

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

**НОЗДРАЧОВА Катерина Леонідівна**



УДК 620.179.16

**МЕТОДИ І ЗАСОБИ ЗБУДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ  
ІМПУЛЬСІВ ЄМНІСНИМ МЕТОДОМ**

Спеціальність 05.11.13 - прилади і методи контролю  
та визначення складу речовин

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

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

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

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

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

доктор технічних наук, професор  
**Кошовий Микола Дмитрович**  
Національний аерокосмічний університет  
ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний  
інститут», професор кафедри інтелектуальних  
вимірювальних систем та інженерії якості.

Захист відбудеться «01» квітня 2021 р. о 12:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.09 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

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

Автореферат розісланий «25» лютого 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради



Іван КОСТЮКОВ

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** При виробництві металовиробів на підприємствах різних галузей промисловості, і виробів, що знаходяться в експлуатації, широко застосовують різні методи і засоби неруйнівного контролю, що дозволяють перевіряти якість продукції без подальшого порушення її придатності до використання за призначенням. Найбільш поширеним методом неруйнівного контролю є акустичний метод, який дозволяє виявляти не тільки макроскопічні дефекти в металах, але і визначати їх структуру.

Актуальність роботи пов'язана із вдосконаленням принципу реалізації збудження ультразвукових (УЗ) імпульсів безконтактними ємнісним перетворювачем (ЄП). Застосування ємнісного методу та перетворювачів, що його реалізують, дозволить заощаджувати час та матеріали у порівнянні з іншими методами ультразвукового контролю.

У відомих інформаційних джерелах вказується на суттєву перспективність безконтактного ємнісного методу збудження ультразвукових імпульсів. Даний метод не потребує зачистки поверхні. Ємнісні перетворювачі малогабаритні і не притягуються до електропровідного виробу. Проведений аналіз літературних джерел стосовно існуючих ЄП свідчить, що вони мають низьку чутливість. Тому дослідження і розробки, направлені на підвищення чутливості ЄП є актуальними.

Для досягнення поставленої мети і вирішення зазначених завдань було використано накопичений у світі досвід в даному напрямленні науки і техніки, в який внесли вклад багато вітчизняних шкіл: під керівництвом Троїцького В.А., Маєвського С.М., Карпаша О.М., Патона Б.Є., і дослідники: Ключев В.В., Єрмолов І.М., Білокур І.П., Сучков Г.М., Вовілін А.Х., Марков А.А., Крауткремер Й., Крауткремер Г., Щербинський В.Г., Ланге Ю.В., Hutchins D.A., White R.M., Palmer S.B., Кондратьєв А.І., Луговий В.А., Бондаренко А.Н., Дробот Ю.Б., Петрищев О.М., Бабак В. П., Гриньов Б. В., Куц Ю.В., Чабанов В.Є., Тараненко Ю.К., Dobbs E.R., Буденков Г. А., Кошовий М.Д., Kavashima K., Legros D., Cantrell J. H., Pawelletz R.H і багато інших. Однак рівень складності і різноманіття проблем, що вирішуються при дослідженнях і створенні засобів контролю і діагностики на базі ємнісних перетворювачів, виявився настільки високим, а перспективи, що відкриваються при цьому, настільки значними, що результати в цій області, досягнуті в минулому, не можуть бути достатніми.

Тому розвиток 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 є актуальною науково-технічною проблемою.

**Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана відповідно до наукових напрямків досліджень кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики (приладів і методів неруйнівного контролю) Національного технічного університету

«Харківський політехнічний інститут» згідно Закону України № 3715-VI від 05.12.2012 «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні», зокрема за напрямом «Приладобудування, як основа високотехнологічного оновлення всіх галузей виробництва», при безпосередній участі здобувача в рамках наступних науково-дослідних робіт НТУ «ХПІ»: держдоговірної теми «Дослідження можливості створення прототипів приладів неруйнівного контролю нового покоління з використанням енерго- та ресурсозберігаючих технологій» (ДР № 0111U002280, 2011–2012 рр.) (здобувач – відповідальний виконавець); держдоговірної теми «Розробка методів та макетів приладів для неруйнівного контролю якості виробів із зменшеними втратами енергії і матеріалів» (ДР № 0113U000444, 2013–2014 рр.) (здобувач – відповідальний виконавець); держдоговірної теми «Удосконалення технічних систем та пристроїв за рахунок імпульсних електромеханічних перетворювачів та електрофізичних технологій» (ДР № 0117U004881, 2017–2018 рр.) (здобувач – виконавець окремих розділів); госпдоговірної теми № 52171 від 16.09.2011 «Провести ремонт, налагодження, калібровку та перевірку двох приладів ПФ-2М» Публічне Акціонерне Товариство «ХАРКІВСЬКИЙ ПІДШИПНИКОВИЙ ЗАВОД» (м. Харків) (здобувач – виконавець окремих розділів); госпдоговірної теми № 52391 від 20.05.2013 «Розробка високочутливого датчика для вимірювання залишкових магнітних полів лічильників газу» ТОВ КОМПАНІЯ «СТАТУС ПРАКТИКА» (м. Харків) (здобувач–виконавець окремих розділів).

Робота виконана за науково-технічним співробітництвом із закордонними організаціями: договір № 52/235-2019 від 11.01.2019 «Безконтактні методи оцінки якості металу та покриттів з використанням вихрострумового та магнітотуляційного ефектів», установа-партнер SRL «AutoService-AF» (Республіка Молдова) (здобувач – виконавець окремих розділів); договір № 52/233-2019 від 18.01.2019 «Безконтактний ультразвуковий неруйнівний контроль товщини тормозного диску», установа-партнер «Darcrist Grup SRL» (Республіка Молдова) (здобувач – відповідальний виконавець); договір №52/234-2019 від 15.01.2019 «Розвиток основ створення методів та засобів для електромагнітно-акустичного контролю стрижневих, трубчастих та листових металовиробів», установа-партнер «Automotive Solution Company» SRL (Румунія) (здобувач – виконавець окремих розділів).

**Мета та задачі досліджень.** Метою досліджень є розвиток теоретичних положень та засобів для збудження високочастотних ультразвукових імпульсів ємнісними перетворювачами з підвищеною чутливістю на основі збільшення відношення амплітуд корисного сигналу до завад у виробках з електропровідних матеріалів.

Для досягнення цієї мети поставлені наступні завдання:

1) на основі аналізу літературних джерел встановити напрямки дослідження щодо виключення недоліків використання традиційних методів і засобів ультразвукового контролю;

2) виконати теоретичні та модельні дослідження, направлені на розробку методів ультразвукового контролю та перетворювачів з підвищеними значеннями амплітуд корисного сигналу (чутливістю);

3) побудувати узагальнену математичну модель ЄП, на основі якої розв'язати задачу з знаходження розподілу механічних напружень в поверхневому шарі виробу, обумовлених силами Кулона, які ініційовані дією постійного поляризуючого електричного поля та дією високочастотного змінного електричного поля для випадків збудження поздовжніх та поверхневих хвиль. Встановити обмеження з обрахування моделей перетворювачів. Виконати обчислення розподілу електричних зарядів на поверхні виробу та напружень, обумовлених силами Кулона, в залежності від різних факторів впливу;

4) встановити та дослідити вплив основних факторів, які визначають чутливість ємнісних перетворювачів;

5) дослідити область формування акустичного поля ємнісного перетворювача з різними електродами;

6) дослідити ефективність збудження радіальних хвиль Релея в широкому частотному діапазоні в залежності від різних характеристик перетворювачів;

7) розробити засоби живлення ємнісних перетворювачів та стенд для досліджень;

8) виконати експериментальні дослідження розроблених ємнісних перетворювачів та методів їх використання. Встановити характеристику чутливості розроблених ЄП;

9) розробити нові моделі ємнісних перетворювачів, призначених: для безконтактного ультразвукового контролю металовиробів імпульсами поверхневих хвиль та визначення фізико-механічних властивостей за допомогою хвиль Релея; виявлення дефектів спектральним способом; збудження імпульсів ультразвукових об'ємних хвиль в електропровідних виробках під кутом до поверхні; збудження та прийому пружних хвиль; також суміщених перетворювачів з регульованою діаграмою спрямованості та комп'ютеризований дефектоскоп ємнісного типу.

*Об'єкт досліджень* – процес взаємодії електричного і акустичного полів з матеріалом виробу, що формує відповідну імпульсну пакетну реакцію, яка несе інформацію про якість електропровідного виробу.

*Предмет досліджень* – методи і засоби для дефектоскопії, товщинометрії, та визначення фізико-механічних властивостей електропровідних матеріалів і виробів ємнісним способом.

**Методи досліджень.** При побудові математичної моделі перетворювача ємнісного типу в режимі збудження ультразвукових хвиль застосовувались інтегральні методи обчислення. При дослідженнях ультразвукового ємнісного способу контролю застосовувалися методи формування та аналізу акустичних і електричних полів, їх взаємодії з електропровідним виробом. Для оцінки акустичних властивостей виробів застосовані луна-імпульсні, тіньові і дзеркально-тіньові методи контролю. При створенні засобів ємнісного ультразвукового контролю використані методи електротехнічного приладобудування, реалізовані методи боротьби із завадами електромагнітного і акустичного походження. При розгляді особливостей метрологічного

забезпечення ємнісного ультразвукового контролю використана методика взаємодії акустичного і електричного полів з електропровідними матеріалами. Для підтвердження отриманих результатів виконані експериментальні дослідження.

### **Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Вперше розроблено наукові засади та обґрунтовано метод підвищення інтенсивності збудження ультразвукових імпульсів ємнісними перетворювачами. Суть метода полягає у формуванні в тонкому поверхневому шарі електропровідного або електроізоляційного та феромагнітного виробу імпульсного високочастотного електричного поля заданої частоти і тривалості, дію на той же поверхневий шар виробу постійним поляризуючим електричним полем, в результаті чого постійне поляризуюче і високочастотне електричне поле формують у поверхневому шарі виробу сили Кулона, які створюють в області існування постійного і змінного електричних полів динамічні деформації поверхні металевго об'єкта. З області динамічних деформацій надлишок енергії виноситься пружними хвилями в об'єм металевго зразка.

2. Вперше розроблена математична модель ємнісного ультразвукового перетворювача, призначеного для збудження УЗ коливань в електропровідному або електроізоляційному та феромагнітному виробі, за якою вирішена задача електростатики для кусково-однорідного середовища, в якій напівпростір заповнений металом з кінцевими значеннями електричної провідності і магнітної проникності, що дало можливість отримати вираз для розрахунку поверхневої щільності статичного електричного заряду на поверхні електропровідного виробу і відповідно інтенсивності збуджуваного ультразвукового імпульсу.

3. Вперше встановлено та експериментально підтверджено механізм збудження ультразвукових хвиль поза межами електрода ємнісного перетворювача за рахунок поширення електричних полів за межі електрода ЄП, які розширюють область формування високочастотних деформацій, що обов'язково необхідно враховувати при визначенні діаграм спрямованості акустичного поля та його інтенсивності.

4. Вперше, з використанням методу прямого і оберненого інтегрального перетворення Ханкеля, отримано вирази, які дають можливість обчислити поверхневі щільності сил Кулона для об'ємних поздовжніх акустичних хвиль та хвиль Релея в залежності від конструктивних особливостей ЄП, що дає можливість розраховувати конструкцію перетворювача за встановленими вимогами.

5. Теоретично та експериментально визначено основні фактори, які впливають на інтенсивність ультразвукових імпульсів, що збуджуються ЄП; визначено допустимі межі їх змін.

6. Розвинено і обґрунтовано концепції побудови ємнісних перетворювачів нового типу і призначення, що надало можливість підвищення їхньої чутливості.

7. Вперше для живлення ємнісних перетворювачів розроблено генератори пакетних імпульсів в діапазоні частот 1...5 МГц з піковою напругою до 3 кВ,

часовою тривалістю 1...10 періодів заповнення високої частоти, що дозволило підвищити відношення «сигнал/завада».

8. Експериментально доведено можливість збудження поздовжніх та поверхневих хвиль ємнісними перетворювачами з інтенсивністю ультразвукового поля, достатньою для подальшого проведення вимірювань, контролю та діагностики.

**Практичне значення отриманих результатів для галузі контролю якості та діагностики металовиробів.** Доведена технічна можливість використання ємнісних перетворювачів для ультразвукового контролю, вимірювань та діагностики електропровідних виробів і доповнення ними традиційної групи засобів, робота яких заснована на застосуванні контактної рідини.

Розроблено і виготовлено: макети пристроїв для досліджень характеристик ЄП різного призначення; генератори високовольтних імпульсів напруги для живлення ЄП; стійкий до завад підсилювач ультразвукових сигналів; металеві зразки для виконання досліджень характеристик ЄП; макет приладу для формування вхідних імпульсів генераторів напруги з можливістю регулювання частоти, тривалості, частоти зондування тощо; каскади генераторів живлення ЄП для створення макету приладу із застосуванням ЄП для ультразвукового контролю електропровідних виробів.

Розроблено та застосовано програмне забезпечення роботи макетів пристроїв для досліджень характеристик ЄП різного призначення.

Розроблено ЄП: для безконтактного ультразвукового контролю металовиробів імпульсами поверхневих хвиль та визначення фізико-механічних властивостей за допомогою хвиль Релея; для виявлення дефектів спектральним способом; збудження імпульсів ультразвукових об'ємних хвиль в електропровідних виробках під кутом до поверхні; збудження та прийому пружних хвиль; також суміщені перетворювачі з регульованою діаграмою спрямованості, що дозволило розробити нові технічні рішення, спрямовані на підвищення можливостей ємнісних ультразвукових приладів і пристроїв. Новизна технічних рішень захищена 38 патентами на корисну модель.

Результати дисертаційної роботи було використано: на ТОВ «ХЕМЗ» (м. Харків) (акт впровадження від 01.07.2020), «Нефтегазовая промышленная арматура», (м. Энергосталь) (акт впровадження від 18.03.2019) та міжнародних підприємствах: SRL «AutoService-AF» (Республіка Молдова) (акт впровадження від 26.09.2018), «Darcrist Grup SRL» (Республіка Молдова) (акт впровадження від 28.09.2018), «Automotive Solution Company» SRL (Румунія) (акт впровадження від 02.10.2018) та у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» (акт впровадження від 03.10.2020 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення і результати дисертаційних досліджень отримані і сформульовані здобувачем особисто. В роботах, що опубліковані здобувачем з співавторами, йому належить:

– розроблена математична модель ємнісного перетворювача для випромінювання ультразвукових імпульсів в металевий виріб; отримано вираз для розрахунку поверхневої щільності статичного електричного заряду на поверхні металевого зразка;

- побудовані замкнуті рішення задач електростатики та електродинаміки для кусково-однорідного середовища, в яких напівпростір заповнений металом з кінцевими значеннями електричної провідності і магнітної проникності;
- розроблено математичну модель ємнісного приймача високочастотних ультразвукових хвиль Релея, що радіально поширюються в металевих листах;
- розроблено варіант схемотехнічного рішення макету дефектоскопа для одно- та двополярного джерела живлення ємнісних перетворювачів; проведено дослідження на розробленому макеті дефектоскопу із застосуванням ємнісних перетворювачів в режимі збудження ультразвукових хвиль;
- проведено аналіз теоретичних і експериментальних даних роботи ємнісного перетворювача в режимі збудження ультразвукових хвиль;
- запропоновано різні способи ємнісного методу ультразвукового контролю електропровідних виробів імпульсами поверхневих та об'ємних УЗ хвиль.

**Апробація результатів дисертаційної роботи.** Матеріали дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на наступних конференціях і симпозіумах: I міжгалузєва науково-практична конференція молодих вчених та фахівців в області проектування підприємств гірничо-металургійного комплексу, енерго- і ресурсозбереження, захисту навколишнього природного середовища «Інноваційні шляхи модернізації базових галузей промисловості, енерго- і ресурсозбереження, охорона навколишнього природного середовища»: УкрДНТЦ «Енергосталь», (2012 р., м. Харків); VII Національній науково-технічній конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика», (2012 р., м. Київ); IX, X, XII міжнародних науково-технічних конференціях «Приладобудування: стан і перспективи», (2013–2015 рр, м. Київ); XXIII та XXIV Національних симпозіумах з міжнародною участю «Метрологія и Метрологическое Обеспечение» (2013, 2014 рр., м. Созополь, Болгарія); IX та VII науково-практичних конференціях студентів і молодих учених; (2013, 2019 рр., м. Івано-Франківськ); XXII та XXIII міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я», (2014, 2015 рр. м. Харків); I Всеукраїнській науково-технічній конференції «Актуальні проблеми автоматики та приладобудування» (2014 р., м. Харків); X міжнародній науково-технічній конференції «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії», (2018 р., м. Харків); VIII Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Сучасний рух науки», (2019 р., м. Дніпро); VII міжнародній науково-практичній конференції «Метрологія, інформаційно-вимірювальні технології та системи», (2020 р., м. Харків); XII міжнародній науково-технічній конференції «Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія–2020)», (2020 р., м. Харків).

**Публікації.** Результати досліджень і розробок опубліковано в 75 наукових працях, серед яких: 22 статті у наукових фахових виданнях України та у періодичних виданнях інших держав (з них 2 статті у фахових виданнях, що включені до наукометричної бази SCOPUS та Web of Science Core Collection та 1 стаття у іноземному науковому спеціалізованому виданні, що



включено до наукометричної бази SCOPUS); 15 тез доповідей на міжнародних та вітчизняних науково-технічних конференціях; 38 патентів України на корисні моделі.

**Структура та об'єм дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел інформації і додатків. Повний об'єм дисертації складає 331 сторінку, з них: 159 рисунків та 8 таблиць за текстом; список використаних джерел з 307 найменувань на 34 сторінках; 4 додатків на 22 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми досліджень і необхідність розробки нових ультразвукових перетворювачів ємнісного типу та методів і засобів безконтактного ультразвукового контролю металовиробів. Визначена

наукова новизна, практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, вказано відомості щодо апробації результатів дисертації, їх публікації та впровадження.

У першому розділі встановлено перспективність застосування ємнісного методу, описаний принцип його роботи. Розглянуто існуючі ємнісні перетворювачі та напрямки їх застосування, дослідження їх можливостей у порівнянні з іншими ЄП; проведено аналіз застосування на практиці безконтактного ємнісного методу неруйнівного контролю у порівнянні з відомими методами контролю.

Другий розділ присвячений розробці теорії ультразвукових перетворювачів ємнісного типу з подальшим вивченням факторів, які визначають чутливість ємнісних перетворювачів, і дослідженням

можливостей підвищення їх чутливості.

На рис. 1 представлена узагальнена схема побудови перетворювача ємнісного типу в режимі збудження ультразвукових хвиль, який являє собою металевий електрод 1, що розташовується на деякій відстані від поверхні металевого зразка 2. На електрод 1 подається постійний електричний потенціал  $U_0$ , який формує на поверхні  $x_3 = 0$  металевого зразка електричний заряд з поверхневою щільністю  $\sigma^0(x_1, x_2)$ , де  $x_1, x_2, x_3$  – координатні лінії правої декартової системи координат, початок якої розташовується на поверхні металевого зразка. Одночасно з постійним потенціалом  $U_0$  на металевий електрод подається електричний потенціал з амплітудним значенням, що змінюється в часі за гармонійним законом  $e^{i\omega t}$  ( $i = \sqrt{-1}$ ;  $\omega$  – циклічна частота;

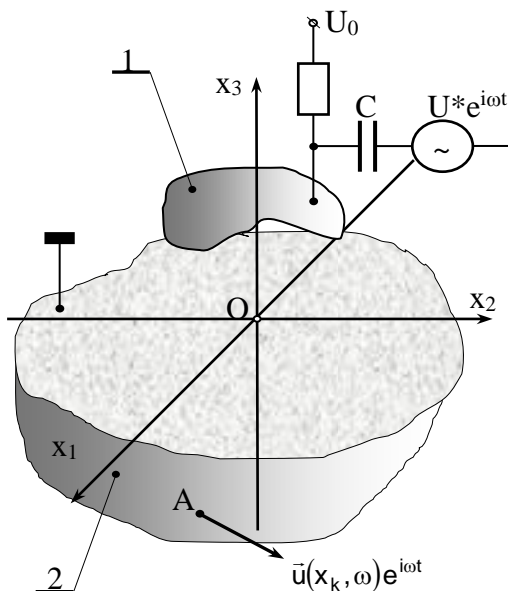


Рисунок 1 – Розрахункова схема ЄП в режимі збудження ультразвукових хвиль в металевому зразку

$t$  – час). Цей потенціал створює змінне електричне поле з напруженістю  $\vec{E}^* e^{i\omega t}$  ( $\vec{E}^*$  – амплітуда вектора напруженості змінного електричного поля). Змінне електричне поле лінійно взаємодіє зі статичним електричним зарядом, в результаті чого на поверхні металевго зразка виникають сили Кулона з поверхневою щільністю  $\sigma_{3j}^*(x_1, x_2, t)$ , ( $j = 1, 2, 3$ ), що визначається за формулою

$$\sigma_{3j}^*(x_1, x_2, t) = \sigma^0(x_1, x_2) E_j^*(x_1, x_2, 0) e^{i\omega t}, \quad (j = 1, 2, 3), \quad (1)$$

де  $E_j^*(x_1, x_2, 0)$  – амплітудні значення компонентів вектора напруженості змінного електричного поля на поверхні  $x_3 = 0$  металевго зразка. «\*» позначені величини (як правило, струми або електричні напруги), які формуються у фізичній системі зовнішніми джерелами-генераторами) і не залежать від значень параметрів фізичної системи; всі параметри фізичних полів вважаються за замовчуванням комплексними функціями.

Амплітудні значення поверхневої щільності сил Кулона  $\sigma_{3j}^*(x_1, x_2)$  або, використовуючи термінологію механіки деформованого твердого тіла, дотичні і нормальні поверхневі навантаження, створюють в області існування постійного і змінного електричних полів динамічні деформації поверхні металевго об'єкта. З області динамічних деформацій надлишок енергії виноситься пружними хвилями в об'єм металевго зразка. З огляду на лінійність фізичної системи та існуючих в ній процесів, визначимо вектор зміщення матеріальних частинок металу як величину з амплітудним значенням  $\vec{u}(x_k, \omega)$ , де  $x_k$  – координати точки спостереження за хвильовим полем (довільно обрана точка А на рис. 1), що гармонійно змінюється у часі. Амплітудні значення хвильового поля зсувів  $\vec{u}(x_k, \omega) e^{i\omega t}$  в будь-якій точці всередині металевго зразка задовольняють рівняння сталих гармонійних коливань. У формі, інваріантній щодо вибору системи координат, це рівняння записується в такий спосіб

$$(\lambda + 2G) \text{grad div } \vec{u}(x_k, \omega) - G \text{rot rot } \vec{u}(x_k, \omega) + \rho_0 \omega^2 \vec{u}(x_k, \omega) = 0, \quad (2)$$

де  $\lambda$  і  $G$  – константи Ламе для ізотропного за пружними властивостями металу;  $\rho_0$  – щільність металу.

Зміщення матеріальних частинок металу, тобто рішення рівняння (2), створюють в об'ємі металу деформації, в результаті чого виникають сили пружності, які визначаються через механічні напруги  $\sigma_{ij}(x_k, \omega) e^{i\omega t}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ). На поверхні  $x_3 = 0$  металу повинен виконуватися третій закон Ньютона в диференційній формі, згідно з яким необхідно виконувати наступні граничні умови

$$\sigma_{3j}(x_1, x_2, 0) = \sigma_{3j}^*(x_1, x_2), \quad (j = 1, 2, 3), \quad (3)$$

де  $\sigma_{3j}^*(x_1, x_2)$  – амплітудні значення поверхневої щільності сил Кулона (див. вираз (1)). Виконання граничних умов (3) забезпечує єдність розв'язку рівняння (2).

Таким чином, електричний вплив  $U^* e^{i\omega t}$  на вході перетворювача ємнісного типу (рис. 1) формує вектор зміщення матеріальних частинок  $\vec{u}(x_k, \omega) e^{i\omega t}$  в

довільній точці А, тобто гармонічно змінюється в часі за законом  $e^{i\omega t}$ . Вплив породжує відгук, що змінюється за тим же законом. При цьому стає справедливим наступний запис

$$\vec{u}(x_k, \omega) = U^* \vec{W}^u(x_k, \omega, \Pi), \quad (4)$$

де  $\vec{W}^u(x_k, \omega, \Pi)$  – векторна функція, що залежить від координат точки А спостереження за хвильовим полем, кругової частоти  $\omega$  зміни знака впливу і набору фізико-механічних параметрів (символ  $\Pi$  в списку аргументів векторної функції) фізичної системи, що описується, тобто перетворювача ємнісного типу. Векторна функція  $\vec{W}^u(x_k, \omega, \Pi)$  представляє передавальну характеристику ємнісного перетворювача в режимі випромінювання ультразвукових хвиль.

Із наведеного матеріалу було зроблено висновок про побудову математичної моделі ємнісного перетворювача в режимі випромінювання ультразвукових хвиль розділяється на дві задачі, що послідовно вирішуються.

Перша задача – це задача електродинаміки про визначення сил Кулона на поверхні металевго зразка.

Друга задача – це гранична задача (2), (3) динамічної теорії пружності про збудження гармонійних хвиль системою поверхневих навантажень. Розв’язання цієї задачі дозволить записати в явному вигляді вираз для розрахунку компонентів векторної функції  $\vec{W}^u(x_k, \omega, \Pi)$ , тобто завершує побудову математичної моделі перетворювача ємнісного типу в режимі збудження.

Для вирішення поставлених задач, шляхом інтегральних обчислень виведена формула (5) для визначення поверхневої щільності статичного електричного заряду перетворювача з дисковим електродом, схема якого представлена на рис. 2.

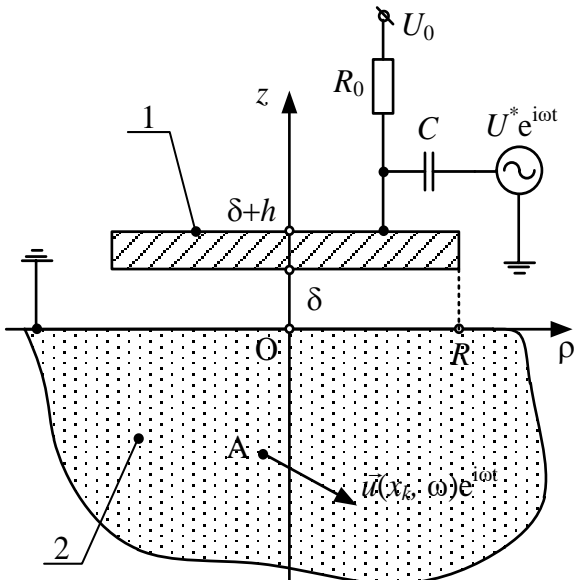


Рисунок 2 – Розрахункова схема ЄП в режимі збудження УЗ хвиль в металевому зразку

$$\sigma^0(\rho) = -\frac{C_0 U_0}{\pi} \int_0^\infty \gamma W(\gamma) J_0(\gamma \rho) d\gamma. \quad (5)$$

де  $C_0 \approx \pi R^2 \chi_0 / \delta$  – статична електрична ємність диска над поверхнею металевго виробу;  $\chi_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  – діелектрична проникність простору, оточуючого диск;  $J_0(x)$  – функція Бесселя нульового порядку;

$$W(\gamma) = e^{-\gamma \delta} \frac{(1 - e^{-\gamma h}) J_1(\gamma R)}{\gamma h \gamma R} \quad \text{– функція,}$$

яка враховує вплив геометричних параметрів ЄП на характер розподілу електричного поля в навколишньому просторі таких як  $R$  – радіус диска,  $h$  – його товщина,  $\delta$  – відстань між диском і поверхнею металевго виробу.

Особливістю обчислення інтеграла (5) є те, що верхня межа інтегрування є

нескінченно великою. У реальному розрахунку верхня межа інтегрування повинна бути кінцевою величиною. В першому наближенні такою величиною повинно бути дійсне число  $\gamma_{\max}$ , починаючи з якого виконується нерівність  $\gamma W(\gamma) < \varepsilon \forall \gamma > \gamma_{\max}$ , де  $\varepsilon$  – наперед задане мале число. Оскільки співмножник  $|J_0(\gamma\rho)| \leq 1$ , то в записаній вище нерівності (стосовно до підінтегрального виразу (5)) було використано максимальне значення функції Бесселя нульового порядку, тобто 1. На рис. 3 показано змінну фрагмента підінтегрального виразу  $xW(x)$  в залежності від безрозмірного параметра інтегрального перетворення  $x = \gamma R$ . Функція  $W(x)$  розраховується за формулою

$$W(x) = e^{-x\delta/R} \frac{(1 - e^{-xh/R}) J_1(x)}{(xh/R) x} \quad (6)$$

З рис. 3 випливає, що при збільшенні неконтакту різко зменшується максимальне значення поверхневої щільності статичного електричного заряду.

З представлених на рис. 3 результатів випливає, що при  $x > 20$  добуток  $xW(x) < 0,02$  для довільних (не нульових) значень  $\delta/R$  і  $h/R$ . Якщо врахувати те, що при  $\rho/R > 0$  функція Бесселя  $J_0(x\rho/R) < 1$ , то можна стверджувати, що основний внесок в інтеграл (5) здійснюють значення підінтегральної функції на інтервалі інтегрування  $0 \leq x \leq 20$ . Таким чином, при виконанні обчислень значення інтеграла (5) замість нескінченної межі інтегрування можна підставити будь-яке безрозмірне число  $x_{\max} > 20$ .

На рис. 4 показані результати обчислення поверхневої щільності  $\sigma^0(\rho)$  статичного електричного заряду за формулою (5), яка в термінах безрозмірного параметра  $x$  записується в такий спосіб

$$\sigma^0(\rho/R) = -\frac{C_0 U_0}{\pi R^2} \int_0^{x_{\max}} xW(x) J_0(x\rho/R) dx$$

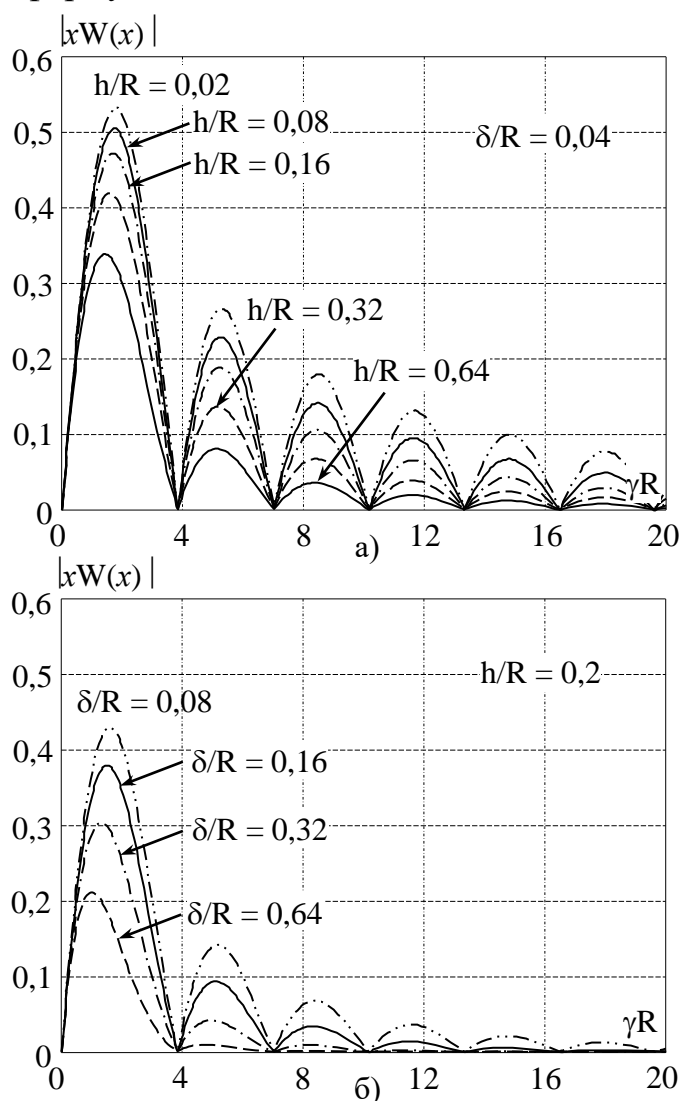


Рисунок 3 – Змінна модуля фрагмента підінтегрального виразу (5)

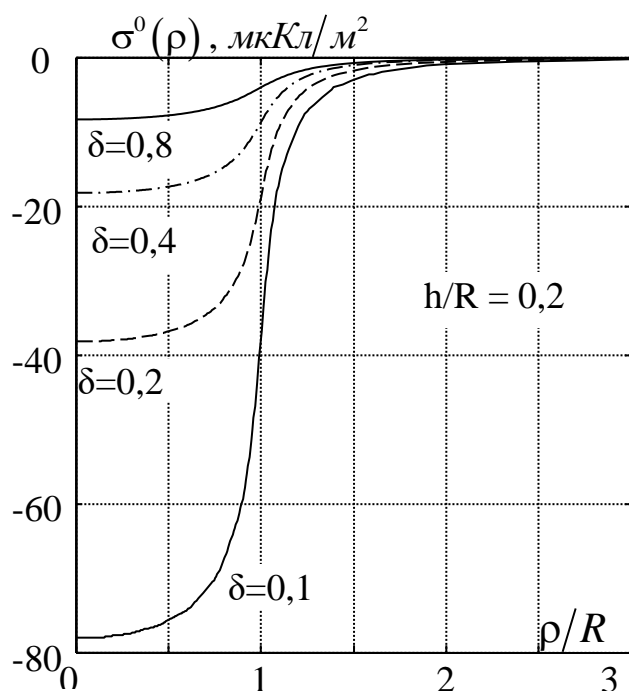


Рисунок 4 – Розподіл статичного електричного заряду по поверхні металевого півпростору

При виконанні розрахунків статична електрична ємність  $C_0$  розраховувалася за наближеною формулою  $C_0 = \pi R^2 \chi_0 / \delta$ . Для відображення результатів рахунки в абсолютних величинах були прийняті наступні: значення параметрів  $U_0 = 100$  В і  $R = 5$  мм,  $x_{\max} > 40$ . З аналізу представлених на рис. 4 результатів необхідно зробити висновок про те, що при збільшенні неконтакту  $\delta$  різко зменшується максимальне значення поверхневої щільності статичного електричного заряду.

В області існування постійного і змінного електричних полів діють тільки нормальні поверхні  $z = 0$  сили Кулона, поверхнева щільність яких

розраховується за виведеною у роботі формулою

$$\sigma_{zz}^*(\rho) = \sigma_0(\rho) E_z^*(\rho, 0) = \sigma_0 \left[ \int_0^{x_{\max}} x W(x) J_0\left(x \frac{\rho}{R}\right) dx \right]^2, \quad (7)$$

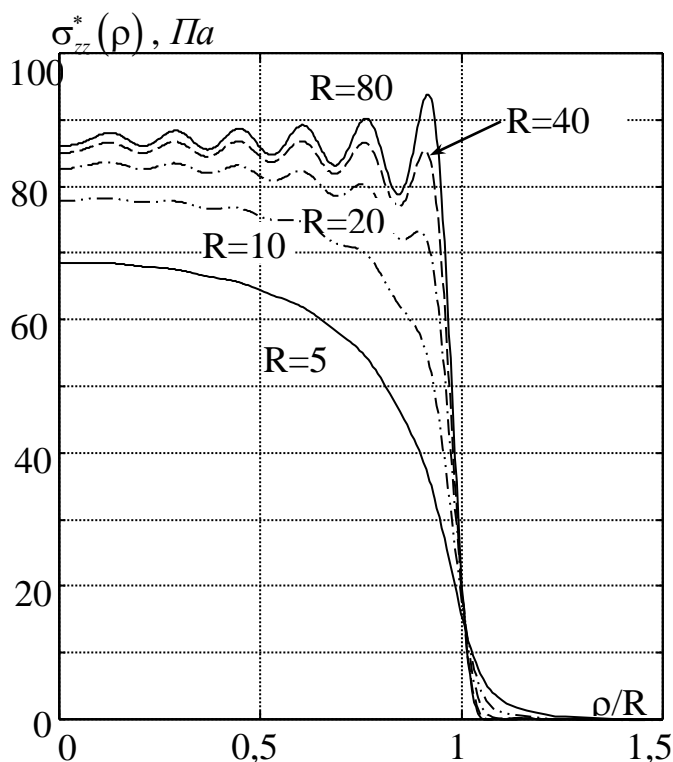


Рисунок 5 – Залежність поверхневої щільності сил Кулона від радіуса металевого диска

де  $\sigma_0 = C_0^2 U_0 U^* / (\pi^2 R^4 \chi_0) \approx \chi_0 U_0 U^* / \delta^2$ . На рис. 5 представлені результати розрахунку поверхневої щільності  $\sigma_{zz}^*(\rho)$  за формулою (7). Фіксованими величинами при виконанні цієї серії розрахунків були: зазор  $\delta = 0,1$  мм, товщина диска  $h = 1$  мм і потенціали  $U_0 = 1000$  В,  $U^* = 100$  В. Збільшення максимальних значень нормальної напруги  $\sigma_{zz}^*(\rho)$  при  $\rho = 0$ , яке обумовлено зростанням радіуса металевого диска, зазнає своєрідне насичення при  $R > 20$  мм. Якщо взяти до уваги, що збільшення розмірів

площини навантаження супроводжується переміщенням смуги робочих частот випромінювача в області низьких частот, то можна стверджувати, що радіус металевого диска перетворювача ємнісного типу не доцільно збільшувати більше 20 ... 25 мм.

Створені перетворювачем ємнісного типу сили Кулона здатні збуджувати в металевих листах симетричні і асиметричні хвилі Лемба, що радіально поширюються. У масивних металевих зразках ці сили збуджують хвилі Релея.

Виведено вираз для розрахунку амплітудного множника релеєвської хвилі, яка збуджується дисковим перетворювачем ємнісного типу

$$A_R(\omega) = -i A_0 W(\Omega), \quad (8)$$

де  $A_0 = \pi \sigma_0 R f(v)/(2G)$  – абсолютна чутливість дискового перетворювача ємнісного типу в режимі збудження хвиль Релея. Символом  $W(\Omega)$  ( $\Omega = \gamma_R R$  (безрозмірне хвильове число або, що те ж саме, безрозмірна частота, оскільки  $\gamma_R R = \omega(R/v_R) = \omega \tau_0$ )) у формулі (8) позначена частотно залежна функція такого змісту

$$W(\Omega) = \Omega \int_0^{\infty} \xi \tilde{\sigma}_{zz}^*(\xi) J_0(\Omega \xi) d\xi, \quad (9)$$

де  $\xi = \rho/R$  – безрозмірна радіальна координата;  $\tilde{\sigma}_{zz}^*(\xi)$  – безрозмірна, що залежить від безрозмірної радіальної координати, функція  $J_0(\Omega \xi)$  – другий співмножник у правій частині виразу (7). Як впливає з представлених на рис. 5 графіків, основний внесок в числові значення інтеграла (9) дають значення функції  $\tilde{\sigma}_{zz}^*(\xi)$  на інтервалі  $0 \leq \xi \leq 1$ . Тому для виконання практичних обчислень вираз (9) необхідно записати в наступному вигляді

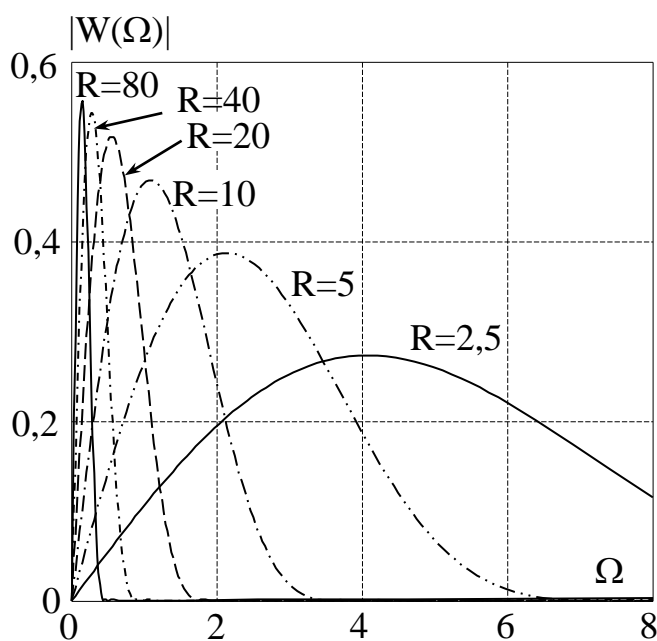


Рисунок 6 – Хвильові характеристики дискових ЄП

$$W(\Omega) \cong \Omega \int_0^1 \xi \tilde{\sigma}_{zz}^*(\xi) J_0(\Omega \xi) d\xi. \quad (10)$$

На рис. 6 показані результати обчислень інтеграла (10) для реального розподілу поверхневої щільності сил Кулона, яке задається другим співмножником у формулі (7). По осі абсцис відкладено безрозмірне хвильове число  $\Omega = \gamma_R R$ , значення якого визначено в припущенні, що  $R = 5 \cdot 10^{-3}$  м. Для середнього значення коефіцієнта Пуассона для сталей  $\nu = \sqrt{0,23 \cdot 0,31} = 0,27$  і щільності  $\rho_0 = \sqrt{7500 \cdot 7920} = 7710$  кг/м<sup>3</sup> отримуємо середнє значення

швидкості хвилі Релея  $v_R = 3042$  м/с, при цьому значенню  $\gamma_R R = 1$  відповідає частота  $f = 96,6$  кГц. Із рис. 6. чітко видно, що диски великих розмірів забезпечують ефективно збудження поверхневих хвиль Релея в області низьких частот. Для збудження ультразвукових імпульсів зі спектром в сотні кілогерц необхідно використовувати диски, радіуси яких менше п'яти міліметрів.

В другому розділі доведено, що основними факторами, що визначають поверхневу щільність сил Кулона, і, як наслідок, чутливість перетворювача, є: поляризуєча напруга; ємність перетворювача (діелектрична проникність); розмір перетворювача; величина зазору між перетворювачем і виробом; форма перетворювача.

У третьому розділі для підтвердження теоретичних висновків було розроблено стенд для тіньового методу ультразвукового контролю, блок-схема якого зображена на рис. 7. До складу стенду входить електропровідна пластина 1 товщиною 25 мм (зразок). Товщина пластини 1 вибиралася з умови формування на її протилежному боці плоского фронту ультразвукового поля (ближня зона). На пластину 1 через діелектрик із лавсану 2 товщиною 0,2 мм помістили круглий мідний електрод 3 товщиною 30 мкм і діаметром 24 мм. До електроду 3 було підключене джерело 4 постійного поляризуєчого поля і джерело 5 пакетних імпульсів напруги з можливістю регулювання частоти заповнення пакета. Механізм роботи ЄП такий, що наряду з прикладеними до електродів 1 і 3 ЄП змінної і постійної напруги, між ними діють і механічні сили, що і призводить до збудження в самому зразку 1 пружних коливань.

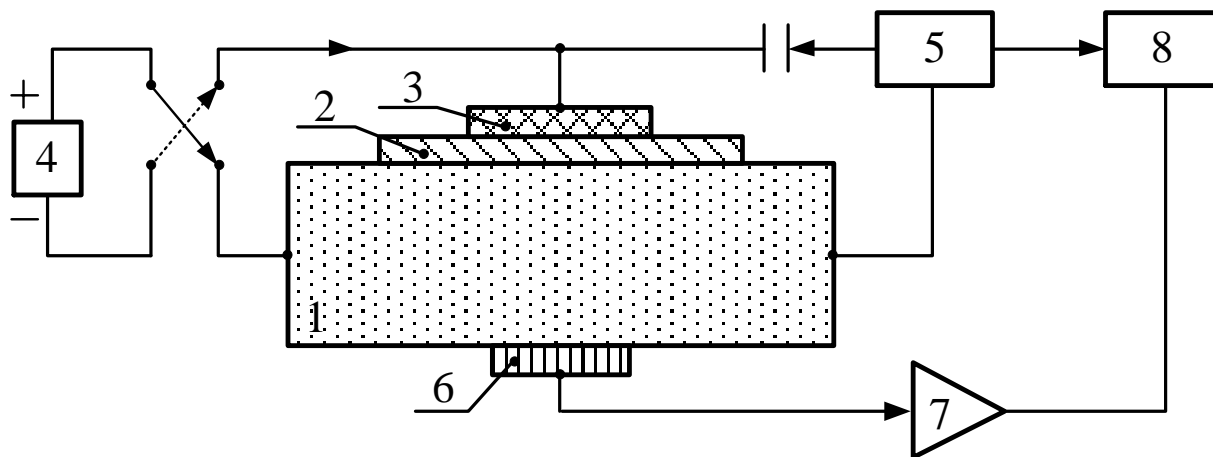


Рисунок 7 – Блок-схема стенду для дослідження впливу діаметра електрода ЄП на характеристики ультразвукових імпульсів (розподілу щільності зарядів по поверхні пластини)

З протилежного боку пластини 1 встановлено стандартний п'єзоелектричний перетворювач (ПЕП) 6 (5 МГц, діаметр робочої пластини 5 мм), підключений до підсилювача 7. З виходу підсилювача 7 прийнятий сигнал подається на осцилограф 8 С1-65А.

При виконанні досліджень на електрод 3 подали напругу +850 В (поляризуєче поле) і пакетний високочастотний імпульс з амплітудою  $\pm 650$  В і заповненням 4 періоду частоти (5 МГц). Далі переміщали ПЕП щодо осі

електрода 3 уздовж його радіуса і приймали сигнал, що пройшов через пластину 1. Підсилювали його і вимірювали амплітуду прийнятого ультразвукового імпульсу за допомогою осцилографа 8.

Згідно з розробленою методикою проведення експериментів, ПЕП і ЄП були встановлені співвісно з протилежних сторін сталевого зразка. Вимірювалися амплітуди першого  $U_1$  і другого  $U_2$  напівперіодів прийнятого першого сигналу, що пройшов через виріб ( $\rho$  – поточна координата,  $R$  – радіус електрода ЄП). З аналізу даних, наведених на рис. 8–11 слід зробити висновок про те, що щільність зарядів на поверхні півпростору не є рівномірною і змінюється до краю проекції електрода ЄП на поверхню зразка.

Крім того, спостерігається наявність значного сигналу і за проекцією електрода ЄП на металевий напівпростір зразка, причому при зміщенні приймального ПЕП за межі електрода ЄП не відбувається зміщення сигналу за часом. Тобто приймаємо імпульс випромінювань нормально до поверхні металу, а не під кутом до неї. При цьому тривалість випроміненого імпульсу не збільшується через гіпотетичний прийом частини сигналу під кутом до приймального ПЕП.

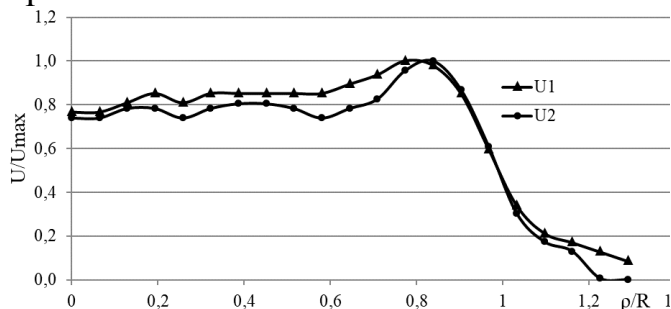


Рисунок 8 - Електрод ЄП діаметром 31 мм

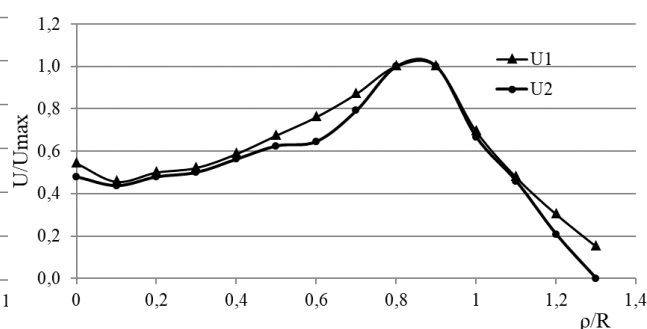


Рисунок 9 - Електрод ЄП діаметром 20 мм

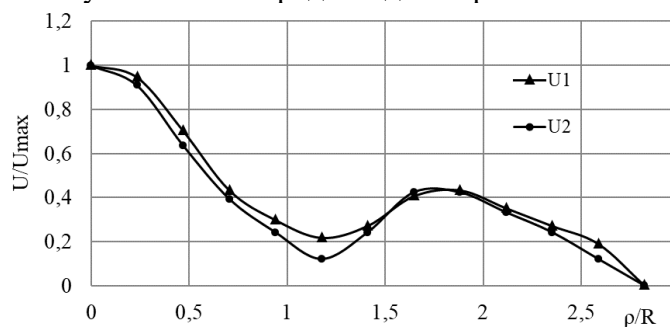


Рисунок 10 - Електрод ЄП діаметром 9,5 мм

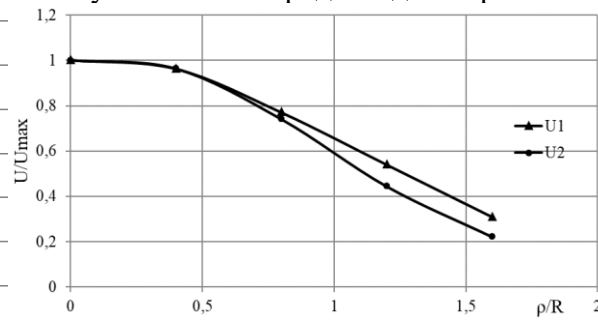


Рисунок 11 - Електрод ЄП діаметром 5 мм

**У четвертому розділі** розроблено макет приладу для збудження ультразвукових хвиль у струмопровідних виробх ємнісним способом. Для реалізації розробленого технічного рішення приладу, вирішено формувати вихідний сигнал генератора високовольтних імпульсів (ГВІ) у вигляді меандру. Такий підхід дає можливість спростити високовольтну частину генератора, особливо на високих частотах зондування. Пристрій для формування сигналів з регульованими параметрами (рис. 12) виконаний на мікроконтролері DD2 типу STM32. Він формує послідовність прямокутних імпульсів амплітудою 3,3 В зі скважністю, рівною 2 (меандр), які необхідні для живлення наступних каскадів ГВІ. Управління частотою і періодом проходження імпульсів здійснюється за



допомогою кнопок SA1–SA4. Часові діаграми для одно- та двополярного джерела живлення зображені на рис. 13, 14. При застосуванні двополярного джерела живлення вдалося знизити амплітуду змінного збудження напруги з 3 кВ до 1 кВ при тій же чутливості. Згенерований з виходу мікроконтролера DD2 імпульс надходить на вхід буферного повторювача DD3. Буферний повторювач використовується для посилення вихідного сигналу за напругою до рівня 5В (рівень логічної «1» на виході з генератора) а також для забезпечення крутих фронтів сформованих прямокутних послідовностей імпульсів.

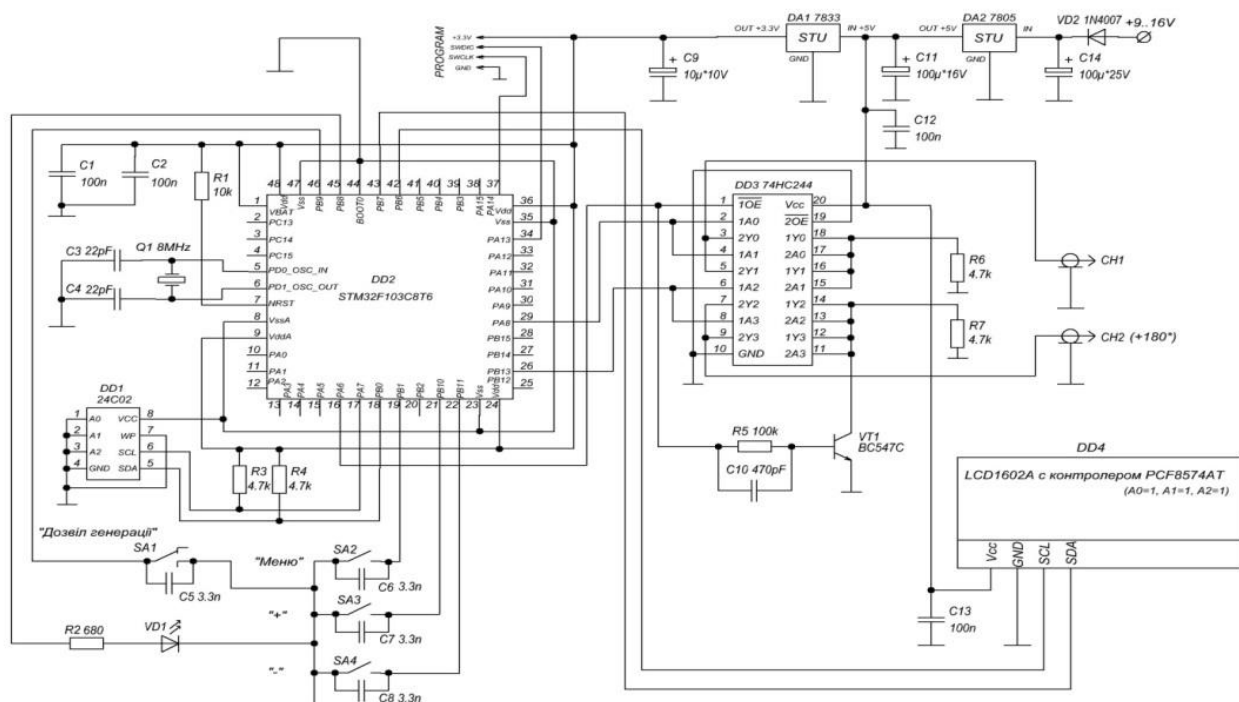


Рисунок 12 – Електрична принципова схема блоку формувача ГВІ

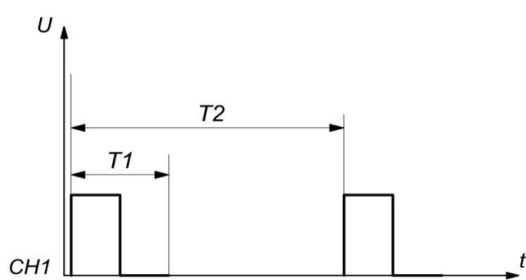


Рисунок 13 – Часова діаграма вихідних сигналів блоку формувача для однополярного джерела живлення : T1 – період збуджуючого імпульсу; T2 - період слідування імпульсів

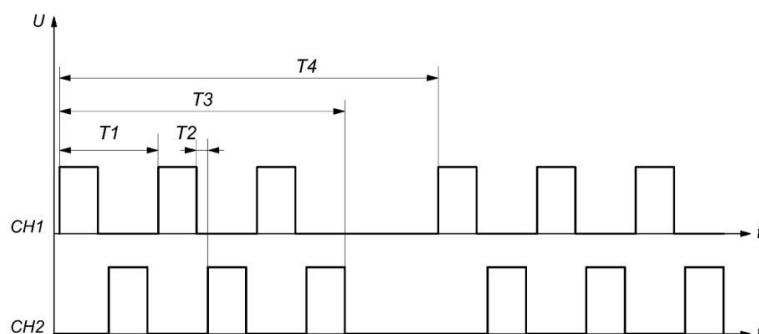


Рисунок 14 – Часова діаграма вихідних сигналів блоку формувача для двополярного джерела живлення: T1 – період послідовності прямокутних імпульсів; T2 – «мертвий» час, необхідний для виключення одночасного відкриття транзисторів двотактного каскаду; T3 – тривалість пакета імпульсів; T4 – період слідування пакета імпульсів

Для захисту мікроконтролера DD2 від радіозавад, що наводяться по лініях виходу буфера DD3, застосовано пристрій гальванічної розв'язки,

принципова схема якого зображена на рис. 15. Відображення поточних параметрів здійснюється на рідкокристалічному індикаторі DD4.

Кнопка з фіксацією SA1 служить для дозволу генерації послідовності імпульсів. Її необхідність полягає в тому, щоб можна було вимкнути генерацію, зробити коригування параметрів генератора, а потім знову включити генерацію із заданими параметрами. Кнопки SA2, SA4 необхідні для переходу по меню налаштувань і їх коригування. Збереження налаштувань генератора здійснюється в DD1.

Модуль гальванічної опторозв'язки складається з DC / DC перетворювача DA1, оптопари DD1, інвертора логічних рівнів DD2 і буфера DD3. Вихід буферного повторювача DD3 підключений до схеми високовольтного комутатора, який зображений на рис. 16. Високовольтний комутатор складається з буферного повторювача DD1 для регенерації форми прийнятого сигналу, драйвера затвора MOSFET транзистора і високовольтного польового ключа (транзистора).

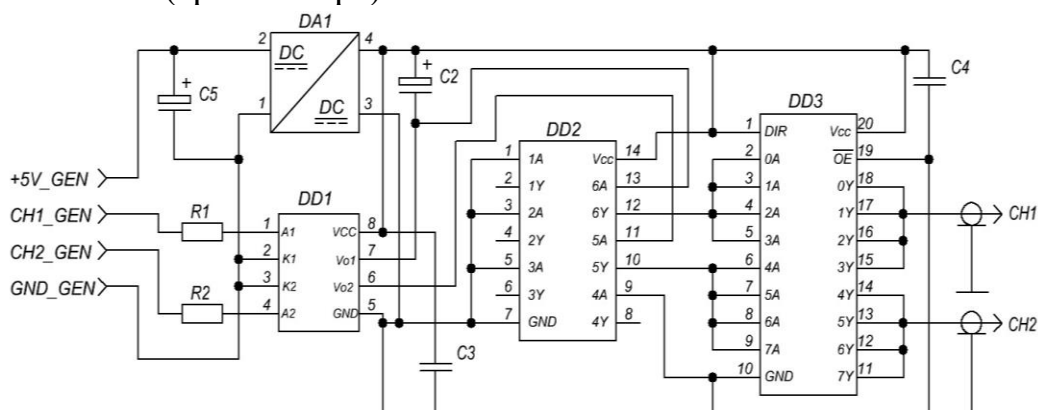


Рисунок 15 – Принципова схема модуля гальванічної опторозв'язки ГВІ

Витік польового ключа підключається до первинної обмотки симетричного ширококутового високовольтного трансформатора. Другий контакт первинної обмотки трансформатора підключений до позитивної полярності джерела живлення напругою 300 Вольт.

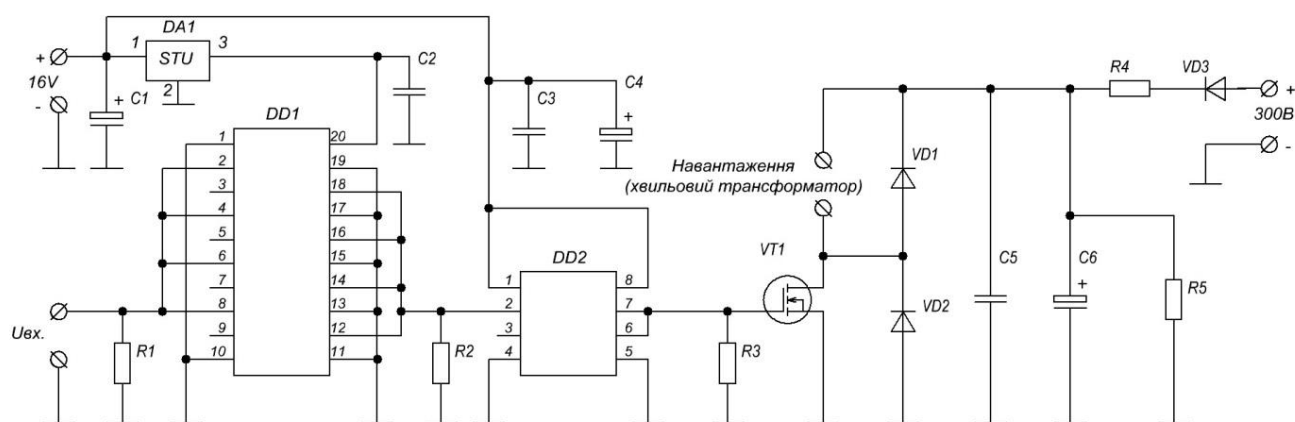


Рисунок 16 – Принципова схема високовольтного комутатора ГВІ

Схема симетруючого ширококутового трансформатора зображена на рис. 17. Він складається з десяти феритових кілець, розмірами K20x12x6 і має

по сім витків коаксіального кабелю RG59 з хвильовим опором 75 Ом. Кожен з трансформаторів є узгоджувачим, тобто має хвильовий опір по 75 Ом по входу і виходу. Входи всіх десяти трансформаторів включені паралельно, а виходи послідовно. Це означає, що вхідний хвильовий опір отриманого симетричного ширококутового трансформатора становить 7,5 Ом, тобто в 10 разів менше хвильового опору коаксіального кабелю. Для того, щоб робота трансформатора була узгодженою, вихід трансформаторної збірки необхідно навантажити на опір, рівний 10 кратному опору коаксіального кабелю, тобто 750 Ом.

Розроблений генератор дозволяє сформувати одиночний імпульс з заданим періодом проходження. До недоліків можна віднести неможливість формування імпульсу негативної полярності, а отже, і неможливість формування більш одного періоду коливань в генерованому пакеті. Для компенсації цього недоліку розроблено двополярне джерело генерування високовольтних імпульсів, отже, з'явилась можливість формувати більш одного імпульсу в пакеті, що в підсумку призведе до збільшення сигнал / завада на прийомі.

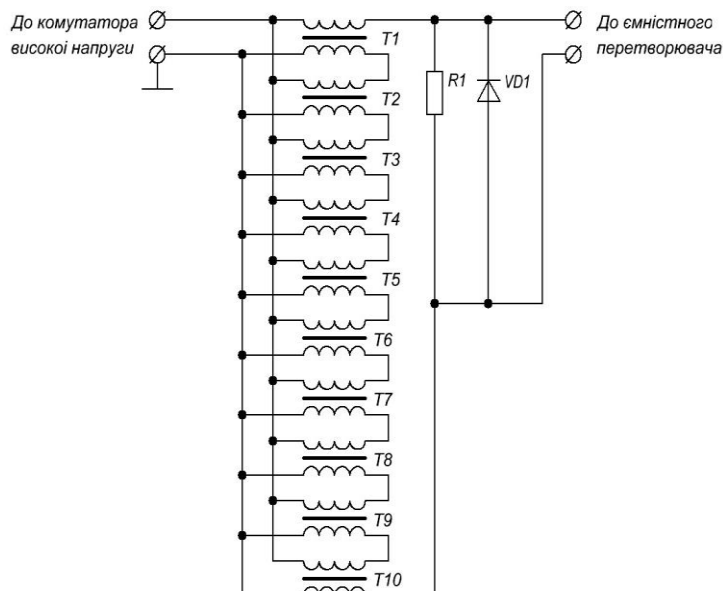


Рисунок 17 – Схема симетруючого підвищувачого ширококутового трансформатор

На рис. 15 та рис. 18 зображені виходи буферних повторювачів DD3, підключені до схеми мостового підсилювача потужності. Мостовий підсилювач потужності складається з двох однакових напівмостів. Кожен з напівмостів складається з драйвера нижнього і верхнього ключів, який керує затворами двох MOSFET транзисторів нижнього і верхнього плеча. Вихід кожного напівмоста підключається до кожного виходу та входу ширококутового симетричного трансформатора. «Н»-мостом формується змінна різнополярна напруга, що прикладається до первинної обмотки ширококутового симетруючого трансформатора.

Для реєстрації сигналів розроблений спеціальний підсилювач, який має наступні характеристики: коефіцієнт посилення в центрі смуги пропускання

Технічна реалізація двополярного джерела така ж, як і однополярного. Відмінність однополярного джерела у формуванні сигналів і порівнянні з двополярним приведена програмно і відображена на часовій діаграмі вихідних сигналів рис. 14. «Мертвий час» необхідний для запобігання протікання наскрізних струмів через транзисторні ключі кожного з напівмостів. На рідкокристалічному індикаторі DD4 відображаються поточні параметри.

5 МГц: 1000; смуга пропускання на рівні 3дБ: 4.4 МГц; чутливість до сигналів амплітудою 40 мкВ; посилення по напрузі в центрі смуги пропускання дорівнює 60 дБ (або 1000 разів).

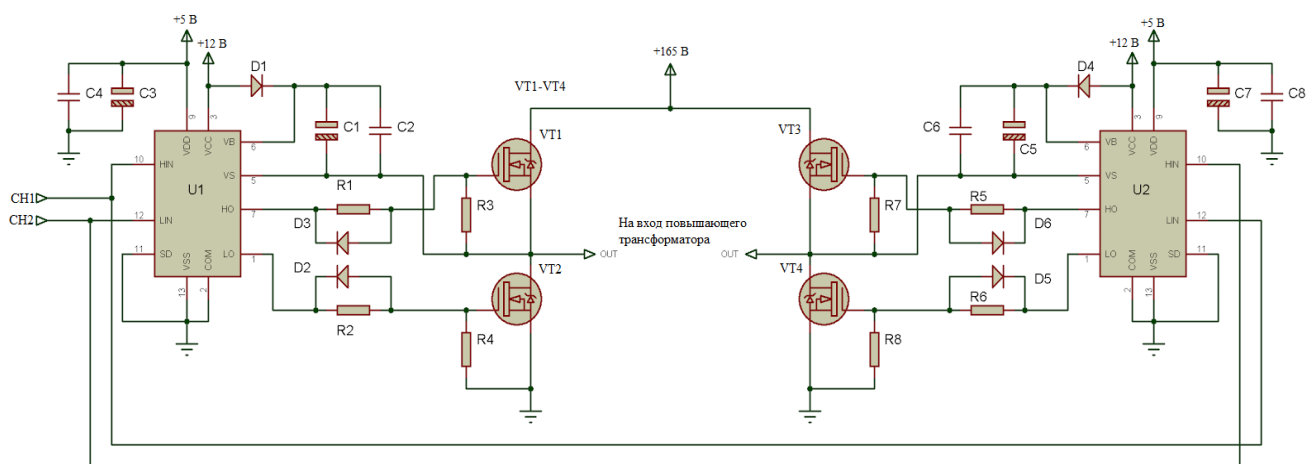


Рисунок 18 – Принципова схема мостового підсилювача напруги ГВІ

Підсилювач (рис. 19) складається з чотирьох операційних підсилювачів DA1.1, DA1.2, DA2.1, DA2.2, суміщених по два підсилювача в кожній мікросбірці (DA1, DA2). Резистори R2-R8 задають коефіцієнти посилення операційних підсилювачів. R10 задає вхідний опір підсилювача. Діоди VD1, VD2 включені зустрічно-паралельно і служать для обмеження вхідної напруги на рівні +/- 0,7 В.

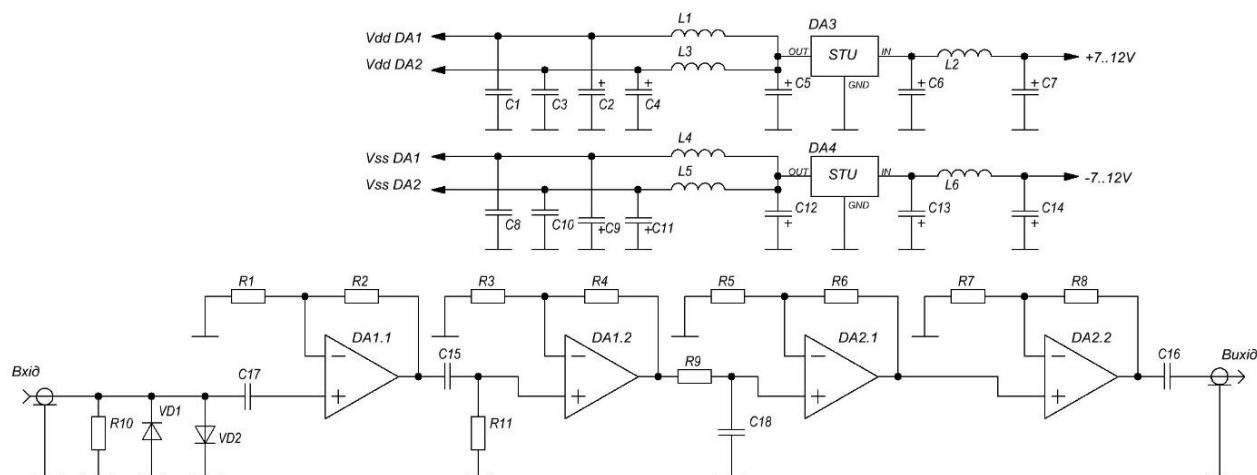


Рисунок 19 – Принципова схема підсилювача

Конденсатори C17, C16 є розділовими, що запобігають протіканню через них постійного струму. Фільтр верхніх частот побудований на C15, R11. Фільтр нижніх частот побудований на R9, C18. Операційні підсилювачі живляться від двополярного стабілізованого джерела постійного струму, виконаного на інтегральних стабілізаторах DA3, DA4. Елементи C1-C14, L1-L6 служать LC фільтром, що запобігають потраплянню завад за лініями живлення операційних підсилювачів.

Для виконання експериментальних досліджень щодо збудження ультразвукових імпульсів ЄП розроблений стенд на основі тіньового ультразвукового методу контролю, блок-схема та фото якого приведена на рис. 20–21. До складу стенду входить електропровідна плоскопаралельна пластина 9 товщиною 20 мм (об'єкт контролю) без зачистки її поверхні. На пластину 9 через діелектрик 8 товщиною 0,06 мм помістили круглий електрод 7 зі сталі товщиною 0,25 мм і діаметром 26 мм. До електроду 7 через розділовий конденсатор 5 (ємність якого на порядок більше ємності перетворювача) прикладається змінна напруга з амплітудою 1 кВ. Для виключення часового впливу поляризаційного ефекту в діелектрику під електродом ЄП на результати вимірювань амплітуди, в складі стенду використане джерело поляризуючої електричної напруги 6 (1 кВ).

Пакетні імпульси тривалістю три періоди частотою 5 МГц формуються генератором 1, який через гальванічну розв'язку 2 генерує імпульси на «Н»-міст 3, функція якого в попереми́нній комутації первинної обмотки підвищувального широкосмугового симетруючого трансформатора 4 для створення на вторинній обмотці імпульсів високої напруги. Щоб не допустити пробій поляризуючої напруги на трансформатор застосований плівковий неполярний конденсатор 5. З протилежного боку пластини 9 встановлений п'єзоелектричний перетворювач (ПЕП) 10 (з резонансною частотою 5 МГц, радіусом 2 мм), підключений до стійкого до завад смугового підсилювача 11 з коефіцієнтом посилення рівним 1000. З виходу підсилювача 11 прийнятий сигнал подається на осцилограф 12.

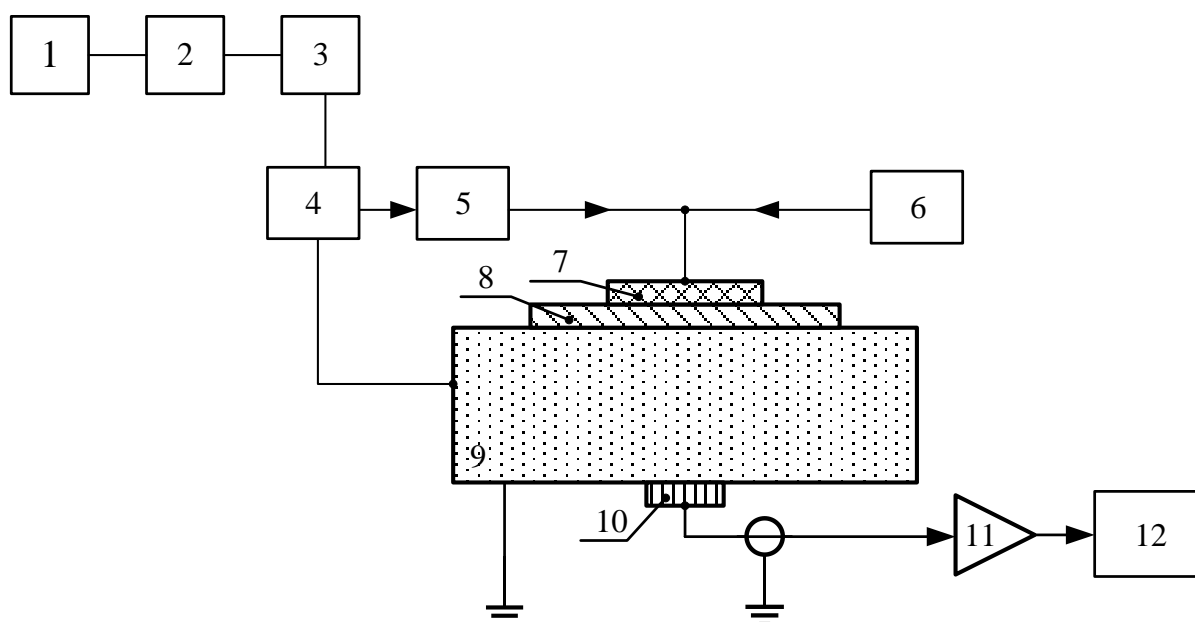


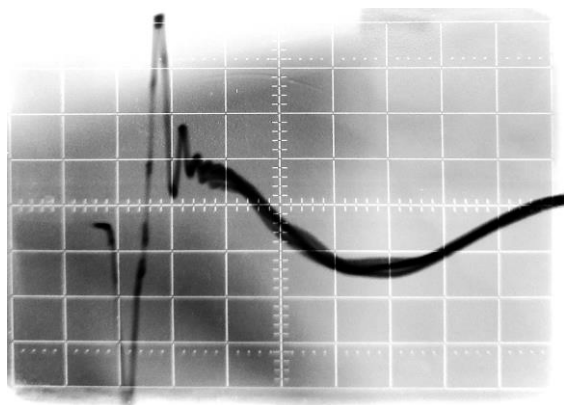
Рисунок 20 – Блок-схема експериментальної установки

На рис. 22 показано зображення на екрані осцилографа реалізації ультразвукових імпульсів, що подаються з генератора на ЄП. Постійна напруга, що прикладається до верхньої пластини перетворювача складає 1,5 кВ, розмах імпульсу на екрані осцилографу становить 3 кВ, частота 4,8 МГц.

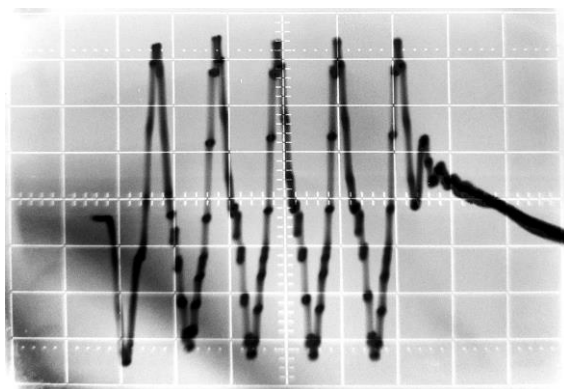


Рисунок 21 –Зображення станда:

- 1 – генератор високочастотних імпульсів і 2 – гальванічна розв'язка (знаходяться в одному корпусі); 3 – «Н» -міст; 4 – підвищуючий широкосмуговий симетруючий трансформатор; 5 – розділовий конденсатор; 6 – джерело поляризуючої електричної напруги, що складається із латру, розв'язуючого трансформатора і помножувача напруги; 7 – електрод ЄП; 8 – діелектричний шар; 9 – об'єкт контролю; 10 – ПЕП; 11 – стійкий до шумів смуговий підсилювач; 12 – осцилограф; 13 – перемикач полярності для однополярного джерела живлення



*а*



*б*

Рисунок 22 – Реалізація на екрані осцилографа імпульсів, що подаються на ЄП:  
*а* – один імпульс в пакеті; *б* – п'ять імпульсів у пакеті



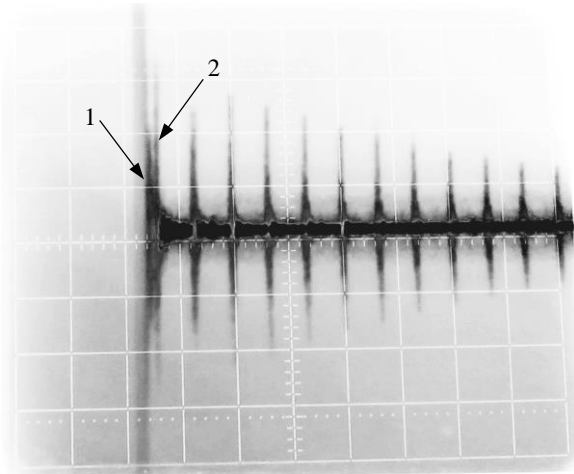


Рисунок 23 – Прийнята ПЕП послідовність імпульсів, сформована від однієї послідовності імпульсів, сформована від однієї послідовності імпульсів (0.2 В / под, 10 мкс / под): 1 – зондувальний імпульс; 2 – перший прийнятий імпульс від ЄП

Очевидно, що запропонованим ГВІ за рахунок збільшення величини поляризувальної напруги і пікової амплітуди змінної напруги можливе значне підвищення амплітуди збудження ультразвукових пакетних імпульсів.

Для дослідження діаграми спрямованості ЄП застосовується стандартний зразок СЗ-3, розміщення збуджуючого і приймаючого перетворювачів на зразку і діаграми спрямованості зображено на рис. 24–25.

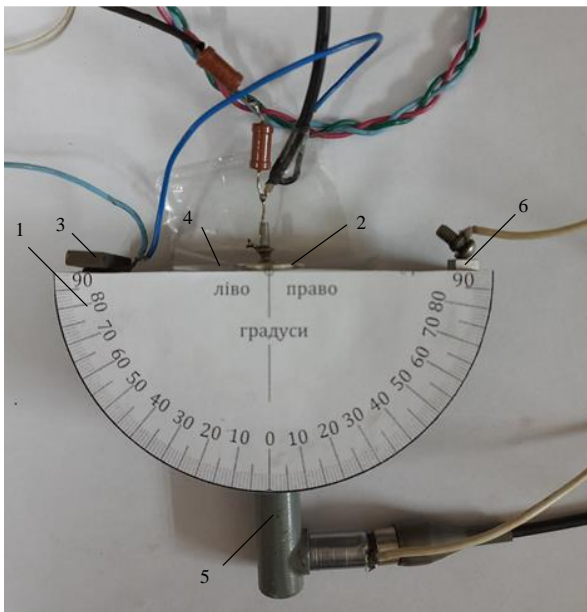
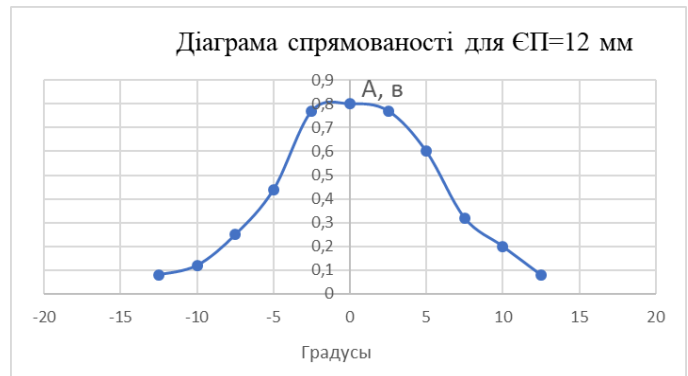
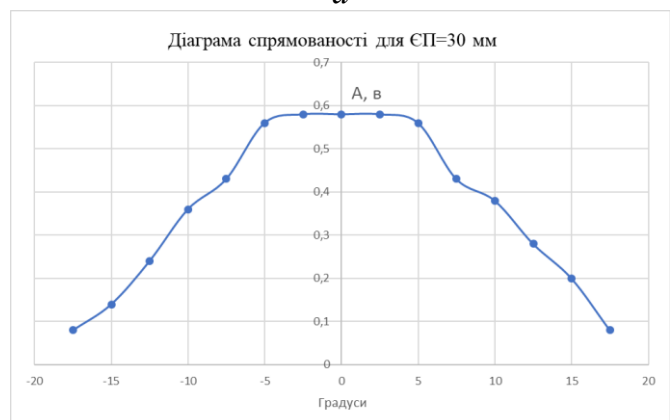


Рисунок 24 – Зображення схеми дослідження діаграми спрямованості ЄП на стандартному зразку СЗ-3:

- 1 – стандартний зразок із Ст 3 зі шкалою;
- 2 – випромінюючий ЄП; 3 – заземлення ЄП; 4 – поліетиленова плівка, товщиною 75 мкм, яка служить діелектриком;
- 5 – приймаючий прямий ПЕП з частотою 5 МГц; 6 – заземлення ПЕП



*a*



*б*

Рисунок 25 – Діаграма спрямованості для діаметрів ЄП: *a* – 12 мм; *б* – 30 мм

На рис. 26 наведені діаграми спрямованості ЄП на зразку Ст3 товщиною 22 мм, розміром 50x70 мм.

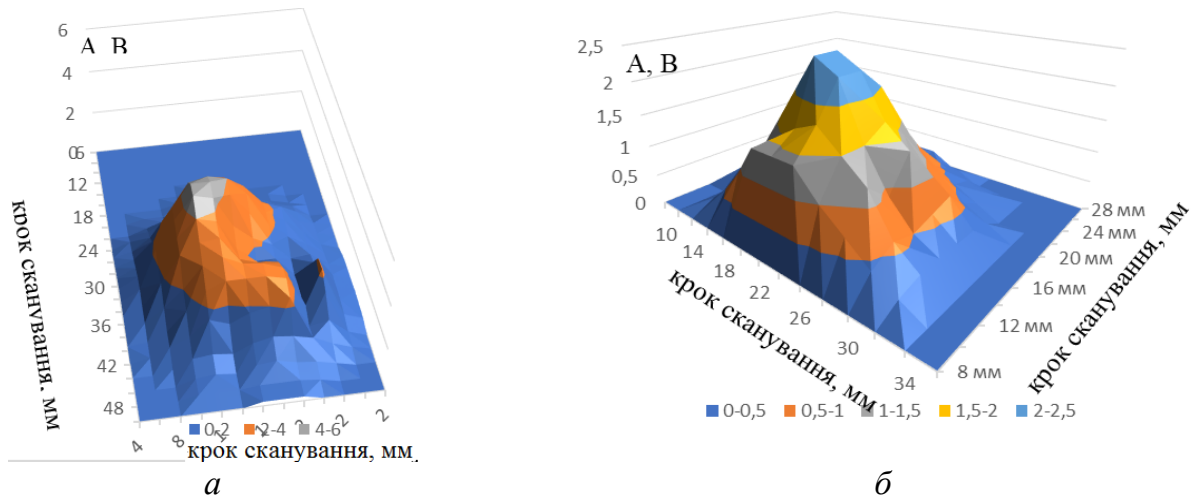


Рисунок 26 – Діаграми спрямованості для діаметрів ЄП:

*a* – 20 мм з ємністю  $C_{еп}=45,3$  пФ; *б* – 12 мм з ємністю  $C_{еп}=16,4$  пФ

Для досліджень використовували ємнісі випромінюючі перетворювачі діаметрами 12 мм і 20 мм. Крок сканування приймаючим п'єзоелектричним перетворювачем протилежної поверхні виробу складає 2 мм з робочою частотою ультразвукових сигналів 5 МГц. В якості діелектричного прошарку було використано поліетиленову плівку товщиною 75 мкм.

З метою подальшого дослідження діаграми ЄП було взято зразок із Ст 20 з більшою товщиною ніж при попередніх дослідженнях, з тим же діелектриком, кроком сканування і приймаючим ПЕП (рис. 27).



Рисунок 27 – Фото схеми дослідження діаграми спрямованості ЄП діаметром 30 мм:

1 – випромінюючий ЄП з діелектричним прошарком у вигляді гетинаксу; 2 – приймаючий прямий ПЕП з частотою 5 МГц; 3 – сталевий зразок із Ст 20 товщиною 80 мм

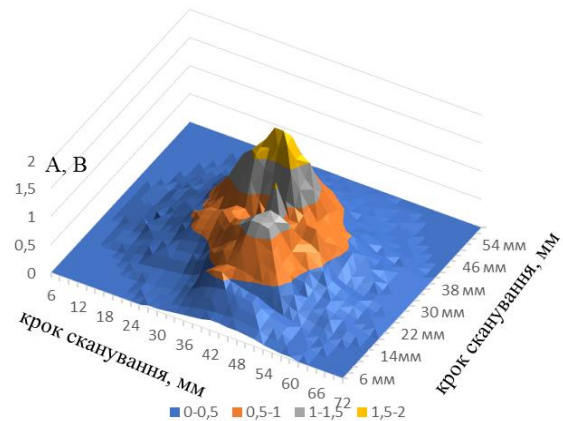


Рисунок 28 – Діаграма спрямованості ЄП діаметром 30 мм

З даної діаграми (рис. 28) можна зробити висновок, що навіть на такій відстані як 80 мм від ємнісного перетворювача максимум амплітуди складає 2 В. Основною величиною, яка визначає точності характеристики контролю товщини виробів, є відношення амплітуди корисного (прийнятого) сигналу і



амплітуди завад, які в даному випадку складають 20 мВ, тобто відношення сигналу до завад буде 100, що є дуже гарним результатом і доказує можливість реалізації методу навіть з такими товщинами і діелектричним покриттям.

Існує безліч факторів, що впливають на величину «сигнал / завада», однак серед них можна виділити основні, такі як: напруга живлення випромінюючого електрода, кількість періодів заповнення зондуєчого імпульсу (при пакетному збудженні), зазор між датчиком і об'єктом контролю тобто ємність датчика, тип діелектрика (табл. 1). Звісно, чим більше ємність перетворювача, тим більше амплітуда прийнятого імпульсу, тому за результатами табл. 1 для подальших досліджень вибрано поліетиленову плівку.

З попередніх досліджень та досліджень інших науковців у даній області, ефективний діаметр випромінюючої (першої) пластини вибрано  $D = 27$  мм, в якості діелектрика взято поліетиленову плівку з діелектричною постійною  $\epsilon = 1,23$  Ф/м. У якості другої пластини взято сталевий зразок зі значно більшою площею поверхні товщиною 22 мм. На випромінюючу пластину подавалась постійна поляризуєча та імпульсна напруги 1,5 кВ і 3 імпульси в пакеті з частотою 5 МГц (табл. 2, рис. 29).

Таблиця 1 – Ємність перетворювачів в залежності від матеріалу діелектрика

Діелектрик, товщиною $h$ , з діелектричною постійною $\epsilon$	Ємність перетворювача площею $S$ , діаметра $D$ , пФ		
	$S=0,5723 \cdot 10^{-3}$ м; $D = 27$ мм	$S=0,3141 \cdot 10^{-3}$ м; $D = 20$ мм	$S=0,1131 \cdot 10^{-3}$ м; $D = 12$ мм
Поліетиленова плівка, $h=50$ мкм, $\epsilon=1,23$ Ф/м	125	68	24,6
Лавсан, $h=0,19$ мм, $\epsilon=2,66$ Ф/м	70,9	38,9	14
Гетинакс $h = 0,65$ мм, $\epsilon=9,74$ Ф/м	75,9	41,7	15

Таблиця 2 – Дослідження амплітуди прийнятого імпульсу в залежності від ємності ЄП та товщиною діелектрика

Товщина діелектрика $d$ , мкм	Ємність перетворювача, $C$ , пФ	Прийнята амплітуда $A$ , В
50	125	3,5
75	83,3	2,1
100	62,5	1,0
125	50	0,9
150	41,6	0,85
200	31,2	0,8
250	25	0,75

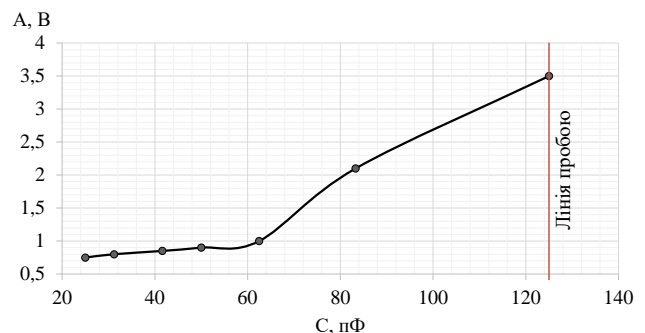


Рисунок 29 – Залежність амплітуди прийнятого імпульсу від ємності перетворювача

Ефективність перетворення електричної енергії в акустичну і взаємодія акустичного поля з виробом крім збуджуючої напруги залежить також від тривалості зондуєчого імпульсу. Зондуєчим імпульсом називається

акустичний імпульс, що випромінюється перетворювачем. Форма зондуючого імпульсу залежить від форми прикладеної напруги. Незважаючи на відмінність в конструкціях приладів загальний принцип збудження коливань залишається незмінним. ЄП заряджається до деякої напруги, потім керуючим сигналом від тактового генератора змінюється полярність прикладеної напруги до ЄП, в результаті перезаряджень ЄП відбувається збудження ультразвукових коливань у виробі.

Чим довше зондуючий імпульс, тим потужніше випромінювання коливання і тим глибше можна прозвучити контрольований виріб. У той же час, чим коротше зондуючий імпульс, тим краще роздільна здатність дефектоскопа за дальністю і менше «мертва» зона. Тому вибір тривалості зондуючого імпульсу – рішення компромісне.

Частоту заповнення зондуючих коливань вибирають, виходячи з мінімальних розмірів дефектів, з одного боку, і максимальних розмірів зерен матеріалу, з якого виготовлено контрольований виріб – з іншого.

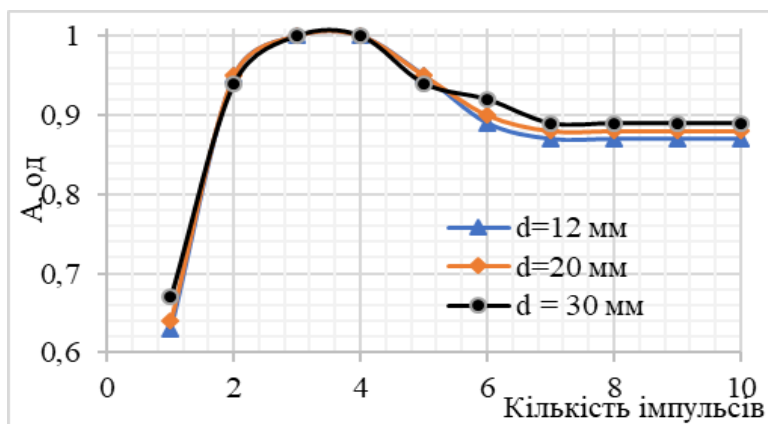


Рисунок 30 – Залежність амплітуди прийнятого імпульсу від кількості імпульсів у зондуючому пакеті для різних діаметрів пластин d

пластина товщиною 22 мм. На випромінюючу пластину подавалась постійна поляризована та імпульсна напруги 1,5 кВ. Діаметри d випромінюючих пластин склали відповідно d = 12 мм (з ємністю C = 16,3 пФ), d = 20 мм (C = 45,3 пФ), d = 30 мм (C = 101,9 пФ)

Із аналізу проведених досліджень можна зробити висновок, що максимум амплітуди прийнятого сигналу досягається при кількості імпульсів у пакеті 2...4.

Експериментально було визначено «мертву» зону (мінімальну товщину), при якій можна відрізнити зондуючий імпульс від першого прийнятого при прозвучуванні тінновим методом УЗК при однополярному джерелі живлення ємнісного перетворювача. Знаючи швидкість поширення хвиль у сталевому зразку, що дорівнює 5900 м/с, встановлено, що «дзвін» зондуючого імпульсу досягає тривалості 4,5 мкс. Звідси легко зробити обчислення, що товщина виробу повинна складати не менше 26,55 мм, для двополярного мінімальна «мертва» зона буде меншою, при тій же частоті УЗ імпульсів, тривалість якого складає 3 мкс, товщина 17,7 мм. Тобто величина «мертвої» зони установки для

На рис. 30 показана залежність наведеної амплітуди напруги на датчику від частоти для різної кількості періодів заповнення зондуючого імпульсу. Вимірювання проведені для зондуючих послідовностей з 1 ... 10 періодів заповнення для зазору 75 мкм, діелектриком взято поліетиленову плівку. Зразком була сталева

двополярного джерела живлення буде в 1,3 рази менше, що ще раз доводить актуальність застосування двополярного джерела живлення.

На рис. 31 *а* зображена роздільна схема розміщення ємнісного перетворювача 1 діаметром 30 мм і п'єзоелектричного перетворювача 2 з частотою прийому імпульсів 5 МГц на сталевому зразку товщиною 22 мм. На ЄП подавалися прямокутні імпульси (3 імпульси в пакеті). Реалізація на екрані дефектоскопу прийнятих імпульсів ПЕП зображена на рис. 31 *б*, з масштабом екрану осцилографу по горизонталі 5 мкс/под, по вертикалі – 0,1 В/под. Відношення «сигнал/завада» дорівнює 5.

З експериментальних результатів можна робити висновок, що чутливість ємнісного перетворювача є достатньою для контролю і при застосуванні його в дзеркально-тіньовому методі ультразвукового контролю.

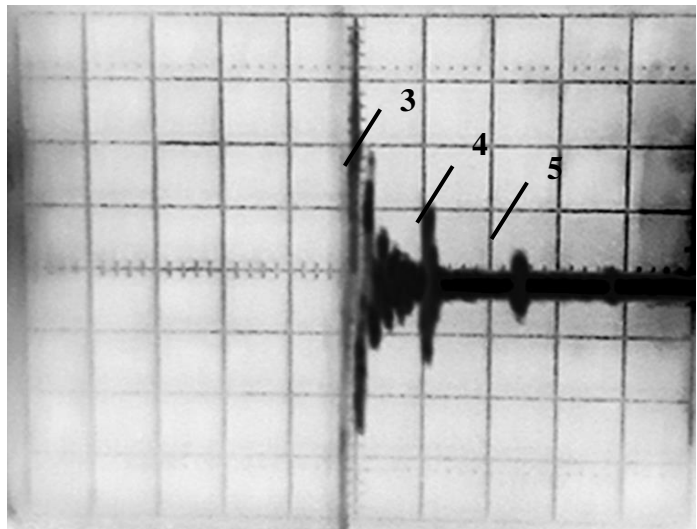
*а**б*

Рисунок 31 – Фото експериментальних досліджень ємнісного перетворювача при застосуванні дзеркально-тіньового метода ультразвукового контролю:  
*а* – схема розміщення перетворювачів; *б* – реалізація на екрані дефектоскопу прийнятих імпульсів; 1 – ЄП; 2 – ПЕП; 3 – зондуєчий імпульс від ЄП; 4 – перший донний імпульс; 5 – другий донний імпульс

У п'ятому розділі розроблені нові моделі ЄП, призначені для: безконтактного ультразвукового контролю металовиробів імпульсами поверхневих хвиль та визначення фізико-механічних властивостей за допомогою хвиль Релея; виявлення дефектів спектральним способом; збудження імпульсів ультразвукових об'ємних хвиль в електропровідних виробках під кутом до поверхні; збудження і прийому пружних хвиль; також суміщені перетворювачі з регульованою діаграмою спрямованості та комп'ютеризований дефектоскоп ємнісного типу. Розроблені ємнісні перетворювачі захищені 38 патентами на корисну модель.

У додатках наведено список публікацій здобувача, акти впровадження результатів, отриманих при виконанні дисертаційної роботи, та написано програмне забезпечення для роботи високочастотного генератора.

## ВИСНОВКИ

У дисертації поставлено та вирішено важливу науково-практичну проблему зі створення нових різновидів ефективних безконтактних ємнісних високочастотних ультразвукових перетворювачів для вимірювань, контролю та діагностики металовиробів з електропровідних або електропровідних і феромагнітних матеріалів.

1. На основі аналізу літературних джерел встановлено, що в значній мірі виключити недоліки традиційного контактного та безконтактного електромагнітно-акустичного методів збудження високочастотних ультразвукових імпульсів в електропровідних феромагнітних виробках можливо за рахунок використання безконтактного ємнісного методу збудження ультразвукових імпульсів.

2. Побудовано узагальнену математичну модель ємнісного перетворювача, на основі якої розв'язано задачу з знаходження розподілу механічних напружень в поверхневому шарі виробу, обумовлених силами Кулона, які ініційовані дією постійного поляризуючого електричного поля та дією високочастотного змінного електричного поля для випадків збудження поздовжніх та поверхневих хвиль. Встановлені обмеження по обрахуванню моделей перетворювачів. Виконано обчислення розподілу електричних зарядів на поверхні виробу та напружень, обумовленими силами Кулона, в залежності від діаметрів електродів ЄП в інтервалі 5...80 мм при заданих значеннях зазору між електродом і поверхнею виробу. Показано, що діаметр електроду не доцільно вибирати більше 20...25 мм.

3. Модельними розрахунками доведено, що основними факторами, що визначають поверхневу щільність сил Кулона, і, як наслідок, чутливість перетворювача, є: поляризуюча напруга; високочастотна напруга, ємність перетворювача (діелектрична проникність); розмір перетворювача; величина зазору між перетворювачем і виробом; форма перетворювача, тип діелектрика.

4. Експериментально показано, що максимальне значення амплітуди корисного сигналу при частоті 5 МГц досягає при формуванні пакетного імпульсу тривалістю 3 періоди частоти заповнення.

5. Експериментальними дослідженнями встановлено, що діюча поверхня збудження ультразвукових променів суттєво перевищує діаметр електроду ЄП навіть при незначних зазорах (0,1...0,2 мм).

6. Наведено результати дослідження ефективності збудження радіальних хвиль Релея в широкому частотному діапазоні. Показано, що збудження ультразвукових імпульсів з частотному спектри в сотні кілогерц можливо перетворювачем, у якого радіус електроду не перевищує п'яти міліметрів. Для більш високих частот необхідно використовувати тонкі періодичні структури з заданими відстанями між електродами ЄП. На основі розрахунків побудовані нові типи ємнісних перетворювачів різного призначення.

7. Для живлення ЄП розроблено та виготовлено блок формувача послідовності імпульсів, модуль гальванічної оптичної розв'язки, високовольтний напівміст і підвищуючий симетричний широкосмуговий

трансформатор, які разом забезпечують регулювання частоти напруги живлення ЄП в діапазоні від 1 до 5 МГц, часової тривалості імпульсу 1...10 періодів частоти заповнення, частоти зондування виробу до 1 кГц та службові імпульси.

8. З використанням розробленого стенду для досліджень встановлено, що величина амплітуди тіньового сигналу по відношенню до завод досягає 15,5 разів. Такої величини достатньо для проведення товщинометрії, дефектоскопії та діагностики металовиробів з достатньою чутливістю.

9. Розроблені та запатентовані нові моделі ЄП, призначені для: безконтактного ультразвукового контролю металовиробів імпульсами поверхневих хвиль та визначення фізико-механічних властивостей за допомогою хвиль Релея; виявлення дефектів спектральним способом; збудження імпульсів ультразвукових об'ємних хвиль в електропровідних виробках під кутом до поверхні; збудження і прийому пружних хвиль; також суміщені перетворювачі з регульованою діаграмою спрямованості та комп'ютеризований дефектоскоп ємнісного типу. Розроблені ємнісні перетворювачі захищені 38 патентами на корисну модель.

Результати дисертаційної роботи запроваджено: на ТОВ «ХЕМЗ» (м. Харків) акт впровадження від 01.07. 2020, «Нефтегазовая промышленная арматура», (м. Енергосталь) акт впровадження від 18.03.2019 та міжнародних підприємствах: SRL «AutoService-AF» (Республіка Молдова) акт впровадження від 26.09.2018, «Darcrist Grup SRL» (Республіка Молдова) акт впровадження від 28.09.2018, «Automotive Solution Company» SRL (Румунія) акт впровадження від 2.10.2018. та в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» (акт впровадження від 03 жовтня 2020 р).

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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.

*Здобувачем запропоновані методи ультразвукового контролю, при яких найбільш ефективно виявляються дефекти у зварних з'єднаннях.*

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: НТУ «ХПІ», 2011. Вип. 19. С. 199–203.

*Здобувачем виконано дослідження, спрямовані на розробку технології ультразвукового контролю виробів із зварними швами при відсутності операцій зачистки поверхні металу від фарби.*

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

*Здобувачем визначено мінімальну відстань від перетворювача,*

*починаючи з якої ультразвукове поле заповнює весь переріз довгомірного електропровідного виробу.*

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

*Здобувачем проведено розрахунок елементів схеми генератора зондуючих імпульсів для електромагнітно-акустичного макету дефектоскопа.*

5. Ноздрачева К.Л. Особенности ультразвукового контролю протяжных виробів. *Вісник НТУ «ХП»*. Харків: НТУ «ХП», 2013. № 11(985). – С. 29–32.

*Здобувачем проаналізовано особливості проведення ультразвукового методу неруйнівного контролю довгомірних виробів, наведено методики контролю прутків різними схемами.*

6. Ноздрачева К.Л. Надійність ультразвукового контролю стрижнів круглого і шестигранного перерізу в виробничих умовах. *Український метрологічний журнал*. Харків: ННЦ «Інститут метрології», 2013. № 1. С. 30–33.

*Здобувачем проведена оцінка виявлення дефектів в довгомірних виробах з високою достовірністю за розробленим експрес-методом.*

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

*Здобувачем виконано розрахунки хвильових, частотних та імпульсних передавальних характеристик ультразвукового тракту з електромагнітним збудженням і прийомом радіально поширюючихся хвиль Релея.*

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

9. Сучков Г.М., Ноздрачева 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.

*Здобувачем запропонована розробка комп'ютеризованого дефектоскопу ємнісного типу.*

10. 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 «ХП»*. Харків: НТУ «ХП», 2014. № 19 (1062). С. 163–175.

11. 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 травня 2014 р.). Харків: НТУ «ХП», 2014. С. 179.

*Здобувачем виявлено основні фактори, що визначають щільність зарядів на поверхні виробу і, відповідно, потужність і діаграму спрямованості ультразвукового поля, що випромінюється.*

12. 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.

*Здобувачем розроблена математична модель ємнісного перетворювача для випромінювання ультразвукових імпульсів в металевий виріб, отримано вираз для розрахунку поверхневої щільності статичного електричного заряду на поверхні металевого зразка.*

13. 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.

*Здобувачем проведено аналіз теоретичних і експериментальних даних роботи ємнісного перетворювача в режимі збудження ультразвукових хвиль.*

14. Ноздрачева Е. Л. Развитие теории и практики создания емкостных преобразователей для ультразвукового контроля металлоизделий (Обзор). *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: *Електроенергетика та перетворювальна техніка*. Харків: НТУ «ХП», 2015. № 19 (1128). С. 29–54.

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

16. 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.

17. 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 «КП». 2014. С. 183–184.

18. Сучков Г., Ноздрачова Е., Чунихина Т. 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.



*Здобувачем встановлено перспективність застосування ємнісного методу, описаний принцип роботи. Розглянуто ємнісні перетворювачі та напрямки їх застосування, дослідження їх можливостей у порівнянні з іншими.*

19. Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Ноздрачова Е.Л. Модель ультразвуковых электромеханических приемных преобразователей ультразвуковых волн Релея. *Техническая электродинамика*. 2016. №6. С. 83–89.

*Здобувачем розроблено математичну модель ємнісного приймача високочастотних ультразвукових хвиль Релея, що радіально поширюються в металевих листах.*

20. 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: НТУ «ХПІ», 2018. № 23 (1299). С. 45–50.

21. 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.

*Здобувачем визначена актуальність знаходження нових методів і підходів контролю і діагностики камер запуску і прийому очисних і діагностичних пристроїв трубопроводів.*

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.

*Здобувачем побудовані замкнуті рішення задач електростатики та електродинаміки для кусково-однорідного середовища, в якій напівпростір заповнене металом з кінцевими значеннями електричної провідності і магнітної проникності.*

23. 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.

24. 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.

25. 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.

*Здобувачем розроблено схеми ємнісних способів збудження імпульсів ультразвукових об'ємних хвиль в електропровідних виробах під кутом до поверхні.*



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

27. 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.

28. Ультразвуковий роздільно-поєднаний височастотний 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.

29. 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.

30. 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.

31. 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.

32. 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.

33. 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.

*Здобувачем запропонована реалізація роздільно – поєднаних безконтактних ультразвукових ємнісних перетворювачів для контролю імпульсами поверхневих хвиль.*

34. 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.

35. 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.

36. 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.

37. 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.

38. 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.

39. 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.

*Здобувачем запропоновано схеми комбінованій ємнісних перетворювачів для контролю імпульсами ультразвукових хвиль Релея фізико–механічних властивостей металовиробів.*

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), Pp. 242–248

*Здобувачем розроблено варіант схемотехнічного рішення макету дефектоскопа для двополярного джерела живлення ємнісних перетворювачів, проведено дослідження на розробленому макеті дефектоскопу із застосуванням ємнісних перетворювачів в режимі збудження ультразвукових хвиль.*

41. 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.

*Здобувачем запропоновано варіант практичної реалізації однополярного генератора потужних радіоімпульсів напруги на базі мікроконтролера, силових MOSFET транзисторів і симетричного підвищуючого широкосмугового трансформатора, який забезпечує на ємнісному перетворювачі високочастотні високовольтні імпульси позитивної та негативної полярності.*

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

43. 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.

*Здобувачем запропоновано спектральний спосіб ультразвукового ємнісного виявлення дефектів на донній поверхні електропровідного виробу.*

44. Хащина С.В., Хомяк Ю.В., Десятниченко А.В., Ноздрачова Е.Л., Сучков Г.М. Экологичные методы и средства неразрушающего контроля. *І межотраслевая научно-практическая конференция молодых учёных и специалистов в области проектирования предприятий горно-металлургического комплекса, энерго- и ресурсосбережения, защиты окружающей природной среды: тезисы докл.* (г. Харьков, 27–28 марта 2012 г.). Харьков. 2012. С. 157–163.

*Здобувачем проведені дослідження на розроблених макетах приладів для визначення фізико-механічних властивостей електропровідних матеріалів, при використанні яких вилучається негативний вплив на екологічні характеристики середовища.*

45. 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.

*Здобувачем розрахована модель для випадку фільтрації низькочастотних компонентів сигналу та обмеження зондуючого імпульсу на вході при використанні широкосмугового підсилювача, при застосуванні перетворювачів імпульсних ультразвукових засобів контролю.*

46. 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.

*Здобувачем показана ефективність дальньодіючого виявлення внутрішніх дефектів довільної орієнтації контактним ультразвуковим методом у тїлі труби при застосуванні об'ємних і поверхневих хвиль одночасно.*

47. Глоба С., Ноздрачева Е., Чунихина Т., 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.

*Здобувачем проведено аналіз застосування на практиці безконтактного електромагнітно-акустичного методу неруйнівного контролю у порівнянні з відомими методами контролю.*

48. 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.

*Здобувачем проведено експериментальні дослідження роботи ємнісного перетворювача в режимі збудження ультразвукових імпульсів.*

49. 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.

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

*Здобувачем запропоновано модель ультразвукового дефектоскопа ємнісного типу, який має в 100 разів вищу чутливість, високу швидкість обробки інформації, не потребує зачистки поверхні та не притягується до феромагнітного виробу.*

51. 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.*

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

*Здобувачем розроблено широкополосний ємнісний перетворювач застосування якого дозволяє підвищити чутливість та продуктивність дефектоскопії.*

53. 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.*

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

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

*Здобувачем запропоновано схеми реалізації ємнісних ультразвукових прямих суміщених перетворювачів з регульованою діаграмою спрямованості.*

56. 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.*

*Здобувачем розроблено математичну модель ємнісного ультразвукового перетворювача, призначеного для випромінювання ультразвукових коливань Релея в електропровідний виріб.*

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

*Здобувачем запропоновано спосіб ультразвукового неруйнівного контролю виробів ширококутовим електромагнітно-акустичним перетворювачем для підвищення чутливості та продуктивності дефектоскопії.*

58. 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). № u 2011 14615; заяв. 09.12.2011; надрук. 10.08.2012, Бюл. №15. 4 с.

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

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

*Здобувачем запропоновано способи і пристрій імерсійного ультразвукового неруйнівного контролю розвинених в одному напрямку виробів з перетином у вигляді кола, у якому за рахунок зменшення впливу акустичних завад на результати контролю підвищується достовірність дефектоскопії.*

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

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

63. 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). № u 2019 05380; заяв. 20.05.2019; надрук. 25.11.2019, Бюл. № 22. 4 с.

64. Спосіб ємнісного збудження однонаправлених імпульсів ультразвукових поверхневих хвиль в металовиробах: пат. 138383 Україна, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). № u 2019 05297; заяв. 20.05.2019; надрук. 25.11.2019, Бюл. № 22. 4 с.

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

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

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

68. 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). № u 2019 05371; заяв. 20.05.2019; надрук. 25.11.2019, Бюл. № 22. 4 с.

69. 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.

70. 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.

71. 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.

72. 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.

73. 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.

*Здобувачем запропоновано різні способи ємнісного ультразвукового контролю електропровідних виробів імпульсами поверхневих хвиль.*

74. 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.

*Здобувачем запропонована реалізація ємнісного способу збудження і прийому пружних хвиль із застосуванням додаткового генератора різнополярних коротких за тривалістю імпульсів прямокутної форми.*

75. 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.

*Здобувачем запропонована реалізація ємнісного способу збудження і прийому пружних хвиль при застосуванні двох типів поляризованих імпульсів.*

## АНОТАЦІЇ

**Ноздрачова К.Л. Методи та засоби збудження ультразвукових імпульсів ємнісним методом.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2020.

В дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-практичну проблему – розвиток теоретичних положень та засобів для збудження високочастотних ультразвукових імпульсів ємнісними перетворювачами у виробках з електропровідних матеріалів з підвищеною чутливістю за рахунок збільшення відношення амплітуд корисного сигналу до завад.

У дисертаційній роботі вперше розроблена математична модель ємнісного перетворювача, призначеного для збудження ультразвукових коливань в електропровідному виробі, за допомогою якої вирішені дві задачі електростатики та динамічної теорії пружності для кусково-однорідного середовища. Експериментально побудовані діаграми спрямованості акустичного поля та визначені основні фактори, які впливають на інтенсивність ультразвукових імпульсів, що збуджуються ЄП. Розроблені нові конструкції ємнісних перетворювачів призначених для контролю електропровідних виробів різними типами ультразвукових хвиль. Застосування даних перетворювачів дозволить значно підвищити відношення сигнал/завада. Розроблено високочастотні генератори збудження високовольтних пакетів одно- та двополярних імпульсів для живлення ємнісних перетворювачів. Експериментально підтверджена можливість збудження поздовжніх та поверхневих хвиль ємнісними перетворювачами з інтенсивністю ультразвукового поля, достатньою для проведення вимірювань, контролю та діагностики.

Практичне значення роботи полягає в технічній можливості використання ємнісних перетворювачів для ультразвукового контролю, вимірювань та діагностики електропровідних виробів. Для реалізації ємнісного методу розроблено і виготовлено: макети пристроїв для досліджень характеристик ЄП різного призначення; генератори високовольтних імпульсів напруги для живлення ЄП; стійкий до дії шумів підсилювач ультразвукових сигналів; макет приладу для формування вхідних імпульсів генераторів напруги з можливістю регулювання частоти, тривалості, частоти зондування тощо; методику побудови вихідних каскадів генераторів живлення ЄП. Створено програмне забезпечення для роботи макетів пристроїв для досліджень характеристик ЄП різного призначення.

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

**Ноздрачева Е.Л. Методы и средства возбуждения ультразвуковых импульсов емкостным методом.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определения состава веществ. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» Харьков, 2020.

В диссертационной работе решена актуальная научно-практическая проблема - развитие теоретических положений и средств для возбуждения высокочастотных ультразвуковых импульсов емкостными преобразователями в изделиях из электропроводящих материалов с повышенной чувствительностью за счет увеличения отношения амплитуд полезного сигнала к помехам.

Актуальность работы связана с совершенствованием принципа реализации возбуждения ультразвуковых импульсов бесконтактными ЕП.

Применение емкостного метода и преобразователей, его реализация позволит сэкономить время и материалы по сравнению с другими методами ультразвукового контроля.

В известных информационных источниках указывается на существенную перспективность бесконтактного емкостного метода возбуждения ультразвуковых импульсов. Данный метод не требует зачистки поверхности. Емкостные преобразователи компактны и не привлекаются к электропроводящей изделия. Однако, ученые, занимающиеся разработками в данной области контроля утверждают, что ЕП имеют низкую чувствительность. Поэтому, исследования и разработки, направленные на повышение чувствительности ЕП - актуальны.

В диссертационной работе впервые разработана математическая модель емкостного преобразователя, предназначенного для возбуждения ультразвуковых колебаний в электропроводящей изделии, с помощью которой решены две задачи электростатики и динамической теории упругости для кусочно-однородной среды. Экспериментально построены диаграммы направленности акустического поля и определены основные факторы, влияющие на интенсивность ультразвуковых импульсов, возбуждаемых ЕП. Разработаны новые конструкции емкостных преобразователей предназначенных для контроля электропроводящих изделий различными типами ультразвуковых волн. Применение данных преобразователей позволит значительно повысить отношение сигнал / помеха. Разработаны высокочастотные генераторы возбуждения высоковольтных пакетов одно- и двуполярного импульсов для питания емкостных преобразователей. Экспериментально подтверждена возможность возбуждения продольных и поверхностных волн емкостными преобразователями с интенсивностью ультразвукового поля, достаточной для проведения измерений, контроля и диагностики.

Практическое значение работы состоит в технической возможности использования емкостных преобразователей для ультразвукового контроля, измерений и диагностики электропроводящих изделий. Для реализации емкостного метода разработаны и изготовлены: макеты устройств для исследований характеристик ЕП различного назначения; генераторы высоковольтных импульсов напряжения для питания ЕП; устойчивый к воздействию шумов усилитель ультразвуковых сигналов; макет прибора для формирования входных импульсов генераторов напряжения с возможностью регулировки частоты, продолжительности, частоты зондирования и т. п.; методику построения выходных каскадов генераторов питания ЕП. Создано программное обеспечение для работы макетов устройств для исследований характеристик ЕП различного назначения.

*Ключевые слова:* ультразвуковой контроль, ультразвуковые импульсы, диагностика, емкостной, преобразователь, генератор мощных радиоимпульсов напряжения, широкополосный трансформатор, электрод, силы Кулона, поляризирующее напряжение, поверхностные волны, усилитель, помехи.



**Nozdrachova Kateryna. Electromagnetic-acoustic transducers for ultrasonic testing of hardware. – Manuscript.**

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

Dissertation for a Doctor Degree of Technical Science (Doctor of Science), specialty 05.11.13 "Devices and methods of testing and determination of composition of substances" - National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute".

In the dissertation work an actual scientific and practical problem is solved – the development of theoretical statements and means for excitation of high - frequency ultrasonic pulses by capacitive transducers in electrically conductive material samples with the increased sensitivity at the expense of increase of the ratio of amplitudes of a useful signal to noise.

In the dissertation work the mathematical model of a capacitive transducer intended for excitation of ultrasonic oscillations in an electrically conductive product is developed for the first time by means of which two problems of electrostatics and the dynamic theory of elasticity for piecewise-homogeneous environment are solved. Diagrams of the acoustic field orientation are built experimentally and the main factors influencing the intensity of ultrasonic pulses excited by CT are determined. New designs of capacitive transducers designed for testing of electrically conductive products with different types of ultrasonic waves have been developed. The use of these converters increases the signal-to-noise ratio significantly. High-frequency excitation generators of high-voltage packets of unipolar and bipolar pulses for power supply of capacitive transducers were developed. The possibility of excitation of longitudinal and surface waves by capacitive transducers with ultrasonic field intensity sufficient for measurements, testing and diagnostics has been experimentally confirmed.

The practical significance of the work lies in the technical feasibility of capacitive transducers usage for ultrasonic testing, measurement and diagnostics of electrically conductive samples. To implement the capacitive method, the following have been developed and manufactured: models of devices for studying the characteristics of CTs for various purposes; high- voltage pulse generators for power supply of CT; noise-resistant amplifier of ultrasonic signals; layout of the device for input pulses generation of supply units allowing to adjust the frequency, duration, sounding frequency, etc.; method of CT power generators output stages construction. The software solution for processing of device models for the research of characteristics of various function CT is created.

*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.





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