

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора – Пастуха Олега Анатолійовича
на дисертаційну роботу – Стрілецького Юрія Йосиповича
на тему: "**Методи та засоби опрацювання сигналів при дослідженні
спектрального імпедансу елементів промислових систем**",
подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти.

Дисертаційна робота Стрілецького Ю.Й. містить в собі розв'язання складної науково-прикладної проблеми у галузі комп'ютерних наук і неруйнівного контролю, а саме: визначення спектрального імпедансу окремих елементів промислових систем, розробка нових та вдосконалення існуючих методів формування сигналів спеціальної форми для збудження коливань і цифрового опрацювання дискретизованих інформаційних сигналів для виділення їх спектральних характеристик із сукупності завод.

Розв'язання вказаної проблеми є значним досягненням в розвитку методів і засобів цифрового опрацювання інформаційних сигналів в застосуванні до задач неруйнівного контролю.

Актуальність обраної теми визначається необхідністю розвитку теорії і засобів цифрового опрацювання дискретизованих сигналів в приладах неруйнівного контролю, зокрема для вивчення властивостей матеріалів і процесів що стосуються підземних металевих трубопроводів. Безпечна експлуатація підземних металевих трубопроводів, а зокрема і магістральних газопроводів вносить значний вклад в енергетичну безпеку України. Унікальність і велика розгалуженість газотранспортної системи, яка використовується в Україні вимагає особливої уваги при її експлуатації.

Актуальність вибраної теми підтверджується також низкою загальнодержавних керівних документів, зокрема, Указом Президента України № 1863 2005 від 27.12.23005 «Про Рішення Ради національної безпеки і оборони України» від 9 грудня 2005 року «Про стан енергетичної безпеки України та основні засади державної політики у сфері її забезпечення» (із змінами, внесеними згідно з Указом Президента № 257/2005 від 24.03.2006 і № 678/2007 від 02.08.2007).

Відомі методи і пристрої для неруйнівного контролю стану металу підземних трубопроводів не задовольняють вимогам сьогодення. Тому постає необхідність розроблення підходів, які здатні забезпечувати більшу інформативність оцінки механічних, електричних, електрохімічних та теплопровідних параметрів елементів системи, складовою частиною якої є металевий трубопровід.

Розв'язанню цієї проблеми присвячена дисертаційна робота Стрілецького Ю.Й. і тому її актуальність і важливість не викликає сумніву. Результати були отримані при виконанні госпдоговірних і держбюджетних тем у яких автор брав участь із 1995 по 2017 роки.

Оцінка змісту дисертації в цілому.

Дисертаційна робота Стрілецького Ю.Й. складається із вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел (307 найменувань) та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 494 сторінки, містить 6 таблиць, 298 рисунків, та додатки на 52 сторінках.

У вступі розкрита актуальність теми дисертаційної роботи, конкретизовані мета та задачі досліджень, показано зв'язок вибраного напрямку досліджень з науковими програмами та планами, подано наукову новизну, практичну цінність та особистий внесок здобувача в одержаних результатах.

У першому розділі проведений аналіз методів контролю окремих параметрів стану металу підземного металевого трубопроводу, обґрунтована визначальна роль цих параметрів в оцінці технічного трубопроводу.

На основі аналізу наведених методів і пристроїв визначено загальний підхід до формування сукупності ознак вибраних параметрів на основі спектрального оцінювання сигналу відклику на нормовані сигнали збудження. Застосовуючи метод індукції поширено поняття спектрального оцінювання імпедансу електрохімічних реакцій, на інші електричні параметри із використанням терміну «спектральний імпеданс». Показано, що необхідно розвинути методи імпедансної спектроскопії для дослідження електрохімічних реакцій, а також розробити методи схожих досліджень для детальнішого вивчення властивостей механічних, електричних та теплових параметрів матеріалів та об'єктів.

У другому розділі розроблено підхід до вибору контрольованого параметру певного елемента промислової системи, шляхом представлення його властивостей у виді імпедансу, і передбачає наявність множини незалежних станів. Представлення параметру певного елемента у виді спектрального імпедансу дозволило отримати із одного інформативного потоку необхідну множину незалежних оцінок, яка визначає стан контрольованого елемента. Представлення у виді імпедансу поширено на всі властивості об'єкта, зокрема на електричні, механічні, хімічні та теплові.

Розроблено методи опрацювання сигналів для визначення амплітудної і фазової складової імпедансу на досліджуваній частоті із врахуванням впливу сторонніх завад. Запропоновано представляти сигнали відклику на збудження у виді регресійної моделі, яка будується виходячи із фізичної сутності об'єкта. Використовуючи рекурсивні алгоритми регресійна модель розбудовується шляхом усунення невизначеності, яка оцінюється дисперсією неврахованих елементів моделі. Із застосуванням вказаного методу опрацювання розроблено алгоритми пошуку амплітудного коефіцієнта поширення сигналу, алгоритм визначення частот мод коливних систем і їх коефіцієнтів затухання. Також розроблено метод пошуку фазового коефіцієнту поширення сигналу, який дозволяє визначати час затримки поширення гармонійного сигналу досліджуваної частоти, спотвореного завадами без зберігання всього масиву вхідного дискретизованого сигналу.

У третьому розділі на основі розроблених методів розроблено систему визначення спектрального імпедансу перехідного ізоляційного покриття підземного трубопроводу. Розроблено спосіб формування сигналів збудження електромагнітних коливань, який за рахунок перерозподілу енергії в спектральній області дозво-

ляє зменшити вплив завад, зосереджених в смузї досліджуваної частоти. Розроблено структурні і принципові схеми цифрових систем, які були реалізовані за допомогою структур на основі FPGA.

Розроблені цифрові структури є частиною систем вимірювання амплітуди та часової затримки поширення сигналів напруги і струму в стінках підземного металевго трубопроводу, який представлено електричною лінією із розподіленими параметрами, на яку діють значні сторонні завади промислових частот та імпульсні, але також можуть використовуватися для дослідження амплітудних та фазових коефіцієнтів передачі в системах із значними завадами на досліджуваних частотах

У четвертому розділі розроблено методи визначення спектральних складових сигналу, пропорційного швидкості переміщення механічних коливальних систем із розподіленими параметрами на прикладі натягнутої металевго струни, яка є складовою частиною коливального контуру разом із досліджуваною деталлю. Розроблені методи опрацювання цифрових сигналів дозволяють визначити його спектральні властивості в перехідному режимі механічних коливань. Запропоновано метод оцінки механічного спектрального імпедансу при використанні широкосмугового сигналу збудження. Розроблено структурні схеми пристрою для оцінки відношення частот мод натягнутої струни, що модулюються параметрами коливальної системи, складовою частиною якої вона є.

У п'ятому розділі розроблено методи спектрального оцінювання сигналів, отриманих при дослідженні електрохімічних реакцій із підвищеною роздільною здатністю по часу. Також розроблено метод синхронного формування і опрацювання сигналів при дослідженні електричного спектрального імпедансу ділянки електричного кола, яка є частиною електрохімічної системи. На основі запропонованих підходів дослідження розроблено структурну схему спеціального процесора, який здійснює синтез гармонійного сигналу для збудження електричної ланки і опрацювання відклику за допомогою кореляційного фільтра для покращенням спектральної чистоти результату дослідження.

У шостому розділі розроблено систему формування і опрацювання сигналів, теплових процесів в перехідному режимі. Запропоновано структурні і принципові схеми цифрових систем реалізованих із використанням структур на основі FPGA які дозволяють виділяти окрему спектральну складову із використанням множини кореляційних фільтрів. Наведено результати моделювання роботи такої схеми із використанням середовища ModelSim. Запропоновано метод опрацювання дискретизованого потоку вхідного сигналу із застосуванням широкосмугового сигналу збудження стрибкоподібної форми, що дозволило визначити тепловий спектральний імпеданс ділянки металевго пластини, яка змінюється зі зміною структури металу.

У сьомому розділі представлені розроблені і виготовлені експериментальні установки для проведення дослідження амплітуди напруги і струму, які поширюються в стінках підземного металевго трубопроводу. Представлено розробку структурних і принципових схем установки для дослідження частот мод натягнутої струни. Наведено результати лабораторних досліджень розробленої установки для оцінки втрат механічної енергії для набору металевих взірців із неодноріднос-

тями в їх будові. Розроблено взірці приладів для оцінки спектральних імпедансу електрохімічних систем із великою ємністю.

Наведено результати промислових випробувань розробленого приладу для визначення швидкості корозійних процесів на поверхні металевого трубопроводу за результатами цифрового опрацювання спектральних оцінок супровідних сигналів. Наведено принципові схеми системи для дослідження температурного імпедансу металевих взірців.

Представлені результати лабораторних і промислових досліджень підтвердили основні теоретичні положення, отримані в попередніх дисертації.

У додатках наведено тексти опису розроблених спеціальних процесорів на мові Verilog. Також наведено тести модулів, які використовувалися при моделюванні роботи окремих частин системи в середовищі MatLab. Надано акти промислового впровадження результатів роботи, зокрема із лабораторії кафедри матеріалознавства і новітніх технологій фізико-технічного факультету ДВНЗ «Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаника» та інституту Металофізики НАН України, що свідчить про успішне застосування знайдених дисертантом рішень в суміжних галузях знань, зокрема при фундаментальних дослідженнях властивостей матеріалів.

Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність.

Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації, підтверджується коректністю постановки і вирішення завдань дослідження, чітким формулюванням мети, використанням широко апробованих методів цифрового опрацювання сигналів, теоретичних основ електротехніки, методів імітаційного моделювання на ПЕОМ та практичними дослідженнями.

Достовірність розроблених математичних моделей, алгоритмів, прийомів експериментальних та розрахункових оцінок спектральних характеристик матеріалів і об'єктів обумовлена застосуванням теорії вимірювань і планування експерименту, регресійного аналізу, математичної статистики і методів числового опрацювання результатів експериментів.

Повнота викладу наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, в опублікованих працях.

За результатами досліджень автором опубліковано 28 статей, з яких 9 одноосібних, 6 статей опубліковані у журналах, внесених до міжнародних наукометричних баз знань, із них 1 стаття у журналі, внесеного до бази Scopus. За темою дисертації одержано п'ять патентів на винаходи. Загальна кількість публікації за темою дисертації 50. Друковані роботи в повному обсязі відображають отримані результати.

Робота пройшла широку апробацію: її основні наукові положення доповідались на 15-ти Міжнародних та Всеукраїнських науково-технічних конференціях.

Дисертація Ю.Й. Стрілецького „Методи та засоби опрацювання сигналів при дослідженні спектрального імпедансу елементів промислових систем” є завершеною науковою працею. Її написано, в основному, технічно грамотною українською мовою та оформлено відповідно до вимог ВАК та Державних стандартів України. Робота добре ілюстрована і не перевантажена зайвим матеріалом.

Зміст дисертаційної роботи цілком відповідає спеціальності 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти, за якою вона подана до захисту.

Наукова новизна

Автором дисертаційної роботи виконаний аналіз стану проблем в галузі неруйнівного контролю, зокрема для дослідження стану промислового обладнання на прикладі підземного металевого трубопроводу. Сформульовано проблему, яка полягає в необхідності створення узагальнюючого підходу до оцінки параметрів об'єктів із використанням багаточастотної оцінки, поданої у виді спектрального імпедансу.

1. Вперше розроблено метод визначення амплітуди вибраної спектральної складової сигналу відклику із застосуванням збуджуючого сигналу у вигляді пари гармонійних коливань, близьких до неї за частотою, на основі рекурсивного аналізу їх синхронно визначених амплітуд і побудови регресійної моделі, яка додатково описує сторонні складові з домінуючими амплітудами, що дало змогу підвищити точність вимірювання амплітуди корисного сигналу при визначенні спектрального імпедансу за рахунок зменшення впливу сторонніх моночастотних завад, зосереджених у спектральній смузі досліджуваних сигналів і підвищило на 95% точність результату, в порівнянні із дискретним перетворенням Фур'є.

2. Вперше розроблено метод формування і опрацювання інформаційних сигналів на основі модуляції випадковими кодовими послідовностями, використання яких дозволило розширити спектральну щільність зосереджених на одній частоті завад, завдяки чому зменшити вплив когерентних, стаціонарних широкосмугових й імпульсних завад на досліджуваний сигнал при його синхронному усередненні після демодуляції, що дало можливість підвищити точність вимірювання амплітуди корисного сигналу, яка в процесі моделювання була на 20% вищою у порівнянні із дискретним перетворенням Фур'є.

3. Вперше розроблено метод визначення частоти власних коливань механічних систем, модульованих зміною їх фізичних параметрів на основі генерування пари опорних сигналів і налаштування їх симетрично відносно максимуму спектральної щільності в смузі частот першої гармоніки, що дало змогу визначити відношення частоти вищих гармонік першої моди до реальних власних частот і встановити рівень втрати енергії в фізичному об'єкті при його коливних деформаціях із роздільною здатністю представлення результуючої частоти вищою за точність представлення дискретної частотної складової дискретизованого сигналу.

4. Вперше розроблено метод оцінки огинаючої спектральної складової коливним дискретним віконним перетворенням Фур'є на основі синтезу періоду гармонійного сигналу за його четвертою частиною після використання перетворення Гільберта і маніпулюючи значеннями в межах півперіоду, що дозволило зменшити часову затримку при відтворенні амплітудної огинаючої спектральної складової та підвищити інформативність дослідження змінюваного в часі сигналу до 4 разів при дослідженні швидкоплинних процесів.

5. Набув подальшого розвитку метод визначення затримки поширення сигналу заданої частоти, модульованого однобітним кодом на основі використання множини опорних сигналів, отриманих зсувом модульованого сигналу на певні кути, та визначення з їх допомогою коефіцієнтів взаємної кореляції із досліджуваним

сигналом впродовж реалізації коду на льоту (fly-by), що дало змогу зменшити час опрацювання сигналу, а також усунути потребу в цифровій пам'яті для зберігання дискретизованих значень досліджуваного сигналу в процесі опрацювання.

6. Набув подальшого розвитку метод збудження інерційної резонансної коливальної системи широкосмуговим сигналом, модифікований фільтром із адаптивно корегованими коефіцієнтами, отриманими за допомогою усереднення спектральної щільності відклику цієї системи на збуджуючий сигнал, що дозволило зменшити час збудження окремих складових системи та збільшити точність визначення їх власних резонансних частот в режимі вільних коливань та отримати в результаті експериментальних досліджень роздільну здатність визначення частоти на рівні 0.01 Гц.

7. Набув подальшого розвитку метод опрацювання сигналу, отриманого при дослідженні вільних коливань механічних систем на основі ітераційного підбору частоти і коефіцієнта затухання лінійної регресійної моделі коливання, параметри якої шукаються шляхом апроксимації, що дало змогу підвищити точність визначення частоти власних коливань системи в межах визначеної частотної смуги і знайти числове значення коефіцієнта затухання коливання з урахуванням впливу сторонніх завад у досліджуваному сигналі.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність і новизна

Задачі дисертаційної роботи сформульовано достатньо обґрунтовано, прийняті вихідні положення і припущення аргументовані і в основному забезпечують відповідність математичних моделей фізичним явищам у реальній системі.

Зміст дисертації свідчить про опанування автором сучасної теорії цифрового опрацювання сигналів, спектральної теорії, теорії ймовірності, теорії інваріантності. Розроблені методи дозволили дисертанту розробити алгоритми опрацювання сигналів і на їх основі розробити ІВС визначення спектрального імпедансу для параметрів, які важливі при контролі підземного металевого трубопроводу в процесі його експлуатації.

У роботі розв'язано такі задачі, що складають її новизну:

- здійснено аналіз і вибір важливих фізичних параметрів, що визначають загальний технічний стан елементів промислової системи, систематизовано методи неруйнівного контролю цих параметрів, на основі чого створено теоретичні застави для побудови ІВС для їх визначення;

- розроблено метод та ІВС визначення амплітуди сигналу відклику заданої частоти в сукупності сторонніх завад, широкосмугових та зосереджених в його околі;

- розроблено метод та ІВС вимірювання часу затримки сигналу відклику при його поширенні по досліджуваному середовищу в умовах дії сторонніх завад;

- розроблено метод та ІВС визначення параметрів власних коливань досліджуваного об'єкта за дискретизованим сигналом, що описує його положення в режимі вільних коливань;

- розроблено метод збільшення інформативності амплітудних оцінок вибраних спектральних складових швидкоплинних процесів, представлених дискретизованим сигналом;

– розроблено метод формування та опрацювання сигналів при дослідженні спектральних характеристик теплових опорів.

Рекомендації щодо використання результатів. Отримані автором результати можуть бути використані при розробці нових і модифікації існуючих систем неруйнівного контролю.

Автореферат повною мірою відображає зміст і основні положення дисертаційної роботи.

Зауваження щодо змісту роботи

Дисертаційна робота має ряд недоліків.

1. При аналізі впливу сторонніх сигналів на результати вимірювання амплітуди напруги і струму сигналу збудження не розглянуто вплив сигналів із змінюваною під час дослідження частотою.

2. Не проведено кількісний порівняльний аналіз розробленого способу синтезу гармонійного сигналу із відомими, при їх реалізації на структурах FPGA.

3. Не обґрунтовано вибір типу матриці FPGA і чому саме вибрано структури FPGA, а не цифрові сигнальні процесори.

4. Спостерігається порушення сталості термінологічних словосполучень при викладенні матеріалу. Так, наприклад, використовується словосполучення: «пара пошукових гармонійних сигналів» (стор.117) та «пара опорних сигналів» (стор. 125), чи «амплітудна огинаюча вибраної спектральної складової» (стор. 134) і «огинаюча спектральної складової» (стор.139).

Загальний висновок по дисертації. Дисертація є завершеною науковою роботою, у якій отримано розв'язання актуальної науково-прикладної проблеми створення системи неруйнівного контролю промислових об'єктів в основі роботи якої є запропонована багаточастотна оцінка досліджуваного елемента, подана у вигляді спектрального імпедансу.

Робота є *актуальною*, містить *нові наукові результати*, автором дотримано цілісність підходу.

Дисертаційна робота на тему «Методи та засоби опрацювання сигналів при дослідженні спектрального імпедансу елементів промислових систем» є завершеним науковим дослідженням, відповідає вимогам п.п. 9, 10, 12-14 "Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р. (зі змінами), а її автор – Стрілецький Юрій Йосипович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти.

Доктор технічних наук,
професор

О.А. Пастух

Гідпис д.т.н., проф. О.А. Пастуха за-
відує.
Вчений секретар ТНТУ ім. І.Гушка
Т.М. Крешмар.

