

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**ОЛІЙНИК ЮРІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ**

УДК.620.179.16

**МЕТОДИ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ТОВЩИНОМЕТРІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ  
ФАЗОМАНІПУЛЬОВАНИХ СИГНАЛІВ ТА ЇХ РЕАЛІЗАЦІЯ**

Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення  
складу речовин

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

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі приладів і систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Куц Юрій Васильович,**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського», професор кафедри приладів і систем  
неруйнівного контролю.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Кулаков Павло Ігорович,**  
Вінницький національний технічний університет,  
професор кафедри метрології та  
промислової автоматики;

кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Шапвалов Євген Вікторович,**  
Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона  
НАН України, завідувач відділом  
автоматизованих систем управління  
технологічними процесами № 027.

Захист відбудеться «10» грудня 2019 р. о 14 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.18 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою:  
03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корп. 1, ауд. 293.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою:  
03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «\_\_» листопада 2019 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
доктор технічних наук, професор



Н.І. Бурау

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Значне коло завдань ультразвукового неруйнівного контролю пов'язане з визначенням геометричних розмірів об'єктів контролю (ОК). Стоншення елементів конструкцій і механізмів внаслідок зношування та дії різних видів корозії було і лишається однією з найбільших загроз втрати ними несучої спроможності, погіршення експлуатаційних характеристик та руйнування. Традиційним методом ультразвукової товщинометрії (УЗТ) є лунаїмпульсний метод, який ґрунтується на визначенні часу проходження ультразвукових коливань в ОК. На початкових етапах розроблення УЗТ цей метод застосовувався для контролю виробів з металів та сплавів, тому саме фізико-механічні властивості останніх визначали основні ідеї і напрями розвитку лунаїмпульсного методу. Зокрема це мало вирішальний вплив на обґрунтування частотного діапазону сигналів УЗТ, створення різних типів перетворювачів ультразвукових коливань, розроблення та удосконалення апаратурної реалізацій та методів вимірювання параметрів і характеристик сигналів УЗТ.

Значний внесок в розвиток методів та засобів УЗТ зробили відомі українські та закордонні вчені: Альошин Н. П., Білокур І. П., Гурвіч А. К., Доммаркас В. І., Єрмолов І. М., Кажис Р-І. Ю., Карпаш О. М., Карпельсон А. Є., Кисіль І. С., Ключев В. В., Корольов М. В., Крауткремер Г., Крауткремер Й., Луценко Г. Г., Мак-Мастер Р., Мозговий О. В., Самойлович Г.С., Соколов С.Я., Сухоруков В. В., Троїцький В. О., Щербинський В.Г. та ін.

Останнім часом в промисловості та на транспорті значного поширення набувають нові конструкційні матеріали, номенклатура яких стрімко зростає. Зокрема до таких матеріалів належать композиційні матеріали, які порівняно з металами характеризуються більшим загасанням ультразвукових коливань та розкидом фізико-механічних характеристик. Контроль товщини виробів з таких матеріалів традиційними методами ускладнений внаслідок суттєвого зменшення відношення сигнал/шум (с/ш), що перешкоджає підвищенню метрологічних характеристик засобів УЗТ. Тому розроблення і вдосконалення методів і засобів прецизійної УЗТ є актуальним науково-прикладним завданням.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами** Дисертаційна робота виконувалась відповідно до тематичних планів науково-дослідних робіт на кафедрі приладів і систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» 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».

**Мета і завдання дисертаційної роботи.** Мета дисертаційної роботи полягає у вирішенні науково-технічної задачі підвищення точності засобів лунаїмпульсної УЗТ за рахунок використання фазоманіпульованих (ФМ) сигналів і методів детермінованого та статистичного опрацювання їх фазових характеристик в широкому діапазоні змін акустичних властивостей матеріалів.

Для досягнення цієї мети в роботі поставлені та вирішені наступні завдання:

- проаналізувати сучасні засоби ультразвукової товщинометрії та реалізовані в них методи опрацювання інформаційних сигналів, дослідити можливість використання фазоманіпульованих сигналів в засобах лунаїмпульсної УЗТ для прецизійного визначення часу затримки сигналів за їх поширення в ОК;
- розробити новий метод прецизійної лунаїмпульсної УЗТ, орієнтований на використання фазоманіпульованого сигналу-носія;
- удосконалити метод лунаїмпульсної УЗТ з фазовим статистичним опрацюванням сигналів, що ґрунтується на аналізі отриманої в ковзному режимі  $r$ -статистики з метою забезпечення працездатності за менших відношень с/ш сигналів УЗТ;
- експериментально дослідити процеси проходження ФМ-сигналів в електроакустичних трактах УЗТ та вимірювання часу затримки сигналів в ОК;
- розробити методики визначення товщини виробів з конструкційно міцних матеріалів для запропонованого і удосконаленого методів лунаїмпульсної УЗТ;
- розробити дослідний зразок засобу лунаїмпульсної УЗТ з покращеними показниками точності вимірювання за рахунок використання тестових фазоманіпульованих сигналів та фазових методів опрацювання сигналів;
- розробити програмно-алгоритмічне забезпечення, яке реалізує запропоновані методи та методики лунаїмпульсної товщинометрії.

**Об’єкт дослідження** – процес визначення товщини виробів з конструкційно міцних матеріалів лунаїмпульсним методом УЗТ.

**Предмет дослідження** – метод лунаїмпульсної ультразвукової товщинометрії виробів з конструкційно міцних матеріалів на основі аналізу фазової характеристики фазоманіпульованих сигналів УЗТ.

**Методи дослідження** базуються на використанні: методів технічної діагностики і неруйнівного контролю; теорії вимірювань; математичного аналізу; цифрових методів аналізу сигналів, зокрема дискретного перетворення Гільберта, теорії ймовірності та математичної статистики; комп’ютерного моделювання та опрацювання експериментальних даних.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в наступному:

1. Удосконалено лунаїмпульсний метод УЗТ шляхом розроблення нового амплітудно-фазового методу УЗТ, який ґрунтується на використанні фазової маніпуляції сигналу-носія зондуючих сигналів, що дозволило визначати час поширення ультразвукових сигналів у виробі за моментами стрибкоподібної зміни фазової характеристики сигналу-носія і підвищити на цій основі точність вимірювання товщини виробу.

2. Удосконалено лунаїмпульсний метод ультразвукової товщинометрії шляхом розробки нового двошкального методу УЗТ, який ґрунтується на уточненні часу затримки лунаісигналів, визначених за моментами стрибкоподібної зміни фазової характеристики фазоманіпульованого сигналу-носія за рахунок вимірюваних фазових зсувів сигналу-носія відбитих лунаісигналів, що дало змогу додатково підвищити точність визначення часу затримки ультразвукового сигналу у виробі і в цілому – підвищити точність вимірювання товщини виробу за зменшеного відношення сигнал/шум.

3. Удосконалено метод УЗТ, який ґрунтується на визначенні часових інтервалів між донними імпульсами за положенням в часі  $r$ -статистики, шляхом використання зваженої  $r$ -статистики з визначенням вагової функції як отриманого в ковзному режимі відгука оператора середньоквадратичного відхилення на вибірку  $r$ -статистики. Використання зваженої  $r$ -статистики дозволяє впевнено виявляти лунасигнали УЗТ за відношення  $c/\pi < 1$ , що дає змогу досліджувати вироби в широкому діапазоні змін акустичних властивостей матеріалів.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у наступному:

1. Експериментально доведено можливість поширення лунасигналів з фазоманіпульованим сигналом-носієм в електроакустичних трактах засобів УЗТ, що дало змогу використовувати особливості фазових характеристик таких сигналів для підвищення точності визначення часу поширення лунасигналів у ОК та обґрунтувати необхідну смугу частот п'єзоелектричних перетворювачів.

2. Розроблено методику визначення товщини виробів з конструкційно міцних матеріалів за методами, які ґрунтуються на отриманні та опрацюванні фазової характеристики фазоманіпульованих лунасигналів УЗТ. Це дає змогу виконати прецизійне вимірювання часу поширення сигналів у ОК.

3. Розроблено методику визначення товщини виробів з матеріалів зі значним загасанням ультразвуку, яка ґрунтується на отриманні фазової характеристики сигналів лунаїмпульсної УЗТ і часових інтервалів за зваженою  $r$ -статистикою, що дає змогу зменшити похибку вимірювання товщини виробів за рахунок виявлення більшої кількості лунасигналів.

4. Виконані комп'ютерні обчислювальні експерименти на заданих моделях сигналів-носіїв з фазовою маніпуляцією дали змогу відпрацювати програмну реалізацію процесу опрацювання таких сигналів і підтвердити ефективність запропонованих методів ультразвукової лунаїмпульсної УЗТ.

5. Розроблено структуру апаратно-програмного засобу лунаїмпульсної УЗТ, що, за рахунок використання тестових ФМ-сигналів та фазових методів їх опрацювання, дало змогу зменшити похибку вимірювання товщини виробів у широкому діапазоні зміни пружних характеристик матеріалу. Розроблено програмно-алгоритмічне забезпечення, яке реалізує запропоновані методи лунаїмпульсної УЗТ і може бути використане як самостійно, так і у складі ультразвукових товщиномірів.

6. Результати теоретичних та експериментальних досліджень впроваджені у виробничий процес ДП «Луцький ремонтний завод «Мотор» (м. Луцьк), у навчальний процес кафедри приладів та систем неруйнівного контролю КПІ імені Ігоря Сікорського під час викладання дисципліни «Комп'ютерно-інтегровані системи технічної та медичної діагностики».

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові положення та результати, що виносяться на захист, отримані автором особисто в ході самостійного виконання досліджень та на основі узагальнень та висновків з колективно отриманих результатів. В дисертації не використовувались ідеї та розробки, що належать співавторам спільно опублікованих наукових праць. Деякі матеріали спільних робіт використано в дисертаціях кандидата технічних наук Монченко О.В., 2010 р. (спец. вчена рада Д26.062.01 Національного авіаційного університету); кандидата технічних

наук Бистрої І.М., 2014 (спеціалізована вчена рада Д 26.062.01 Національного авіаційного університету).

У роботах, опублікованих у співавторстві, особисто автором виконано: [1] – постановку задачі, розроблено методику проведення досліджень та опрацювання експериментальних даних; [2] – аналіз літературних джерел, базового та удосконаленого методів виявлення сигналів УЗТ; [3,7,10, 11] – запропоновано використання в УЗТ фазоманіпульованих сигналів для прецизійного визначення часу затримки сигналів, а також виконані експериментальні дослідження нового методу УЗТ; [4] – експериментально підтверджено ефективність статистичного опрацювання фазових характеристик сигналів УЗТ в задачах виявлення лунасигналів на фоні значного шуму; [5, 8, 13, 21] – модельні та експериментальні дослідження двошкального способу лунаїмпульсної УЗТ, відпрацювання програмної реалізації процесу опрацювання експериментальних даних; [6, 18] – оцінювання невизначеності результатів вимірювання затримки сигналу в електроакустичному тракці приладу УЗТ; [9, 17, 20] – алгоритми та методики оброблення ФМ-сигналів УЗТ; [12, 19] – оцінювання похибок у методі УЗТ на основі використання  $r$ -статистики, обчисленої за фазовою характеристикою сигналу УЗТ; [14, 15] – експериментально доведена можливість використання вузькосмугових п'єзоелектричних перетворювачів для передачі фазоманіпульованих сигналів в електроакустичному тракці УЗТ; [16] – експериментально отримані і проаналізовані амплітудно-частотні характеристики п'єзоперетворювачів для лунаїмпульсної УЗТ з ФМ-сигналами.

**Апробація результатів роботи.** Основні результати роботи обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях: міжнародних науково-практичних конференціях «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Чернігів, 2012, 2013, 2015, 2016); міжнародних науково-технічних конференціях «Приладобудування: стан і перспективи» (м. Київ, 2013, 2015, 2018); міжнародній конференції «Дні неруйнівного контролю» (Болгарія, 2013); міжнародній науково-технічній конференції «Авіа-2013» (Київ, 2013); міжнародній науково-практичній конференції «Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси» (Київ, 2014); науково-технічній конференції «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю та технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання» (Івано-Франківськ, 2014); міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (Вінниця, 2015); міжнародному науково-технічному семінарі «Неопределенность измерений: научные, законодательные, методические и прикладные аспекты» (Мінськ, Беларусь, 2016); міжнародній науково-технічній конференції «Метрологія та вимірювальна техніка» (Харків, 2016).

**Публікації.** Основні положення дисертації, які в достатній мірі висвітлюють результати роботи, що виноситься на захист, опубліковані в 21 науковій праці, з яких: 6 статей у наукових фахових виданнях (одна входить до міжнародної науково-метричної бази та одна у закордонному виданні); отримано два патенти України на корисну модель, тринадцять матеріалів та тез доповідей на науково-технічних конференціях.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 113 найменувань та

додатків. Загальний обсяг дисертації становить 174 сторінки, в тому числі 145 сторінок основного тексту, 45 рисунків і 9 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання наукових досліджень, викладено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено дані про зв'язок роботи з науковими темами, апробацію результатів роботи, впровадження та публікації.

У **першому розділі** проведено аналіз виробів з конструктивно міцних матеріалів, які використовуються в різних галузях промисловості та на транспорті. За своєю природою такі матеріали поділяються на металеві, неметалеві і композиційні та суттєво різняться акустичними властивостями – швидкістю поширення коливань, загасанням, акустичним імпедансом. Особливо значне загасання мають композиційні матеріали, що створює певні труднощі для застосування УЗТ.

Розглянуто фізичні принципи лунаїмпульсного методу ультразвукової товщинометрії.

Виконано аналіз стану розвитку апаратних засобів лунаїмпульсної УЗТ, наведена узагальнена структура лунаїмпульсного товщиноміра та технічні характеристики таких приладів різних виробників. Доступні у періодичних наукових виданнях відомості про ультразвукові лунаїмпульсні товщиноміри здебільшого мають рекламний характер і не розкривають або свідомо приховують реальні можливості апаратури. Зокрема, відсутність даних про межу відношення с/ш, за якої досягаються заявлені показники точності, час вимірювання, коефіцієнт загасання матеріалу ОК, алгоритми опрацювання даних, відомості про методи статистичного опрацювання даних і т.і. Це обмежує можливості об'єктивного оцінювання наведених технічних характеристик та умов їх досягнення, унеможлиблює проведення коректного співставного аналізу апаратури різних виробників.

Підтверджено, що домінуючий вплив на точність вимірювання товщини ОК має похибка формування часового інтервалу. Реалізований у відомих приладах амплітудний метод формування часових інтервалів практично вичерпав свої можливості. Це пояснюється тим, що в реальних електроакустичних трактах товщиномірів обвідна лунаісигналів зазнає суттєвих змін та спотворень внаслідок значного розкиду фізико-механічних характеристик матеріалів ОК та дії шумів і завад. Це призводить до збільшення похибки формування часового інтервалу, суттєво обмежує точність вимірювання часових інтервалів і товщини ОК в цілому.

Розглянуто відомі варіанти формування часових інтервалів в УЗТ, які використовують різні ознаки та характеристики сигналів УЗТ: реєстрацію часового інтервалу за першим/максимальним виявленим лунаісигналом; визначення вимірюваного інтервалу за обраною напівхвилею; використання мульти-лунаісигналів; використання апріорної інформації про діапазон вимірювання; усереднення результатів вимірювання; використання часових міток, отриманих за різними характерними особливостями сигналів та ін.

Зроблено висновок про те, що фазова характеристика сигналів УЗТ, зокрема з фазоманіпульованим сигналом-носієм (ФМ-сигналом), має невикористаний інформаційний ресурс, а така ознака сигналу як стрибок значень його фазової

характеристики дозволить зменшити похибку формування та вимірювання часових інтервалів. На основі проведеного аналізу показано існуюче протиріччя між інформаційними можливостями лунаїмпульсної УЗТ, спрощеними моделями тестових сигналів та способами здобуття вимірювальної інформації, сформульовано науково-практичну задачу роботи, обґрунтовано завдання теоретичних, модельних і експериментальних досліджень та шляхи їх розв'язання.

**Другий розділ** присвячено розробленню методу лунаїмпульсної УЗТ з використанням ФМ-сигналів. З метою аналізу особливостей формування інформаційних сигналів в електроакустичному тракті ультразвукового товщиноміра проаналізовано процес проходження фазоманіпульованих сигналів з маніпуляцією типу BPSK через одиничне резонансне коло. Вибір такої моделі обумовлений тим, що п'єзоелектричні перетворювачі (ПЕП) ультразвукових коливань уявляє резонансну систему. Підтверджено, що внаслідок інерційності контуру стрибок фази сигналу затримується в часі на величину  $t_0 = 0,69/\alpha_k$ , де  $\alpha_k$  – параметр контуру (обернено пропорційний добротності контуру). Зроблено висновок, що в УЗТ з ФМ-сигналами доцільно використовувати широкосмугові ПЕП для передавання стрибків фази сигналу-носія з якомога меншими спотвореннями. Зазначено, що величина  $t_0$  практично не впливає на точність визначення часу затримки сигналу в ОК у випадку, коли цей часовий інтервал визначається між стрибками фази сигналів-носіїв донних імпульсів. У разі вимірювання часового інтервалу між зондуючим і донним імпульсами ця затримка має систематичний характер і може бути вирахована з результату вимірювання за рахунок поправки.

Запропоновано метод прецизійної лунаїмпульсної УЗТ, що ґрунтується на визначенні  $\tau_3$  за фазовою характеристикою зондуючих ФМ-сигналів виду:

$$u_3(t) = \begin{cases} U(t) \sin 2\pi f t, & t \in [0, \tau_1], \\ -U(t) \sin 2\pi f t, & t \in [\tau_1, \tau_i], \\ 0, & t \notin [\tau_i, T_c], \end{cases} \quad (1)$$

де  $U(t)$  – обвідна сигналу;  $f$  – частота сигналу-носія,  $\tau_1$  – момент маніпуляції фази,  $[0, \tau_i]$  – тривалість радіоімпульсу,  $T_c$  – час спостереження сигналу УЗТ.

В основу опрацювання сигналів покладено методологію, що ґрунтується на використанні перетворення Гільберта, яке реалізується оператором  $\mathbf{H}$ . Аналізований сигнал  $u(t) = u_3(t) + u_b(t)$  уявляє адитивну суміш зондуючого  $u_3(t)$  і донного (одного чи декількох)  $u_b(t)$  сигналів. Методика оцінювання інтервалу  $\tau_3$  передбачає:

- визначення гільберт-образу сигналу  $\hat{u}(t) = \mathbf{H}[u(t)]$ ;
- обчислення розгорнутої фазової характеристики сигналу (ФХС)  $u(t)$

$$\tilde{\Phi}(t) = \arctg(u(t)/\hat{u}(t)) + \mathbf{K}[u(t), \hat{u}(t)], \quad (2)$$

де  $\mathbf{K}$  – оператор розгортання ФХС за межі інтервалу  $[-0,5\pi, 0,5\pi]$ ;



- визначення моментів стрибкоподібної зміни значень ФХС (2) на величину  $\pm\pi$  за її похідною  $d\tilde{\Phi}(t)/dt$ ;
- обчислення обвідної  $A(t) = \sqrt{u^2(t) + \hat{u}^2(t)}$  сигналу  $u(t)$ , яку використовують для селекції інформативних стрибків значень ФХС, викликаних фазовою модуляцією сигналу-носія;
- селекція інформативних стрибків ФХС шляхом стробування похідної  $d\tilde{\Phi}(t)/dt$  за допомогою обвідної  $A(t)$ ;
- визначення  $\tau_3$  як інтервалу часу між двома інформативними стрибками значень фазової характеристики двох донних сигналів (або для зонduючого і донного).

Сутність способу ілюструють часові діаграми сигналів на рис.1.

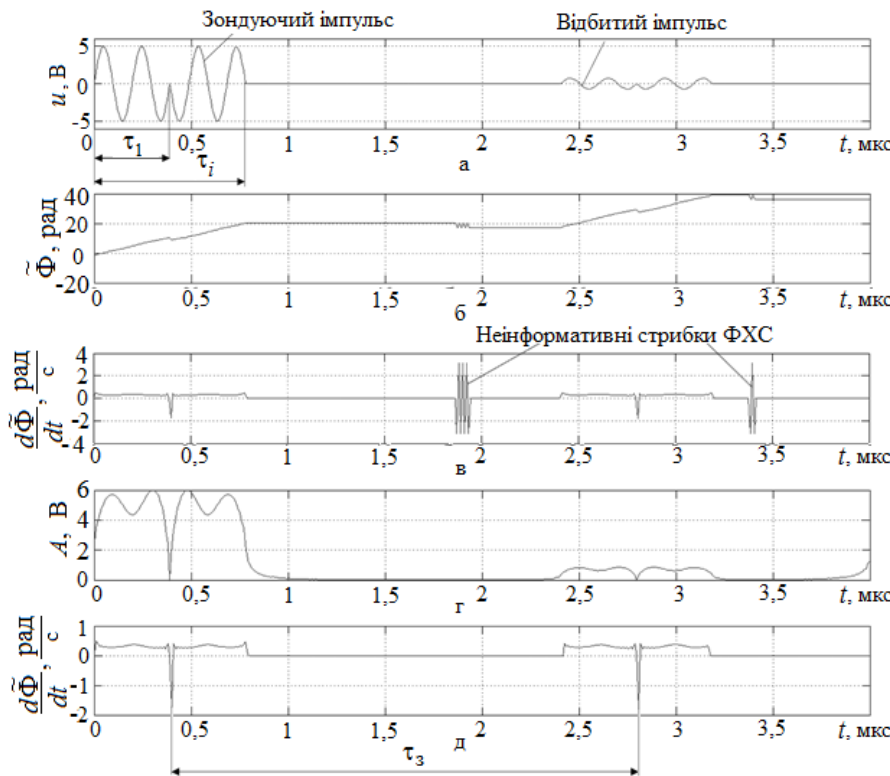


Рис. 1. Графіки модельного сигналу (а) та його характеристик (б – д), що ілюструють процес визначення часового інтервалу  $\tau_3$

На рис.1 зображено: рис. 1 а – сигнал  $u(t)$ ; рис. 1 б – розгорнута ФХС (1); рис. 1 в – похідна  $d\tilde{\Phi}(t)/dt$ ; рис. 1 г – обвідна  $A(t)$  сигналу  $u(t)$  (2); рис. 1 д – інформативні стрибки ФХС, за якими визначається тривалість  $\tau_3$ .

Стрибки значень фази надійно виявляються, а їх положення в часі локалізовані й лишаються стабільними в широкому діапазоні зміни амплітуди донних сигналів.

У випадку цифрового опрацювання сигналів УЗТ отримують цифровий образ  $u[j]$  сигналу  $u(t)$  на евідистантній часовій ґратці  $S[j] = S[jT_d]$ , де  $j = \overline{1, J}$ ,  $J = [T_c/T_d]^+$ ,  $T_d$  – період дискретизації,  $[\cdot]^+$  – позначення операції виділення цілої частини числа. Часовий інтервал з кроком  $T_d$  визначається як

$$\tau_3 = T_d(j_k - j_n) + \Delta\tau = T_d k + \Delta\tau, \quad (3)$$

де  $j_{\Pi}$ ,  $j_k$  – номери відліків у вибірці значень ФХС, що відповідають моментам маніпуляції фази сигналу-носія, тобто відповідають початку і закінченню часового інтервалу;  $\Delta t$  – похибка квантування часового інтервалу, випадкова за характером з середнім квадратичним значенням  $\sigma_{\Delta t} = T_d / \sqrt{6}$ .

З метою підвищення точності вимірювання  $\tau_3$  запропоновано двошкальний метод його визначення, який ґрунтується на технології багатоскальних фазових вимірювань. Суть удосконалення методу лунаїмпульсної УЗТ з використанням ФМ-сигналів полягає у прецизійному визначенні  $\hat{\tau}_3$  через повний фазовий зсув виду  $\Phi = 2\pi n + \varphi$  гармонічного сигналу з частотою  $f$  сигналу-носія (рис.2).

У випадку поширення такого сигналу в ОК маємо

$$\hat{\tau}_3 = \Phi / 2\pi f = f^{-1}(n + \varphi / 2\pi), \quad (4)$$

де  $n$ ,  $\varphi / 2\pi \in [0, 1)$  – відповідно ціле число фазових циклів і доля фазового циклу сигналу з частотою  $f$ , що міститься у повному фазовому зсуві  $\Phi$ . Якщо значення  $n$  визначено безпомилково, похибка вимірювання  $\hat{\tau}_3$  визначається лише похибкою вимірювання значення  $\varphi / 2\pi$ .

На рис. 2 зображено: а – графік фази опорного гармонічного колювання  $\Phi_0 = 2\pi f t$ ; б – графік інформативних стрибків фазової характеристики ФМ-сигналів УЗТ; в – послідовність імпульсів дискретизації часових інтервалів. З рис.2.а видно, що  $\Phi = \Phi_k - \Phi_{\Pi}$ .

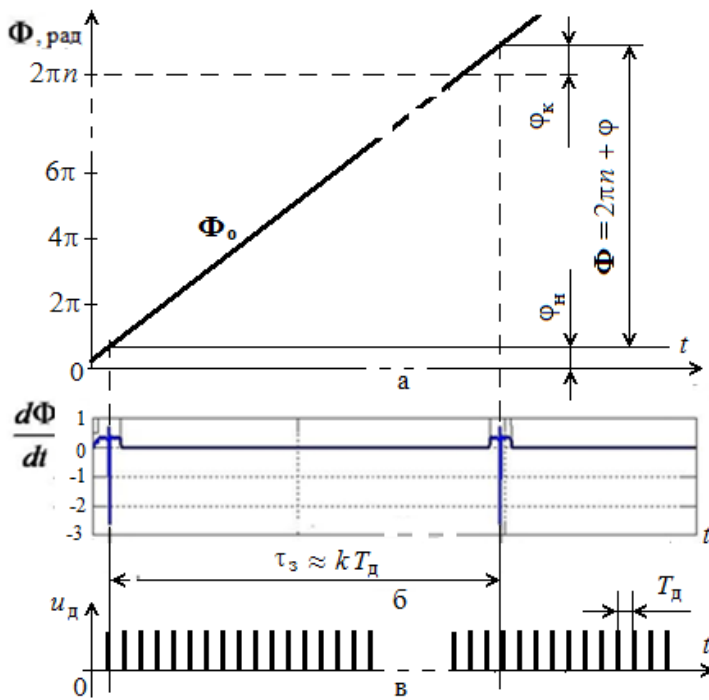


Рис. 2. Графічна ілюстрація двошкального методу лунаїмпульсної УЗТ з використанням фазоманіпульованого сигналу-носія

Методика визначення  $\tau_3$  за двошкальним методом реалізується на основі розглянутої вище методики шляхом додавання наступних операцій:

- за «точною» шкалою здійснюється вимірювання  $\Phi$  з дискретом значно меншим за  $2\pi f T_d$  як різниці фазових зсувів сигналу-носія на початку і в кінці інтервалу  $\tau_3$ ;
- за визначеним згідно (3) значенням  $\tau_3$  (результатом вимірювання за «грубою» шкалою) та значенням  $\Phi$  обчислюється оцінка числа цілих фазових циклів

$$\hat{n} = \left[ f\tau_3 - \frac{\varphi}{2\pi} + 0,5 \right]^+; \quad (5)$$

- обчислення оцінки затримки сигналу УЗТ  $\hat{\tau}_3$  (4)

– визначається, з урахуванням відомої швидкості  $c_l$  ультразвуку, товщина ОК

$$h = \frac{c_l}{2f} \left( \hat{n} + \frac{\varphi}{2\pi} \right) = \frac{c_l}{2f} \left( \left[ f\tau_3 - \frac{\varphi}{2\pi} + 0,5 \right]^+ + \frac{\varphi}{2\pi} \right). \quad (6)$$

Отримано умову відсутності грубих помилок (під грубими помилками вимірювання розуміється невірне визначення числа  $n$ )

$$\left[ f\Delta\tau - \frac{\Delta\varphi}{\pi} + 0,5 \right]^+ = 0, \quad (7)$$

де  $\Delta\tau$  – похибка визначення  $\tau_3$  (зазвичай  $|\Delta\tau| \leq T_d$ ),  $\Delta\varphi$  – похибка визначення фазових зсувів сигналів в кінці і на початку вимірюваного інтервалу часу.

Узгодження результатів отриманих на грубій і точній шкалі здійснюється на тій основі, що молодші розряди числа  $n$  співпадають за вагою зі старшими розрядами числа  $\varphi/2\pi$ , що ілюструє рис. 3.

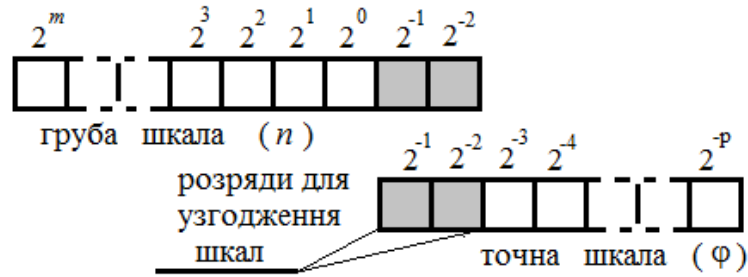


Рис. 3. Графічна ілюстрація процесу узгодження результатів, отриманих на грубій і точній шкалі

З метою підвищення точності вимірювання  $\hat{\tau}_3$  запропоновано визначати  $\varphi$  за усередненими значеннями  $\bar{\varphi}_k$ ,  $\bar{\varphi}_n$ , тобто як  $\varphi = \bar{\varphi}_k - \bar{\varphi}_n$ . Така можливість обумовлена тим, що за час існування радіоімпульсу  $\tau_i$  можна отримати вибірку значень фазової характеристики сигналу обсягу  $g = \left[ \tau_i / T_d \right]^+ \gg 1$ . Це дає змогу сформулювати вибірки

$$\varphi_{n(k)} = (\varphi_j = \Phi[j] - \Phi_0[j], j = j_{n(k)}, j_{n(k)} + g), \quad (8)$$

елементами якої є поточні різниці фазових характеристик сигналу-носія  $\tilde{\Phi}$  та  $\Phi_0$  в околі області фазової маніпуляції на початку (в кінці) часового інтервалу  $\tau_3$  (рис. 4).

Значення  $\bar{\varphi}_k$ ,  $\bar{\varphi}_n$  обчислюються як вибіркові середні фазові зсуви сигналів за відомою формулою

$$\bar{\varphi}_{n(k)} = \arctg \frac{S}{C} + \frac{\pi}{2} \{ 2 - (\text{sign} S)(1 + \text{sign} C) \}. \quad (9)$$

де  $S$ ,  $C$  – відповідно синус і косинус моменти, визначені за вибіркою  $\varphi_{n(k)}$  (8)

$$C = \frac{1}{g} \sum_{j=1}^g \cos \varphi_j, \quad S = \frac{1}{g} \sum_{j=1}^g \sin \varphi_j. \quad (10)$$

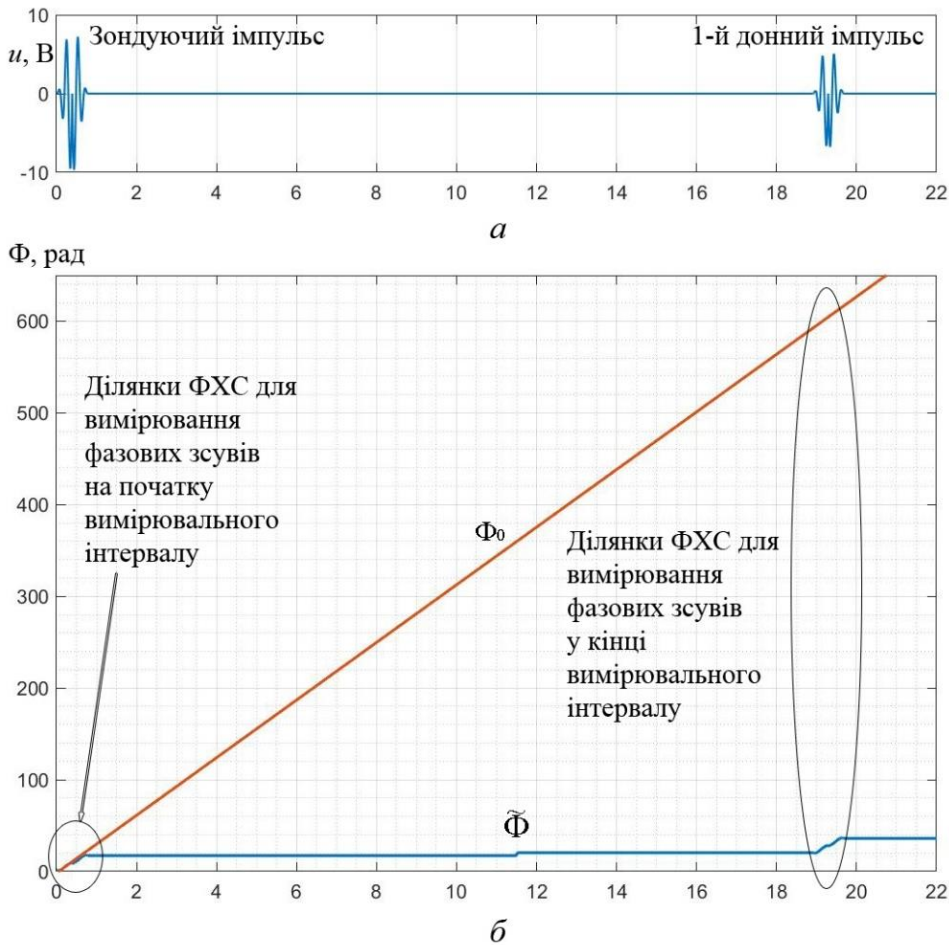


Рис. 4. Графіки сигналу  $u(t)$  (а) та ФХС сигналу-носія  $\tilde{\Phi}$  та  $\Phi_0$  (б)  
з позначеними ділянками для вимірювання фазових зсувів сигналів

Використання цього методу дозволило підвищити точність вимірювання часових інтервалів до точності вимірювання фазових зсувів сигналу-носія без збільшення частоти дискретизації

Структурно-логічну схему двошкального методу лунаїмпульсної УЗТ з використанням фазоманіпульованих сигналів-носіїв показано на рис. 5.

Виконане моделювання підтвердило працездатність запропонованого методу. Назагал у серії зі 100 експериментів з використанням

двошкального методу було досягнуто зменшення абсолютної похибки формування часового інтервалу до величини  $\pm 0,2T_d$ , що підтвердило ефективність запропонованого двошкального методу лунаїмпульсної УЗТ з використанням фазоманіпульованих сигналів-носіїв.

Проведені комп'ютерні вимірювальні експерименти засвідчили, що запропоновані методи можна рекомендувати для УЗТ за відношення  $c/\lambda > 10$ . У випадку зменшення цього відношення спостерігаються значні помилки у виявленні стрибків значень ФХС, визначенні їх часового положення і як наслідок – збільшення ймовірності появи грубих помилок вимірювання часових інтервалів.

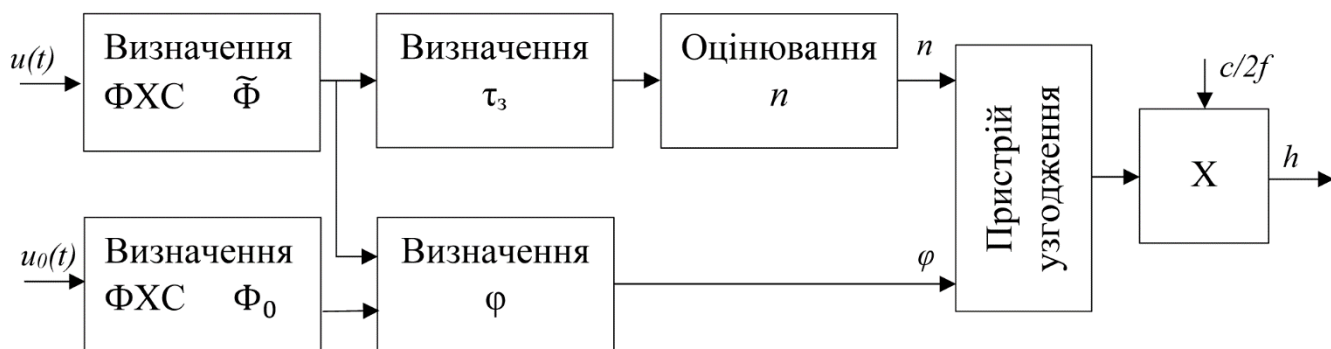


Рис. 5. Структурно-логічна схема двошкального методу лунаїмпульсної УЗТ з використанням фазоманіпульованого сигналу-носія

У третьому розділі розглянуто удосконалення методу УЗТ, що ґрунтується на використанні сигналу-носія з фазовою маніпуляцією шляхом його доповнення статистичним опрацюванням фазових характеристик сигналів УЗТ. Це дає змогу оцінювати часовий інтервал за положенням в часі  $r$ -статистики. За визначенням статистика  $r$  є модулем (довжиною) усередненого результуючого вектора  $\bar{\mathbf{r}}$ , утвореного векторним підсумовуванням вибірки кутів певного обсягу на колі одиничного радіусу. Згідно з базовим методом поточні значення статистики  $r[j]$  визначаються під час ковзного віконного (з апертурою  $2M_r + 1$ ) опрацювання вибірки різниць ФХС  $\{\phi[j], j = \overline{1, J}\}$ . Кожне  $j$ -те значення статистики  $r[j, M_r]$  отримують за вибіркою  $\theta[k, M_r], k \in \overline{j - M_r, j + M_r}$  обсягу  $2M_r + 1$ . На ділянках сигналу УЗТ, які містять донні імпульси, розкид значень  $\phi[j]$  є значно меншим, а на ділянках з шумом значення  $\phi[j]$  розосереджені по всьому інтервалу  $[0, 2\pi)$ .

Більші значення  $r[j, M_r]$  вказують на меншу дисперсію фазових даних, що відібрані вікном аналізу з апертурою  $M_r$  і відповідають випадку наявності сигналів, а менші значення  $r[j, M_r]$  – випадку відсутності сигналу. Це дає змогу виявляти за значеннями  $r[j, M_r]$  лунаісигнали УЗТ і визначати їх положення в часі. Такий спосіб виділення і вимірюваного часового інтервалу має підвищену завадостійкість.

Згідно удосконаленого методу  $\tau_z$  знаходять за зваженою  $r$ -статистикою

$$r_{zb}[j] = r[j] \hat{\sigma}_r[j]. \quad (11)$$

де  $\hat{\sigma}_r[j, M_\sigma] = \sqrt{\frac{1}{2M_\sigma} \sum_{k=j-(M_\sigma-1)/2}^{j+(M_\sigma-1)/2} \binom{0}{r[k]}^2}$  – відгук оператора середньоквадратичного

відхилення на вибірку значень  $r$ -статистики обсягом  $2M_\sigma + 1$ ;

Методика реалізації удосконаленого методу передбачає наступні дії:

- до дискретної реалізації  $u[j]$  сигналу  $u(t)$  застосовують дискретне перетворення Гільберта ( $\mathbf{H}_d$ ) і визначають її гільберт-образ  $\hat{s}_{ук}[j] = \mathbf{H}_d(s'_{ук}[j])$ ;

- знаходять розгорнуту дискретну ФХС  $\tilde{\Phi}[j]$  за формулою (2);
- знаходять різницю дискретної функції  $\tilde{\Phi}[j]$  та дискретної фазової характеристики гармонічного коливання виду  $s_0[j] = \sin(2\pi f j T_d + \varphi_0)$  з частотою  $f$  сигналу-носія

$$\phi[j] = \Phi[j] - 2\pi f T_d j - \varphi_0, \quad j = \overline{1, J} \quad (12)$$

де  $\varphi_0 \in [0, 2\pi)$  – випадкова початкова фаза гармонічного коливання, розподілена рівномірно в інтервалі  $[0, 2\pi)$ ;

- обчислюють поточні значення  $r$ -статистики в ковзному режимі під час руху прямокутного вікна з апертурою  $(2M_r + 1)$  відносно вибірки  $\phi[j]$ .

$$r[j, M_r] = \frac{1}{2M_r + 1} \sqrt{\left( \sum_{k=j-M_r}^{j+M_r} \cos \phi[k] \right)^2 + \left( \sum_{k=j-M_r}^{j+M_r} \sin \phi[k] \right)^2}. \quad (13)$$

- знаходять часові положення донних імпульсів, як «центри мас»  $q$  ділянок статистики  $r$ , що відповідають лунасигналам та сигналу збудження

$$q = \sum_{j=k}^m j \cdot r[j] / \sum_{j=k}^m r[j], \quad (14)$$

де  $k$  та  $m$  – значення змінної  $j$ , які вибираються з умови

$$k = j : \begin{cases} r[j+1] \leq P, \\ r[j-1] > P, \end{cases} \quad m = j : \begin{cases} r[j+1] > P, \\ r[j-1] \leq P, \end{cases} \quad (15)$$

а значення  $P$  вибирається з умови його гарантованого перевищення шумової складової  $r$ -статистики;

- формують відгук  $\hat{\sigma}_r[j, M_\sigma]$  оператора середньоквадратичного відхилення на вибірку значень  $r$ -статистики обсягом  $(2M_\sigma + 1)$ ;
- визначають зважену  $r$ -статистику за формулою (11);
- за виконання умови  $r[j, M_r] > P$  приймають рішення про наявність лунасигналів та визначають їх центри (14), за якими оцінюють  $\tau_3$  та  $h$ .

Структурно-логічна схема опрацювання сигналів за удосконаленим методом УЗТ з використанням зваженої  $r$ -статистики наведена на рис. 6.

Для моделювання процесу опрацювання сигналів УЗТ за цим методом використано типову модель у вигляді адитивної суміші зонduючого сигналу, послідовності лунасигналів та реалізації  $u_{\text{ш}}(t)$  гаусового шуму з нульовим математичним сподіванням та дисперсією  $\sigma_{\text{ш}}^2$  виду

$$u_{\text{д}}(t) = u_3(t) + \sum_{i=1}^I k_{\text{ЕАТ},i} u_3(t - \tau_1 - (i-1)\tau_3) + u_{\text{ш}}(t), \quad i = \overline{1, I}, \quad t \in [0, T_c], \quad (16)$$

де  $k_{\text{ЕАТ},i}$  – коефіцієнти електроакустичного тракту для  $i$ -того лунасигналу.



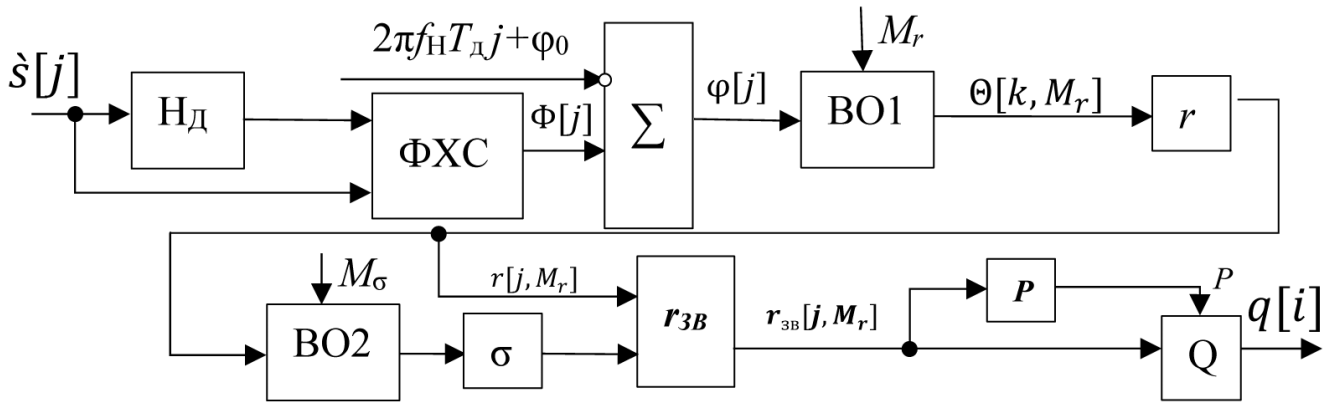


Рис. 6. Структурно-логічна схема опрацювання сигналів УЗТ на основі зваженого оцінювання  $r$ -статистики

Для елементів схеми на рис. 6 використано позначення:  $H_d$  – модуль дискретного перетворення Гільберта,  $\Phi X C$  – модуль визначення ФХС,  $\Sigma$  – модуль визначення різниці ФХС  $\phi[j]$ ,  $BO1$ ,  $BO2$  – модулі віконного опрацювання вибірок даних,  $r$  – модуль визначення поточних значень статистики  $r$ ,  $\sigma$  – модуль визначення поточних значень вибіркового середньоквадратичного відхилення  $r$ -статистики,  $r_{3B}$  – модуль визначення зваженої  $r$ -статистики,  $P$  – модуль визначення  $P$ ,  $Q$  – модуль прийняття рішення про наявність донного сигналу та визначення його центру  $q[i]$ .

Відношення  $(c/\sigma)_{вх}$  для  $i$ -го лунасигналу (тобто на вході фазового виявляча сигналів) визначається величиною  $U_{\max,i}/\sigma_{ш}$ , де  $U_{\max,i}$  – максимальне значення обвідної  $i$ -того лунасигналу. Відношення  $(c/\sigma)_{вих}$  (на виході фазового виявляча) визначалось за центрованою  $r$ -статистикою як відношення її максимального значення для кожного  $i$ -го донного сигналу до середньо квадратичного відхилення цієї статистики  $\sigma_r$  на ділянках поза донних імпульсів

$$\left( \frac{c}{\sigma} \right)_{вих} = \frac{r_{\max,i} - \bar{r}}{\sigma_r}, \quad (17)$$

де  $\bar{r}$  – значення  $r$ -статистики для шумової складової сигналу.

На рис. 7 наведено графіки послідовності  $r[j]$  та зваженої послідовності  $r_{3B}[j]$ . В обчисленнях використані вікна з апертурою  $M_r = 300$ ,  $M_\sigma = 100$ .

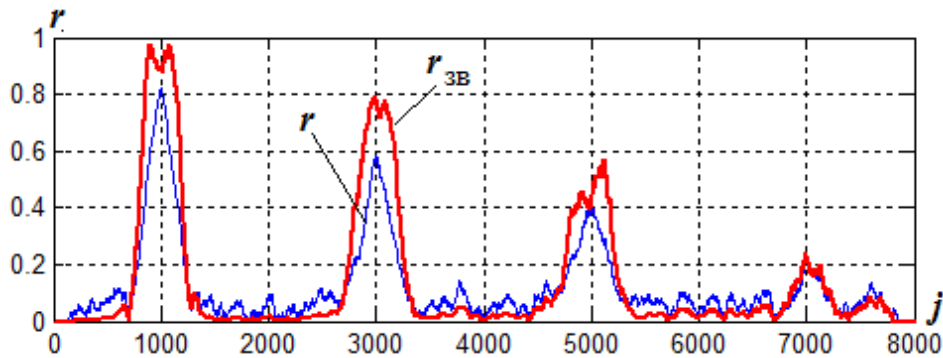


Рис. 7. Графік послідовностей  $r[j]$  та  $r_{3B}[j]$

За викладеною вище методикою були проведені модельні експерименти за пониженого значення  $(с/ш)_{вх}$  і різних апертур вікон  $M_r$  та  $M_\sigma$ . Результати оцінювання відношення  $(с/ш)_{вх}$  за (17) для базового і удосконаленого методів УЗТ та їх ефективності зведено у таблицю 1. З наведених в табл.1 даних видно, що додаткове вагове опрацювання  $r$ -статистики дає змогу підвищити відношення  $с/ш$  на виході фазового виявляча сигналів УЗТ, що сприяє підвищенню вірогідності їх виявлення в завданнях контролю товщини виробів з матеріалів зі значним загасанням ультразвукових коливань.

Табл.1. Відношення  $(с/ш)_{вх}$  за  $M_\sigma = 100$  та різних значень  $M_r$  та  $(с/ш)_{вх}$

Апертура вікна $M_r$	Відношення $(с/ш)_{вх}$	Базовий метод УЗТ		Удосконалений метод УЗТ		Відносне покращення ефективності, $\frac{E'-E}{E}100, \%$
		$(с/ш)_{вх}$	$E$	$(с/ш)_{вх}$	$E'$	
100	0,5	1,94	3,88	2,8	5,6	44
	0,33	1,5	4,55	1,8	5,45	20
	0,25	1,25	5	1,3	5,2	4
200	0,5	2,37	4,72	4,5	9	90
	0,33	1,8	5,45	2,45	7,4	36
	0,25	1,42	7,1	1,57	6,28	11
300	0,5	2,46	4,92	6,75	13,5	170
	0,33	1,75	5,3	3,5	10,6	100
	0,25	1,46	5,84	2,3	9,2	58

Підвищення відношення  $(с/ш)_{вх}$  дає змогу покращити точність вимірювання товщини виробів ультразвуковим лунаїмпульсним методом за рахунок виявлення більшої кількості донних сигналів і можливості статистичного усереднення більших обсягів експериментальних даних. За умови багаторазового відбиття сигналів від поверхонь ОК визначають час між першим і  $n$ -тим лунаїмпульсами  $\tau_{1,n} = (n-1)\tau_i$  і знаходять товщину як

$$h = \frac{\tau_{1,n} C_l}{2(n-1)} \quad (18)$$

де  $C_l$  – швидкість поширення ультразвуку у матеріалі ОК.

Така організація процесу вимірювання часових інтервалів дає змогу зменшити середньоквадратичне значення похибки квантування часового інтервалу  $\tau = \tau_{1,n} / (n-1)$  в  $\sqrt{n-1}$  разів.

Доведено, що удосконалений метод УЗТ забезпечує підвищену завадостійкість порівняно з розглянутим в розділі 2 методом, проте має нижчу точність за високого відношення  $(с/ш)_{вх}$ . Тому під час проведення експериментів, за умови зміни коефіцієнтів акустичного тракту для різних матеріалів у широкому діапазоні значень, доцільно використовувати комбінацію цих методів. За значення  $с/ш > 10$  доцільно використовувати метод УЗК з фазоманіпульованим сигналом-носієм, а у



випадку  $c/\pi < 10$  – метод УЗТ, що ґрунтується на виявленні лунасигналів за зваженою  $r$ -статистикою.

Результатами моделювання підтверджено, що додаткове вагове опрацювання  $r$ -статистики дозволяє підвищити відношення  $(c/\pi)_{\text{вих}}$  на 25...100% на виході фазового виявляча в залежності від відношення  $(c/\pi)_{\text{вх}} = 0,25 \dots 0,5$  та значень  $M_\sigma = 100$  і  $M_r$ .

У четвертому розділі розглянуто результати експериментальних досліджень розроблених методів УЗТ, які виконувались з метою: підтвердження можливості передавання стрибка фазової характеристики зонduючого сигналу в акустичному тракті УЗТ з використанням п'єзoeлектричних перетворювачів з різною добротністю та перевірки працездатності розробленого та удосконалених методів УЗТ.

Структурна схема засобу для практичної реалізації розроблених методів лунаїмпульсної УЗТ, наведена на рис. 8.

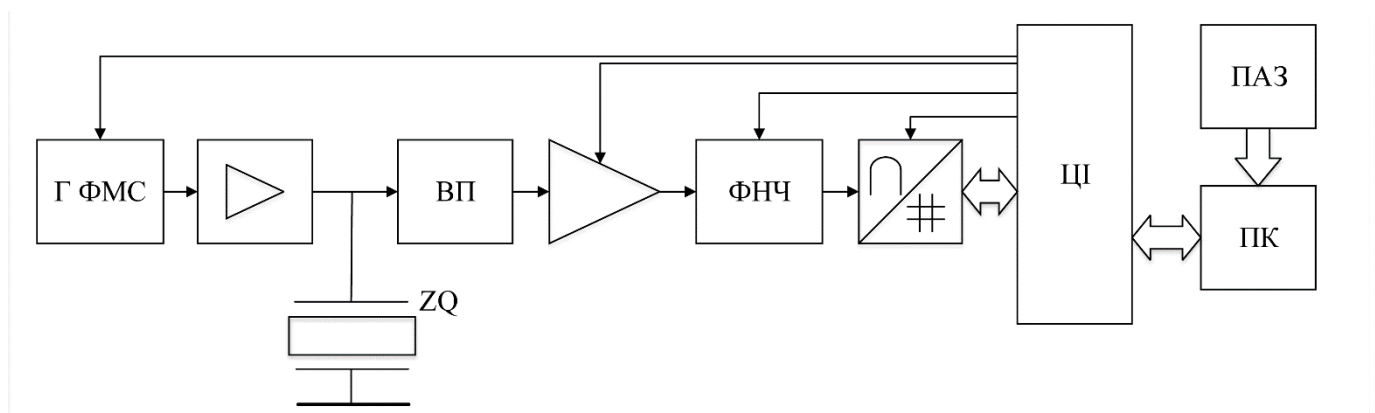


Рис. 8. Структурна схем розробленого засобу УЗТ: ГФМС – генератор фазоманіпульованих сигналів, ВП – вхідний пристрій, ФНЧ – фільтр нижніх частот, ЦІ – цифровий інтерфейс, ПК – персональний комп'ютер, ПАЗ – програмно-алгоритмічне забезпечення.

Апаратна частина засобу дає змогу отримати і передати в ПК первинну вимірювальну інформацію у вигляді послідовності миттєвих значень лунасигналів. Основна відмінність засобу полягає у вторинному опрацюванні вимірювальної інформації, що реалізує розроблені методи лунаїмпульсної УЗТ, визначає архітектуру програмних засобів та інформаційних потоків (рис.9).

Структура програмного забезпечення включає модулі керування, інформаційні модулі та програмне забезпечення процесу опрацювання експериментальних даних. Крім оригінальних модулів вона включає і ряд таких, що реалізують функції загального управління процесом вимірювання, формування архіва даних і т. і.

Запропонована структура програмного та математичного забезпечення засобу реалізує методологію опрацювання сигналів УЗТ, основою якої є використання дискретного перетворення Гільберта у поєднанні з детермінованими та статистичними методами опрацювання амплітудної та фазової характеристик інформаційних сигналів. В цілому, воно є важливим інформаційним ресурсом розвитку засобів УЗТ, за рахунок удосконалення і доповнення якого можуть підвищуватись їх метрологічні характеристики.

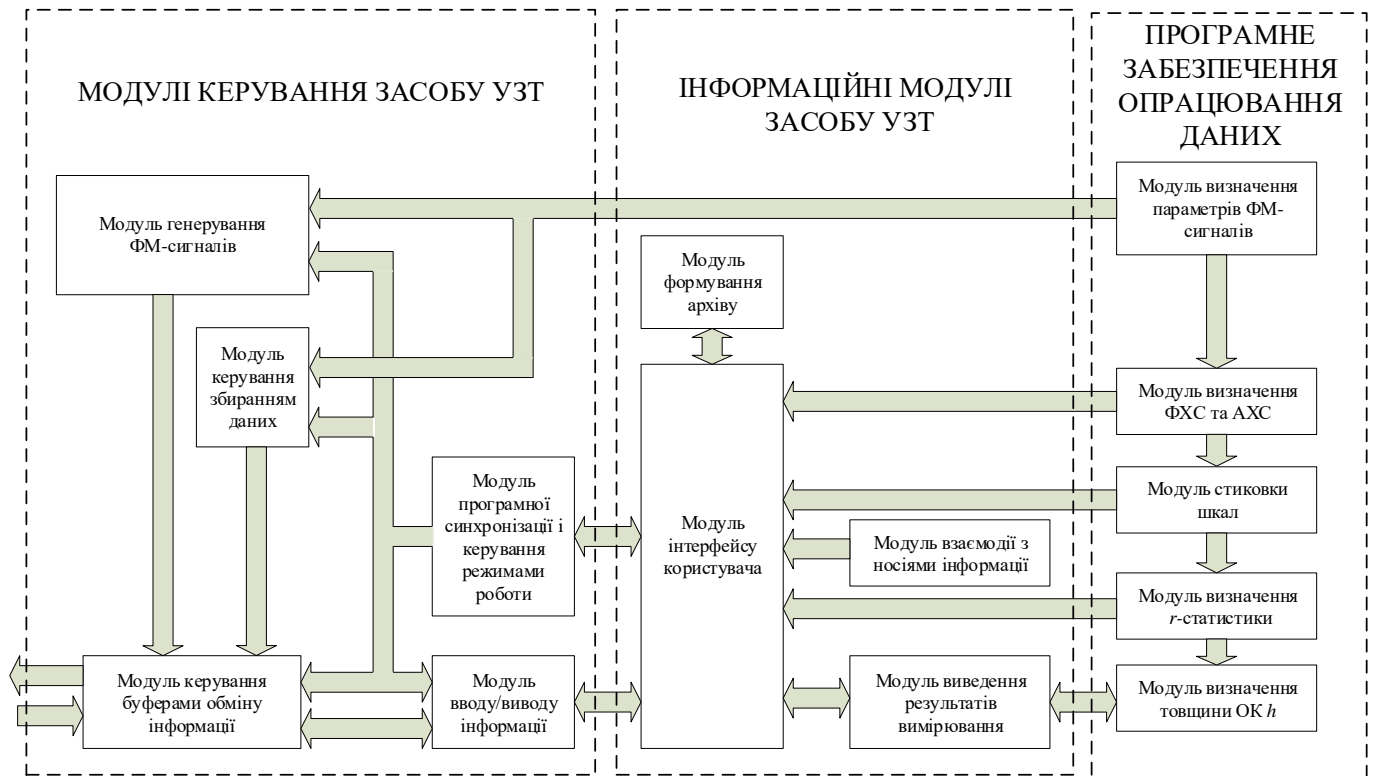


Рис. 9. Структура програмного забезпечення та інформаційних потоків засобу лунаїмпульсної УЗТ

Експериментальні дослідження було проведено на установці, структура якої та загальний вигляд наведені на рис. 10.

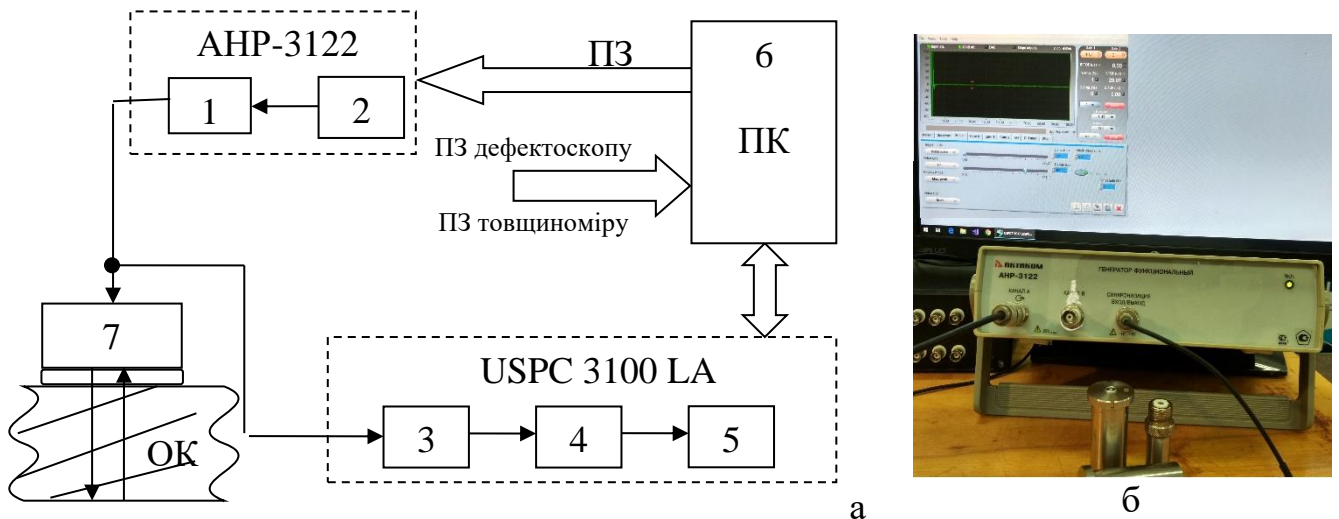


Рис. 10. Структура (а) та загальний вид установки (б): 1 – генератор зондуючих імпульсів (ГЗІ); 2 – формувач ФМ-сигналів форми; 3 – вхідний пристрій; 4 – підсилювач; 5 – АЦП; 6 – ПК; 7 – ПЕП суміщеного типу.

Експериментальні дослідження проводились за таких загальних умов: для вимірювання товщини використовуються поздовжні хвилі; частота сигналу-носія

становить 5,0 МГц; тривалість зонduючого радіоімпульсу – 4 періоди сигналу-носія; затримка ультразвукового сигналу в ОК набагато більша за тривалість зонduючого імпульсу; матеріал ОК не має дисперсії швидкості ультразвуку.

Використовувались два типи перетворювачів суміщеного типу:

1. Panametrics C309 з композитної п'єзокераміки (широкосмуговий ПЕП), робоча (центральна) частота 5,0 МГц, діаметр п'єзопластини 12,5 мм.
2. П211-5-П20, на базі звичайної п'єзокераміки (вузькосмуговий ПЕП) робоча частота 5,0 МГц, діаметр п'єзопластини 20,0 мм.

Було проведено дослідження амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) вказаних перетворювачів за допомогою цифрового осцилографа типу Tektronix TDS 2002C. Встановлено, що смуга пропускання за рівнем -6дБ для перетворювача Panametrics C309 складає  $\Delta f \sim 4$  МГц (від 3,19 МГц до 7,28 МГц), а добротність –  $Q = f / \Delta f = 1,25$ . Для перетворювача П211-5-П20 отримано такі дані:  $\Delta f \sim 1,7$  МГц (від 4,2 МГц до 5,9 МГц), добротність перетворювача  $Q = 2,9$ .

В якості приладу отримання та попереднього опрацювання сигналів УЗТ використовувався одноплатний (у вигляді PCI – плати для ПК) одноканальний дефектоскоп типу USPC 3100 LA (виробник – компанія «Socomate», Франція). Дефектоскоп виконував функції попереднього підсилення, фільтрації, аналого-цифрового перетворення сигналу УЗТ та їх передавання в ПК.

Зонduючий сигнал формувався у блоці 2 як фазоманіпульований радіоімпульсний сигнал з наступними характеристиками: амплітуда сигналу  $U = 5$  В ; частота сигналу-носія  $f = 5,0$  МГц; момент маніпуляції фази  $\tau_1 = 0,4$  мкс; тривалість та період повторення радіоімпульсу відповідно  $\tau_i = 0,8$  мкс та  $T_n = 1$  кГц.

ПЕП встановлювався на ОК, в якості якого використовувався стандартний зразок СО-3Р (виготовлений згідно ГОСТ 1857685). Затримка поширення ультразвукового сигналу в СО-3Р становить  $\tau_{OK} = 19,94$  мкс.

Експериментально підтверджено, що зі збільшенням добротності ПЕП тривалість лунаімпульсів збільшується за рахунок перехідних процесів, проте це не перешкоджає виявленню стрибків значень ФХС лунаісигналів і їх використанню для оцінювання часу затримки  $\tau_z$  з високою точністю.

Було проведено визначення часу затримки поширення вимірюваного сигналу в ОК між першим і другим, другим і третім, та третім і четвертим донними сигналами за зменшення їх амплітуди до 4 разів. Розкид значень вимірюваних часових затримок між цими сигналами не перевищував  $\pm 0,02$  мкс, що відповідало двом періодам дискретизації АЦП (100 МГц).

Було проведено експериментальні дослідження ефективності використання статистичного опрацювання ФХС для розв'язання задачі виявлення лунаісигналів УЗТ на фоні значних шумів. Підтверджено, що за зменшеного відношення с/ш запропонований метод оброблення сигналів УЗТ на основі статистичного опрацювання їх фазових характеристик є більш ефективним, оскільки забезпечує можливість виявлення більшої кількості лунаімпульсів, тобто можливість їх виявлення за меншого відношення с/ш (рис. 11).

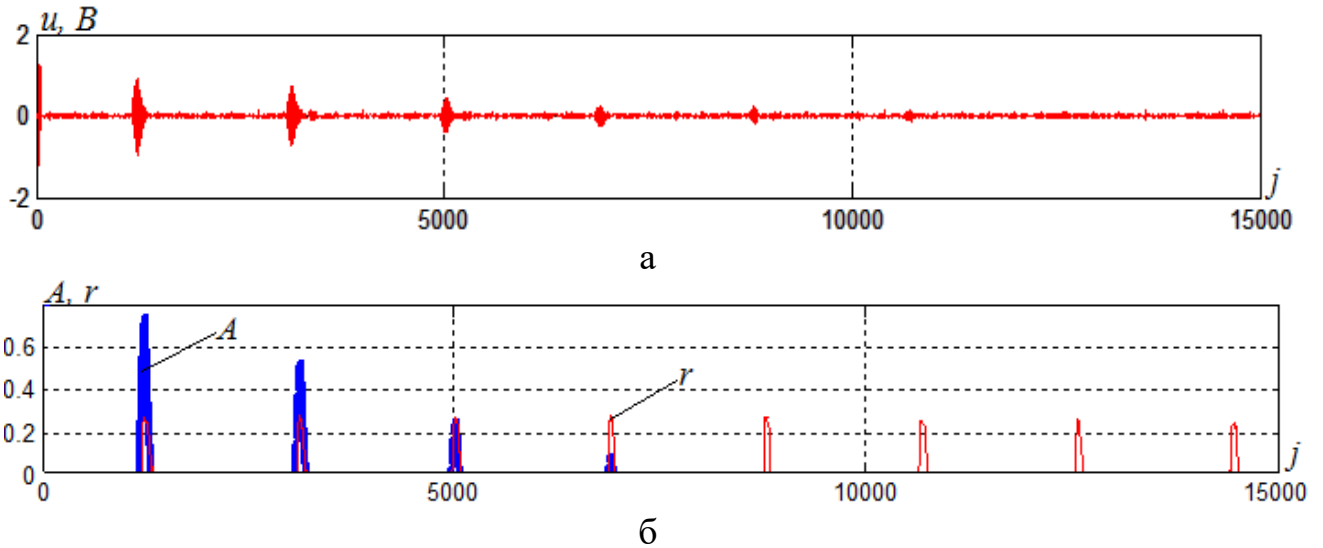


Рис. 11. Експериментальні дані: а) графік сигналу  $u_d[j]$ ; б) фрагмент графіків обвідної  $A[j]$  (крива  $A$ ) та зваженої  $r$ -статистики

У проведеному експерименті за зваженою  $r$ -статистикою впевнено виявляються вісім лунаїмпульсів ( $d=8$ ). Для восьмого імпульсу відношення с/ш становить  $U_{\max,i} / \sigma_{ш} \approx 1,8$ , де  $\sigma_{ш}$  - середньо квадратичне відхилення  $r$ -статистики на ділянках, що не містять донних імпульсів,  $U_{\max,i}$  – максимальне значення обвідної  $i$ -того донного імпульсу.

Виконано аналіз стандартної невизначеності результату вимірювання для розроблених методів лунаїмпульсної УЗТ за наступною загальною методикою: розроблення та обґрунтування діаграми впливаючих факторів (діаграми Ішикави); формування бюджету невизначеності згідно з діаграмою Ішикави; отримання загального виразу для оцінювання комбінованої стандартної невизначеності.

В загальному випадку стандартна невизначеність результату вимірювання товщини виробу, за умови некорельованості її складових, визначається за формулою

$$u_h = \sqrt{\left(\frac{c}{2}u_\tau\right)^2 + \left(\frac{\tau}{2}u_c\right)^2 + u_\xi^2}, \quad (19)$$

де  $u_\tau, u_c, u_\xi$  – стандартні невизначеності відповідно оцінки часового інтервалу, швидкості хвилі в матеріалі та додаткових випадкових чинників, що пов'язані з умовами проведення експерименту.

Інтервальній оцінці невизначеності відповідає розширена невизначеність [113], яку отримують за відомою формулою.

Для експериментального підтвердження розробленої методики було проведено дослідження з вимірювання товщини сталюї пластини  $h=10$  мм зі швидкістю поширення ультразвукової хвилі  $c \cong 5920$  м/с на частоті  $f = 5,0$  МГц. Оцінена за результатами експерименту комбінована невизначеність результату вимірювання товщини виробу склала  $u_h = 0,024$  мм,  $v_{eff} = 9$ ,  $t_{0,95}(9) = 2,26$ , а розширена невизначеність –  $U_h = 0,05$  мм.

Проведене оцінювання точності вимірювання товщини виробів довело, що запропонований метод дає змогу прецизійного вимірювання товщини виробів з

різних металевих і неметалевих матеріалів в широкому діапазоні зміни загасання ультразвуку в цих матеріалах.

У додатках прикладено акти впровадження результатів дисертаційної роботи та розроблені в середовищі MATLAB програми для моделювання процесів опрацювання сигналів за розробленими методами УЗТ.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі в результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішено актуальну науково-технічну задачу підвищення точності засобів лунаїмпульсної УЗТ за рахунок використання фазоманіпульованих сигналів та методів детермінованого та статистичного опрацювання їх фазових характеристик в широкому діапазоні змін акустичних властивостей матеріалів.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному.

1. Виконані модельні та експериментальні дослідження довели можливість поширення фазоманіпульованих сигналів в електроакустичному тракті ультразвукового лунаїмпульсного товщиноміра і дали змогу обґрунтувати необхідну смугу частот п'єзоелектричних перетворювачів для передавання таких сигналів без втрат інформації про стрибки значень їх фазової характеристики.

2. Розроблено та досліджено теоретично і експериментально амплітудно-фазовий метод лунаїмпульсної ультразвукової товщинометрії, який ґрунтується на використанні зондуючого сигналу з фазовою маніпуляцією сигналу-носія, селекції моментів фазової маніпуляції сигналів за їх амплітудною характеристикою та вимірюванні часових інтервалів за стрибками значень фазової характеристики сигналів, що дало змогу зменшити похибку вимірювання часових інтервалів до періоду сигналу-носія у широкому динамічному діапазоні амплітуд відбитих сигналів.

3. Запропоновано удосконалення амплітудно-фазового методу лунаїмпульсної ультразвукової товщинометрії з використанням ФМ-сигналів за рахунок уточнення отриманої часової затримки лунаісигналів шляхом вимірювання і врахування фазових зсувів сигналу-носія. Такий двошкальний метод вимірювання дає змогу зменшити абсолютну похибку формування і вимірювання часового інтервалу до величини  $\pm 0,2$  періоду дискретизації сигналу і не потребує розширення робочої смуги частот товщиноміра.

4. Досліджено та удосконалено метод лунаїмпульсної УЗТ, який ґрунтується на визначенні часових інтервалів між донними імпульсами за положенням в часі близьких до одиниці значень  $r$ -статистики, яка визначається за фазовою характеристикою сигналу-носія. Удосконалення методу ґрунтується на аналізі поточних значень зваженої  $r$ -статистики. Запропоновано визначати вагову функцію як отриманий в ковзному режимі відгук оператора середньоквадратичного відхилення на  $r$ -статистику. Результатами моделювання доведено, що додаткове вагове опрацювання  $r$ -статистики дозволяє підвищити відношення с/ш на виході фазового виявляча сигналів не менше ніж на 40% за відношення с/ш на вході виявляча не менше 0,5, що за рахунок виявлення більшої кількості лунаісигналів дає змогу

підвищити точність вимірювання часу поширення сигналів у виробі.

5. Розроблено методики визначення товщини виробів з конструкційно міцних матеріалів для запропонованого і удосконаленого методів лунаїмпульсної УЗТ, що дало змогу створити програмне забезпечення для опрацювання фазоманіпульзованих лунасигналів УЗТ та їх фазових характеристики, і забезпечило прецизійне вимірювання часу поширення сигналів у виробі в широкому діапазоні змін пружних характеристик матеріалу.

6. Розроблено дослідний зразок засобу лунаїмпульсної УЗТ, який реалізує розроблені методи і за рахунок використання тестових фазоманіпульзованих сигналів та фазових методів опрацювання вимірювальної інформації забезпечує зменшення похибки вимірювання товщини виробів з конструкційно міцних матеріалів в цілому на 35-40% у випадку опрацювання сигналів з низьким рівнем шуму ( $c/\text{ш} \gg 10$ ) і на 15-20% у випадку зашумлених відбитих сигналів ( $c/\text{ш} = 1 \div 10$ ). Розроблено програмно-алгоритмічне забезпечення системи, яке реалізує запропоновані методи лунаїмпульсної УЗТ і може бути використане автономно з метою проведення відповідних комп'ютерних вимірювальних експериментів.

7. Основні результати теоретичних та експериментальних досліджень впроваджені у виробничий процес ДП «Луцький ремонтний завод «Мотор» (м. Луцьк), а також використані у навчальному процесі кафедри приладів та систем неруйнівного контролю КПП ім. Ігоря Сікорського під час викладання дисциплін «Комп'ютерно-інтегровані системи технічної та медичної діагностики».

## СПИСОК ОСНОВНИХ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Олійник Ю.А. Фазовий спосіб ультразвукової товщинометрії / Ю.А. Олійник, О.Д. Близнюк, Ю.В. Куц, В.Ю. Куц, // «Научни известия на НТСМ». – Сопот, Болгария, 2013. – № 2(139). – С.57-61 (іноземне видання). (Входить до The Web's Largest Open Access Database of NTD, Google Scholar). *Здобувачем сформульована постановка задачі, розроблена методика проведення досліджень та опрацювання експериментальних даних.*

2. Derhunov O. Improvement of ultrasonic testing method for materials with significant attenuation / O. Derhunov, Y. Kuts, O. Monchenko, Y. Oliinyk, S. Shengur // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, ISSN 1729-3774. – 1/9(91) 2018. – P.54-610. (Входить до SCOPUS). *Здобувачем виконано аналіз літературних джерел, базового та удосконаленого (з ваговою обробкою r-статистики) методів виявлення сигналів УЗТ.*

3. Олійник Ю.А. Фазовий спосіб ультразвукової товщинометрії / Ю.А. Олійник, Ю.В. Куц, О.Д. Близнюк // Технічна діагностика та неруйнівний контроль. – Київ, 2013. – № 1. – С. 23-27. *Здобувачем запропоновано використання в ультразвуковій товщинометрії фазоманіпульзованих сигналів для прецизійного визначення часу затримки сигналів за їх фазовими характеристиками, а також виконані експериментальні дослідження запропонованого способу.*

4. Олійник Ю.А. Експериментальні дослідження фазового методу ультразвукового неруйнівного контролю / Ю.А. Олійник, І.М. Бистра, Ю.В. Куц //

Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2013. – № 1/9 (61). – С.49-52. *Здобувачем експериментально підтверджено ефективність статистичної обробки фазових характеристик сигналів ультразвукового контролю в задачах виявлення сигналів на фоні значного шуму.*

5. Олійник Ю.А. Використання ультразвукового двошкального способу для підвищення точності вимірювання товщини виробів / Ю.А. Олійник, О.Д. Близнюк, В.Ю. Куц, Ю.В. Куц, О.В. Монченко // Системи обробки інформації. – Харків, 2015. – №7(132). – С. 6-10. *Здобувачем виконано модельні та експериментальні дослідження двошкального способу ультразвукової лунаїмппульсної товщинометрії.*

6. Мокійчук В.М. Методика оцінювання невизначеності вимірювання пружних констант матеріалів / В.М. Мокійчук, О.В. Монченко, Ю.А. Олійник // Системи обробки інформації. – Харків, 2016. – №6(143). – С. 93-96. *Здобувачем виконано оцінювання невизначеності вимірювання затримки сигналу в електроакустичному тракті приладу ультразвукового контролю.*

7. Патент України на корисну модель №79972, МПК G01B17/02. Спосіб ультразвукового вимірювання товщини матеріалів та виробів / Ю.В. Куц, В.Л. Найда, Ю.А. Олійник, О.В. Монченко. – № u201212606; заявл. 05.11.2012; опубл. 13.05.2013, Бюл.№9.–4с. *Здобувачем теоретично обґрунтований спосіб ультразвукової товщинометрії з використанням фазомодульованих сигналів-носіїв.*

8. Патент України на корисну модель №100756, МПК G01B17/02. Ультразвуковий двошкальний спосіб вимірювання товщини виробів / Ю.В. Куц, Ю.А. Олійник, О.В. Монченко. – № u201501408; заявл. 19.02.2015; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 15. –3 с. *Здобувачем запропоноване використання додаткових фазових вимірювань сигналу-носія та узгодження результатів грубого і точного вимірювань затримки сигналу.*

9. Олійник Ю.А. Спосіб ультразвукового вимірювання товщини матеріалів та виробів / Ю.А. Олійник, Ю.В. Куц, В.К. Цапенко // II Міжнар. науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем». Збірник тез доповідей / ЧДТУ. – Чернігів, 2012. – С.101. *Здобувачем досліджені алгоритми опрацювання фазоманіпульованих сигналів ультразвукової товщинометрії.*

10. Олійник Ю.А. Фазовий спосіб ультразвукового вимірювання товщини матеріалів та виробів / Ю.А. Олійник // III Міжнар. науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем». Збірник тез доповідей / ЧДТУ. – Чернігів, 2013. – С.154-156. *Здобувачем проаналізований спосіб ультразвукової товщинометрії з використанням фазоманіпульованих сигналів.*

11. Фазовий спосіб ультразвукової товщинометрії / Ю.В. Куц, Ю.А. Олійник, В.К. Цапенко // XII Міжнар. науково-технічна конференція «Приладобудування 2013: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / КПІ, Приладобудівний факультет. – Київ, 2013. – С. 223-224. *Здобувачем запропонована структура експериментальної установки та методика експериментальних досліджень.*

12. Бистра І.М. Аналіз ефективності фазового методу виявлення сигналів ультразвукового контролю / І.М. Бистра, Ю.В. Куц, Ю.А. Олійник, В.К. Цапенко // XI Міжнар. науково-технічна конференції «Авіа-2013». Збірник тез доповідей / НАУ. – Київ, 2013. – Том I. – С. 1.9-1.12. *Здобувачем виконане оцінювання похибок першого і*

другого роду у задачі виявлення сигналів ультразвукової товщинометрії за *г-статистикою, обчисленою за фазовою характеристикою сигналу.*

13. Олійник Ю.А. Прецизійне вимірювання товщини фазовим способом ультразвукової товщинометрії / Ю.А. Олійник, Ю.В. Куц, В.В. Левківська, О.В.Монченко // VII Міжнар. науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси». Збірник тез доповідей / НАУ. – Київ, 2014. – С. 94. *Здобувачем проаналізовані можливості двошкального методу ультразвукової товщинометрії з використання фазоманіпульованих сигналів.*

14. Куц Ю.В. Практична реалізація фазового способу ультразвукової товщинометрії / Ю.В. Куц, О.Д. Близнюк, О.В.Монченко, Ю.А. Олійник // 7-а науково-технічна конференції «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю та технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання». Збірник тез доповідей / ІФНТУНГ. – Івано-Франківськ, 2014. – С. 49-53. *Здобувачем експериментально доведена можливість використання вузькосмугових п'єзоелектричних перетворювачів для передачі фазоманіпульованих сигналів в електроакустичному тракті ультразвукових товщиномірів.*

15. Куц Ю.В. Особливості поширення фазоманіпульованих сигналів в електроакустичних трактах ультразвукових товщиномірів / Ю.В. Куц, О.В. Монченко, Ю.А. Олійник, Р.М. Галаган // XIV Міжнар. науково-технічна конференція «Приладобудування 2015: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2015. – С. 174-175. *Здобувачем досліджена і експериментально підтверджена можливість передачі стрибків фазової характеристики сигналів після поширення в електроакустичному тракті ультразвукових товщиномірів.*

16. Олійник Ю.А. Дослідження амплітудно-частотних характеристик п'єзоперетворювачів для фазових ультразвукових приладів неруйнівного контролю / Ю.А. Олійник, Ю.В. Куц, О.В. Монченко // V Міжнар. науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем». Збірник тез доповідей / ЧДТУ. – Чернігів, 2015. – С.244. *Здобувачем експериментально отримані і проаналізовані амплітудно-частотні характеристики п'єзоперетворювачів для лунаїмпульсних ультразвукових товщиномірів з фазоманіпульованими сигналами-носіями.*

17. Олійник Ю.А. Використання фазоманіпульованих сигналів для підвищення точності вимірювання товщини виробів з композиційних матеріалів / Ю.А. Олійник, Б.В. Добржанська, О.В. Монченко // III Міжнар. наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах». Збірник тез доповідей / ВНТУ. – Вінниця, 2015. – С.32. *Здобувачем запропонована методика оброблення фазоманіпульованих сигналів в ультразвукових товщиномірах та виконувались експериментальні дослідження.*

18. Мокийчук В.М. Оценивание неопределенности измерения модуля Юнга / В.М. Мокийчук, О.В. Монченко, Ю.А. Олійник // XIII Междунар. научно-технический семинар «Неопределенность измерений: научные, законодательные, методические и прикладные аспекты». Сборник докладов / БелГИМ. – Минск, Беларусь, 2016. – С.93. *Здобувачем запропонована методика оцінювання*



*невизначеності вимірювання затримки сигналу в електроакустичному тракті приладів ультразвукового контролю*

19. Монченко О.В. Дослідження впливу апертури вікна для виявлення сигналів ультразвукової товщинометрії композиційних матеріалів / О.В. Монченко, Б.В. Добржанська, Ю.А. Олійник // VI Міжнар. науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем». Збірник тез доповідей / ЧНТУ. – Чернігів, 2016. – С. 346. *Здобувачем проаналізований вплив зміни апертури вікна на вірогідність виявлення сигналів ультразвукової товщинометрії.*

20. Монченко О.В. Розробка методів оброблення фазової характеристики сигналів ультразвукової товщинометрії з підвищеною достовірністю / О.В. Монченко, Б.В. Добржанська, Ю.А. Олійник, Р.О. Ткачик // X Міжнар. науково-технічна конференція «Метрологія та вимірювальна техніка». Збірник тез доповідей / Інститут Метрології. – Харків, 2016. – С.25. *Здобувачем надані рекомендації щодо методики оброблення фазової характеристики сигналів ультразвукової товщинометрії.*

21. Олійник Ю.А. Двошкальний фазовий метод ультразвукової лунаїмпульсної товщинометрії / Ю.А. Олійник, Ю.В. Куц, Ю.Ю. Лисенко, О.В. Монченко, О.Д. Близнюк // XV Міжнар. науково-технічна конференція «Приладобудування 2018: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / КПП ім. І. Сікорського, Приладобудівний факультет. – Київ, 2018. – С. 177-178. *Здобувачем проведені комп'ютерні обчислювальні експерименти та відпрацьовано програмну реалізацію процесу опрацювання експериментальних даних.*

## АНОТАЦІЯ

**Олійник Ю.А. Методи ультразвукової товщинометрії з використанням фазоманіпульованих сигналів та їх реалізація. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2019.

Дисертаційна робота присвячена розвитку і вдосконаленню ультразвукового лунаїмпульсного методу товщинометрії.

В дисертації розроблений та досліджений теоретично і експериментально амплітудно-фазовий метод лунаїмпульсної ультразвукової товщинометрії, який ґрунтується на використанні зонduючого ФМ-сигналу, селекції моментів фазової маніпуляції сигналів за їх амплітудною характеристикою та вимірюванні часових інтервалів за стрибками значень фазової характеристики сигналів.

Запропоновано удосконалення амплітудно-фазового методу лунаїмпульсної ультразвукової товщинометрії з використанням ФМ-сигналів за рахунок уточнення отриманої часової затримки лунаісигналів шляхом вимірювання і врахування фазових зсувів сигналу-носія.

Досліджено та удосконалено метод лунаїмпульсної УЗТ, який ґрунтується на визначенні часових інтервалів між донними імпульсами за положенням в часі  $r$ -статистики, яка визначається за фазовою характеристикою сигналу-носія.

Представлено результати моделювання, що підтвердило можливість використання зваженої  $r$ -статистики для підвищення відношення сигнал/шум на виході фазового виявляча сигналів.

Наведено конструкцію розробленого дослідного зразка засобу лунаїмпульсної УЗТ та програмно-алгоритмічне забезпечення системи, що реалізує запропоновані методи лунаїмпульсної УЗТ.

**Ключові слова:** ультразвуковий контроль, лунаїмпульсний метод товщинометрії, фазоманіпульований сигнал, фазова характеристика сигналу, статистична фазометрія.

## АННОТАЦИЯ

**Олейник Ю.А. Методы ультразвуковой толщинометрии с использованием фазоманипулированных сигналов и их реализация. - На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 - приборы и методы контроля и определения состава веществ. Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, Киев, 2019.

Диссертационная работа посвящена развитию и совершенствованию ультразвукового эхо-импульсного метода толщинометрии.

В диссертации разработан и исследован теоретически и экспериментально амплитудно-фазовый метод эхо-импульсной ультразвуковой толщинометрии, основанный на использовании зондирующего ФМ-сигнала, селекции моментов фазовой манипуляции сигналов с их амплитудной характеристикой и измерении временных интервалов по скачкам значений фазовой характеристики сигналов.

Предложено усовершенствование амплитудно-фазового метода эхо-импульсной ультразвуковой толщинометрии с использованием ФМ-сигналов за счет уточнения полученной временной задержки эхо-сигналов путем измерения и учета фазовых сдвигов несущего сигнала.

Исследован и усовершенствован метод эхо-импульсной УЗТ, основанный на определении временных интервалов между донными сигналами по положению во времени  $r$ -статистики, определяемой по фазовым характеристикам несущего сигнала.

Представлены результаты моделирования, которые подтвердили возможность использования взвешенной  $r$ -статистики для повышения отношения сигнал / шум на выходе фазового обнаружителя сигналов.

Приведена конструкция разработанного опытного образца средства эхо-импульсной УЗТ и программно-алгоритмическое обеспечение системы, реализующей предложенные методы эхо-импульсной УЗТ.

**Ключевые слова:** ультразвуковой контроль, эхо-импульсной метод толщинометрии, фазоманипулированный сигнал, фазовая характеристика сигнала, статистическая фазометрии.

## ABSTRACT

### **Oliynyk Y.A. Methods of ultrasonic thickness measurement using phase-manipulated signals and their implementation.- Manuscript.**

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences on the specialty 05.11.13 «Instruments and methods of testing and determination of composition of substances» - National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the solution of the scientific and technical problem of ultrasonic pulse-echo thickness measurement improvement due to the use of phase-manipulated test signals and their processing by methods of phase measurement.

It is established that in the electroacoustic tracts of thickness gauges, the pulse envelope of echo waves undergoes significant changes and distortions due to the considerable spread of physical and mechanical characteristics of materials of products and the effect of uncontrolled noise and disturbances.

It is indicated that the promising direction of ultrasonic pulse-echo thickness measurement is the use of test signals of a more complex structure, in particular signals with phase manipulation of the carrier signal. It makes it possible to increase the accuracy of the formation of time measuring intervals during of signal's propagation through testing products and to reduce the error of thickness measurement based on it methods.

The amplitude-phase method of ultrasonic thickness measurement is proposed and investigated. It is based on the use of modified by phase-manipulated initial signal and subsequent analysis of the phase characteristics of the testing and echo signals. The method involves the use of short-term (two to four periods of signal-carrier) phase-manipulation signals to reduce the error of allocation of the ultrasonic thickness measurement signals. The considered implementation of the method is based on the use of the discrete Hilbert transformation of ultrasonic signals.

The conducted model researches have proved the possibility of using jumps of the phase characteristic of the probe and the bottom signals after their propagation in the electroacoustic tract of the thickness gauge for precise measurement of the time of delay of the ultrasonic signal and allowed to develop a method of realization of the developed method of the ultrasonic thickness measurement.

The possibility of propagation of echoes with phase-manipulated carrier signal in electroacoustic tracts of the ultrasonic thickness gauge has been experimentally proved. This allows us to use the features of the phase characteristics of such signals to increase the accuracy of determining the time of propagation of echoes in the testing object (TO) and to justify the required band of frequencies for piezoelectric transducer.

Improvement of the amplitude-phase method of ultrasonic thickness measurement with the use of phase-manipulated signals is proposed by clarifying the received time delay by measuring and taking into account phase shifts of the carrier signal. The advantage of the two-way method is that it is rough and clarifying the value of the time interval is determined on a single methodological basis - the phase characteristic of the ultrasonic signals without changing the carrier signal frequency, which does not require the expansion of the working band of the thickness gauge. A condition for the absence of a coarse error in the measurement of time intervals by dual scale method is obtained.

The method ultrasonic pulse-echo thickness measurement is investigated and improved. It based on the determination of time intervals between bottom impulses in the position of time  $r$ -statistics, which is determined by the phase characteristic of the carrier signal. Improvement of the method is based on the analysis of the current values of the weighted  $r$ -statistics. It is proposed to determine the weight function as the response of the operator of the mean-square deviation to  $r$ -statistics obtained in the sliding mode.

The study of the noise stability of the improved ultrasonic method was carried out on a model. This model is an additive mix of the sequence of damped ultrasonic bottom signals and the realization of Gaussian noise. The results of simulation prove that the additional weight processing of  $r$ -statistics allows to increase the output signal-to-noise ratio at the of the phase detecting signals by at least 40% for the input signal-to-noise ratio at the of 0.5 or more.

Based on the results of the simulation, algorithmic and software software was implemented that implements the proposed ultrasonic techniques. Performed computer computing experiments on signal models allowed to work out the program realization of the processing of phase-manipulated ultrasonic signals and to confirm the effectiveness of the dual scale phase method of the ultrasonic pulse-echo thickness measurement to improve the accuracy of determining the delay of the information signals and in general to increase the accuracy of the products thickness measurement.

Analysis of the error of determination of time intervals by the developed methods is performed. It allowed to determine its most important error components and to suggest ways to reduce it.

Methods of determining the thickness of products from structurally durable materials for the proposed and improved methods of ultrasonic pulse-echo thickness measurement are developed. This allowed the creation of software for the processing of phase-manipulated signals of ultrasonic pulse-echo thickness measurement and their phase characteristics, and provided a precise measurement of the signal propagation time in the product in a wide range of changes in the elastic characteristics of the material.

A method for determining the thickness of products from materials with a significant attenuation of ultrasonic signals is developed. This method is based on obtaining the phase characteristic of the signals of the ultrasonic pulse-echo thickness measurement and the time intervals by the weighted  $r$ -statistics, which enables to reduce the error of measurement of the thickness of wares by detecting more echoes.

The laboratory sample of the precision system of the ultrasonic pulse-echo thickness measurement that implements the developed methods is developed. It provides by means of the use of test phase-manipulated signals and phase methods for processing the measurement information to reduce the error of measuring the thickness of products from structurally strong materials in general by 35-40% in the case of processing signals from low noise (signal/noise ratio  $\gg 1$ ) and 15-20% in the case of noisy reflected signals (signal/noise ratio  $< 1$ ). Software-algorithmic support of the system, which implements proposed ultrasonic pulse-echo thickness measurement methods is developed and it can be used autonomously in order to perform appropriate computer-based measurement experiments.

**Key words:** ultrasonic testing, pulse-echo method, thickness measurement, phase-manipulated signal, phase signal characteristic, phaseometry.