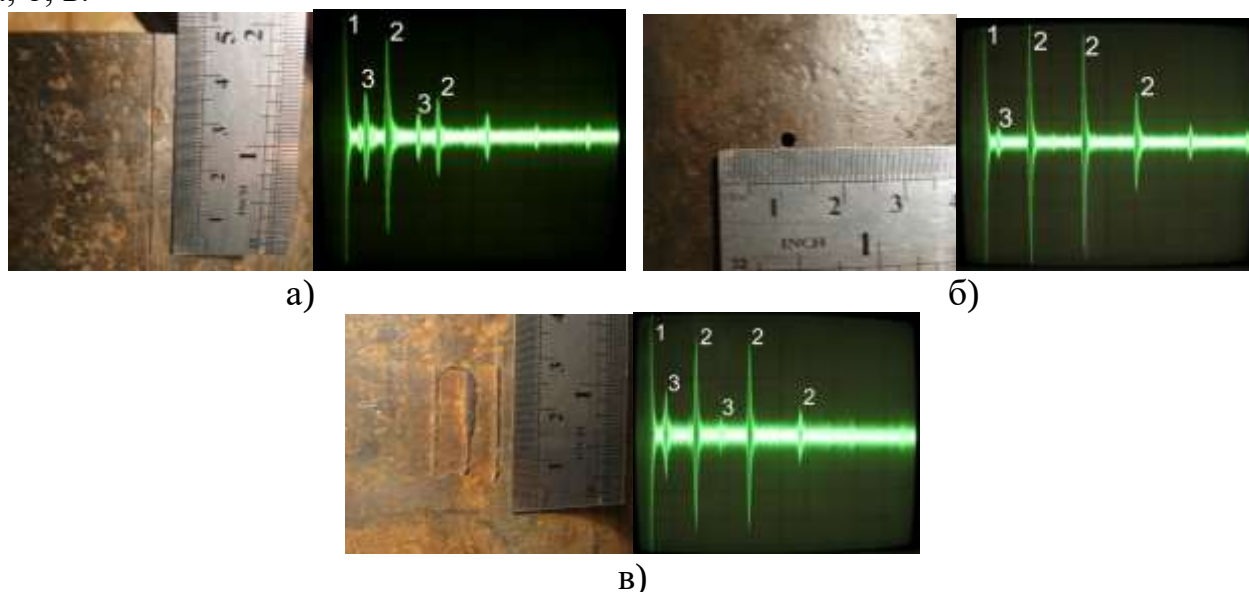


Рисунок 26 – Дефекти і відповідні їм часові розгортки на екрані осцилографа:
а) тріщина; б) циліндричний отвір; в) подряпина

У четвертому розділі наводяться дані про розроблені технічні та технологічні рішення щодо створення та використання ЕМА перетворювачів. В межах розділу наведено і описано 11 методів та 14 пристроїв, в тому числі:

- Метод та інформаційно-вимірювальні електромеханічні перетворювачі для оцінки якості поверхні феромагнітних металовиробів ультразвуковими хвилями Релея з підвищеною чутливістю, в основу яких поставлено задачу підвищення чутливості ультразвукового електромагнітно-акустичного контролю поверхні металічних виробів зі значною площею, які мають прямолінійні ділянки кромки.

- Метод та електромагнітно-акустичний перетворювач для виявлення поверхневих і підповерхневих дефектів з використанням імпульсів хвиль Релея, для реалізації якого збуджуючий і приймальний ЕМА перетворювачі виготовляються окремо, а узгодження збуджуючого перетворювача з виходом генератора зондуючих імпульсів і приймального перетворювача з входом підсилювача можна оптимізувати. Таким чином виключається вплив потужного зондуючого імпульсу на вхід підсилювача корисного сигналу. При дослідженнях зразків обсадної труби діаметром 168 мм і товщиною стінки 10,4 мм (сталі ГОСТ 632-80) з моделями дефектів у вигляді пазів різної глибини, довжини і розкриття, розташованих на зовнішній і внутрішній сторонах, і свердлень, амплітуда прийнятого сигналу поверхневої хвилі знаходилася в інтервалі 8...53 дБ. На чавунній гільзі для двигунів вантажівок діаметром 132 мм і товщиною стінки 7 мм з дефектом у вигляді поздовжнього пазу на зовнішній поверхні довжиною 28 мм, розкриттям 0,15 мм і глибиною 0,3 мм, амплітуда імпульсу становила 9,4 дБ. На трубах зі сталі Ст. 3, 45 і легованої сталі діаметрами 51,3; 32; 28; 24 і 17 мм, з товщиною стінок 1; 2; 2,5; 3,5 і 6,3 мм і моделями дефектів глибиною 0,2...0,4 мм, а також з натуральними тріщинами різних розмірів, амплітуда корисного сигналу перебувала в інтервалі 5,7...54 дБ. Експериментальні дослідження проводилися по поверхні без застосування зачистки на частотах 2,3...4,8 МГц.

- Метод ультразвукового електромагнітно-акустичного контролю феромагнітних металовиробів зі складною формою перетину з невеликим розміром дозволяє виконувати контроль шляхом формування ультразвукових імпульсів недиспергуючих крутильних хвиль шляхом одночасного збудження поляризованого магнітного поля та збудження високочастотного електромагнітного поля високочастотною прохідною котушкою, що повторює форму перетину виробу, прийом з виробу ультразвукових імпульсів високочастотною прохідною котушкою при дії поляризованого магнітного поля і прийняття рішення про якість виробу.

- Метод безконтактного ультразвукового ЕМА контролю металічних виробів імпульсами поверхневих хвиль, розроблений у поєднанні з суміщенням ЕМАП для контролю імпульсами ультразвукових поверхневих хвиль. У методі пропонується сканування поверхні виробу електромагнітно-акустичним перетворювачем переважно вздовж виробу в середній його частині. Збуджують одночасно двонаправлені в протилежних напрямках імпульси ультразвукових коливань. Відбиті імпульси поверхневих ультразвукових хвиль приймають тим

же або іншим ЕМАП і аналізують їх характеристики. При появі імпульсів відбитих від дефектів поверхні виробу послідовно збуджують і приймають ультразвукові імпульси тільки в одному з визначених протилежно направлених напрямків, що дозволяє визначити координати місцеположення виявленого дефекту та його умовні розміри за характеристиками прийнятих однонаправлених ультразвукових імпульсів.

– Електромагнітно-акустичний перетворювач для контролю трубчастих неферомагнітних металовиробів з перетином у вигляді кола, який реалізується за допомогою збудження ультразвукових хвиль в неферомагнітному ОК через розміщення джерела поляризовуючого магнітного поля в центрі ОК. При цьому джерело магнітного поля виконується у вигляді провідника постійного струму. Силкові магнітні лінії такого джерела мають форму кола, а розміщення джерела в центрі трубчастого виробу забезпечує формування поляризовуючого кругового магнітного поля в поверхневому шарі ОК.

– Суміщений електромагнітно-акустичний перетворювач для контролю металовиробів імпульсами ультразвукових поверхневих хвиль має корпус, закріплені в ньому джерело постійного магнітного поля, плоску високочастотну котушку індуктивності з робочими ділянками, яка виконана у зигзагоподібній формі і розміщена в неелектропровідній неферомагнітній основі, та електромагнітний екран, що розміщений між джерелом постійного магнітного поля і плоскою високочастотною котушкою індуктивності. Така конструкція надає можливість ефективного контролю приповерхневих шарів у металовиробах.

У додатках наведено список публікацій здобувача та акти впровадження результатів.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання теоретичних, модельних та експериментальних досліджень і розробок вирішено важливу науково-практичну проблему зі створення основних положень збудження та прийому імпульсів ультразвукових поверхневих та нормальних хвиль в листах, трубах та стрижнях, виготовлених переважно з феромагнітного матеріалу, методів та засобів для їх контролю та діагностики.

Основні наукові та практичні результати отримані при виконанні дисертаційної роботи полягають в наступному.

1. Проведено аналіз існуючих теоретичних, модельних та експериментальних досліджень, методів та засобів безконтактного електромагнітно-акустичного контролю металовиробів, визначені їх недоліки та можливості застосування для подальшого удосконалення методів та засобів контролю та діагностики металовиробів. Визначено перспективність розробки та використання нових типів ЕМАП. Встановлено перспективність використання хвиль Релея, Лемба та хвиль нормального типу для дефектоскопії та діагностики. Підтверджено високу економічну ефективність використання електромагнітно-акустичних перетворювачів для контролю листів, труб та стрижнів, виготовлених переважно з феромагнітного матеріалу.

2. Розроблено математичну модель електромагнітно-акустичного перетворення електромагнітної енергії в акустичну переважно для феромагнітних металів, що містить пов'язані між собою хвильове рівняння, рівняння Максвелла і узагальнений закон Ома в диференціальній формі. У математичній моделі комплексно враховані характеристики електромагнітно-акустичного перетворювача, параметри збуджуваних сигналів і властивості досліджуваного матеріалу. На підставі встановлених зв'язків сформульовані концептуальні підходи щодо вирішення завдання конструювання ЕМА перетворювачів для збудження ультразвукових коливань.

Визначено вихідні положення, необхідні і достатні для знаходження характеристик зсувів пружних коливань, збуджених способом електромагнітно-акустичного перетворення.

Встановлено, що збільшення розмірів високочастотної котушки перетворювача призводить до звуження смуги збуджуваних частот, в якій відбувається ефективне перетворення електромагнітної енергії в енергію крутильних ультразвукових коливань.

3. Проведено математичне моделювання прохідного електромагнітно-акустичного перетворювача для збудження крутильних недиспергуючих пружних коливань в трубчатоподобних феромагнітних виробах з урахуванням характеристик перетворювача, властивостей об'єкта досліджень і взаємного розташування ЕМАП і виробу, яким показана необхідність поетапного знаходження взаємопов'язаних електромагнітних полів в різних областях моделі ЕМАП з урахуванням всіх факторів, що впливають на конструкцію прохідного перетворювача. Отримано рішення загального диференціального рівняння шляхом визначення значень електромагнітних полів в області між котушкою збудження перетворювача і трубчастим виробом. Визначено хвильова характеристика джерела змінного магнітного поля ЕМАП.

Створено алгоритми перетворення сигналів, які реалізуються в процесі прийому (реєстрації) ультразвукових хвиль в металах електромагнітним способом. Доведено теореми про наведений магнітний потік для металів неферомагнітних груп і феромагнетиків. На підставі цих теорем побудовані математичні моделі процесів реєстрації ультразвукових хвиль електромагнітним способом.

4. Знайдено рішення диференціального рівняння вимушених крутильних коливань в електропровідному феромагнітному стрижні (трубці), попередньо намагніченому в окружному напрямку, у вигляді виразу для лінійної щільності зовнішніх крутильних моментів. Отримано вираз для розрахунку амплітуд кутів поворотів поперечних перерізів у фронті бігучої недиспергуючої крутильної хвилі через абсолютну чутливість, коефіцієнт інтерференційних втрат і коефіцієнт втрат ефективності збудження крутильних хвиль, обумовлений вихровими струмами (скін-ефектом). Вираз враховує повний набір геометричних і фізико-механічних властивостей матеріалу полого феромагнітного стрижня, котушок і центрального провідника електричного струму, що дозволяє проектувати електромеханічні перетворювачі з урахуванням особливостей контролюваного трубчастого металовиробу.

Визначено в явному вигляді вирази для розрахунку силових факторів, які виникають при електромагнітному збудженні ультразвукових хвиль в струмопровідному аксіально намагніченому скін-шарі феромагнетика.

5. Оцінено збільшення механічної жорсткості попередньо намагніченого феромагнетика за рахунок пов'язаної дії сил пружності і сил магнітної взаємодії між полюсами доменів тонкому шарі феромагнетика, що деформується (ΔE -ефект). Визначено межі, при яких ΔE -ефект можна не враховувати в практичних розрахунках.

На підставі оцінок числових значень ΔE -ефекту запропонований метод послідовних наближень для розв'язання граничної задачі про перетворення високочастотного електромагнітного поля в поле пружних хвиль в мікротовщинних шарах металів феромагнітної групи.

Показано, що основний внесок у фізичне перетворення вносять пондеромоторні сили електромагнітного поля і сили Джоуля, які відповідають пружним деформаціям, що виникають в результаті прояву прямого магнітострикційного ефекту в мікротовщинному шарі феромагнітного металу. Встановлено, що при оптимальному виборі величини постійного поля підмагнічування, сили Джоуля практично на чотири порядки перевершують пондеромоторні сили, створювані електромагнітним полем. При цьому зворотно-пропорційний зв'язок частоти електромагнітного поля і товщини скін-шару феромагнітного матеріалу, в якому відбувається перетворення, дозволяє здійснювати пошаровий контроль і визначати фізичні і пружні властивості матеріалу шляхом зміни частоти струму, що живить сенсор.

Встановлено, що радіально орієнтовані сили Джоуля в аксіально намагніченому тонкому поверхневому шарі феромагнетика на частотах порядку 1 МГц практично в тридцять разів перевершують аксіально орієнтовані сили, тобто є домінуючими при формуванні ультразвукових високочастотних коливань.

6. Розроблено та створено макети генератора та підсилювача на базі силових IGBT транзисторів для живлення високочастотних електромеханічних перетворювачів, призначених для використання в складі вимірювальної, контрольної та діагностичної техніки та запропоновано варіант практичної реалізації генератора потужних радіоімпульсів струму (ГПРС) на базі силових IGBT транзисторів типу IRG4PC50F, який забезпечує в котушці індуктивності високочастотного електромеханічного перетворювача струми величиною до 450 А в діапазоні частот 1...3 MHz при тривалості пакетного імпульсу живлення 1...20 періодів заповнення використовуваної частоти. Показано, що ГПРС забезпечує істотне збільшення струму в високочастотній котушці при живленні резонансного ЕМА перетворювача, підвищуючи, таким чином, коефіцієнт перетворення електромагнітної енергії в високочастотну механічну в електропровідних, електропровідних і феромагнітних виробках і матеріалах.

Обґрунтовано концепцію побудови підсилювачів потужних високочастотних імпульсів з регульованими параметрами, призначених для застосування в системах безконтактного ультразвукового контролю і в установках, що використовують метод магнітного ядерного резонансу або

електронного парамагнітного резонансу, а також в вимірювальних приладах. Розроблено схемотехнічне рішення зі створення потужного високочастотного підсилювача зонduючого сигналу для живлення ЕМА перетворювача, який забезпечує на генеруючій обмотці датчика достатню напругу для збудження акустичного сигналу в умовах великого зазору між ЕМАП і об'єктом контролю.

7. Сформульовано фізичні основи створення безконтактних ультразвукових частотних сенсорів, що перетворюють високочастотне регульоване електромагнітне поле в поле пружних коливань в обсязі мікротовщинного шару електропровідного феромагнетика, що динамічно деформується з урахуванням зв'язності пружних і магнітних полів, які дозволяють безконтактно контролювати і визначати фізичні властивості наноструктурованих і плівкових матеріалів за допомогою ультразвукових хвиль.

Визначена роль внутрішнього магнітного поля в процесі формування рівня електричного сигналу на виході перетворювача-приймача ультразвукових хвиль. Показано, що ігнорування факту існування внутрішнього магнітного поля може привести до завищеної (в десятки разів) оцінки рівня вихідного електричного сигналу перетворювача електромагнітного типу. Сукупність викладених принципів і методів становить теоретичну основу розрахунку перетворювачів електромагнітного типу в режимах збудження і прийому ультразвукових хвиль у феромагнітних металах і в металах неферомагнітної групи.

Для визначення характеристики чутливості ЕМА перетворювачів експериментально встановлена можливість виявлення дефектів глибиною 0,1...1,2 мм на поверхні та під поверхнею імпульсами ультразвукових поверхневих хвиль, які збуджуються і приймаються електромагнітно-акустичними перетворювачами на відстанях до 8 м, залежно від стану поверхні виробу з плоскою або криволінійною поверхнею, при частотах УЗК в діапазоні 0,2...1 МГц, тривалості зонduючих пакетних імпульсів 6–8 періодів частоти заповнення високочастотним струмом силою до 200 А в котушці ЕМАП. Показано, що дефекти під поверхнею металовиробів можуть виявляються на глибинах залягання більших, ніж величина довжини хвилі Релея.

8. Розроблено 14 конструкцій електромагнітно-акустичних перетворювачів та 11 методів ультразвукової дефектоскопії, які дозволяють проводити виявлення дефектів листів, труб та стрижнів невеликого діаметру. Розроблено фізико-математичну модель прохідного електромагнітно-акустичного перетворювача для збудження (прийому) крутильних недиспергуючих пружних коливань. Основу моделі складають дві зустрічно включених за магнітним полем котушки і джерело магнітного поля у вигляді провідника зі струмом. У розробленій моделі враховано вплив геометричних розмірів котушок перетворювача і виробу, їх взаємного розташування, а також фізико-механічних характеристик матеріалу досліджуваного металовиробу. Перетворювачі такого типу призначені для контролю якості, діагностики, вимірювання фізико-механічних характеристик матеріалу трубчастих металовиробів.

9. Результаты работы впроваджено на підприємстві «Automotive Solution Company» SRL, Румунія – для контролю стрижневих, трубчастих і листових металовиробів ЕМА-методом в інтервалі товщин 7–25 мм на етапі підготовки до виробництва і для контролю готової продукції. Застосування впроваджених методів забезпечило зниження рівню браку (акт впровадження від 17.01.2019 р.) та на підприємстві ТОВ «Харківський електромашинобудівний завод», Україна – для контролю електромагнітно-акустичним методом якості стрижневих та трубчастих металовиробів, призначених для виготовлення елементів генераторів, трансформаторів та електродвигунів на етапі підготовки до виробництва і контролю готової продукції. Застосування впроваджених методів забезпечило зниження рівня браку (акт впровадження від 07.07.2020 р.).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1 Петрищев О. Н., Сучков Г. М., Плеснецов С. Ю. Теория и практика электромагнитно-акустического контроля. Часть 1. Теоретические основы расчета и проектирования электроакустических преобразователей электромагнитного типа: монография. Харьков : Издательство «Оберіг», 2019. 556 с.

Здобувачем виконано теоретично-розрахункові дослідження в межах розділів 1, 3 та 4.

2 Плеснецов С. Ю. Методи і засоби ультразвукового контролю металовиробів трубчатого, стрижневого та пластинчатого типу (огляд, ч. 1). Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. Харків : НТУ «ХПІ», 2017. №36(1258). С.49–61.

3 Плеснецов С. Ю., Юданова Н. М. Методи і засоби ультразвукового контролю металовиробів трубчатого, стрижневого та пластинчатого типу (огляд, ч. 2). Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. №38(1259). С. 58–65.

Здобувачем виконано патентний пошук та аналіз джерел для огляду актуальних методів і засобів ультразвукового контролю металовиробів трубчатого, стрижневого та пластинчатого типу.

4 Плеснецов С. Ю., Сучков Г. М., Мещеряков С. Ю., Юданова Н. Н. Новые разработки электромагнитно-акустических преобразователей (обзор). Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 2018. №3. С. 27–34.

Здобувачем виконано патентний пошук та аналіз джерел відносно нових та актуальних досліджень ЕМА-перетворювачів

5 Плеснецов С. Ю., Сучков Г. М., Корж А. И., Суворова М. Д. Новые теоретические исследования и разработки в области электромагнитно-акустического преобразования (обзор). Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 2018. №2. С. 24–31.

Здобувачем виконано патентний пошук та аналіз відносно нових та актуальних теоретичних досліджень процесу ЕМА-перетворення.

6 Плеснецов С. Ю., Сучков Г. М., Петрищев О. Н. О чувствительности ультразвукового контроля поверхностными волнами, возбуждаемыми и

принимаемыми электромагнитно-акустическими преобразователями (обзор, ч. 2). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2019. №1. С. 47–52.

Здобувачем виконано патентний пошук та аналіз джерел відносно актуальних розробок та досліджень щодо чутливості перетворювачів для ЕМА-контролю та УЗК.

7 Салам Бусси, Сучков Г. М., Мигущенко Р. П., Кропачек О. Ю., Плеснецов С. Ю. Современное состояние методов и средств ультразвукового контроля проката с применением электромагнитно-акустических преобразователей. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків : НТУ «ХПІ», 2019. №12 (1337). С. 63–69.

Здобувачем виконано пошук, спрямований на освітлення сучасного стану ЕМА-перетворювачів та пов'язаних з ними досліджень

8 Сучков Г. М., Плеснецов С. Ю. Чувствительность контроля электромагнитно-акустическими преобразователями (обзор, ч. 1). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2018. №4. С. 45–50.

Здобувачем виконано патентний пошук та аналіз джерел відносно актуальних розробок та досліджень щодо чутливості перетворювачів для ЕМА-контролю та УЗК.

9 Сучков Г. М., Петрищев О. Н., Плеснецов С. Ю. Чувствительность ультразвукового контроля ЭМА способом при выявлении естественных внутренних дефектов металлоизделий. Возможности ЭМА толщинометрии. (обзор, ч. 3). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2019. №2. С. 51–57.

Здобувачем виконано співставлення існуючих досліджень з наявними експериментальними, проведено аналіз актуальних джерел.

10 Plesnetsov S. Yu., Migushchenko R. P., Petryshev O. N., Suchkov G. M., Khrypunov G. S. Mathematical modeling of physical processes of electromagnetic field transformation in elastic oscillations field in microthick layers of metals. *Journal of nano- and electronic physics*, 2017. Vol. 9. No 5. 05041(7 pp).

Здобувачем виконано розрахунково-аналітичні теоретичні дослідження стосовно питань збудження ультразвукової хвилі в надтонких прошарках матеріалу.

11 Plesnetsov S. Yu., Petrishchev O. N., Mygushchenko R. P., Suchkov G. M. Simulation of electromagnetic conversion process under torsion waves excitation. Part 2. *Технічна електродинаміка*, 2018. №1. С. 30–36.

Здобувачем виконано розрахунково-аналітичні дослідження та аналіз процесу збудження крутильних хвиль у матеріалі об'єктів контролю.

12 Plesnetsov S. Yu., Petrishchev O. N., Mygushchenko R. P., Suchkov G. M. Simulation of electromagnetic-acoustic conversion process under torsion waves excitation. Part 3. *Технічна електродинаміка*, 2018. № 3. С. 10–19.

Здобувачем виконано розрахунково-аналітичні дослідження та аналіз процесу збудження крутильних хвиль у матеріалі об'єктів контролю.

13 Плеснецов С. Ю., Петрищев О. Н., Мигущенко Р. П., Сучков Г. М. Моделирование процесса электромагнитно-акустического преобразования при возбуждении крутильных волн. *Технічна електродинаміка*, 2017. № 3. С. 79–88.

Здобувачем виконано розрахунково-аналітичні дослідження та аналіз процесу збудження крутильних хвиль у матеріалі об'єктів контролю

14 Плєснецов С. Ю., Мигущенко Р. П., Петрищев О. Н., Сучков Г. М., Хрипунова А. Л. Фізичні основи створення безконтактних ультразвукових частотних сенсорів для дослідження нанокристалічних феромагнітних матеріалів. *Журнал нано- та електронної фізики*, 2018. Том 10. № 2. 9 с.

Здобувачем виконано теоретичний аналіз фізичних основ процесу збудження коливань у полікристалічних матеріалах.

15 Plesnetsov S. Yu., Petrishchev O. N., Mygushchenko R. P., Suchkov G. M., Sotnik S. V., Kropachek O. Yu. Powerful sources of pulse high-frequency electromechanical transducers for measurement, testing and diagnostics. *Електротехніка і електромеханіка*, 2018. №2. Р. 31–35.

Здобувачем розроблено методологію перетворення при отриманні амплітудно підсиленого інформаційного сигналу.

16 Плєснецов С.Ю., Мигущенко Р. П., Сучков Г. М., Петрищев О. Н., Митин А. В. Обнаружение импульсами волн Релея несплошностей поверхности металлоизделий, имеющих сложную форму. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків : НТУ «ХПІ», 2016. №38(1210). С. 48–55.

Здобувачем здійснена розробка теоретичних положень та практична оцінка методології контролю виробів зі складною формою поверхні.

17 Плєснецов С. Ю. Високоєфективний контроль труб електромагнітно-акустичними перетворювачами. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків : НТУ «ХПІ», 2017. №35(1257). С. 44–48.

18 Мигущенко Р. П., Сучков Г. М., Петрищев О. Н., Болух В. Ф., Плєснецов С. Ю., Кочерга А. И. Информационно-измерительные электромеханические преобразователи для оценки качества поверхности ферромагнитных металлоизделий ультразвуковыми волнами Релея. *Технічна електродинаміка*, 2017. № 2. С. 70–76.

Здобувачем проведено розробку конфігурації накладного ЕМА-перетворювача та розрахунок його геометричних характеристик.

19 Плєснецов С. Ю., Мигущенко Р. П., Сучков Г. М. Метод підвищення чутливості при швидкісній комплексній аналоговій і комп'ютерній обробці інформаційних сигналів в приладах ультразвукового контролю. *Наукові праці ДонНТУ, Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація»*, 2017. №1. С. 100–109.

Здобувачем виконано теоретичний аналіз процесу послідовного підсилення сигналу ланцюгом вузьких елементів перетворювача.

20 Плєснецов С. Ю. Метод та засіб ультразвукового електромагнітно-акустичного контролю феромагнітних металовиробів зі складною формою перетину з невеликим розміром. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків : НТУ «ХПІ», 2018. №23(1299). С. 51–56.

21 Плєснецов С. Ю. Спосіб та електромагнітно-акустичний перетворювач для контролю трубчастих неферомагнітних металовиробів з перетином у вигляді кола. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків : НТУ «ХПІ», 2018. №30(1306). С.46–50.

22 Сучков Г. М., Мигущенко Р. П., Плеснецов С. Ю., Кропачек О. Ю. Способ электромагнитно-акустического контроля металлоизделий без «мертвой» зоны. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2018. №1. С. 42–46.

Здобувачем виконана розробка методології оцінки сигналу та технологічної бази проведення контролю

23 Petrishchev, O.N., Nozdrachova, K.L., Suchkov, G.M., Kropachek, O.Y., Plesnetsov S.Yu. Improving principles of electric energy pulse transformation into high-frequency mechanical energy using capacitive method. *Technical Electrodynamics*, 2019. №6. С.18–24.

Здобувачем здійснювалось виконання аналітично-розрахункових задач при обчисленні параметрів сигналу, що аналізується.

24 Bussi, Salam, Suchkov, G., Mygushchenko, R., Plesnetsov S. Electromagnetic-acoustic transducers for ultrasonic measurements, testing and diagnostics of ferromagnetic metal products. *Ukrainian metrological journal*, 2019. №4. С. 41–49.

Здобувачем виконано розробку елементів схемотехнічного рішення для ЕМА-перетворювача.

25 Салам Буссі, Плеснецов С. Ю. Практичні розробки електромагнітно-акустичних перетворювачів. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. Харків : НТУ «ХПІ», 2019. №26(1351). С. 57–65.

Здобувачем проведено патентний та літературний пошук в межах огляду.

26 Плеснецов С.Ю. Нові методи контролю твердості поверхневих шарів зміцнених металовиробів. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. Харків : НТУ «ХПІ», 2018. № 41(1317). С. 45–50.

27 Suchkov G. M., Mygushchenko, R. P., Plesnetsov S. Yu. Powerful sources for high frequency electromagnetic transducers for measurement, monitoring and diagnostics. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017. 53(12). Pp. 850–855.

Здобувачем розроблено структуру методики перетворення сигналу джерела на підсилений сигнал для електромагнітно-акустичного перетворювача.

28 Suchkov, G.M., Migushchenko, R.P., Kropachek, O.Y., Efimenko, S.A., Boussi, S. Noncontact spectral express method for detecting corrosion damage to metal products. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2020. 56(1). Pp. 12–19.

Здобувачем виконано розробку елементів схемотехнічного рішення для ЕМА-перетворювача.

29 Plesnetsov S. Yu., Suchkov G. M. Electromagnetic-acoustic method of ultrasonic pulse excitation and reception in metal products. *Вісник ХНУ ім. В. Н. Каразіна*. Серія «Фізика», 2017. Вип. 27. С. 31–34.

Здобувачем виконано проектування та аналітично-розрахункові операції для розрахунку параметрів перетворювача для оптимізації режимів збудження та прийому ультразвукових коливань.

30 Спосіб ультразвукового контролю якості скріплення діелектричного покриття з поверхневим прошарком металовиробу: пат. 120392 Україна:

G01N29/38, G01N3/24. № а201711614; заяв. 27.11.2017; опубл. 10.05.2019, Бюл. № 9.

Здобувачем виконано моделювання випадків контролю для різних матеріалів, експериментальне підтвердження ефективності способу.

31 Роздільно-поєднаний електромагнітно-акустичний перетворювач для контролю імпульсами хвиль Релея та Лемба: пат. 117697 Україна: G01N29/04. № u201612498; заяв. 08.12.2016; опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.

Здобувачем проведено розрахунок параметрів елементу збудження для перетворювача.

32 Ультразвуковий роздільно-поєднаний електромагнітно-акустичний перетворювач для контролю феромагнітних металовиробів: пат. 116248 Україна: G01N29/04. № u201612502; заяв. 08.12.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9.

Здобувачем виконано розрахунок параметрів елементу збудження для перетворювача та урахування додаткових ефектів при розрахунку геометричних характеристик перетворювача.

33 Спосіб ультразвукового контролю твердості металу протяжного виробу хвилями Релея: пат. 116249 Україна: G01N29/04. № u201612507; заяв. 08.12.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9.

Здобувачем здійснювалась розробка послідовності операцій визначення наявності дефекту при контролі.

34 Спосіб ультразвукового контролю пружних характеристик металу тонкостінних виробів хвилями Лемба: пат. 117698 Україна: G01N29/04. № u201612501; заяв. 08.12.2016; опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.

Здобувачем здійснювався розрахунок геометричних параметрів катушок накладного перетворювача.

35 Електромагнітно-акустичний перетворювач для контролю трубчатих неферомагнітних металовиробів з перетином у вигляді кола: пат. 117766 Україна: G01N29/04. № u201700073; заяв. 03.01.2017; опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.

Здобувачем виконана розрахунково-графічна реалізація збуджуючої схеми перетворювача.

36 Спосіб ультразвукового електромагнітно-акустичного контролю протяжних трубчатих феромагнітних металовиробів з складною формою перерізу: пат. 117763 Україна: G01N29/04. № u201700069; заяв. 03.01.2017; опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.

Здобувачем здійснювалась розробка послідовності операцій визначення наявності дефекту при контролі з використанням перетворювача та при виконанні послідовності операцій для визначення фізико-механічних характеристик.

37 Спосіб поточного ультразвукового контролю луна-методом: пат. 117762 Україна: G01N29/04. № u201700064; заяв. 03.01.2017; опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.

Здобувачем розроблено структуру операцій, необхідних для визначення наявності дефекту при контролі з використанням луна-методу УЗК.

38 Спосіб ультразвукового контролю твердості металовиробу: пат. 121134 Україна: G01N29/04. № u201706021; заяв. 15.06.2017; опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.

Здобувачем виконано експериментальні дослідження, спрямовані на формування аналітичної бази для оцінки впливу характеристик металовиробу на характеристики сигналу, що приймається електромагнітно-акустичним перетворювачем.

39 Комбінований електромагнітно-акустичний перетворювач для контролю імпульсами ультразвукових поверхневих хвиль: пат. 121968 Україна: G01N29/04. № u201705970; заяв. 15.06.2017; опубл. 26.12.2017, Бюл. № 24.

Здобувачем проведений математичний аналіз параметрів, за якими визначаються геометричні параметри перетворювача.

40 Суміщений електромагнітно-акустичний перетворювач для контролю металовиробів імпульсами ультразвукових поверхневих хвиль: пат. 129857 Україна: G01N29/04. № u201806754; заяв. 14.06.2018; опубл. 12.11.2018, Бюл. № 21.

Здобувачем виконано моделювання характеристик перетворювача для розрахунку його параметрів при роботі в режимі збудження та прийому.

41 Спосіб визначення коефіцієнта Пуассона матеріалу неферромагнітних електропровідних виробів ультразвуковим електромагнітно-акустичним методом: пат. 134258 Україна: G01N29/04. № u201811953; заяв. 03.12.2018; опубл. 10.05.2019, Бюл. № 9.

Здобувачем проведено розрахунок технічних параметрів та виконана розробка елементів схемотехніки, геометричної конфігурації збуджуючих елементів перетворювача.

42 Суміщений електромагнітно-акустичний перетворювач: пат. 134257 Україна: G01N29/04. № u201811951; заяв. 03.12.2018; опубл. 10.05.2019, Бюл. № 9.

Здобувачем проведена розробка конструкторської документації, розрахунки геометричних параметрів перетворювача.

43 Спосіб імпульсного ультразвукового електромагнітно-акустичного контролю прокатаних ферромагнітних виробів: пат. 134256 Україна: G01N29/04. № u201811950; заяв. 03.12.2018; опубл. 10.05.2019, Бюл. № 9.

Здобувачем виконане математичне моделювання окремих випадків використання способу.

44 Суміщений електромагнітно-акустичний перетворювач для контролю металовиробів імпульсами високочастотних ультразвукових хвиль: пат. 134255 Україна: G01N29/04. № u201811948; заяв. 03.12.2018; опубл. 10.05.2019, Бюл. № 9.

Здобувачем здійснювалась розробка окремих елементів конструкції електромагнітно-акустичного перетворювача, сформовано структуру розташування електромеханічних перетворюючих елементів.

45 Спосіб безконтактного збудження коротких імпульсів ультразвукових хвиль Релея: пат. 136379 Україна: G01N29/04. № u201902813; заяв. 21.03.2019; опубл. 12.08.2019, Бюл. № 15.

Здобувачем виконано теоретичне моделювання окремих випадків збудження ультразвукових коливань для ферромагнітних зразків.

46 Роздільно-поєднаний ультразвуковий перетворювач електромагнітного типу для контролю імпульсами хвиль Релея: пат. 137007 Україна: G01N29/04. № u201902812; заяв. 21.03.2019; опубл. 25.09.2019, Бюл. № 18.

Здобувачем здійснювалась розробка технічних рішень, спрямованих на уточнення принципу розташування перетворюючих елементів.

47 Роздільно-поєднаний електромагнітно-акустичний перетворювач для ультразвукового контролю імпульсами поверхневих хвиль: пат. 137008 Україна: G01N29/04. № u201902812; заяв. 21.03.2019; опубл. 25.09.2019, Бюл. № 18.

Здобувачем розроблено конструктивне рішення для схемотехнічної частини перетворювача.

48 Пристрій для електромагнітно-акустичного збудження імпульсних ультразвукових коливань: пат. 137011 Україна: G01N29/04. № u201902819; заяв. 21.03.2019; опубл. надрук. 25.09.2019, Бюл. № 18.

Здобувачем проводився теоретичний аналіз щодо параметрів сигналу, який надходить з перетворювача для окремих випадків об'єктів контролю.

49 Роздільно-поєднаний безконтактний ультразвуковий перетворювач для контролю імпульсами поверхневих хвиль: пат. 137259 Україна: G01N29/04, G01N29/14. № u201903756; заяв. 11.04.2019; опубл. 10.10.2019, Бюл. № 19.

Здобувачем виконано математичний аналіз параметрів, за якими визначаються геометричні характеристики збуджуючої і приймальної котушок перетворювача.

50 Роздільно-поєднаний безконтактний ультразвуковий перетворювач для контролю імпульсами поверхневих хвиль: пат. 138760 Україна: G01N29/04, G01N29/36. № u201903756; заяв. 20.05.2019; опубл. 10.12.2019, Бюл. № 23.

Здобувачем виконано моделювання процесу електромагнітно-акустичного перетворення для теоретичного обґрунтування конструкції перетворювача.

51 Пристрій для установки автоматичного ультразвукового безконтактного контролю протяжних феромагнітних металовиробів: пат. 136357 Україна G01N 29/04. № u201902706; заяв. 20.03.2019; опубл. 12.08.2019, Бюл. № 15.

Здобувачем проведено теоретичний аналіз та математичне моделювання параметрів сигналу, який надходить з перетворювача для окремих випадків об'єктів контролю.

52 Спосіб високочутливого безконтактного ультразвукового виявлення тріщин поверхневого шару металовиробів: пат. 136359 Україна: G01N 29/04. № u201902710; заяв. 20.03.2019; опубл. 12.08.2019, Бюл. № 15.

Здобувачем виконано теоретичне моделювання окремих випадків збудження ультразвукових коливань для феромагнітних зразків стрижневих, трубчастих та листових металовиробів.

53 Спосіб імпульсного ультразвукового електромагнітно-акустичного контролю феромагнітних виробів з значною площею поверхні: пат. 136380 Україна: G01N 29/04. № u201902815; заяв. 21.03.2019; опубл. 12.08.2019, Бюл. № 15.

Здобувачем виконано розробку схеми вимірів та експериментальну оцінку точності запропонованого способу.

54 Комбінований роздільно-поєднаний електромагнітно-акустичний перетворювач для неруйнівного ультразвукового контролю: пат. 137009 Україна: G01N 29/04. № u201902816; заяв. 21.03.2019; опубл. 25.09.2019, Бюл. №18.

Здобувачем здійснена розробка конструкції збуджуючої та приймальної частини перетворювача (котушок) на базі теоретичного моделювання процесів прийому та збудження ультразвукових хвиль.

55 Спосіб імпульсного продуктивного ультразвукового контролю довгих феромагнітних виробів: пат. 137010 Україна: G01N 29/04. № u201902817; заяв. 21.03.2019; опубл. 25.09.2019, Бюл. № 18.

Здобувачем проведено моделювання процесу збудження ультразвукових коливань для феромагнітних зразків стрижневих, трубчастих та листових металовиробів.

56 Плесецов С. Ю., Мигущенко Р. П., Сучков Г. М., Петрищев О. Н., Митин О. В. Обнаружение импульсами волн Релея несплошностей поверхности металлоизделий, имеющих сложную форму. *Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии*: матеріали 8-ї міжн. наук.-техн. конф. «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії» (м. Харків, 23–25 листопада 2016 р.). Харків. 2016. С. 110–111.

Здобувачем здійснена розробка теоретичних положень та практична оцінка методології контролю виробів зі складною формою поверхні.

57 - Сучков Г. М., Петрищев О. Н., Плесецов С. Ю. Разработка основ электромагнитно-акустического возбуждения крутильных волн в трубчатых металлоизделиях. *Фізичні та комп'ютерні технології*: тези ХХІІ міжн. наук.-практ. конф. (м. Харків, 7–9 грудня 2016 р.). Харків. 2016. С. 469–473.

Здобувачем виконано теоретичні дослідження та аналітичну обробку результатів моделювання ЕМА перетворення для стрижневих виробів.

58 Suchkov G. M., Mygushchenko R. P., Plesnetsov S. Yu. Real time signal processing under intense interference. *Metrology and Metrology Assurance 2017: 27th International Scientific Symposium* (Sozopol, Bulgaria, September 12, 2017).

Здобувачем розроблено імплементацію методу для випадків контролю металовиробів електромагнітно-акустичним методом.

59 Плесецов С. Ю. Образцы для калибровки и проверки устройств контроля металлоизделий электромагнитно-акустическим способом импульсами поверхностных волн. *MicroCAD - 2017 Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези доповідей ХХV міжн. наук.-практ. конф. (м. Харків, 17–19 травня 2017 р.). Харків: НТУ «ХП», 2017. Ч.ІІ. 346 с.

60 Плесецов С. Ю. Безконтактний високопродуктивний ультразвуковий контроль трубчатих феромагнітних металовиробів зі складною формою перетину. *Сучасні тенденції розвитку української науки: Всеукраїнська наукова конференція*: матеріали Всеукр. наук. конф. (Переяслав-Хмельницький 6–7 травня 2017 р.). Переяслав-Хмельницький. 2017. Вип. 2. 195 с.

61 Плесецов С. Ю., Мигущенко Р. П., Сучков Г. М., Петрищев О. М. Швидкісна аналогова обробка інформаційних сигналів в приладах неруйнівного контролю. *Приладобудування: стан і перспективи*: матеріали 16-ї міжн. науково-технічної конференції (м. Київ, 16–17 травня 2017 р.). Київ. 2017. С. 91–92.

Здобувачем розроблено імплементацію методу для випадків контролю металовиробів електромагнітно-акустичним методом.

62 Плєснецов С.Ю. Безконтактний ультразвуковий перетворювач для контролю трубчатих неферромагнітних металовиробів. *Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування*: матеріали III Всеукр. наук.-техн. конф. (м. Тернопіль, 8–9 червня 2017 р.). Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2017. 244 с.

63 Плєснецов С. Ю. Контроль труб електромагнітно-акустичними перетворювачами для забезпечення високої ефективності діагностики. *Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії*: матеріали IX міжн. наук.-техн. конф. (м. Харків, 22–24 листопада 2017 р.). Харків. 2017. С. 51–53.

64 Плєснецов С. Ю. Збудження ультразвукових коливань в металах з допомогою магнітних і електромагнітних полів. *Фізичні явища в твердих тілах* матеріали XIII міжн. наукової конференції, присвяч. 100-річчю з дня народж. ак. І. М. Ліфшиця. (м. Харків, 5–8 грудня 2017 р.). Харків: ХНУ ім. Каразіна, 2017. С. 170.

65 Крамаренко Д. С., Плєснецов С. Ю. Програмні засоби для аналізу електромагнітних явищ методом скінчених елементів. *XII міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів*: матер. конф. (м. Харків, 17–20 квітня 2018 р.). Харків : НТУ «ХП», 2018. 233 с.

Здобувачем наведено вихідні дані та зведено відомості щодо виконання огляду.

66 Сучков Г. М., Плєснецов С. Ю. Состояние исследований и разработок в области неразрушающего электромагнитно-акустического контроля, измерений и диагностики. *Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики*: збірка тез доповідей 22-ї міжн. конф. (м. Одеса, 10–14 вересня 2018 р.). Одеса. 2018. С. 16.

Здобувачем виконано аналіз джерел, публікацій та патентних даних щодо актуального стану досліджень та промислового виготовлення електромагнітно-акустичних перетворювачів та обладнання, призначеного для роботи в кон'юнкції з ними.

67 Сучков Г. М., Плєснецов С. Ю., Корж А. И., Суворова М. Д. Математическое моделирование регистрирующих электромеханических преобразователей для контроля элементов электротехнических устройств. *MicroCAD-2018 Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези допов. 26-ї міжн. наук.-практ. конф. (м. Харків, 16–18 травня 2018 р.). Харків : НТУ «ХП», 2018. С. 104.

Здобувачем виконано побудову математичної моделі електромагнітно-акустичного перетворювача в режимі прийому.

68 Сучков Г. М., Плєснецов С. Ю. Состояние исследований и разработок в области неразрушающего электромагнитно-акустического контроля, измерений и диагностики. *Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії*: матер. X міжн. наук.-техн. конф. (м. Харків, 21–23 листопада 2018 р.). Харків. 2018. С. 103–104.

Здобувачем виконано аналіз джерел, публікацій та патентних даних щодо актуального стану досліджень та промислового виготовлення електромагнітно-акустичних перетворювачів.

69 Плєснецов С. Ю., Загребельний В. В., Загребельна А. В. Ультразвуковий роздільно-поєднаний електромагнітно-акустичний

перетворювач для контролю феромагнітних металовиробів. *Приладобудування: стан і перспективи*: збір. тез допов. XVII міжн. наук.-техн. конф. (м. Київ, 15–16 квітня 2018 р.). Київ. 2018. С. 152.

Здобувачем виконано теоретичні та практичні дослідження, на базі яких було розроблено методику виконання товщинометрії.

70 Плєснецов С. Ю., Кисільов М. В., Корж Д. Ю. Спосіб контролю товщини покриття на електропровідному виробі. *Приладобудування: стан і перспективи*: збір. тез допов. XVII міжн. наук.-техн. конф. (м. Київ, 15–16 квітня 2018 р.). Київ. 2018. С. 182.

Здобувачем виконано теоретичні та практичні дослідження, на базі яких було розроблено методику виконання товщинометрії.

71 Плєснецов С. Ю., Сучков Г. М., Осадчий В. О. Метод ультразвукового контролю пружних характеристик металу тонкостінних виробів імпульсами хвиль Лемба або Релея. *Актуальні проблеми автоматики та приладобудування*: матер. міжн. наук.-техн. конф. (м. Харків, 06–07 грудня 2018 р.). Харків : ФОП Панов А.М., 2018. С. 137.

Здобувачем виконано теоретичні та практичні дослідження, на базі яких було розроблено перетворювачі, які буде використано при експериментальній оцінці впливу механічних властивостей металовиробу на характеристики ультразвукового сигналу.

72 Сучков Г. М., Петрищев О. М., Плєснецов С. Ю. Виявлення корозійних пошкоджень металовиробів безконтактним експрес-методом. *Погляд у майбутнє приладобудування*: збір. праць XII наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених (м. Київ, 15–16 травня 2019 р.). Київ. 2019. С. 403–406.

Здобувачем виконано теоретичні та практичні дослідження, на базі яких було розроблено методику виконання контролю.

АНОТАЦІЇ

Плєснецов С.Ю. Розвиток методів та засобів для електромагнітно-акустичного контролю стрижневих, трубчастих та листових металовиробів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2021.

В дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-практичну проблему – розвиток теоретичних положень та засобів для збудження височастотних ультразвукових імпульсів електромагнітно-акустичними перетворювачами у трубчастих, стрижневих та листових металовиробах з підвищеною чутливістю за рахунок збільшення відношення амплітуд корисного сигналу до завад.

У дисертаційній роботі вперше розроблена математична модель електромагнітно-акустичного перетворювача, призначеного для збудження ультразвукових коливань в електропровідному виробі, за допомогою якої вирішені дві задачі електростатики та динамічної теорії пружності для кусково-однорідного середовища. Експериментально побудовані діаграми спрямованості акустичного поля та визначені основні фактори, які впливають

на інтенсивність ультразвукових імпульсів, що збуджуються електромагнітно-акустичним перетворювачем. Розроблені нові конструкції електромагнітно-акустичних перетворювачів, призначених для контролю металовиробів різними типами ультразвукових хвиль. Застосування даних перетворювачів дозволить значно підвищити відношення сигнал/завада. Експериментально підтверджена можливість збудження поверхневих хвиль Релея та Лемба, а також крутильних хвиль перетворювачами з інтенсивністю ультразвукового поля, достатньою для проведення вимірювань, контролю та діагностики.

Практичне значення роботи полягає в наступному: реалізовано теоретичну модель, яка дозволяє виконувати розрахунки параметрів і характеристик електромагнітно-акустичних перетворювачів суміщеного та роздільного типу; розроблено, виконано та випробувано стендові макети електромагнітно-акустичних перетворювачів, що практично реалізують теоретичну модель та доводять її ефективність; розроблено електромагнітно-акустичні перетворювачі для контролю різних зразків в межах сортаментів стрижневих, трубчастих та листових металовиробів для різних типів та етапів виробництва та експлуатації крутильними хвилями, хвилями Релея та Лемба на поверхні та всередині об'єктів контролю; створено методики контролю з використанням розроблених конфігурацій перетворювачів та практичні рекомендації з їх використання; розроблено та впроваджено технічні рішення, спрямовані на підвищення якості та ефективності використання електромагнітно-акустичного методу в виробництві.

Розроблено нові технічні рішення, що спрямовані на підвищення чутливості ультразвукових електромагнітно-акустичних приладів і пристроїв на основі збільшення відношення амплітуд корисного сигналу до завад у виробках з електропровідних матеріалів. Новизна технічних рішень захищена патентом України на винахід та 25 патентами України на корисну модель.

Ключові слова: ультразвуковий контроль, ультразвукові імпульси, діагностика, електромагнітно-акустичний, перетворювач, магнітострикція, сила Лоренця, сила Джоуля, хвилі Релея, хвилі Лемба, крутильні хвилі.

Plesnetsov S.Yu. Development of methods and tools for electromagnetic and acoustic control of rod, tubular and sheet metal products. – Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of technical sciences on a specialty 05.11.13 – devices and methods of the control and definition of structure of substances. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2021.

The dissertation solves a topical scientific and practical problem – the development of theoretical positions and tools for excitation of high-frequency ultrasonic pulses by electromagnetic-acoustic transducers in tubular, rod and sheet metal products with increased sensitivity by increasing the ratio of amplitudes of the useful signal to interference.

In the dissertation work the mathematical model of the electromagnetic-acoustic transducer intended for excitation of ultrasonic oscillations in an electrically conductive product is developed for the first time by means of which two problems of electrostatics and the dynamic theory of elasticity for piecewise homogeneous environment are solved. Experimentally constructed diagrams of the direction of the acoustic field and identified the main factors that affect the intensity of ultrasonic

pulses excited by the electromagnetic-acoustic transducer. New designs of electromagnetic-acoustic transducers designed to control hardware with different types of ultrasonic waves have been developed. The use of these converters will significantly increase the signal-to-noise ratio. The possibility of excitation of Rayleigh and Lamb surface waves, as well as torsional waves by transducers with an ultrasonic field intensity sufficient for measurements, control and diagnostics, has been experimentally confirmed.

The practical significance of the work is as follows: implemented a theoretical model that allows calculations of parameters and characteristics of electromagnetic-acoustic transducers of combined and separate type, developed, performed and tested bench models of electromagnetic-acoustic transducers, which practically implement the theoretical model and prove its effectiveness, developed electromagnetic-acoustic transducers for control of various components of rod, tubular and sheet metal products for different types and stages of production and operation by torsional waves, Rayleigh and Lamb waves on the surface and inside control objects, developed control methods using developed configurations of transducers and practical recommendations on their use, developed and implemented technical solutions aimed at improving the quality and efficiency of the electromagnetic-acoustic method in production.

Within the work the theoretical and experimental research is provided on creating the new types of electromagnetic-acoustic transducers and physical basics of the process of exciting the ultrasonic wave in the material of a researched sample. The calculations are provided, allowing to design coil components of electromagnetic-acoustic transducers for excitation and reception of ultrasonic waves at frequencies that allow for detection of flaws in specific areas of samples. The cases of tubular, cylindrical and sheet metal are studied, with approach of respectively using torsional waves, Rayleigh waves and Lamb waves for flaw detection. Schemes and descriptions of tools and methods for flaw detection in appropriate cases are provided.

The chain process of force transformation during the process of ultrasonic wave excitation is researched. Transitional equations within coordinate systems of different types of samples are provided.

The effects of Lorents, ponderomotive force and other effects are considered in relation to separate cases of electromagnetic-acoustic ultrasonic wave excitation. Experimental data on simplification of calculations via exclusion of irrelevant force components is given.

New technical solutions aimed at increasing the sensitivity of ultrasonic electromagnetic-acoustic devices and devices based on increasing the ratio of the amplitudes of the useful signal to interference in products made of conductive materials have been developed. The novelty of technical solutions is protected by the patent of Ukraine for invention and 25 patents of Ukraine for utility model.

Key words: ultrasonic testing, ultrasonic pulses, diagnostics, electromagnetic-acoustic, transducer, magnetostriction, Lorentz force, Joule force, Rayleigh waves, Lamb waves, torsional waves



Видавництво та друк ФОП Єфименко С.А.
61166, Україна, м. Харків, вул. Коломенська, 27
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців,
виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 6869 від 08.08.2019

