

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

**ПЛЕСНЕЦОВ СЕРГІЙ ЮРІЙОВИЧ**

УДК 620.179.16

**ДИСЕРТАЦІЯ**

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

05.11.13 - Прилади і методи контролю та визначення складу речовин  
Галузь знань: 15 – автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

*Ідентифіковано за змістом  
з іншими працями  
дисертації завідувача*

*Великий консультант  
спеціалізованої вищої школи*



*С.Ю.*  
Плеснецов С.Ю.  
підпис

*У Кошик - Іван КОСТИКОВ*  
Науковий консультант Сучков Григорій Михайлович,  
доктор технічних наук, професор

Харків — 2021

## АНОТАЦІЯ

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

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин (15 – автоматизація та приладобудування). – НТУ «ХПІ», Харків, 2021.

Дисертаційну роботу спрямовано на вирішення важливої науково-практичної проблеми 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 контролю та діагностики таких металовиробів.

В роботі 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. Визначено перспективність розробки та використання нових типів електромагнітно-акустичних перетворювачів (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.

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 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 ефективно перетворення електромагнітної енергії в енергію крутильних ультразвукових коливань.

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. 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.

Створено алгоритми перетворення сигналів, які реалізуються в процесі прийому та 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.

Знайдено рішення диференційного 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 розповсюджуючої 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 полоого феромагнітного стрижня, котушок і центрального провідника електричного струму, що дозволяє проектувати електромеханічні перетворювачі з урахуванням особливостей контрольованих трубчастих металовиробів. Визначено в явному вигляді вирази для розрахунку силових факторів, які виникають при електромагнітному збудженні ультразвукових хвиль в струмопровідному аксіально намагніченому скін-шарі феромагнетика.

Виконано оцінку збільшення механічної жорсткості попередньо намагніченого феромагнетика за рахунок сумісної дії сил пружності і сил магнітної взаємодії між полюсами доменів в деформуємому тонкому шарі феромагнетика ( $\Delta E$ -ефект). Визначено межі, при яких  $\Delta E$ -ефект можна не враховувати у практичних розрахунках. На підставі оцінок числових значень  $\Delta E$ -ефекту запропоновано метод послідовних наближень для розв'язання граничної задачі про перетворення високочастотного електромагнітного поля у поле пружних хвиль в мікротовщинних шарах металів феромагнітної групи.

В роботі показано, що основний внесок у фізичне перетворення електромагнітного поля в ультразвукові коливання вносять пондеромоторні сили електромагнітного поля і сили Джоуля, які відповідають пружним деформаціям, що виникають в результаті прояву прямого магніострикційного ефекту в мікротовщинному шарі феромагнітного металу. Встановлено, що при оптимальному виборі величини постійного поля підмагнічування, сили Джоуля чотирикратно перевершують пондеромоторні сили, створювані електромагнітним полем. 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. Радіально

орієнтовані сили Джоуля в аксіально намагніченому тонкому поверхневому шарі феромагнетика на частотах порядку 1 МГц практично в 30 разів перевершують аксіально орієнтовані сили, тобто є домінуючими при формуванні ультразвукових високочастотних коливань.

При виконанні роботи розроблено та створено макети генератора та підсилювача на базі силових IGBT транзисторів для живлення високочастотних електромеханічних перетворювачів, призначених для використання у складі вимірювальної, контрольної та діагностичної техніки та запропоновано варіант практичної реалізації генератора потужних радіоімпульсів струму 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 МГц при тривалості пакетного імпульсу живлення 1...20 періодів заповнення використовуваної частоти. Показано, що генератор потужних радіоімпульсів струму (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, неелектропровідних 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 при дослідженнях організму людини, 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.

В ході виконання дисертаційної роботи розроблено 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'язаності 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 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.

Експериментально встановлена можливість виявлення дефектів глибиною 0,1...1,2 мм на поверхні та під поверхнею виробу 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 ультразвукових коливань у діапазоні 0,2...1 МГц, тривалості зондуючих пакетних імпульсів 6–8 періодів частоти заповнення високочастотним струмом силою до 200 А в котушці ЕМАП. Показано, що дефекти під поверхнею металовиробів можуть виявлятися на глибинах залягання більших, ніж величина довжини хвилі Релея.

Розроблено 12 методів ультразвукового контролю та 14 конструкцій електромагнітно-акустичних перетворювачів, 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 по магнітному полю 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.

**Ключові слова:** електромагнітно-акустичний перетворювач, прийом, збудження, ультразвукові коливання, крутильні хвилі, хвилі Релея та Лемба, підвищення чутливості, сила Лоренца, пондеромоторна сила, генератор потужних радіоімпульсів струму

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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

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

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

4. Плєснецов 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.

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.

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.

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.

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.

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.

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).

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.



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.

13. Плєснецов 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.

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 ферромагнітних матеріалів. *Журнал нано- та електронної фізики*, 2018. Том 10. №2. 9 С.

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.

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.

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., Болюх 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.

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.

20. Плєснецов С. Ю. Метод та засіб ультразвукового електромагнітно-акустичного контролю феромагнітних металовиробів зі складною формою перетину з невеликим розміром. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: *Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків : НТУ «ХП», 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 «ХП»*. Серія: *Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків : НТУ «ХП», 2018. №30(1306). С.46–50.

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

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.

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.

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

26. Плєснецов С.Ю. Нові методи контролю твердості поверхневих шарів зміцнених металовиробів. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: *Інноваційні технології та*

обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. Харків : НТУ «ХП», 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. Vol. 53. Вып. 12. С. 850–855.

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). С. 12–19.

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. Вып. 27. С. 31–34.

30. 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: материалы 8-ї міжн. наук.-техн. конф. (м. Харків, 23–25 листопада 2016 р.)*. Харків. 2016. С. 110–111.

31. 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.

32. 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)*. Pp. 44-47

33. 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.

34. Плєснецов 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.

35. Плєснецов 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.

36. Плєснецов С. Ю. Безконтактний ультразвуковий перетворювач для контролю трубчатих неферомагнітних 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.

37. 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.

38. 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.

39. 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.

40. 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.

41. 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.

42. 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.

43. 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.

44. 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.

45. 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.

46. 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.

47. Спосіб ультразвукового контролю якості скріплення діелектричного покриття з поверхневим прошарком металовиробу: пат. 120392 Україна: G01N29/38, G01N3/24. №a201711614; заяв. 27.11.2017; опубл. 10.05.2019, Бюл. №9.

48. 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.

49. 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.

50. 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.

51. 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.

52. 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.

53. 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.

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

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

56. 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.

57. 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.

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

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

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

61. 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.

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

63. 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.

64. 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.

65. 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.

66. 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.

67. 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.

68. 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.

69. 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.

70. 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.

71. 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.

72. 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.



## ABSTRACT

Plesnetsov S.Yu. Development of methods and tools for electromagnetic – acoustic testing of rod, tubular and sheet metal products. – Qualifying scientific work on the rights of the 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 (15 – automation and instrument making). – NTU "KhPI", Kharkiv, 2021.

The dissertation is aimed at solving an important scientific and practical problem of creating the basic provisions of excitation and reception of pulses of ultrasonic surface and normal waves in sheets, tubes and rods, made mainly of ferromagnetic material, methods and tools for control and diagnosis of such hardware.

The analysis of the existing theoretical, model and experimental researches, methods and means of non – contact electromagnetic – acoustic control of metal products is carried out, their shortcomings and possibilities of application for further improvement of methods and means of control and diagnostics of metal products are defined. The prospects of development and use of new types of EMAP are determined. The prospects of using Rayleigh, Lamb and normal type waves for defectoscopy and diagnostics have been established. The high economic efficiency of using electromagnetic – acoustic transducers for control of sheets, pipes and rods made mainly of ferromagnetic material is confirmed.

A mathematical model of electromagnetic – acoustic conversion of electromagnetic energy into acoustic, mainly for ferromagnetic metals, has been developed, which contains interconnected wave equation, Maxwell's equation and generalized Ohm's law in differential form. The mathematical model comprehensively takes into account the characteristics of the electromagnetic – acoustic transducer, the parameters of the excited signals and the properties of the investigated material. Based on the established connections, conceptual approaches to solving the problem of designing EMA transducers for the excitation of ultrasonic vibrations are formulated.

The initial positions necessary and sufficient for finding the characteristics of the displacements of elastic oscillations excited by the method of electromagnetic – acoustic transformation are determined.

It is established that the increase in the size of the high-frequency coil of the converter leads to a narrowing of the excited frequency band, in which there is an effective conversion of electromagnetic energy into the energy of torsional ultrasonic vibrations.

Mathematical modeling of the electromagnetic – acoustic transducer for excitation of torsional non – dispersive elastic oscillations in tubular ferromagnetic products is carried out taking into account the characteristics of the transducer, properties of the object of research and mutual arrangement of EMAP and the product. taking into account all the factors influencing the design of the transducer. The solution of the general differential equation is found by determining the values of electromagnetic fields in the region between the excitation coil of the converter and the tubular product. The wave characteristic of the source of the alternating magnetic field EMAP is determined.

Algorithms for signal conversion have been developed, which are implemented in the process of receiving and registering ultrasonic waves in metals by the electromagnetic method. Theorems on the induced magnetic flux for nonferromagnetic metals and ferromagnets are proved. On the basis of these theorems mathematical models of processes of registration of ultrasonic waves by the electromagnetic way are constructed.

The solution of the differential equation of forced torsional oscillations in an electrically conductive ferromagnetic rod (tube), pre-magnetized in the circumferential direction, is found in the form of an expression for the linear density of external torques. An expression is obtained for calculating the amplitudes of rotation angles of cross sections in the front of a propagating traveling non-dispersing torsional wave due to absolute sensitivity, interference loss coefficient and torsional wave excitation efficiency loss factor due to eddy currents (skin effect). The expression takes into account the full set of geometric and physico-mechanical properties of the material of

the hollow ferromagnetic rod, coils and the central conductor of electric current, which allows you to design electromechanical transducers taking into account the characteristics of controlled tubular hardware. Expressions for the calculation of force factors that occur during electromagnetic excitation of ultrasonic waves in a conductive axially magnetized skin layer of a ferromagnet are defined explicitly.

The increase in the mechanical stiffness of the pre-magnetized ferromagnet due to the associated action of elastic forces and magnetic interaction forces between the poles of the domains in the deformable thin layer of the ferromagnet ( $\Delta E$  effect) is estimated. The limits at which the  $\Delta E$  effect can be ignored in practical calculations are determined. Based on the estimates of the numerical values of the  $\Delta E$ -effect, the method of sequential approximations to solve the boundary value problem of converting a high-frequency electromagnetic field into an elastic wave field in the microthick layers of ferromagnetic metals.

The paper shows that the main contribution to the physical transformation of the electromagnetic field into ultrasonic oscillations is made by ponderomotor forces of the electromagnetic field and Joule forces, which correspond to elastic deformations resulting from the direct magnetostrictive effect in the microthick layer of ferromagnetic metal. It is established that with the optimal choice of the value of the constant field of magnetization, the Joule forces are four orders of magnitude greater than the ponderomotor forces created by the electromagnetic field. The inverse relationship between the frequency of the electromagnetic field and the thickness of the skin layer of the ferromagnetic material in which the conversion takes place, allows layer-by-layer control and determine the physical and elastic properties of the material by changing the frequency of the current supplying the sensor. The radially oriented Joule forces in the axially magnetized thin surface layer of the ferromagnet at frequencies of the order of one megahertz are almost thirty times greater than the axially oriented forces, ie, are dominant in the formation of ultrasonic high-frequency oscillations.

During the work the models of generator and amplifier on the basis of power IGBT transistors for power supply of high-frequency electromechanical converters intended for use as a part of measuring, control and diagnostic equipment are developed

and the variant of practical realization of generator of powerful radio pulses of current provides in the inductor of the high-frequency electromechanical converter currents up to 450 A in the frequency range 1 ... 3 MHz with the duration of the packet power pulse 1 ... 20 periods of filling the frequency used. It is shown that GPRS provides a significant increase in current in the high-frequency coil when powering the resonant EMA converter, thus increasing the conversion factor of electromagnetic energy into high-frequency mechanical in electrically conductive, electrically conductive and ferromagnetic products and materials.

The concept of construction of high-frequency pulse amplifiers with adjustable parameters, intended for use in contactless ultrasonic control systems and in installations using the method of magnetic nuclear resonance or electronic paramagnetic resonance in human studies, as well as in measuring devices is substantiated. A circuit solution for creating a powerful high-frequency amplifier of the probing signal to power the EMA converter, which provides a sufficient voltage on the generating winding of the sensor to excite the acoustic signal in a large gap between the EMAP and the control object.

In the course of the dissertation the physical bases of creation of contactless ultrasonic frequency sensors transforming a high-frequency regulated electromagnetic field into a field of elastic oscillations in the volume of a microthick layer of an electrically conductive ferromagnet which is dynamically deformed taking into account connectivity of elastic and magnetic properties of nanostructured and film materials using ultrasonic waves.

The role of the internal magnetic field in the process of forming the level of the electric signal at the output of the transducer-receiver of ultrasonic waves is determined. It is shown that ignoring the fact of the existence of an internal magnetic field can lead to an increased (tens of times) assessment of the level of the output electrical signal of the electromagnetic transducer. The set of the stated principles and methods forms a theoretical basis of calculation of converters of electromagnetic type in the modes of excitation and reception of ultrasonic waves in ferromagnetic metals and in metals of nonferromagnetic group.

The possibility of detecting defects with a depth of 0.1... 1.2 mm on the surface and below the surface by pulses of ultrasonic surface waves, which are excited and received by electromagnetic – acoustic transducers at distances up to 8 m, depending on the surface of the product with a flat or curved surface, at ultrasonic frequencies of oscillations in the range of 0.2... 1 MHz, the duration of the probing packet pulses of 6-8 periods of the frequency of filling with high-frequency current up to 200 A in the EMAP coil. It is shown that defects under the surface of metal products can be detected at depths greater than the value of the Rayleigh wavelength.

12 methods of ultrasonic control and 14 designs of electromagnetic-acoustic transducers which allow to carry out detection of defects of sheets, pipes and cores of small diameter are developed.

A physico-mathematical model of a bushing electromagnetic-acoustic transducer for excitation (reception) of torsional non-dispersive elastic oscillations has been developed. The basis of the model consists of two coils oppositely connected by a magnetic field and the source of the magnetic field in the form of a conductor with current. The developed model takes into account the influence of the geometric dimensions of the coils of the converter and the product, their mutual location, as well as the physical and mechanical characteristics of the material of the investigated metal product. Converters of this type are intended for quality control, diagnostics, measurement of physical and mechanical characteristics of material of tubular metal products.

**Key words:** electromagnetic-acoustic transducer, reception, excitation, ultrasonic oscillations, torsional waves, Rayleigh and Lamb waves, sensitivity increase, Lorentz force, ponderomotor force, generator of powerful current radio pulses

## REFERENCES

1. Petryshchev O. N., Suchkov H. M., Plesnetsov S. Yu. Teoryia y praktyka elektromahnytno-akustycheskoho kontroliia. Chast 1. Teoretycheskye osnovy rascheta y proektyrovanyia elektroakustycheskykh preobrazovatelei elektromahnytnoho typu: monohrafiia. Kharkiv : Vydavnytstvo «Oberih», 2019. 556 p.
2. Plesnetsov S. Yu. Metody i zasoby ultrazvukovoho kontroliu metalovyrobiv trubchatoho, stryzhnevoho ta plastynchatoho typu (ohliad, ch. 1). *Visnyk NTU “KhPI”*. Serii: *Innovatsiini tekhnolohii ta obladnannia obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhii*. Kharkiv : NTU “KhPI”, 2017. No36(1258). P. 49–61.
3. Plesnetsov S. Yu., Yudanova N. M. Metody i zasoby ultrazvukovoho kontroliu metalovyrobiv trubchatoho, stryzhnevoho ta plastynchatoho typu (ohliad, ch. 2). *Visnyk NTU “KhPI”*. Serii: *Innovatsiini tekhnolohii ta obladnannia obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhii*. Kharkiv: NTU “KhPI”, 2017. No38(1259). P. 58–65.
4. Plesnetsov S. Yu., Suchkov H. M., Meshcheriakov S. Yu., Yudanova N. N. Novie razrobotky elektromahnytno-akustycheskykh preobrazovatelei (obzor). *Tekhnicheskaia dyahnostyka y nerazrushaiushchyi kontrol*, 2018. No3. P. 27–34.
5. Plesnetsov S. Yu., Suchkov H. M., Korzh A. Y., Suvorova M. D. Novye teoretycheskye yssledovanyia y razrobotky v oblasti elektromahnytno-akustycheskoho preobrazovanyia (obzor). *Tekhnicheskaia dyahnostyka y nerazrushaiushchyi kontrol*, 2018. No2. P. 24–31.
6. Plesnetsov S. Yu., Suchkov H. M., Petryshchev O. N. O chuvstvytelnosti ultrazvukovoho kontroliia poverkhnostnymy volnamy, vzbuzhdaemymy y prynymaemymy elektromahnytno-akustycheskymy preobrazovateliamy (obzor, ch. 2). *Tekhnicheskaia dyahnostyka y nerazrushaiushchyi kontrol*, 2019. No1. P. 47–52.
7. Salam Bussy, Suchkov H. M., Myhushchenko R. P., Kropachek O. Yu., Plesnetsov S. Yu. Sovremennoe sostoianye metodov y sredstv ultrazvukovoho kontroliia

prokata s prymenenyem elektromahnytno-akustycheskykh preobrazovatelei. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Innovatsiini tekhnologii ta obladnannia obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhii*. Kharkiv : NTU "KhPI", 2019. No12(1337). P. 63–69.

8. Suchkov H. M., Plesnetsov S. Yu. Chuvstvytelnost kontroliia elektromahnytno-akustycheskymy preobrazovateliamy (obzor, ch. 1). *Tekhnicheskaiia dyahnostyka y nerazrushaiushchyi kontrol*, 2018. No4. P. 45–50.

9. Suchkov H. M., Petryshchev O. N., Plesnetsov S. Yu. Chuvstvytelnost ultrazvukovoho kontroliia EMA sposobom pry vyjavleny estestvennykh vnutrennykh defektov metalloyzdelyi. *Vozmozhnosity EMA tolshchynometryy*. (obzor, ch. 3). *Tekhnicheskaiia dyahnostyka y nerazrushaiushchyi kontrol*, 2019. No2. P. 51–57.

10. Plesnetsov S. Yu., Migushchenko R. P., Petryshchev 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).

11. Plesnetsov S. Yu., Petrishchev O. N., Mygushchenko R. P., Suchkov G. M. Simulation of electromagnetic conversion process under torsion waves excitation. Part 2. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2018. No1. P. 30–36.

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. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2018. No3. P. 10–19.

13. Plesnetsov S. Yu., Petryshchev O. N., Myhushchenko R. P., Suchkov H. M. Modelyrovanye protsessa elektromahnytno-akustycheskoho preobrazovanyia pry vzbuzhdeny krutylnykh voln. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2017. No3. P. 79–88.

14. Plesnetsov S. Yu., Myhushchenko R. P., Petryshchev O. N., Suchkov H. M., Khrypunova A. L. Fizychni osnovy stvorennia bezkontaktnykh ultrazvukovykh chastotnykh sensoriv dlia doslidzhennia nanokrystalichnykh feromahnitnykh materialiv. *Zhurnal nano- ta elektronnoi fizyky*, 2018. Tom 10. No2. 9 pp.

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. *Elektrotehnika i elektromekhanika*, 2018. No2. P. 31–35.

16. Plesnetsov S.Iu., Myhushchenko R. P., Suchkov H. M., Petryshchev O. N., Mytyn A. V. Obnaruzhenye ymпульsamy voln Releia nesploshnostei poverkhnosty metalloyzdelyi, ymeiushchykh slozhnuiu formu. *Visnyk NTU “KhPI”. Serii: Innovatsiini tekhnolohii ta obladnannia obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhii*. Kharkiv : NTU “KhPI”, 2016. No38(1210). P. 48–55.

17. Plesnetsov S. Yu. Vysokoefektyvnyi kontrol trub elektromahnitno-akustychnymy peretvoriuvachamy. *Visnyk NTU “KhPI”. Serii: Innovatsiini tekhnolohii ta obladnannia obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhii*. Kharkiv : NTU «KhPI», 2017. No35(1257). P. 44–48.

18. Myhushchenko R. P., Suchkov H. M., Petryshchev O. N., Boliukh V. F., Plesnetsov S. Yu., Kocherha A. Y. Ynformatsyonno-ymerytelnye elektromekhanicheskye preobrazovateli dlia otsenky kachestva poverkhnosty ferromahnytnykh metalloyzdelyi ultrazvukovymy volnamy Releia. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2017. No2. P. 70–76.

19. Plesnetsov S. Yu., Myhushchenko R. P., Suchkov H. M. Metod pidvyshchennia chutlyvosti pry shvydkisnii kompleksnii analohovii i kompiuternii obrobtsi informatsiinykh syhnaliv v pryladakh ultrazvukovoho kontroliu. *Naukovi pratsi DonNTU, Serii: “Obchysliuvalna tekhnika ta avtomatyzatsiia”*, 2017. No1. P. 100–109.

20. Plesnetsov S. Yu. Metod ta zasib ultrazvukovoho elektromahnitno-akustychnoho kontroliu feromahnitnykh metalovyrobiv zi skladnoiu formoiu peretynu z nevelykym rozmirom. *Visnyk NTU “KhPI”. Serii: Innovatsiini tekhnolohii ta obladnannia obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhii*. Kharkiv : NTU “KhPI”, 2018. No23(1299). P. 51–56.

21. Plesnetsov S. Yu. Sposib ta elektromahnitno-akustychnyi peretvoriuvach dlia kontroliu trubchastykh neferomahnitnykh metalovyrobiv z peretynom u vyhliadi kola. *Visnyk NTU “KhPI”. Serii: Innovatsiini tekhnolohii ta obladnannia obrobky*



*materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhii*. Kharkiv : NTU “KhPI”, 2018. No30(1306). P. 46–50.

22. Suchkov H. M., Myhushchenko R. P., Plesnetsov S. Yu., Kropachek O. Yu. Sposob elektromahnytno-akustycheskoho kontroliia metalloyzdelyi bez «mertvoi» zony. *Tekhnicheskaiia dyahnostyka y nerazrushaiushchyi kontrol*, 2018. No1. P. 42–46.

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. No6. P. 18–24.

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. No4. P. 41–49.

25. Salam Bussi, Plesnetsov S. Yu. Praktychni rozrobky elektromahnitno-akustychnykh peretvoriuvachiv. *Visnyk NTU “KhPI”. Serii: Innovatsiini tekhnolohii ta obladnannia obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhii*. Kharkiv : NTU “KhPI”, 2019. No26(1351). P. 57–65.

26. Plesnetsov S.Iu. Novi metody kontroliu tverdosti poverkhnevykh shariv zmitsnenykh metalovyrobiv. *Visnyk NTU «KhPI»*. Serii: *Innovatsiini tekhnolohii ta obladnannia obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhii*. Kharkiv : NTU «KhPI», 2018. No41(1317). P. 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. Vol. 53. No. 12. P. 850–855.

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

29. Plesnetsov S. Yu., Suchkov G. M. Electromagnetic-acoustic method of ultrasonic pulse excitation and reception in metal products. *Visnyk KhNU im. V. N. Karazina. Seriya "Fizyka"*, 2017. Vyp. 27. P. 31–34.

30. Plesnetsov S. Yu., Myhushchenko R. P., Suchkov H. M., Petryshchev O. N., Mytyn O. V. Obnaruzhenye ymпульsamy voln Releia nesploshnostei poverkhnosti metalloyzdelyi, ymeiushchyykh slozhnuiu formu. *Resursosberezhenye y enerhoeffektyvnost protsessov y oborudovaniya obrabotky davlenyem v mashynostroenyy y metallurhyy: materialy 8-yi mizhn. nauk.-tekhn. konf. (m. Kharkiv, 23–25 lystopada 2016 r.)*. Kharkiv. 2016. P. 110–111.

31. Suchkov H. M., Petryshchev O. N., Plesnetsov S. Yu. Razrabotka osnov elektromahnytno-akustycheskoho vozbuzhdeniya krutylnykh voln v trubchatykh metalloyzdelyakh. *Fizychni ta kompiuterni tekhnolohii: tezy XXII mizhn. nauk.-prakt. konf. (m. Kharkiv, 7–9 hrudnia 2016 r.)*. Kharkiv. 2016. P. 469–473.

32. 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)*. Pp.44-47

33. Plesnetsov S. Yu. Obraztsy dlia kalybrovky y proverky ustroystv kontroliia metalloyzdelyi elektromahnytno-akustycheskym sposobom ymпульsamy poverkhnostnykh voln. *MicroCAD – 2017 Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: tezy dopovidei XXV mizhn. nauk.-prakt. konf. (m. Kharkiv, 17–19 travnia 2017 r.)*. Kharkiv: NTU «KhPI», 2017. Ch.II. 346 p.

34. Plesnetsov S. Yu. Bezkontaktnyi vysokoproduktyvnyi ultrazvukovyi kontrol trubchatykh feromahnitnykh metalovyrobiv zi skladnoiu formoiu peretynu. *Suchasni tendentsii rozvytku ukrainskoi nauky: Vseukrainska naukova konferentsiia: materialy Vseukr. nauk. konf. (Pereiaslav-Khmelnyskyi 6–7 travnia 2017 r.)*. Pereiaslav-Khmelnyskyi. 2017. Vyp. 2. 195 p.

35. Plesnetsov S. Yu., Myhushchenko R. P., Suchkov H. M., Petryshchev O. M. Shvydkisna analohova obrobka informatsiinykh syhnaliv v prykladakh neruivnoho kontroliu. *Pryladobuduvannia: stan i perspektyvy: materialy 16-yi mizhn. naukovotekhnichnoi konferentsii (m. Kyiv, 16–17 travnia 2017 r.)*. Kyiv. 2017. P. 91–92.

36. Pliesnetsov S.Iu. Bezkontaktnyi ultrazvukovyi peretvoriuvach dlia kontroliu trubchatykh neferomahnitnykh metalovyrobiv. *Teoretychni ta prykladni aspekty radiotekhniki i pryladobuduvannia*: materialy III Vseukr. nauk.-tekhn. konf. (m. Ternopil, 8–9 chervnia 2017 r.). Ternopil: FOP Palianytsia V. A., 2017. 244 p.

37. Pliesnetsov S. Yu. Kontrol trub elektromahnitno-akustychnymy peretvoriuvachamy dlia zabezpechennia vysokoi efektyvnosti diahnostryky. *Resursozberezhennia ta enerhoefektyvnist protsesiv i obladnannia obrobky tyskom u mashynobuduvanni ta metalurhii*: materialy IX mizhn. nauk.-tekhn. konf. (m. Kharkiv, 22–24 lystopada 2017 r.). Kharkiv. 2017. P. 51–53.

38. Pliesnetsov S. Yu. Zbudzhennia ultrazvukovykh kolyvan v metalakh z dopomohoiu mahnitnykh i elektromahnitnykh poliv. *Fizychni yavyshcha v tverdykh tilakh*: materialy XIII mizhn. naukovoii konferentsii, prysviach. 100-richchiiu z dnia narodzh. ak. I. M. Lifshytsia. (m. Kharkiv, 5–8 hrudnia 2017 r.). Kharkiv: KhNU im. Karazina, 2017. P. 170.

39. Kramarenko D. S., Pliesnetsov S. Yu. Prohramni zasoby dlia analizu elektromahnitnykh yavyshch metodom skinchenykh elementiv. *XII mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia mahistrantiv ta aspirantiv*: mater. konf. (m. Kharkiv, 17–20 kvitnia 2018 r.). Kharkiv : NTU «KhPI», 2018. 233 p.

40. Suchkov H. M., Plesnetsov S. Yu. Sostoianye yssledovanyi y razrobotok v oblasti nerazrushaiushcheho elektromahnytno-akustycheskoho kontroliu, yzmerenyi y dyahnostryky. *Suchasni metody ta zasoby neruinivnoho kontroliu i tekhnichnoi diahnostryky*: zbirka tez dopovidei 22-yi mizhn. konf. (m. Odesa, 10–14 veresnia 2018 r.). Odesa. 2018. P. 16.

41. Suchkov H. M., Plesnetsov S. Yu., Korzh A. Y., Suvorova M. D. Matematycheskoe modelyrovanye rehystryruuiushchykh elektromekhanycheskykh preobrazovatelei dlia kontroliu elementov elektrotekhnichnycheskykh ustroistv. *MicroCAD-2018 Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia*: tezy dopov. 26-yi mizhn. nauk.-prakt. konf. (m. Kharkiv, 16–18 travnia 2018 r.). Kharkiv : NTU «KhPI», 2018. P. 104.

42. Suchkov H. M., Plesnetsov S. Yu. Sostoianye yssledovanyi y razrobotok v oblasti nerazrushaiushcheho elektromahnytno-akustycheskoho kontroliu, yzmerenyi y dyahnostyky. *Resursozberezhennia ta enerhoefektyvnist protsesiv i obladnannia obrobky tyskom u mashynobuduvanni ta metalurhii*: mater. X mizhn. nauk.-tekhn. konf. (m. Kharkiv, 21–23 lystopada 2018 r.). Kharkiv. 2018. P. 103–104.

43. Plesnetsov S. Yu., Zahrebelnyi V. V., Zahrebelna A. V. Ultrazvukovyi rozdilno-poiednanyi elektromahnitno-akustychnyi peretvoriuvach dlia kontroliu feromahnitnykh metalovyrobiv. *Pryladobuduvannia: stan i perspektyvy*: zbir. tez dopov. XVII mizhn. nauk.-tekhn. konf. (m. Kyiv, 15–16 kvitnia 2018 r.). Kyiv. 2018. P. 152.

44. Plesnetsov S. Yu., Kysilov M. V., Korzh D. Yu. Sposib kontroliu tovshchyny pokryttia na elektroprovidnomu vyrobi. *Pryladobuduvannia: stan i perspektyvy*: zbir. tez dopov. XVII mizhn. nauk.-tekhn. konf. (m. Kyiv, 15–16 kvitnia 2018 r.). Kyiv. 2018. P. 182.

45. Plesnetsov S. Yu., Suchkov H. M., Osadchyi V. O. Metod ultrazvukovoho kontroliu pruzhnykh kharakterystyk metalu tonkostinnykh vyrobiv impulsamy khvyl Lemba abo Releia. *Aktualni problemy avtomatyky ta prylobuduvannia*: mater. mizhn. nauk.-tekhn. konf. (m. Kharkiv, 06–07 hrudnia 2018 r.). Kharkiv : FOP Panov A.M., 2018. P. 137.

46. Suchkov H. M., Petryshchev O. M., Plesnetsov S. Yu. Vyiavlennia koroziinykh poshkodzen metalovyrobiv bezkontaktnym ekspres-metodom. *Pohliad u maibutnie prylobuduvannia*: zbir. prats XII nauk.-prakt. konf. studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh (m. Kyiv, 15–16 travnia 2019 r.). Kyiv. 2019. P. 403–406.

47. Sposib ultrazvukovoho kontroliu yakosti skriplennia dielektrychnoho pokryttia z poverkhnevym prosharkom metalovyrobu: pat. 120392 Ukraina: G01N29/38, G01N3/24. No a201711614; zaiav. 27.11.2017; opubl. 10.05.2019, Biul. No 9.

48. Rozdilno-poiednanyi elektromahnitno-akustychnyi peretvoriuvach dlia kontroliu impulsamy khvyl Releia ta Lemba: pat. 117697 Ukraina: G01N29/04. No u201612498; zaiav. 08.12.2016; opubl. 10.07.2017, Biul. No 13.

49. Ultrazvukovy rozdilno-poiednanyi elektromahnitno-akustychnyi peretvoriuvach dlia kontroliu feromahnitnykh metalovyrobiv: pat. 116248 Ukraina: G01N29/04. No u201612502; zaiav. 08.12.2016; opubl. 10.05.2017, Biul. No 9.

50. Sposib ultrazvukovoho kontroliu tverdosti metalu protiazhnoho vyrobu khvyliamy Releia: pat. 116249 Ukraina: G01N29/04. No u201612507; zaiav. 08.12.2016; opubl. 10.05.2017, Biul. No 9.

51. Sposib ultrazvukovoho kontroliu pruzhnykh kharakterystyk metalu tonkostinnykh vyrobiv khvyliamy Lemba: pat. 117698 Ukraina: G01N29/04. No u201612501; zaiav. 08.12.2016; opubl. 10.07.2017, Biul. No 13.

52. Elektromahnitno-akustychnyi peretvoriuvach dlia kontroliu trubchatykh neferomahnitnykh metalovyrobiv z peretynom u vyhliadi kola: pat. 117766 Ukraina G01N29/04. No u201700073; zaiav. 03.01.2017; opubl. 10.07.2017, Biul. No 13.

53. Sposib ultrazvukovoho elektromahnitno-akustychnoho kontroliu protiazhnykh trubchatykh feromahnitnykh metalovyrobiv z skladnoiu formoiu pererizu: pat. 117763 Ukraina: G01N29/04. No u201700069; zaiav. 03.01.2017; opubl. 10.07.2017, Biul. No 13.

54. Sposib potochnoho ultrazvukovoho kontroliu luna-metodom: pat. 117762 Ukraina: G01N29/04. No u201700064; zaiav. 03.01.2017; opubl. 10.07.2017, Biul. No 13.

55. Sposib ultrazvukovoho kontroliu tverdosti metalovyrobu: pat. 121134 Ukraina: G01N29/04. No u201706021; zaiav. 15.06.2017; opubl. 10.07.2017, Biul. No 13.

56. Kombinovanyi elektromahnitno-akustychnyi peretvoriuvach dlia kontroliu impulsamy ultrazvukovykh poverkhnevyykh khvyl: pat. 121968 Ukraina: G01N29/04. No u201705970; zaiav. 15.06.2017; opubl. 26.12.2017, Biul. No 24.

57. Sumishchenyi elektromahnitno-akustychnyi peretvoriuvach dlia kontroliu metalovyrobiv impulsamy ultrazvukovykh poverkhnevyykh khvyl: pat. 129857 Ukraina: G01N29/04. No u201806754; zaiav. 14.06.2018; opubl. 12.11.2018, Biul. No 21.

58. Sposib vyznachennia koefitsiienta Puassona materialu neferomahnitnykh elektroprovodnykh vyrobiv ultrazvukovym elektromahnitno-akustychnym metodom:

pat. 134258 Ukraina: G01N29/04. No u201811953; zaiav. 03.12.2018; opubl. 10.05.2019, Biul. No 9.

59. Sumishchenyi elektromahnitno-akustychnyi peretvoriuvach: pat. 134257 Ukraina: G01N29/04. No u201811951; zaiav. 03.12.2018; opubl. 10.05.2019, Biul. No 9.

60. Sposib impulsnoho ultrazvukovoho elektromahnitno-akustychnoho kontroliu prokatanykh feromahnitnykh vyrobiv: pat. 134256 Ukraina: G01N29/04. No u201811950; zaiav. 03.12.2018; opubl. 10.05.2019, Biul. No 9.

61. Sumishchenyi elektromahnitno-akustychnyi peretvoriuvach dlia kontroliu metalovyrobiv impulsamy vysokochastotnykh ultrazvukovykh khvyl: pat. 134255 Ukraina: G01N29/04. No u201811948; zaiav. 03.12.2018; opubl. 10.05.2019, Biul. No 9.

62. Sposib bezkontaktneho zbudzhennia korotkykh impulsiv ultrazvukovykh khvyl Releia: pat. 136379 Ukraina: G01N29/04. No u201902813; zaiav. 21.03.2019; opubl. 12.08.2019, Biul. No 5.

63. Rozdilno-poiednanyi ultrazvukovyi peretvoriuvach elektromahnitnoho typu dlia kontroliu impulsamy khvyl Releia: pat. 137007 Ukraina: G01N29/04. No u201902812; zaiav. 21.03.2019; opubl. 25.09.2019, Biul. No 18.

64. Rozdilno-poiednanyi elektromahnitno-akustychnyi peretvoriuvach dlia ultrazvukovoho kontroliu impulsamy poverkhnevykh khvyl: pat. 137008 Ukraina: G01N29/04. No u201902812; zaiav. 21.03.2019; opubl. 25.09.2019, Biul. No 18.

65. Prystroi dlia elektromahnitno-akustychnoho zbudzhennia impulsnykh ultrazvukovykh kolyvan: pat. 137011 Ukraina: G01N29/04. No u201902819; zaiav. 21.03.2019; opubl. nadruk. 25.09.2019, Biul. No 18.

66. Rozdilno-poiednanyi bezkontaktnyi ultrazvukovyi peretvoriuvach dlia kontroliu impulsamy poverkhnevykh khvyl: pat. 137259 Ukraina: G01N29/04, G01N29/14. No u201903756; zaiav. 11.04.2019; opubl. 10.10.2019, Biul. No 19.

67. Rozdilno-poiednanyi bezkontaktnyi ultrazvukovyi peretvoriuvach dlia kontroliu impulsamy poverkhnevykh khvyl: pat. 138760 Ukraina: G01N29/04, G01N29/36. No u201903756; zaiav. 20.05.2019; opubl. 10.12.2019, Biul. No 23.

68. Prystrii dlia ustanovky avtomatychnoho ultrazvukovoho bezkontaktneho kontroliu protiazhnykh feromahnitnykh metalovyrobiv: pat. 136357 Ukraina G01N 29/04. No u201902706; zaiav. 20.03.2019; opubl. 12.08.2019, Biul. No 15.

69. Sposib vysokochutlyvoho bezkontaktneho ultrazvukovoho vyjavlennia trishchyn poverkhnevoho sharu metalovyrobiv: pat. 136359 Ukraina: G01N 29/04. No u201902710; zaiav. 20.03.2019; opubl. 12.08.2019, Biul. No 15.

70. Sposib impulsnoho ultrazvukovoho elektromahnitno-akustychnoho kontroliu feromahnitnykh vyrobiv z zachnoiu plosheiu poverkhni: pat. 136380 Ukraina: G01N 29/04. No u201902815; zaiav. 21.03.2019; opubl. 12.08.2019, Biul. No 15.

71. Kombinovanyi rozdilno-poiednanyi elektromahnitno-akustychnyi peretvoriuvach dlia neruinivnoho ultrazvukovoho kontroliu: pat. 137009 Ukraina: G01N 29/04. No u201902816; zaiav. 21.03.2019; opubl. 25.09.2019, Biul. No 18.

72. Sposib impulsnoho produktyvnoho ultrazvukovoho kontroliu dovhykh feromahnitnykh vyrobiv: pat. 137010 Ukraina: G01N 29/04. No u201902817; zaiav. 21.03.2019; opubl. 25.09.2019, Biul. No 18.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД РОЗРОБОК ТА ДОСЛІДЖЕНЬ У СФЕРІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНОГО ТА УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ МЕТАЛОВИРОБІВ .....	24
1.1. Актуальні роботи у сфері ЕМА-контролю .....	24
1.2. Аналіз теоретичних і модельних досліджень.....	39
1.3. Аналіз досліджень ЕМА перетворювачів та розробки, пов'язані з ЕМАП .	50
1.4. Висновки до розділу 1 .....	67
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНОГО СПОСОБУ ЗБУДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ.....	70
2.1 Загальні питання моделювання ЕМАП.....	70
2.2. Теоретичний аналіз взаємодії ЕМАП та металовиробу.....	81
2.3. Моделювання магнітного поля при ЕМА-перетворенні.....	91
2.3.1. Розрахунок змінного магнітного поля в полуму феромагнітному стрижні і визначення коефіцієнта втрат на вихрові струми .....	91
2.3.2. Раціональна модель ЕМАП для контролю трубчастих металострижнів .....	103
2.4. Реалізація теоретичної моделі для випадку збудження поверхневої хвилі у металовиробі .....	106
2.5. Моделювання окремих випадків ЕМА-взаємодії .....	127
2.5.1. Загальні проблеми моделей ЕМА-перетворювачів .....	127
2.5.2. Модельний приклад і кількісна оцінка зв'язку пружних і магнітних полів в об'ємі деформованого шару феромагнетика .....	133
2.5.3. Метод послідовних наближень при математичному моделюванні перетворення електромагнітного поля в поле пружних коливань в струмопровідному попередньо намагніченому шарі феромагнетика .....	137



2.6. Математичні моделі перетворювачів в режимі прийому імпульсів високочастотних пружних коливань.....	140
2.7. Висновки до розділу 2 .....	168
<b>РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНОГО СПОСОБА В УЛЬТРАЗВУКОВОМУ КОНТРОЛІ ЛИСТІВ, ТРУБ І ТРУБОК МАЛОГО ДІАМЕТРУ, СТРИЖНІВ.....</b>	<b>173</b>
3.1. Розробка засобів генерації та збудження сигналу та живлення для ЕМА перетворювачів підвищеної чутливості.....	173
3.2. Дослідження, розробка методів і засобів ультразвукового контролю виробів із значною площею поверхні імпульсами поверхневих хвиль, які збуджуються та приймаються ЕМА перетворювачами.....	186
3.3. Дослідження, розробка методів і засобів ультразвукового контролю стрижнів і трубок малого діаметру, імпульсами, які збуджуються та приймаються ЕМА перетворювачами.....	228
Висновки до розділу 3 .....	235
<b>РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ВИРОБІВ ІЗ ЗНАЧНОЮ ПОВЕРХНЕЮ ТА СТРИЖНІВ І ТРУБОК НЕЗНАЧНОГО ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕТИНУ .....</b>	<b>238</b>
4.1. Метод та інформаційно-вимірювальні електромеханічні перетворювачі для оцінки якості поверхні феромагнітних металовиробів ультразвуковими хвилями Релея з підвищеною чутливістю .....	238
4.2. Методи та засоби для ультразвукової електромагнітно-акустичної дефектоскопії виробів і матеріалів .....	252
4.2.1. Метод та електромагнітно-акустичний перетворювач для виявлення поверхневих і підповерхневих дефектів з використанням імпульсів хвиль Релея .....	252

4.2.2. Електромагнітно-акустичний перетворювач для контролю трубчастих ферромагнітних металовиробів з перетином у вигляді кола.....	259
4.2.3. Метод ультразвукового електромагнітно-акустичного контролю ферромагнітних малогабаритних металовиробів зі складною формою.....	263
4.2.4. Суміщений електромагнітно-акустичний перетворювач для контролю металовиробів імпульсами ультразвукових поверхневих хвиль .....	268
4.2.5. Метод безконтактного ультразвукового ЕМА контролю металічних виробів імпульсами поверхневих хвиль .....	272
4.3. Методи та засоби визначення фізико-механічних властивостей металовиробів .....	275
4.3.1. Метод ультразвукового контролю пружних характеристик металу тонкостінних виробів імпульсами хвиль Лемба .....	275
4.3.2. Метод ультразвукового контролю твердості металовиробу .....	278
4.3.3. Комбінований електромагнітно-акустичний перетворювач для контролю імпульсами ультразвукових поверхневих хвиль фізико-механічних характеристик металовиробів .....	281
4.3.4. Метод ультразвукового контролю твердості металу протяжного виробу імпульсами хвиль Релея.....	286
4.4. Методи та засоби підвищення чутливості електромагнітно-акустичного контролю, вимірювань та діагностики.....	292
4.4.1. Метод поточного імпульсного ультразвукового електромагнітно-акустичного контролю прокатаних ферромагнітних виробів .....	292
4.4.2. Метод ультразвукового електромагнітно-акустичного контролю луна методом .....	296
4.5. Інші засоби та методи ЕМА-перетворення та контролю .....	299
4.6. Висновки до розділу 4 .....	315
ВИСНОВКИ.....	324

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ .....	330
ДОДАТОК А СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА .....	368
ДОДАТОК Б АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ .....	379