

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

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

НОЗДРАЧОВА КАТЕРИНА ЛЕОНІДІВНА

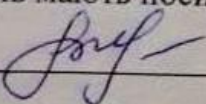
УДК 620.179.16

МЕТОДИ І ЗАСОБИ ЗБУДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ  
ІМПУЛЬСІВ ЄМНІСНИМ МЕТОДОМ

05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин

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

 Катерина НОЗДРАЧОВА

*Ідентифікована за змістом з  
іменем приписаним  
дисертації за свідченням  
Всесвітнього секретаря  
білої ради*



Науковий консультант  
Сучков Григорій Михайлович,  
доктор технічних наук, професор  
*Іван Косіачев*

Харків – 2020

## АНОТАЦІЯ

*Ноздрачова Катерина Леонідівна.* Методи і засоби збудження ультразвукових імпульсів ємнісним методом. На правах рукопису.

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

Дисертація присвячена розробці нових теоретичних положень та засобів для збудження високочастотних ультразвукових імпульсів ємнісними перетворювачами (ЄП) з підвищеною чутливістю на основі збільшення відношення амплітуд корисного сигналу до завад у виробках з електропровідних матеріалів.

Виконано аналітичний огляд та аналіз сучасних засобів і методів контролю та діагностики безконтактними ультразвуковими методами неруйнівного контролю. Встановлено, що в значній мірі виключити недоліки традиційного контактного та безконтактного ультразвукових методів збудження високочастотних ультразвукових імпульсів в електропровідних виробках можливо за рахунок застосування нових принципів створення приладів, адаптації сучасних методів виділення корисних імпульсів з шумів і перешкод, нетрадиційних схемотехнічних рішень. Таким чином можливе збільшення чутливості і підвищення ефективності роботи і області застосування ємнісних перетворювачів і приладів на їх основі. Встановлено доцільність використання відношення амплітуди корисного сигналу до амплітуди завад як характеристику чутливості.

Створена математична модель перетворювача ємнісного типу в режимі збудження ультразвукових хвиль в металах. Побудовано замкнутий розв'язок задачі електростатики для кусково-однорідного середовища, в якій напівпростір заповнений металом з кінцевими значеннями електричної провідності і магнітної проникності.

Отримано вираз для розрахунку поверхневої щільності статичного електричного заряду на поверхні металевого зразка. Отримано і досліджено вираз для розрахунку поверхневої щільності сил Кулона, які формуються перетворювачем ємнісного типу з дисковим електродом. Показано, що основними впливаючими факторами, що визначають поверхневу щільність сил Кулона, і, як наслідок, чутливість перетворювача, є: поляризуюча напруга; ємність перетворювача (діелектрична проникність); розмір перетворювача; величина зазору між перетворювачем і виробом; форма перетворювача.

Отримано вираз для розрахунку амплітудного множника хвилі Релея, що радіально поширюється і збуджується перетворювачем ємнісного типу з дисковим електродом. Введено поняття хвильової характеристики перетворювача ємнісного типу з дисковим електродом.

Наведено результати дослідження ефективності збудження радіально поширюючихся хвиль Релея в широкому частотному діапазоні. Показано, що збудження ультразвукових імпульсів з частотному спектрі в сотні кілогерц можливо перетворювачем, у якого радіус диска не перевищує п'яти міліметрів.

На основі теоретичних здобутків виконано експериментальні дослідження, з яких встановлено: при діаметрах випромінюючого електрода ємнісного перетворювача 5 ... 9,5 мм щільність зарядів плавно спадає до кромки електрода і триває за його межами; при діаметрах випромінюючих електродів 20 ... 31 мм починає проявлятися більш рівномірна область в районі центру електрода, потім відбувається збільшення щільності зарядів при наближенні до краю електрода і потім плавне зменшення щільності, в тому числі і за межами проекції електрода, але в меншій мірі, ніж при малих відносних розмірах електродів; при товщині досліджених зразків в діапазоні 5 ... 25 мм тіньовим методом осциляцій прийнятих п'єзоелектричним перетворювачем імпульсів по амплітуді поперек збуджуючого імпульсного акустичного поля не спостерігалось; характер залежності амплітуд першої і

другої напівхвилі прийнятого першого тіньового імпульсу при всіх досліджених діаметрах електродів ЄП і товщині зразків практично збігаються; враховуючи розподіл амплітуди акустичного поля сформованого ємнісним перетворювачем з діаметрами близько 20 мм і більше можна припустити, що заряди на поверхні електрода ємнісного перетворювача також розподіляються нерівномірно, концентруючись ближче до його краю, тому що це характерно для одиночного відокремленого електропровідного тонкого диска; при визначенні діаграми спрямованості ємнісного перетворювача необхідно враховувати реальну випромінюючу поверхню.

Виходячи з теоретичних досліджень, пояснити ефект плавного зменшення амплітуди ультразвукового імпульсу і існування її за проекцією електрода ємнісного перетворювача на поверхні електропровідного виробу можна тим, що на «індуковані» на поверхні півпростору заряди діють дві основні сили. З одного боку – сила притягнення зарядами на поверхні металу електрода ємнісного перетворювача, а з протилежного – сили відштовхування однойменних зарядів на поверхні металу зразка. Очевидно, сили відштовхування і призводять до зміщення зарядів за проекцію електрода ємнісного перетворювача на півпростір металу, зменшуючи їх щільність під проекцією. З наведених даних також випливає, що при зменшенні діаметра ємнісного перетворювача, розподіл зарядів в поверхневому шарі металу стає більш нерівномірним (в відносних розмірах).

При виконанні роботи розроблено і виготовлено блок формувача послідовності імпульсів, модуль гальванічної опторозв'язки, високовольтний напівміст і підвищуючий симетричний ширококутовий трансформатор для використання в складі вимірювальної, контрольної та діагностичної техніки на основі ЄП.

Запропоновано варіант практичної реалізації одно– та двополярних генераторів потужних радіоімпульсів напруги на базі мікроконтролера, силових MOSFET транзисторів і симетричного підвищувачого ширококутового трансформатора, який забезпечує на ємнісний

перетворювач високочастотні високовольтні імпульси позитивної та негативної полярності, амплітудою до 1 кВ, частотою до 5 МГц тривалістю три періоди частоти заповнення.

Експериментально доведено можливість реалізувати випромінювання ультразвукових коливань ємнісним методом на практиці, із застосуванням сучасних досягнень в області електротехніки. Показано, що співвідношення донний сигнал / завада досягає 15,5 разів. Можливе подальше підвищення амплітуди збуджуючих імпульсів шляхом підвищення поляризуючої і імпульсної напруги. Визначено «мертву» зону, що для однополярної схеми включення складає 26,55 мм, двополярної – 17,7мм.

Одне з досягнень даної розробки дає можливість розроблену схему зробити портативною у вигляді макету дефектоскопу.

Розроблені конструкції ємнісних перетворювачів, що забезпечує більш високу ефективність перетворення електричної енергії в акустичні в порівнянні з відомими конструкціями:

- способи ємнісного збудження і прийому імпульсів високочастотних поверхневих хвиль за допомогою різних варіацій верхніх електродів перетворювача (що розміщуються над поверхнею виробу) і відстаней між ними, які повинні бути кратними довжині хвилі;

- роздільно – поєднані безконтактні ультразвукові ємнісні перетворювачі для контролю імпульсами поверхневих хвиль. Їх конструкція передбачає розміщення випромінюючого і приймаючого електродів перетворювача в одному корпусі, що значно підвищить ефективність контролю і зменшить завади прийнятих імпульсів за рахунок такого конструктивного рішення;

- комбіновані ємнісні перетворювачі для контролю імпульсами ультразвукових хвиль Релея фізико–механічних властивостей металовиробів. Особливості конструкції такого типу ємнісних перетворювачів дають можливість мати високу захищеність від когерентних акустичних завад, що є важливим при визначенні таких параметрів матеріалів як твердість, коефіцієнт Пуасона і т.д.;

– на основі безконтактного ємнісного ультразвукового методу запропоновано способи збудження ультразвукових об'ємних хвиль під кутом до поверхні електропровідного виробу, детально описані схеми і принцип їх реалізації. Визначено, що ефективність безконтактного збудження ультразвукових імпульсів в електропровідному виробі під кутом до поверхні забезпечується за рахунок складання з однаковою фазою амплітуд ультразвукових імпульсів в заданому напрямку;

– спектральний спосіб ультразвукового ємнісного виявлення дефектів на донній поверхні електропровідного виробу. За допомогою якого можна підвищити ефективність виявлення пошкоджень донної поверхні ОК аналізуючи спотворення форми огибаючої спектру прийнятого ємнісним методом пакетного ультразвукового сигналу;

– ємнісні ультразвукові прямі суміщені перетворювачі з регульованою діаграмою спрямованості. Розглянуто два типа перетворювачів, з фіксованим верхнім електродом, радіус викривлення якого визначено експериментально заздалегідь і з електродом, радіус якого можна регулювати в процесі контролю. Основною особливістю реалізації цих способів є забезпечення рівномірності діаграми спрямованості.

– ємнісний спосіб збудження і прийому пружних хвиль. При якому верхній електрод являється як збудником УЗК і приймачем, електричні імпульси на який подаються певної форми з певною періодичністю та амплітудою, що забезпечує підвищення чутливості розробленого способу.

– ультразвуковий комп'ютеризований макет дефектоскопу ємнісного типу. Прилади, які не мають пристрою сполучення з комп'ютером, часто використовуються в дуже обмеженому полі дій. В основному це портативні моделі, що використовуються в польових умовах. У стаціонарному режимі введення інформації в комп'ютер часто є необхідною функцією. Переваги комп'ютеризації фізичних засобів отримання інформації: розширення функціональних можливостей приладів; поліпшення технічних характеристик приладів, зокрема підвищення достовірності результатів

контролю; підвищення продуктивності контролю; можливість використання персоналу без глибокої спеціальної підготовки; подання інформації у вигляді, зручному для оператора.

Тобто, застосування комп'ютерів та мікропроцесорної техніки при розробці дефектоскопів, що використовують ємнісний перетворювачів дозволить не тільки підвищити чутливість контролю, а й швидкодію обробки прийнятої інформації.

*Ключові слова:* ультразвуковий контроль, ультразвукові імпульси, діагностика, ємнісний, перетворювач, генератор потужних радіоімпульсів напруги, широкосмуговий трансформатор, електрод, сили Кулона, поляризуюча напруга, поверхневі хвилі, посилювач, завади.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Сучков Г.М., Глоба С.Н., Ноздрачева Е.Л., Юданова Н.Н., Петрищев О.Н., Горбашова А.Г. Основные методы контроля качества сварных соединений при ремонте и производстве подвижного состава. *Вагонный парк*. Харьков. 2011. №8. С. 19–23.

2. Сучков Г.М., Єрощенко В.М., Міщанчук Е.В., Ноздрачова К.Л., Титова Н.В. Можливість ультразвукового контролю зварних з'єднань без видалення фарбового покриття. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Харків. 2011. Вип. 19. С. 199–203.

3. Ноздрачова К.Л. Визначення «мертвої зони» при контролі виробів циліндричної форми. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. Харків. 2013. №4 (978). С. 102–105.

4. Сучков Г.М., Глоба С.Н., Десятниченко А.В., Хомяк Ю.В., Хащина С.В., Познякова М.Е., Петрищев О.Н., Ноздрачева Е.Л. Силовая электроника в устройствах неразрушающего контроля. Генераторы радиоимпульсов большой пикової мощности. *Энергосбережение*.

*Энергетика. Энергоаудит. спец. выпуск.* Т 2. Харьков, 2013. № 8 (114). С 98–101.

5. Ноздрачова К.Л. Особливості ультразвукового контролю протяжних виробів. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Харків. 2013. № 11(985). – С. 29–32.

6. Ноздрачова К.Л. Надійність ультразвукового контролю стрижнів круглого і шестигранного перерізу в виробничих умовах. *Український метрологічний журнал*. Харків. 2013. № 1. С. 30–33.

7. Горбашова А.Г., Петрищев О.Н., Сучков Г.М., Романюк М.И., Хащина С.В., Ноздрачова Е.Л. Оценка механизмов ЭМА преобразования при излучении и приеме поверхностных волн. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка*. Харків. 2013. № 34 (1007). С. 131–155.

8. Сучков Г.М., Ноздрачова К.Л. Безконтактний ємнісний спосіб збудження і прийому пружних хвиль. *Методи та прилади контролю якості*. Івано-Франківськ. 2013. № 2(31). С. 3–6.

9. Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Ноздрачева Е.Л., Романюк М.И. Математическое моделирование преобразователя емкостного типа в режиме возбуждения ультразвуковых волн в металлах. Часть 1. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Харків. 2014. № 19 (1062). С. 163–175.

10. Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Ноздрачева Е.Л., Романюк М.И. О возбуждении ультразвуковых волн в металлах емкостным преобразователем. Часть 1. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. Киев. 2015. № 1. С. 45–50.

11. Ноздрачева Е.Л., Сучков Г.М., Петрищев О.Н. Особенности возбуждения ультразвуковых импульсов емкостным преобразователем *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація»*. Красноармійськ. №1(28) 2015. С. 165–170.

12. Ноздрачева Е. Л. Развитие теории и практики создания емкостных преобразователей для ультразвукового контроля металлоизделий (Обзор).



*Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка.* Харків. 2015. № 19 (1128). С. 29–54.

13. Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Ноздрачова К.Л. Модель ультразвуковых электромеханических прерывных преобразователей ультразвуковых волн Релея. *Техническая электродинамика.* 2016. №6. С. 83–89. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.06.083/>

14. Ноздрачева Е.Л., Манько В.В. Особенности контроля и диагностики камер запуска и приема очистных и диагностических устройств. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії.* Харків, 2018. № 23 (1299). С. 45–50.

15. Petrishchev O.N., Nozdrachova K.L., Suchkov G.M., Myhushchenko R.P., Kropachek O.Yu., Plesnetsov S.Yu. Improving principles of electric energy pulse transformation into high-frequency mechanical energy using capacitive method. *Technical Electrodynamics.* 2019(6). P. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.018.>

16. Ноздрачова К.Л. Ємнісні способи збудження імпульсів ультразвукових хвиль в електропровідних виробах під кутом до поверхні. *Вісник НТУ «ХПІ».* Харків. 2019. № 11(1336). С. 48–52.

17. Ноздрачова К.Л. Роздільно-поєднаний безконтактний ультразвуковий ємнісний перетворювач для контролю імпульсами поверхневих хвиль. *Вісник НТУ «ХПІ».* Харків. 2019. № 12(1337). С. 41–44.

18. Ноздрачова К.Л., Слободчук А.Ю., Юданова Н.М. Комбіновані ємнісні перетворювачі для контролю імпульсами ультразвукових хвиль релея фізико-механічних властивостей металовиробів. *Вісник НТУ «ХПІ».* Харків. 2019. № 26(1351). С. 28–35.

19. Салам Буссі Еп Мішел Кассаблі, Ноздрачова К.Л., Сучков Г.М., Слободчук А.Ю. Новый безконтактный метод виявлення дефектів металовиробів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність.* Харків. 2019. № 29 (1354). С. 34–40.

20. Nozdrachova K. L., Slobodchuk A. Yu., Suchkov G. M., Migushchenko R. P. & Kropachek O. Yu. Power Supplies of High-Frequency Capacitive Transducers for Measurement, Monitoring, and Diagnostics of Metal Products. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. No 56(3), Pp. 242–248

21. Ноздрачова К.Л., Слободчук А.Ю. Однополярне джерело живлення високочастотних ємнісних перетворювачів для вимірювання, контролю та діагностування металовиробів. *Методи та прилади контролю якості*. Івано-Франківськ. 2020. № 1(44). С. 99–109.

22. Ноздрачова К.Л. Ультразвуковий ємнісний спектральний спосіб виявлення дефектів об'ємними хвилями на донній поверхні електропровідного виробу. / *Вісник НТУ «ХПИ»*. Харків. 2020. № 2 (1356). С. 39–44.

23. Хащина С.В., Хомяк Ю.В., Десятниченко А.В., Ноздрачова Е.Л., Сучков Г.М. Экологичные методы и средства неразрушающего контроля. *І межотраслева научно-практическа конференція молодих учених і спеціалістів в області проектування підприємств горно-металургічного комплексу, енерго- і ресурсобереження, захисту оточуючої природної середовища: тези докл. (г. Харків, 27–28 березня 2012 р.)*. Харків. 2012. С. 157–163.

24. Сучков Г.М., Познякова М.Е., Десятниченко А.В., Ноздрачева Е.Л. Выбор питания преобразователей импульсных ультразвуковых средств контроля. *Неруйнівний контроль та технічна діагностика: матеріали VII націон. наук.-техн. конф., (м. Київ, 20–23 листопада 2012 р.)*. Київ: УТ НКТД, 2012. С. 123-128.

25. Сучков Г.М., Глоба С.Н., Ноздрачева Е.Л., Хомяк Ю.В., Десятниченко А.С., Хащина С.В., Познякова М.Е. Новые разработки кафедры ПМНК НТУ «ХПИ» в области неразрушающего контроля. *Приладобудування: стан і перспективи: тези доп. IX міжнар. наук.-техн. конф. (м. Київ, 23–24 квітня 2013 р.)*. Київ : НТУУ «КПІ», 2013. С. 202.

26. Глоба Светлана, Ноздрачёва Екатерина, Чунихина Татьяна, Ле Чи Хиеу Комплексный контроль качества изделий и объектов. *Метрология и Метрологическое Обеспечение: сборник докл. XXIII Национального Симпозиума с Международным участием* (г. Созополь, 9–13 сентября 2013 г.). Болгария, г. Созополь. 2013. С. 384–388.

27. Сучков Г.М., Ноздрачова К.Л. Ємнісний спосіб збудження пружних хвиль. *Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання: збірник тез 4-ї науково-практичної конференції студентів і молодих учених* (м. Івано-Франківськ, 26–27 листопада 2013 р.). Івано-Франківськ, 2013. С. 172–173.

28. Петрищев О.Н., Сучков Г.М., Ноздрачова К.Л. Ємнісний спосіб ультразвукового контролю металовиробів. *Приладобудування 2014: стан і перспективи: тези доп. XIII міжнар. наук.-техн. конф.* (м. Київ, 23–24 квітня 2014 р.). Київ: НТУУ «КПІ». 2014. С. 183–184.

29. Петрищев О.Н., Сучков Г.М., Ноздрачева Е.Л. Математическая модель емкостного преобразователя в режиме возбуждения ультразвуковых волн. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. XXII міжнар. наук.-практ. конф.* (м. Харків, 21–23 трав. 2014 р.). Харків: НТУ «ХПІ». 2014. С. 179.

30. Ноздрачова К.Л., Сучков Г.М. Применение ультразвукового емкостного метода в неразрушающем контроле металлоизделий. *Актуальні проблеми автоматики та приладобудування: матеріали I Всеукраїнської науково-технічної конференції.* (м. Харків, 11–12 грудня 2014 р.). Харків, 2014. С. 142–143.

31. Сучков Григорий, Екатерина Ноздрачёва, Татьяна Чунихина Ультразвуковой преобразователь емкостного типа для измерений и контроля. *Метрология и Метрологическое Обеспечение 2014 : сборник докл. XXIV Национального Симпозиума с Международным участием* (г. Созополь, 7–11 сентября 2014 г.). Болгария, г. Созополь. 2014. С. 185–188.

32. Петрищев О.Н., Сучков Г.М., Ноздрачева Е.Л., Куличенко В.В. Исследование импульсного емкостного ультразвукового преобразователя в режиме излучения. *Приладобудування 2015: стан і перспективи*: тези доп. XIII міжнар. наук.-техн. конф. (м. Київ, 22–23 квітня 2015 р.). Київ: НТУУ «КПІ». 2015. С. 173–174.

33. Ноздрачева Е.Л., Манько В.В. Неразрушающий контроль камер запуска и приема очистных и диагностических устройств. *Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії*: тези доп. X міжнар. наук.-технічн. конф., (м, Харків, 21–23 листопада 2018 р.). Харків: НТУ «ХПІ», 2018. С. 68–70.

34. Ноздрачова К.Л. Ультразвукова контрольна система на основі ємнісного перетворювача. *Сучасний рух науки: VIII Міжнародна науково-практична інтернет-конференція* (м. Дніпро, 3–4 жовтня 2019 р.). *Міжнародний електронний науково-практичний журнал «WayScience»*. Дніпро, 2019. С. 624–628.

35. Ноздрачова К.Л. Широкополосний безконтактний ємнісний перетворювач. *Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання*: тези доп. VII науково-практичної конференції (м. Івано-Франківськ, 19–20 жовтня 2019 р.). Івано-Франківськ, ІФНТУНГ 2019. С.91–93.

36. Ноздрачова К.Л., Слободчук А.Ю. Ємнісний прямий суміщений перетворювач для ультразвукового контролю з регульованою діаграмою спрямованості. *Метрологія, інформаційно-вимірвальні технології та системи*: тези доп. VII міжнародної науково-практичної конференції (м, Харків, 18–19 лютого 2020 р.). Харків: ХНУРЕ, 2020. С. 102–103.

37. Ноздрачова К.Л., Слободчук А.Ю. Дослідження передавальних характеристик дискового ємнісного перетворювача в режимі збудження ультразвукових хвиль Релея. *Метрологія та вимірвальна техніка (Метрологія–2020)*: тези доп. XII міжнародної науково-технічної

конференції (м, Харків, 6–8 жовтня 2020 р.). Харків: ННЦ «Інститут метрології», 2020. С. 38.

38. Спосіб ультразвукового контролю виробів широкосмуговим електромагнітно-акустичним перетворювачем: пат. 71700 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01); № у 2011 15525; заяв. 28.12.2011; надрук. 25.07.2012, Бюл. №14. 4 с.

39. Спосіб імерсійного ультразвукового контролю розвинених в одному напрямку виробів з перетином у вигляді кола: пат. 72057 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2011 14615; заяв. 09.12.2011; надрук. 10.08.2012, Бюл. №15. 4 с.

40. Пристрій для імерсійного ультразвукового контролю: пат. 80269 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2012 11852; заяв. 15.10.2012; надрук. 27.05.2013, Бюл. №10. 4 с.

41. Спосіб імерсійного ультразвукового контролю: пат. 82092 Україна, МПК G 01 N 29/04. № у 2012 14317; заяв. 14.12.2012; надрук. 25.07.2013, Бюл. № 14. 4 с.

42. Спосіб збудження та прийому високочастотних імпульсів у металевому виробі ємнісним перетворювачем: пат. 94611 Україна, МПК G 01 № 29/34 (2006.01); № у 2014 04754; заяв. 05.05.2014; надрук. 25.11.2014, Бюл. № 22. 4 с.

43. Ультразвуковий ємнісний засіб для збудження і прийому пружних хвиль: пат. 94693 (Україна), МПК G 01 N 29/34 (2006.01). № у 2014 06364; заяв. 10.06.2014; надрук. 25.11.2014, Бюл. № 22. 4 с.

44. Спосіб ємнісного збудження однонаправлених імпульсів ультразвукових поверхневих хвиль в металовиробах для продуктивної діагностики: пат. 138382 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 05296; заяв. 20.05.2019; надрук. 25.11.2019, Бюл. № 22. 4 с.

45. Спосіб ємнісного збудження однонаправлених імпульсів ультразвукових поверхневих хвиль в металовиробах: пат. 138383 Україна,

МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 05297; заяв. 20.05.2019; надрук. 25.11.2019, Бюл. № 22. 4 с.

46. Спосіб безконтактного ємнісного збудження імпульсів ультразвукових поверхневих хвиль Релея в виробах з електропровідних матеріалів: пат. 138392 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 05371; заяв. 20.05.2019; надрук. 25.11.2019, Бюл. № 22. 4 с.

47. Спосіб ємнісного збудження імпульсів високочастотних ультразвукових хвиль Релея в електропровідних виробах: пат. 138394 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 05375; заяв. 20.05.2019; надрук. 25.11.2019, Бюл. № 22. 4 с.

48. Спосіб ємнісного збудження однонаправлених імпульсів ультразвукових хвиль Релея із значною величиною довжини хвилі в виробах з електропровідних матеріалів: пат. 138396 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 05380; заяв. 20.05.2019; надрук. 25.11.2019, Бюл. № 22. 4 с.

49. Спосіб безконтактного збудження імпульсів ультразвукових хвиль Релея в електропровідних виробах: пат. 138398 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 05384; заяв. 20.05.2019; надрук. 25.11.2019, Бюл. № 22. 4 с.

50. Спосіб ємнісного збудження однонаправлених високочастотних імпульсів ультразвукових поверхневих хвиль в металовиробах: пат. 138761 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 05324; заяв. 20.05.2019; надрук. 10.12.2019, Бюл. № 23. 4 с.

51. Спосіб ємнісного збудження однонаправлених імпульсів ультразвукових хвиль Релея в виробах з електропровідних матеріалів: пат. 138776 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 05389; заяв. 20.05.2019; надрук. 10.12.2019, Бюл. № 23. 4 с.

52. Спосіб безконтактного ємнісного збудження імпульсів ультразвукових поверхневих хвиль Релея в виробах з електропровідних матеріалів: пат. 138777 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 05391; заяв. 20.05.2019; надрук. 10.12.2019, Бюл. № 23. 4 с.

53. Накладний ультразвуковий ємнісний перетворювач: пат. 138998 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 06663; заяв. 13.06.2019; надрук. 10.12.2019, Бюл. № 23. 4 с.

54. Спосіб ємнісного ультразвукового контролю поверхні електропровідних виробів: пат. 139000 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 06668; заяв. 13.06.2019; надрук. 10.12.2019, Бюл. № 23. 4 с.

55. Спосіб ємнісного ультразвукового контролю твердості поверхневого шару протяжного електропровідного виробу: пат. 139001 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 06669; заяв. 13.06.2019; надрук. 10.12.2019, Бюл. № 23. 4 с.

56. Ультразвуковий комп'ютеризований дефектоскоп ємнісного типу: пат. 139241 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 06670; заяв. 13.06.2019; надрук. 26.12.2019, Бюл. № 24. 4 с.

57. Роздільно-поєднаний ємнісний перетворювач для контролю імпульсами хвиль Релея та Лемба: пат. 139245 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 06691; заяв. 13.06.2019; надрук. 26.12.2019, Бюл. № 24. 4 с.

58. Спосіб продуктивного ємнісного ультразвукового контролю електропровідних виробів імпульсами поверхневих хвиль: пат. 139246 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 06692; заяв. 13.06.2019; надрук. 26.12.2019, Бюл. № 24. 4 с.

59. Роздільно-поєднаний ємнісний перетворювач для контролю імпульсами хвиль Релея та Лемба: пат. 139330 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 07457; заяв. 04.07.2019; надрук. 26.12.2019, Бюл. № 24. 4 с.

60. Ширококутовий ємнісний перетворювач для контролю електропровідних виробів імпульсами ультразвукових поверхневих хвиль. пат. 140190 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 07496; заяв. 04.07.2019; надрук. 10.02.2020, Бюл. № 3. 4 с.

61. Комбінований ємнісний перетворювач для контролю імпульсами ультразвукових поверхневих хвиль: пат. 140191 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 07497; заяв. 04.07.2019; надрук. 10.02.2020, Бюл. № 3. 4 с.

62. Ємнісний ультразвуковий прямий суміщений перетворювач: пат. 140269 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 08176; заяв. 04.07.2019; надрук. 10.02.2020, Бюл. № 3. 4 с.

63. Спосіб ємнісного збудження імпульсів ультразвукових об'ємних хвиль під кутом до поверхні електропровідних виробів: пат. 140270 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 08177; заяв. 15.07.2019; надрук. 10.02.2020, Бюл. № 3. 4 с.

64. Спосіб ультразвукового контролю ємнісним методом: пат. 140366 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 08172; заяв. 15.07.2019; надрук. 10.03.2020, Бюл. № 5. 4 с.

65. Роздільно-поєднаний ультразвуковий ємнісний перетворювач для контролю імпульсами поверхневих хвиль: пат. 140386 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 07454; заяв. 04.07.2019; надрук. 25.02.2020, Бюл. № 4. 4 с.

66. Ультразвуковий роздільно-поєднаний ємнісний перетворювач для контролю імпульсами поверхневих хвиль: пат. 140387 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 07480; заяв. 04.07.2019; надрук. 25.02.2020, Бюл. № 4. 4 с.

67. Ємнісний ультразвуковий прямий суміщений перетворювач, що регулюється: пат. 140417 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 08179; заяв. 15.07.2019; надрук. 25.02.2020, Бюл. № 4. 4 с.

68. Спектральний спосіб ультразвукового ємнісного виявлення дефектів на донній поверхні електропровідного виробу: пат. 140606 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 07474; заяв. 04.07.2019; надрук. 10.03.2020, Бюл. № 5. 4 с.

69. Ультразвуковий роздільно-поєднаний високочастотний ємнісний перетворювач для контролю імпульсами хвиль Релея: пат. 140607 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 07492; заяв. 04.07.2019; надрук. 10.03.2020, Бюл. № 5. 4 с.

70. Комбінований роздільно-поєднаний ємнісний перетворювач для



неруйнівного ультразвукового контролю: пат. 140608 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 07493; заяв. 04.07.2019; надрук. 10.03.2020, Бюл. № 5. 4 с.

71. Спосіб ємнісного ультразвукового контролю твердості електропровідного виробу: пат. 140609 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 07494; заяв. 04.07.2019; надрук. 10.03.2020, Бюл. № 5. 4 с.

72. Ультразвуковий комбінований ємнісний перетворювач для контролю електропровідних виробів імпульсами хвиль Релея: пат. 140610 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 07495; заяв. 04.07.2019; надрук. 10.03.2020, Бюл. № 5. 4 с.

73. Безконтактний комбінований імпульсний ультразвуковий перетворювач для визначення коефіцієнта Пуассона електропровідних феромагнітних виробів: пат. 140680 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 08172; заяв. 15.07.2019; надрук. 10.03.2020, Бюл. № 5. 4 с.

74. Спосіб ємнісного збудження імпульсів ультразвукових об'ємних хвиль під кутом до поверхні електропровідних виробів: пат. 140682 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 08174; заяв. 15.07.2019; надрук. 10.03.2020, Бюл. № 5. 4 с.

75. Спосіб ультразвукового ємнісного контролю поверхні електропровідних виробів з прямолінійними ділянками країв: пат. 141331 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № у 2019 06694; заяв. 13.06.2019; надрук. 10.04.2020, Бюл. № 7. 4 с.

## ABSTRACT

*Nozdrachova Kateryna Leonidovna.* Methods and means of excitation of ultrasonic pulses by capacitive method. On the rights of the manuscript.

Thesis for a Doctor Degree in Engineering, specialty 05.11.13 "Devices and methods of testing and determination of composition of substances" - National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute".

The dissertation is devoted to the development of new theoretical provisions and means for excitation of high-frequency ultrasonic pulses by capacitive transducers (CT) with increased sensitivity on the basis of increasing the ratio of useful signal amplitudes to interferences in products made of electrically conductive materials.

Analytical review and analysis of modern means and methods of testing and diagnostics by non-contact ultrasonic methods of non-destructive testing are performed. It is established that general elimination of the shortcomings of traditional contact and non-contact ultrasonic methods of excitation of high-frequency ultrasonic pulses in electrically conductive products is possible through the application of new principles of device construction, adaptation of modern methods of separation of useful pulses from noise and interference, unconventional circuitry solutions. This way it is possible to increase the sensitivity, efficacy and the areas of application of capacitive converters and devices based on them. The expediency of using the ratio of the amplitude of the useful signal to the amplitude of interference as a characteristic of sensitivity is established.

A mathematical model of a capacitive type converter in the mode of ultrasonic waves excitation in metals is created. A closed solution of the electrostatics problem for a piecewise homogeneous medium is constructed, in which the half-space is filled with metal with finite values of electrical conductivity and magnetic permeability.

An expression for calculating the surface density of static electric charge on

the surface of a metal sample is obtained. An expression for calculating the surface density of Coulomb forces formed by a capacitive-type converter with a disk electrode is obtained and investigated. It is shown that the main influencing factors that determine the surface density of Coulomb forces, and, as a consequence, the sensitivity of the transducer, are: polarizing voltage; converter capacity (dielectric constant); the size of the converter; the size of the gap between the transducer and the product; the shape of the converter.

An expression is obtained for calculating the amplitude multiplier of a radially propagating Rayleigh wave, which is excited by a capacitive type converter with a disk electrode. The concept of wave characteristic of a capacitive type converter with a disk electrode is introduced.

The results of the excitation efficiency of radially propagating Rayleigh waves in a wide frequency range study are presented. It is shown that excitation of ultrasonic pulses with a frequency spectrum in the hundreds of kilohertz is possible by a transducer the disk radius of which does not exceed five millimeters.

On the basis of theoretical research experimental researches were conducted, from which it is established that: at capacitive converter radiating electrode diameters of 5 ... 9,5 mm the density of charges drops smoothly towards the electrode edge and expands outside of it; at diameters of radiating electrodes of 20 ... 31 mm the more uniform area around the center of an electrode becomes more prominent, beyond which there is an increase in density of charges towards the electrode edge, followed by gradual decrease in density, including outside of the electrode projection, but to a lesser extent, than at small relative sizes of electrodes; at the thickness of the studied samples in the range of 5 ... 25 mm via shadow method no amplitude oscillations of the pulses received by the piezoelectric transducer across the exciting pulsed acoustic field were observed; the nature of the dependence of the amplitudes of the first and second half-waves of the received first shadow pulse at all the studied diameters of the CT electrodes and the sample thickness is almost identical; given the acoustic field amplitude distribution generated by the capacitive transducer with diameter of about 20 mm and more, it can be assumed that the

charges on the capacitive transducer electrode surface are also unevenly distributed, concentrating closer to its edge; when determining the radiation pattern of the capacitive transducer, it is necessary to take into account the real radiating surface.

Based on theoretical studies, the explanation of the effect of gradual decrease in the amplitude of the ultrasonic pulse and its existence beyond the projection of the capacitive transducer electrode on the conductive product surface can be that the charges "induced" on the surface of the half-space are affected by two main forces. On one hand - the force of attraction of charges on the metal surface of the capacitive transducer electrode, and on the other hand - the repulsive force of the charges of the same sign on the metal surface of the sample. Obviously, the repulsive forces also lead to a shift of the charges behind the projection of the capacitive transducer electrode on the half-space of the metal, reducing their density under the projection. From the above data it also follows that with reduction of the diameter of the capacitive transducer, the distribution of charges in the surface layer of metal becomes more uneven (in relative dimensions).

During the work execution the pulse sequence shaper block, the galvanic optocoupler module, the high-voltage half-bridge and the step-up symmetric broadband transformer for use as a part of new measuring, testing and diagnostic technology based on CT are developed and built.

A variant of practical implementation of uni- and bipolar generators of powerful radio voltage pulses based on a microcontroller, MOSFET power transistors and a symmetric step-up broadband transformer, which provides high-frequency high voltage pulses of positive and negative polarity at amplitude of up to 1 kV and frequency of up to 5 MHz with duration of three filling frequency periods is proposed.

The possibility of realizing the emission of ultrasonic oscillations by the capacitive method in practice, with the application of modern achievements in the field of electrical engineering, has been experimentally proved. It is shown that the bottom signal / noise ratio reaches 15.5. It is possible to further increase the amplitude of the excitation pulses by increasing the polarizing and pulsed voltages.

The "dead" zone was determined, which for a unipolar switching scheme is 26.55 mm, for bipolar - 17.7 mm.

One of the achievements of this development makes it possible to make the developed scheme portable in the form of a flaw detector model.

Designs of capacitive converters are developed, allowing for higher efficiency of conversion of electrical energy into acoustic in comparison with known designs:

- methods of capacitive excitation and reception of pulses of high-frequency surface waves by means of different variations of the upper electrodes of the transducer (located above the surface of the product) and the distances between them, which must be multiples of the wavelength;

- separately-connected non-contact ultrasonic capacitive transducers for testing via pulses of surface waves. Their design provides for the placement of the emitting and receiving electrodes of the transducer in one housing, which will significantly increase the efficiency of testing and reduce the interference of the received pulses due to such a design solution;

- combined capacitive transducers for pulse testing of physical and mechanical properties of metal products via ultrasonic Rayleigh waves. Features of a design of this type of capacitive transducers provide high protection against coherent acoustic interference that is important at definition of such parameters of materials as hardness, Poisson's ratio, etc.;

- on the basis of the non-contact capacitive ultrasonic method the methods of excitation of ultrasonic bulk waves at an angle to the surface of the electrically conductive product are offered, the schemes and the principle of their realization are described in detail. It is determined that the efficiency of non-contact excitation of ultrasonic pulses in an electrically conductive product at an angle to the surface is provided by addition of the amplitudes of ultrasonic pulses with the same phase in a given direction;

- spectral method of ultrasonic capacitive detection of defects on the bottom surface of an electrically conductive product. With which it is possible to increase the efficiency of sample bottom surface damage detecting by analyzing the distortion

of the shape of the packet ultrasound signal spectrum envelope received via capacitive method;

- capacitive ultrasonic direct combined transducers with adjustable pattern.

Two types of transducers are considered, with a fixed upper electrode, the radius of curvature of which is determined experimentally in advance, and with an electrode, the radius of which can be adjusted during the process of testing. The main feature of the implementation of these methods is to ensure the uniformity of the pattern.

- capacitive method of excitation and reception of elastic waves. In which the upper electrode is both the exciter of the ultrasound and the receiver, the electrical pulses to which are fed a certain shape with a certain frequency and amplitude, which increases the sensitivity of the developed method.

- ultrasonic computerized model of a capacitive flaw detector. Devices that do not have a computer connection device are often used in a very limited field of action. These are mainly portable models used in the field. In stationary mode, entering information into a computer is often a necessary feature. Advantages of computerization of physical means of obtaining information: expansion of functionality of devices; improving the technical characteristics of devices, in particular increasing the reliability of testing results; increase of testing productivity; the possibility of using staff without deep special training; presentation of information in a form convenient to the operator.

That is, the use of computers and microprocessor technology in the development of flaw detectors using capacitive transducers will not only increase the sensitivity of testing, but also the speed of received information processing.

Key words: ultrasonic testing, ultrasonic pulses, diagnostics, capacitive, transducer, generator of powerful voltage radio pulses, broadband transformer, electrode, Coulomb forces, polarizing voltage, surface waves, amplifier, interference.

**REFERENCES**

1. Suchkov G. M., Globa S. N., Nozdracheva E. L., Yudanova N. N., Petrishev O. N., Gorbashova A. G. Osnovnye metody kontrolya kachestva svarnyh soedinenij pri remonte i proizvodstve podvizhnogo sostava. Vagonnyj park. Kharkiv. 2011. No 8. P. 19–23.
2. Suchkov G. M., Yeroshenkov V. M., Mishanchuk E. V., Nozdrachova K. L., Titova N. V. Mozhlivist ultrazvukovogo kontrolyu zvarnih z'yednan bez vidalennya farbovogo pokrittya. Visnik NTU «HPI». Kharkiv: NTU «HPI», 2011. No. 19. P. 199–203.
3. Nozdrachova K. L. Viznachennya «mertvoyi zoni» pri kontroli virobiv cilindrichnoyi formi. Visnik NTU «HPI». Seriya: Novi rishennya u suchasnih tehnologiyah. Kharkiv: NTU «HPI», 2013. No 4 (978). P. 102–105.
4. Suchkov G.M., Globa S.N., Desyatnichenko A.V., Homyak Yu.V., Hashina S.V., Poznyakova M.E., Petrishev O.N., Nozdracheva E.L. Silovaya elektronika v ustrojstvah nerazrushayushego kontrolya. Generatory radioimpulsov bolshoj pikovoj moshnosti. Energoberezhenie. Energetika. Energoaudit. spec. vypusk. T 2. Kharkiv. 2013. No 8 (114). P 98–101.
5. Nozdrachova K.L. Osoblivosti ultrazvukovogo kontrolyu protyazhnyh virobiv. Visnik NTU «HPI». Kharkiv: NTU «HPI», 2013. No 11(985). – P. 29–32.
6. Nozdrachova K.L. Nadijnist ultrazvukovogo kontrolyu strizhniv kruglogo i shestigrannogo pererizu v virobnychih umovah. Ukrayinskij metrologichnij zhurnal. Kharkiv: NNC «Institut metrologiyi», 2013. No 1. P. 30–33.
7. Gorbashova A.G., Petrishev O.N., Suchkov G.M., Romanyuk M.I., Hashina S.V., Nozdrachova E.L. Ocenka mehanizmov EMA preobrazovaniya pri izluchenii i prieme poverhnostnyh voln. Visnik NTU «HPI». Seriya: Elektroenergetika ta peretvoryvalna tehnika. Kharkiv: NTU «HPI», 2013. No 34 (1007). P. 131–155.

8. Suchkov G.M., Nozdrachova K.L. Bezkontaktnij yemnisnij sposib zbudzhennya i prijomu pruzhnyh hvil. Metodi ta priladi kontrolyu yakosti. Ivano-Frankivsk: IFNTUNG, 2013. No 2(31). P. 3–6.

9. Suchkov G.M., Nozdrachova K.L. Yemnisnij sposib zbudzhennya pruzhnyh hvil. Metodi ta zasobi nerujnivnogo kontrolyu promislovogo obladnannya: zbirnik tez 4-yi naukovo-praktichnoyi konferenciyi studentiv i molodih uchenih (Ivano-Frankivsk, 26–27 listopada 2013 r.). Ivano-Frankivsk. 2013. P. 172–173.

10. Suchkov G. M., Petrishev O. N., Nozdracheva E. L., Romanyuk M.I. Matematicheskoe modelirovanie preobrazovatelya emkostnogo tipa v rezhime vozbuzhdeniya ultrazvukovyh voln v metallah. Chast 1. Visnik NTU «HPI». Kharkiv: NTU «HPI», 2014. No 19 (1062). P. 163–175.

11. Petrishev O.N., Suchkov G.M., Nozdracheva E.L. Matematicheskaya model emkostnogo preobrazovatelya v rezhime vozbuzhdeniya ultrazvukovyh voln. Informacijni tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya: tezi dop. HHII mizhnar. nauk.-prakt. konf. (Kharkiv, 21–23 travnya 2014 r.). Kharkiv: NTU «HPI», 2014. P. 179.

12. Suchkov G.M., Petrishev O.N., Nozdracheva E.L., Romanyuk M.I. O vozbuzhdenii ultrazvukovyh voln v metallah emkostnym preobrazovatelem. Chast 1. Tehnicheskaya diagnostika i nerazrushayushij kontrol. Kyiv. 2015. No 1. P. 45–50.

13. Nozdracheva E.L., Suchkov G.M., Petrishev O.N. Osobennosti vozbuzhdeniya ultrazvukovyh impulsiv emkostnym preobrazovatelem Naukovi praci Doneckogo nacionalnogo tehnicnogo universitetu. Seriya: «Obchislyvalna tehnika ta avtomatizaciya». Krasnoarmiysk. No1(28)'2015. P. 165–170.

14. Nozdracheva E. L. Razvitie teorii i praktiki sozdaniya emkostnyh preobrazovatelej dlya ultrazvukovogo kontrolyu metalloizdelij (Obzor). Visnik NTU «HPI». Seriya: Elektroenergetika ta peretvoryvalna tehnika. Kharkiv: NTU «HPI», 2015. No 19 (1128). P. 29–54.



15. Salam Bussi Ep Mishel Kassabli, Nozdrachova K.L., Suchkov G.M., Slobodchuk A.Yu. Novij bezkontaktij metod viyavleniya defektiv metalovirobiv. Visnik Nacionalnogo tehničnogo universitetu «HPI». Seriya: Energetika: nadijnist ta energoefektivnist. Kharkiv. 2019. No 29 (1354). P. 34–40.

16. Nozdrachova K.L., Suchkov G.M. Primenenie ultrazvukovogo emkostnogo metoda v nerazrushayushem kontrole metalloizdelij. Aktualni problemi avtomatiki ta priladobuduvannya: materiali I Vseukrayinskoyi naukovu-tehničnoyi konferenciyi. (Kharkiv, 11–12 grudnya 2014). Kharkiv. 2014. P. 142–143.

17. Petrishev O.N., Suchkov G.M., Nozdrachova K.L. Yemnisnij sposib ultrazvukovogo kontrolyu metalovirobiv. Priladobuduvannya 2014: stan i perspektivi: tezi dop. HIII mizhnar. nauk.-tehn. konf. (Kyiv, 23–24 kvitnya 2014). Kyiv: NTUU «KPI». 2014. P. 183–184.

18. Suchkov G., Nozdrachyova E., Chuniyhina T. Ultrazvukovoj preobrazovatel emkostnogo tipa dlya izmerenij i kontrolya. Metrologiya i Metrologicheskoe Obespechenie 2014: sbornik dokl. HHIV Nacionalnogo Simpoziuma s Mezhdunarodnym uchastiem (Sozopol, 7–11 sentyabrya 2014). Bolgariya, Sozopol. 2014. P. 185–188.

19. Migushenko R.P., Suchkov G.M., Petrishev O.N., Nozdrachova E.L. Model ultrazvukovyh elektromehaničeskikh priemnyh preobrazovatelej ultrazvukovyh voln Releya. Tehničeskaya elektrodinamika. 2016. No 6. C. 83–89.

20. Nozdracheva E.L., Manko V.V Osobennosti kontrolya i diagnostiki kamer zapuska i priema ochistnyh i diagnostičeskikh ustrojstv. Visnik NTU «HPI». Seriya: Innovacijni tehnologii ta obladnannya obrobki materialiv u mashinobuduvanni ta metalurgiyi. Kharkiv: NTU «HPI», 2018. No 23 (1299). P. 45–50.

21. Nozdracheva E.L., Manko V.V. Nerazrushayushij kontrol kamer zapuska i priema ochistnyh i diagnostičeskikh ustrojstv. Resursozberezhennya ta

energoefektivnist procesiv i obladnannya obrobki tiskom u mashinobuduvanni ta metalurgiyi: tezi dop. H mizhnar. nauk.-tehnicn. konf., (Kharkiv, 21–23 listopada 2018). Kharkiv: NTU «HPI», 2018. P. 68–70.

22. Petrishchev O.N., Nozdrachova K.L., Suchkov G.M., Myhushchenko R.P., Kropachek O.Yu., Plesnetsov S.Yu. Improving principles of electric energy pulse transformation into high-frequency mechanical energy using capacitive method. *Technical Electrodynamics*. 2019(6). P. 18–24.

23. Nozdrachova K.L. Yemnisni sposobi zbudzhennya impulsiv ultrazvukovih hvil v elektroprovidnih virobah pid kutom do poverhni. *Visnik NTU «HPI»*. Kharkiv. 2019. No 11(1336). P. 48–52.

24. Sposib yemnisnogo zbudzhennya impulsiv ultrazvukovih ob'yemnih hvil pid kutom do poverhni elektroprovidnih virobiv: pat. 140682 Ukraine, MPK G01N29/04 (2006.01). No u201908174; zayav. 15.07.2019; nadruk. 10.03.2020, *Byul*. No 5. 4 p.

25. Sposib yemnisnogo zbudzhennya impulsiv ultrazvukovih ob'yemnih hvil pid kutom do poverhni elektroprovidnih virobiv: pat. 140270 Ukraine, MPK G 01N29/04 (2006.01). No u201908177; zayav. 15.07.2019; nadruk. 10.02.2020, *Byul*. No 3. 4 p.

26. Nozdrachova K.L. Rozdilno-poyednaniy bezkontaktnij ultrazvukovij yemnisnij peretvoryuvach dlya kontrolyu impulsami poverhnevih hvil. *Visnik NTU «HPI»*, Kharkiv. 2019. No 12(1337). P. 41–44.

27. Rozdilno-poyednaniy yemnisnij peretvoryuvach dlya kontrolyu impulsami hvil Releya ta Lemba: pat. 139245 Ukraine, MPK G01N29/04 (2006.01). No u201906691; zayav. 13.06.2019; nadruk. 26.12.2019, *Byul*. No 24. 4 p.

28. Ultrazvukovij rozdilno-poyednaniy visokochastotnij yemnisnij peretvoryuvach dlya kontrolyu impulsami hvil Releya: pat. 140607 Ukraine, MPK G 01N29/04 (2006.01). No u201907492; zayav. 04.07.2019; nadruk. 10.03.2020, *Byul*. No 5. 4 p.

29. Rozdilno-poyednaniy yemnisnij peretvoryuvach dlya kontrolyu impulsami hvil Releya ta Lemba: pat. 139330 Ukraine, MPK G01N29/04 (2006.01). No u201907457; zayav. 04.07.2019; nadruk. 26.12.2019, Byul. No 24. 4 p.

30. Rozdilno-poyednaniy ultrazvukovij yemnisnij peretvoryuvach dlya kontrolyu impulsami poverhnevih hvil: pat. 140386 Ukraine, MPK G 01 N 29/04 (2006.01). No u 2019 07454; zayav. 04.07.2019; nadruk. 25.02.2020, Byul. No 4. 4 p.

31. Ultrazvukovij rozdilno-poyednaniy yemnisnij peretvoryuvach dlya kontrolyu impulsami poverhnevih hvil: pat. 140387 Ukraine, MPK G 01 N 29/04 (2006.01). No u 2019 07480; zayav. 04.07.2019; nadruk. 25.02.2020, Byul. No 4. 4 p.

32. Shirokosmugovij yemnisnij peretvoryuvach dlya kontrolyu elektroprovodnih virobiv impulsami ultrazvukovih poverhnevih hvil. pat. 140190 Ukraine, MPK G 01 N 29/04 (2006.01). No u 2019 07496; zayav. 04.07.2019; nadruk. 10.02.2020, Byul. No 3. 4 p.

33. Kombinovanij rozdilno-poyednaniy yemnisnij peretvoryuvach dlya nerujnivnogo ultrazvukovogo kontrolyu: pat. 140608 Ukraine, MPK G 01 N 29/04 (2006.01). No u 2019 07493; zayav. 04.07.2019; nadruk. 10.03.2020, Byul. No 5. 4 p.

34. Nozdrachova K.L., Slobodchuk A.Yu., Yudanova N.M. Kombinovani yemnisni peretvoryuvachi dlya kontrolyu impulsami ultrazvukovih hvil releya fiziko-mehanicnih vlastivostej metalovirobiv. Visnik NTU «HPI». Kharkiv. 2019. No 26(1351). P. 28–35.

35. Kombinovanij yemnisnij peretvoryuvach dlya kontrolyu impulsami ultrazvukovih poverhnevih hvil: pat. 140191 Ukraine, MPK G01N29/04 (2006.01). No u201907497; zayav. 04.07.2019; nadruk. 10.02.2020, Byul. No 3. 4 p.

36. Ultrazvukovij kombinovanij yemnisnij peretvoryuvach dlya kontrolyu elektroprovodnih virobiv impulsami hvil Releya: pat. 140610 Ukraine, MPK G01N29/04 (2006.01). No u201907495; zayav. 04.07.2019; nadruk. 10.03.2020, Byul. No 5. 4 p.

37. Sposib yemnisnogo ultrazvukovogo kontrolyu tverdosti elektroprovodnogo virobu: pat. 140609 Ukraine, MPK G01N29/04 (2006.01). No u201907494; zayav. 04.07.2019; nadruk. 10.03.2020, Byul. No 5. 4 p.

38. Sposib yemnisnogo ultrazvukovogo kontrolyu tverdosti poverhneвого шарu protyazhnogo elektroprovodnogo virobu: pat. 139001 Ukraine, MPK G 01 N 29/04 (2006.01). No u 2019 06669; zayav. 13.06.2019; nadruk. 10.12.2019, Byul. No 23. 4 p.

39. Bezkontaktnij kombinovaniy impulsnij ultrazvukovij peretvoryuvach dlya viznachennya koefitsiyenta Puassona elektroprovodnih feromagnetnih virobiv: pat. 140680 Ukraine, MPK G 01 N 29/04 (2006.01). No u 2019 08172; zayav. 15.07.2019; nadruk. 10.03.2020, Byul. No 5. 4 p.

40. Nozdrachova K. L., Slobodchuk A. Yu., Suchkov G. M., Migushchenko R. P. & Kropachek O. Yu. Power Supplies of High-Frequency Capacitive Transducers for Measurement, Monitoring, and Diagnostics of Metal Products. Russian Journal of Nondestructive Testing. No 56(3), P. 242–248.

41. Nozdrachova K.L., Slobodchuk A.Yu. Odnopolyarne dzherelo zhivlennya visokochastotnih yemnisnih peretvoryuvachiv dlya vimiryuvannya, kontrolyu ta diagnostuvannya metalovirobiv. Metodi ta priladi kontrolyu yakosti. Ivano-Frankivsk. 2020. No 1(44). P. 99–109.

42. Nozdrachova K.L. Ultrazvukovij yemnisnij spektralnij sposib viyavlennya defektiv ob'yemnimi hvilyami na donnij poverhni elektroprovodnogo virobu. / Visnik NTU «HPI». Kharkiv. 2020. No 2 (1356). P. 39–44.

43. Spektralnij sposib ultrazvukovogo yemnisnogo viyavlennya defektiv na donnij poverhni elektroprovodnogo virobu: pat. 140606 Ukraine, MPK G 01 N 29/04 (2006.01). No u 2019 07474; zayav. 04.07.2019; nadruk. 10.03.2020, Byul. No 5. 4 p.

44. Hashina S.V., Homyak Yu.V., Desyatnichenko A.V., Nozdrachova E.L., Suchkov G.M. Ekologichnye metody i sredstva nerazrushayushego kontrolya. I mezhotraslevaya nauchno-prakticheskaya konferenciya molodyh uchyonyh i specialistov v oblasti proektirovaniya predpriyatij gorno-metalurgicheskogo

kompleksa, energo- i resursosberezheniya, zashity okruzhayushej prirodnoj sredy: tezisy dokl. (Kharkiv, 27–28 marta 2012). Kharkiv. 2012. P. 157–163.

45. Suchkov G.M., Poznyakova M.E., Desyatnichenko A.V., Nozdracheva E.L. Vybory pitaniya preobrazovatelej impulsnyh ultrazvukovyh sredstv kontrolya. Nerujnivnij kontrol ta tehnicna diagnostika: materiali VII nacion. nauk.-tehn. konf., (m. Kiyiv, 20–23 listopada 2012 r.). Kyiv: UT NKTD, 2012. P. 123–128.

46. Suchkov G.M., Globa S.N., Nozdracheva E.L., Homyak Yu.V., Desyatnichenko A.S., Hashina S.V., Poznyakova M.E. Novye razrabotki kafedry PMNK NTU «HPI» v oblasti nerazrushayushego kontrolya. Priladobuduvannya: stan i perspektivi: tezi dop. IH mizhnar. nauk.-tehn. konf. (Kyiv, 23–24 kvitnya 2013). Kyiv : NTUU «KPI», 2013. P. 202.

47. Globa S., Nozdrachyova E., Chuniyhina T., Le Chi Hieu Kompleksnyj kontrol kachestva izdelij i obektov. Metrologiya i Metrologicheskoe Obespechenie: sbornik dokl. HHIII Nacionalnogo simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiem (Sozopol, 9–13 sentyabrya 2013). Bolgariya, Sozopol. 2013. P. 384–388.

48. Petrishev O.N., Suchkov G.M., Nozdracheva E.L., Kulichenko V.V. Issledovanie impulsnogo emkostnogo ultrazvukovogo preobrazovatelya v rezhime izlucheniya. Priladobuduvannya 2015: stan i perspektivi: tezi dop. HIII mizhnar. nauk.-tehn. konf. (Kyiv, 22–23 kvitnya 2015). Kyiv: NTUU «KPI». 2015. P. 173–174.

49. Nozdrachova K.L. Ultrazvukova kontrolna sistema na osnovi yemnisnogo peretvoryuvacha. Suchasnij ruh nauki: VIII Mizhnarodna naukovo-praktichna internet-konferenciya (Dnipro, 3–4 zhovtnya 2019 r.). Mizhnarodnij elektronnij naukovo-praktichnij zhurnal «WayScience». Dnipro, 2019. P. 624–628.

50. Ultrazvukovij komp'yuterizovanyj defektoskop yemnisnogo tipu: pat. 139241 Ukraine, MPK G01N29/04 (2006.01). No u201906670; zayav. 13.06.2019; nadruk. 26.12.2019, Byul. No 24. 4 p.

61. Sposib yemnisnogo zbudzhennya odnonapravlenih impulsiv ultrazvukovyh hvil Releya v virobah z elektroprovodnih materialiv: pat. 138776

Ukraine, MPK G01N29/04 (2006.01). No u201905389; zayav. 20.05.2019; nadruk. 10.12.2019, Byul. No 23. 4 p.

62. Sposib yemnisnogo zbudzhennya odnonapravlениh visokochastotnih impulsiv ultrazvukovih poverhnevih hvil v metalovirobah: pat. 138761 Ukraine, MPK G01N29/04 (2006.01). No u201905324; zayav. 20.05.2019; nadruk. 10.12.2019, Byul. No 23. 4 p.

63. Sposib yemnisnogo zbudzhennya odnonapravlениh impulsiv ultrazvukovih hvil Releya iz znachnoyu velichinoyu dovezhni hvili v virobah z elektroprovidnih materialiv: pat. 138396 Ukraine, MPK G01N29/04 (2006.01). No u 2019 05380; zayav. 20.05.2019; nadruk. 25.11.2019, Byul. No 22. 4 p.

64. Sposib yemnisnogo zbudzhennya odnonapravlениh impulsiv ultrazvukovih poverhnevih hvil v metalovirobah: pat. 138383 Ukraine, MPK G01N29/04 (2006.01). No u201905297; zayav. 20.05.2019; nadruk. 25.11.2019, Byul. No 22. 4 p.

65. Sposib yemnisnogo zbudzhennya odnonapravlениh impulsiv ultrazvukovih poverhnevih hvil v metalovirobah dlya produktivnoyi diagnostiki: pat. 138382 Ukraine, MPK G01N29/04 (2006.01). No u201905296; zayav. 20.05.2019; nadruk. 25.11.2019, Byul. No 22. 4 p.

66. Sposib bezkontaktnogo zbudzhennya impulsiv ultrazvukovih hvil Releya v elektroprovidnih virobah: pat. 138398 Ukraine, MPK G01N29/04 (2006.01). No u201905384; zayav. 20.05.2019; nadruk. 25.11.2019, Byul. No 22. 4 p.

67. Sposib yemnisnogo zbudzhennya impulsiv visokochastotnih ultrazvukovih hvil Releya v elektroprovidnih virobah: pat. 138394 Ukraine, MPK G01N29/04 (2006.01). No u201905375; zayav. 20.05.2019; nadruk. 25.11.2019, Byul. No 22. 4 p.

68. Sposib bezkontaktnogo yemnisnogo zbudzhennya impulsiv ultrazvukovih poverhnevih hvil Releya v virobah z elektroprovidnih materialiv: pat. 138392 Ukraine, MPK G01N29/04 (2006.01). No u201905371; zayav. 20.05.2019; nadruk. 25.11.2019, Byul. No 22. 4 p.

69. Sposib bezkontaktnogo yemnisnogo zbudzhennya impulsiv ultrazvukovih poverhnevih hvil Releya v virobah z elektroprovidnih materialiv: pat. 138777 Ukraine, MPK G01N29/04 (2006.01). No u201905391; zayav. 20.05.2019; nadruk. 10.12.2019, Byul. No 23. 4 p.

70. Sposib ultrazvukovogo yemnisnogo kontrolyu poverhni elektroprovidnih virobiv z pryamolinijnimi dilyankami krayiv: pat. 141331 Ukraine, MPK G01N29/04 (2006.01). No u201906694; zayav. 13.06.2019; nadruk. 10.04.2020, Byul. No 7. 4 p.

71. Sposib yemnisnogo ultrazvukovogo kontrolyu poverhni elektroprovidnih virobiv: pat. 139000 Ukraine, MPK G01N29/04 (2006.01). No u201906668; zayav. 13.06.2019; nadruk. 10.12.2019, Byul. No 23. 4 p.

72. Nakladnij ultrazvukovij yemnisnij peretvoryuvach: pat. 138998 Ukraine, MPK G01N29/04 (2006.01). No u 2019 06663; zayav. 13.06.2019; nadruk. 10.12.2019, Byul. No 23. 4 p.

73. Sposib produktivnogo yemnisnogo ultrazvukovogo kontrolyu elektroprovidnih virobiv impulsami poverhnevih hvil: pat. 139246 Ukraine, MPK G01N29/04 (2006.01). No u201906692; zayav. 13.06.2019; nadruk. 26.12.2019, Byul. No 24. 4 p.

74. Ultrazvukovij yemnisnij zasib dlya zbudzhennya i prijomu pruzhnih hvil: pat. 94693 (Ukraine), MPK G01N29/34 (2006.01). No u201406364; zayav. 10.06.2014; nadruk. 25.11.2014, Byul. No 22. 4 p.

75. Sposib zbudzhennya ta prijomu visokochastotnih impulsiv u metalevomu virobi yemnisnim peretvoryuvachem: pat. 94611 Ukraine, MPK G01N29/34 (2006.01); No u201404754; zayav. 05.05.2014; nadruk. 25.11.2014, Byul. No 22. 4 p.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	5
ВСТУП .....	6
1 УЛЬТРАЗВУКОВІ БЕЗКОНТАКТНІ МЕТОДИ .....	21
НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ .....	21
1.1 Лазерне збудження ультразвукових коливань.....	21
1.2 Метод лазерного детектування ультразвуку.....	26
1.3 Електромагнітно-акустичні (ЕМА) методи збудження і прийому ультразвукових коливань.....	32
1.4 П'єзоелектричні перетворювачі з повітряно-акустичним зв'язком .....	34
1.5 Ємнісний метод безконтактного ультразвукового контролю.....	40
1.6 Висновки.....	78
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЄМНІСНОГО ТИПУ .....	80
2.1 Узагальнена схема побудови ЄП в режимі збудження ультразвукових хвиль.....	80
2.2 Визначення поверхневої щільності $\sigma_0$ ( $\rho$ ) статичного електричного заряду перетворювача з дисковим електродом .....	84
2.3 Розрахунок змінного електричного поля і оцінка поверхневої щільності сил Кулона .....	94
2.4 Дослідження передавальних характеристик дискового перетворювача ємнісного типу в режимі збудження хвиль Релея, що радіально поширюються.....	101
2.5 Висновки.....	113
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗБУДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХИЛІ У СТРУМОПРОВІДНИХ ВИРОБАХ ЄМНІСНИМ СПОСОБОМ.....	114



3.1 Розробка стенда для проведення досліджень .....	114
3.3 Висновки.....	123
<b>4 РОЗРОБКА МАКЕТУ ПРИЛАДУ ДЛЯ ЗБУДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ У СТРУМОПРОВІДНИХ ВИРОБАХ ЄМНІСНИМ СПОСОБОМ .</b>	<b>124</b>
4.1 Принцип роботи перетворювача ємнісного типу.....	124
4.2 Розробка випромінюючої частини пристрою .....	128
4.2.1 Однополярне джерело живлення високочастотних ємнісних перетворювачів для вимірювань, контролю та діагностики металовиробів .....	128
4.2.2 Модулі широкосмугових трансформаторів типу довгої лінії .....	134
4.2.3 Двополярне джерело живлення високочастотних ємнісних перетворювачів для вимірювань, контролю та діагностики металовиробів .....	158
4.2.4 Розробка і дослідження оптимального варіанту трансформатору на довгих лініях на трьох кільцях.....	161
4.3 Тіньова схема контролю ємнісним методом.....	167
4.4 Експериментальні результати роботи схеми .....	173
4.5 Дзеркально-тіньовий метод ультразвукового контролю.....	186
4.6 Оцінка похибки ультразвукового перинного перетворювача.....	190
4.5 Висновки.....	192
<b>5 КОНСТРУКЦІЇ ВИСОКОЧАСТОТНИХ ЄМНІСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ВИПРОМІЮЮВАННЯ І ПРИЙОМУ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ</b>	<b>194</b>
5.1 Способи ємнісного збудження імпульсів поверхневих хвиль .....	194
5.2 Роздільно-поєднані безконтактні ультразвукові ємнісний перетворювачі для контролю імпульсами поверхневих хвиль .....	215

5.3 Комбіновані ємнісні перетворювачі для контролю імпульсами ультразвукових хвиль Релея фізико–механічних властивостей металовиробів.....	224
5.4 Ємнісні способи збудження імпульсів ультразвукових об’ємних хвиль в електропровідних виробках під кутом до поверхні .....	236
5.5 Спектральний спосіб ультразвукового ємнісного виявлення дефектів на донній поверхні електропровідного виробу .....	242
5.6 Ємнісні ультразвукові прямі суміщені перетворювачі з регульованою діаграмою спрямованості.....	252
5.7 Ємнісний спосіб збудження і прийому пружних хвиль .....	257
5.8 Ультразвуковий комп’ютеризований макет дефектоскопу ємнісного типу.....	262
5.9 Висновки .....	270
ВИСНОВКИ.....	273
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	276
ДОДАТОК А.....	310
ДОДАТОК Б .....	316
ДОДАТОК В.....	318
ДОДАТОК Г .....	324