

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Стрілецький Юрій Йосипович



УДК 004.62:681.2.083:621.37:539.3:536.6

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ОПРАЦЮВАННЯ СИГНАЛІВ
ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ СПЕКТРАЛЬНОГО ІМПЕДАНСУ
ЕЛЕМЕНТІВ ПРОМИСЛОВИХ СИСТЕМ**

05.13.05. «Комп'ютерні системи та компоненти»
технічні науки

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів – 2018

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу на кафедрі методів та приладів контролю якості і сертифікації продукції.

Науковий консультант доктор технічних наук, професор
Дунець Роман Богданович,
завідувач кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Національного університету «Львівська політехніка», м. Львів;

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Білинський Йосип Йосипович,
завідувач кафедри електроніки Вінницького національного технічного університету,
м. Вінниця;

доктор технічних наук, професор
Опанасенко Володимир Миколайович,
провідний науковий співробітник відділу мікропроцесорної техніки № 205, Інституту кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України,
м. Київ;

доктор технічних наук, доцент
Яцків Василь Васильович,
завідувач кафедри кібербезпеки Тернопільського національного економічного університету,
м. Тернопіль.

Захист відбудеться 28 вересня 2018 року на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.08 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, Львів-13, м. Львів, вул. С. Бандери, 12), в ауд. 226 головного корпусу о 14:00.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1)

Автореферат розіслано 25 серпня 2018 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради, д.т.н., проф.



Я. Т. Луцик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної проблеми розвитку теорії та впровадженню програмно-апаратних засобів на основі спектрального підходу до створення нових ефективних технологій опрацювання сигналів у комп'ютерних системах, зокрема у компонентах первинного перетворення інформації, цифрових системах обробки вимірюваної інформації для неруйнівного контролю.

Актуальність теми. Загальний розвиток техніки і концентрація виробничих ресурсів на виробництві дозволили спростити багато повсякденних завдань людства. Простіше стало пересуватися, спілкуватися і виготовляти нові засоби. Все це заохочує до пошуку і впровадження нових рішень для створення надійних промислових систем.

Відмінною особливістю промислових систем є висока інтенсивність їх використання і експлуатаційна надійність впродовж терміну експлуатації, що забезпечується складністю конструкції і надійністю матеріалів, з яких їх виготовлено. До елементів промислових систем висувають особливі вимоги. Деякі технічні показники елементів промислових систем перевіряють при виготовленні і впродовж терміну їх експлуатації. Перевірка здійснюється на основі результатів вимірювання певного технологічного параметра і подальшого його аналізу на придатність.

Використання електронних засобів для перетворення і аналізу вимірюваних сигналів суттєво підвищило точність і достовірність результатів. Із появою електронних цифрових засобів опрацювання сигналів значно змінилися підходи до виробництва електронної апаратури. Переважаючим став програмно-апаратний принцип побудови засобів електронної техніки. Однак значна кількість електронних цифрових засобів неруйнівного контролю в своїй реалізації використовує методи аналогової техніки для опрацювання вимірюваних сигналів. Тому поряд із зростанням обчислювальних можливостей апаратної частини цифрових засобів обробки актуальною залишається розробка нових алгоритмів опрацювання дискретизованих сигналів.

Вивченням технічного стану елементів систем при взаємодії їх із зовнішньою силою займалися багато дослідників. Працюють дослідницькі інститути, колективи яких досліджують подібні проблеми. В Україні це такі як ФМІ ім. Г. В. Карпенка, Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова, Інститут електрозварювання ім. Е. О. Патона, відомі науковці З. Т. Назарчук, Р. М. Джала, В. М. Учанін, В. Р. Скальський, Ю. С. Герасименко, В. С. Хандецький, В. О. Троїцький, Ю. М. Посипайко. Проблемами вимірювання електричного імпедансу займалися науковці Ф. Б. Гриневич, В. В. Хома, Є. В. Походило, П. Г. Столярчук, Б. І. Стадник, І. М. Гасюк, Г. І. Барило, М. Н. Сурду.

Опрацюванням сигналів при дослідженні інформаційних потоків займалися В. П. Бабак, Я. М. Николайчук, С. І. Мельничук.

Інтенсивний розвиток електронної техніки при використанні узагальнюючого підходу до вирішення поставлених задач доводить його прогресивність і змушує шукати схожі принципи в інших галузях, зокрема при

проведенні неруйнівного контролю. Одним із напрямків узагальнення є спосіб оцінки контрольованого параметра. Вичерпну кількість незалежних змінних, що дають можливість встановити всі можливі стани контрольованого об'єкта, пов'язані із вибраним параметром, можна отримати з використанням множини спектральних оцінок, які стали наслідком взаємодії цього параметра з відповідною збуджуючою силою. Такий підхід використовується при пошуку імпедансу в електриці, механіці чи акустиці, де імпеданс повною мірою характеризує поведінку об'єкта. Досліджувані об'єкти є поєднанням множини простих елементів із власними імпедансами, що змушує визначати відповідну множину змінних із використанням різних частот. Загальним параметром, який описує поведінку об'єкта, є множина імпедансів, залежних від частоти. Множину імпедансів, залежних від частоти, отриману імпедансною спектроскопією, називають спектральним імпедансом. Отже, узагальнюючим підходом, який дозволяє удосконалити неруйнівні дослідження елементів промислових систем, є представлення їхніх параметрів у вигляді спектрального імпедансу і застосування до його визначення цифрових засобів.

Тому *актуальною проблемою, яка вирішується в дисертаційній роботі*, є створення системи неруйнівного контролю промислових об'єктів в основі роботи якої є багаточастотна оцінка досліджуваного елемента, подана у вигляді спектрального імпедансу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дослідження, результати яких відображені в дисертаційній роботі, виконувалися згідно з програмами і планами науково-дослідних робіт протягом 1995–2017 років у Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу, а саме: фундаментальні наукові роботи Міністерства освіти України (теми Д22/95 і Д6/98) і науково-дослідного інституту нафтогазових технологій (НДІ НГТ) Івано-Франківського державного технічного університету нафти і газу (госпдоговірна тема № 9/98 за договором з ВАТ «Укрнафта» м. Київ); Д-8/04-Ф, реєстраційний № 0104U004086, «Дослідження нових технологій підвищення ефективності видобування вуглеводнів, в тому числі з низькодебітних свердловин»; Gr/F27/0150, реєстраційний № 0110/002628, «Розроблення нового методу неруйнівного контролю ранніх стадій корозії металевих конструкцій»; К1/2009, реєстраційний № 0109U008878, «Наукові основи розробки методів, систем і нормативної бази для вимірювання та контролю обладнання і технологічних параметрів в нафтогазовій галузі»; К1/2015, реєстраційний № 0115U007099, «Науково-організаційні засади нарощування видобутку вітчизняних нафти і газу, їх транспортування та диверсифікації постачання для підвищення енергетичної безпеки України», в яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

Метою і завданням дослідження є подальший розвиток існуючої теорії і розроблення нових методів формування сигналів збудження спеціальної форми та опрацювання сигналів відгуків для створення інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) неруйнівного контролю промислових систем в основі роботи яких є багаточастотна оцінка досліджуваного параметру, поданого у вигляді спектрального імпедансу.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити наступні наукові задачі:

- здійснити аналіз і вибір важливих фізичних параметрів, що визначають загальний технічний стан елементів промислової системи, систематизувати методи неруйнівного контролю цих параметрів, на основі чого створити теоретичні засади для побудови ІВС для їх визначення;

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

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

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

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

- розробити метод формування та опрацювання сигналів при дослідженні спектральних характеристик теплових опорів.

Об'єктом дослідження є процес опрацювання вимірювальної інформації про стан об'єкта на основі спектрального підходу до оцінки імпедансу окремих його параметрів.

Предметом дослідження є методи та засоби перетворення інформаційних сигналів для визначення їх спектральної оцінки.

Методи дослідження: теорія цифрового опрацювання сигналів, спектральна теорія, теорія вимірювань, теорія ймовірності, інтегральне числення, теорія інваріантності (дослідження принципів побудови ІВС), теорія множин, теорія систем, теорія електричних кіл, теорія автоматичного керування.

Наукова новизна одержаних результатів

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 на близько 95% у порівнянні із результатом, отриманим за 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 ширококутових й імпульсних завад на досліджуваній сигнал при його

синхронному усередненні після демодуляції, що дало можливість підвищити точність вимірювання амплітуди корисного сигналу, отриману в процесі моделювання, до 20% 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 результируючої частоти вищою за точність представлення дискретної частотної складової дискретизованого сигналу.

4. Вперше розроблено метод оцінки огинаючої спектральної складової ковзним 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.

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що на основі розроблених теоретичних засад, методів і математичних моделей створено нові методики й алгоритми опрацювання сигналів, побудовано ІВС підвищеної точності і завадостійкості, а також спеціалізовані процесори на базі

ПЛІС FPGA як основу ІВС неруйнівного контролю промислових систем, що дало можливість визначати спектральний імпеданс параметрів їх елементів.

Розроблені методи та засоби доведено до інженерного рівня, вони знайшли застосування в наступних пристроях:

- ІВС для дослідження стану ізоляційного покриття підземних металевих трубопроводів;
- ІВС для виявлення розподілених по об'єму структурних змін в металі за змінами відношення власних коливань струнного сенсора, який є складовою коливальної системи;
- ІВС виявлення локальних структурних змін у металевій стінці труби за зміною її теплопровідності.
- ІВС для вимірювання ємності металевих поверхонь, яка використовується для дослідження імпедансу електрохімічної комірки з розвиненою площею електродів і високою електричною ємністю;
- ІВС для вимірювання швидкості електрохімічної корозії на поверхні підземного металевого трубопроводу за величиною поляризаційного опору;
- ІВС для вимірювання положення дзвона дзвонової витратовимірювальної установки з використанням струнного сенсора;
- ІВС для вимірювання електричного імпедансу ділянки на частотах від 0.001Гц до 12МГц.

ІВС для визначення швидкості електрохімічної корозії впроваджено на виробничих підприємствах УНДП ВАТ «Укрнафта». ІВС для вимірювання положення дзвона взірцевої установки витрати газу впроваджено в науково-впровадницькій фірмі «Темпо» (м. Івано-Франківськ). ІВС контролю та вимірювання параметрів процесу заряд-розряду електрохімічних комірок використовувався лабораторією кафедри матеріалознавства і новітніх технологій фізико-технічного факультету ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника» та Інституту металофізики НАН України. Вказані провадження підтверджуються відповідними актами.

Результати дисертаційної роботи також впроваджуються в навчальному процесі у Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу на кафедрі методів та приладів контролю якості і сертифікації продукції, інформаційно-вимірювальної техніки, систем управління та автоматики, геофізики.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати, що виносяться на захист, отримані автором особисто. Роботу з експериментального дослідження ІВС та їх впровадження проведено разом із співавторами, прізвища яких наведено у бібліографічному списку.

Розроблені автором теоретичні засади формування і обробки сигналів для дослідження імпедансу промислових об'єктів розглянуто як у монопрацях [2, 6-8, 24-26, 35- 37, 39, 46, 48], так і у працях, виконаних у співавторстві.

Розробки способів та пристроїв дослідження властивостей промислових об'єктів запатентовані у співавторстві [29-33].

Внесок автора в роботах, опублікованих у співавторстві, зазначено в списку праць за темою роботи. Крім того автору належить розробка структурної схеми і алгоритму роботи ІВС [38–42]; постановка задачі і

розробка методу дослідження [43–45, 47, 49, 50]; програмна реалізація алгоритму роботи ІВС [34, 40].

Апробація роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на 15 наукових конференціях: конференції «Фундаментальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах» (м. Уфа, 2006 р.); 7-мій Міжнародній наук. техн. конференції «Приладобудування-2008» (м. Київ, 22-23 квітня 2008 р.); 8-мій Міжнародній наук. техн. конференції «Приладобудування-2009» (м. Київ, 28-29 квітня 2009 р.); 6-тій Міжнародній наук. техн. конференції «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання» (м. Івано-Франківськ, 29 листопада – 2 грудня 2011 р.); 9-тій Міжнародній наук. техн. конференції «Приладобудування-2010» (м. Київ 27-28 квітня 2010 р.); 7-мій національній наук. техн. конференції «Неруйнівний контроль і технічна діагностика» (м. Київ, 20-23 листопада 2012 р.); 7-мій наук. техн. конференції молодих вчених і спеціалістів «Сварка и родственные технологии» (м. Київ, 22-24-травня 2013 р.); наук. практи. конференції студентів і молодих вчених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання» (м. Івано-Франківськ, 26-27 листопада 2013 р.); 7-мій Міжнародній наук. техн. конференції «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання» (м. Івано-Франківськ, 25-28 листопада 2014 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання» (м. Івано-Франківськ, 23-28 травня 2016 р.); 8-мій національній наук. техн. конференції «Неруйнівний контроль і технічна діагностика» (м. Київ, 22-24 листопада 2016 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання» (м. Івано-Франківськ, 15-20 травня 2017 р.); 1-шій науково-технічній конференції з міжнародною участю «Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському союзі», (м. Люблін, 24–27 жовтня 2017 р.); 8-мій Міжнародній наук. техн. конференції «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання» (м. Івано-Франківськ, 14-16 листопада 2017 р.); 6-тій Всеукраїнській наук. техн. конференції студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання» (м. Івано-Франківськ, 15-16 листопада 2017 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 50 робіт, у тому числі 28 статей у фахових виданнях, з них 9 одноосібно, отримано 5 патентів на винаходи. Перелік основних публікацій наведено в авторефераті.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, семи розділів з висновками до кожного з них, загальних висновків, списку використаної літератури та додатків. Робота містить 494 с. загального обсягу, з яких 391 с. основного змісту, 298 рисунків, 6 таблиць, список бібліографічних посилань із 307 джерел та додатки на 52 с. Зміст дисертації відображає результати досягнення мети та вирішення основних завдань, результати теоретичних та експериментальних досліджень.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми досліджень, показано зв'язок обраного напрямку з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету та основні задачі досліджень, подано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, визначено особистий внесок здобувача, наведено дані про апробацію, публікації за темою роботи.

У першому розділі проведено узагальнюючий огляд методів контролю промислових об'єктів на прикладі підземного металевого трубопроводу. В результаті проведеного аналізу встановлено, що основними показниками, які змінюються в процесі тривалої експлуатації таких об'єктів є їх геометричні розміри і структура металу. Зміни пов'язані з електрохімічною корозією і механічними зусиллями, які діють на трубопровід в процесі експлуатації. Тому дослідження стану відбувається з використанням комплексу відповідних методів контролю, за допомогою яких контролюються ефективність протикорозійного захисту, а також зміни, пов'язані з макродеформаціями трубопроводу, і зміни в металі стінки труби на мікроструктурному рівні. Вказані дослідження передбачають контроль стану ізоляційного покриття, яке захищає поверхню металу від корозії, контроль корозійних процесів за умови втрати суцільності покриття і контроль зміни механічних параметрів, які сталися внаслідок невиконання якоїсь із умов експлуатації.

Проаналізовано методи та ІВС дослідження суцільності ізоляційного покриття, яке захищає метал від впливу корозійних процесів, а також методи та ІВС дослідження інтенсивності корозійних процесів у випадку пошкоджень. Розглянуто існуючі підходи до оцінки механічних властивостей матеріалів неруйнівними методами. Узагальнено напрямки розвитку методів формування інформаційних сигналів, які використовуються для збудження середовища при дослідженні механічних властивостей матеріалів. Проведено критичний аналіз методів, покладених в основу роботи ІВС для вихрострумовеого, акустичного та електромагнітного дослідження структури металу.

Виявлено спільні ознаки в описаних методах дослідження властивостей, які проявляються в опрацюванні багаточастотних сигналів для збільшення інформативності контролю, що дозволяє зменшити невизначеності в параметрах при проведенні контролю. Схожість підходів до визначення властивостей об'єктів у різних методах із використанням багаточастотних сигналів пояснюється схожістю процесів, які відбуваються при дії збуджуючої сили. Опрацювання багаточастотного сигналу при вимірюванні цільових параметрів дозволяє отримати більше інформації, яка за допомогою певної математичної моделі досліджуваного процесу використовується для пошуку чи компенсації невідомих величин.

Запропоновано взаємно поширити методи дослідження об'єктів за реакцією на дію сторонньої збуджуючої сили, що за фізичною сутністю в електричних та механічних системах описується імпедансом. Множина імпедансів на різних частотах формує спектральний імпеданс досліджуваного параметра.

Проаналізовано методи опрацювання сигналів, зокрема дискретизованих, які застосовуються в ІВС для вимірювання імпедансу електричних ланок, механічних та електрохімічних систем на певних частотах, і методи формування відповідних збуджуючих сигналів.

На підставі зробленого аналізу сформовано задачі подальших досліджень.

В другому розділі розглядається узагальнений підхід до оцінки властивостей об'єкта з використанням повздовжнього та поперечного спектрального імпедансу для відповідного силового поля. Пошук спектрального імпедансу для якогось із полів визначається відношенням спектральної щільності сигналу збуджуючої сили до спектральної щільності сигналу відклику, представленого швидкістю.

Аналіз спектральних імпедансів різних об'єктів показав, що важливу інформацію несуть власні частоти об'єкта, які описують здатність перетікання різних виглядів енергії з одного виду в інший, а також втрати цієї енергії в процесі перетікання. Тому при опрацюванні сигналів будується регресійна модель, яка описує лінійну комбінацію гармонійних сигналів, пов'язаних із власними частотами об'єкта. Регресійна модель будується з використанням квадратурного представлення коливань відомої частоти та частот сторонніх сигналів із домінуючими амплітудами та описується формулою:

$$y_i = A_0 \cdot x_{0,i} + \sum_{l=1}^m (A_{R,l} \cdot x_{2l-1,i} + j \cdot A_{I,l} \cdot x_{2l,i}) + u_i, \quad (1)$$

де $A_0, A_{R,l}, A_{I,l}$ – коефіцієнти моделі, $x_{0,i}, x_{2l-1,i}, x_{2l,i}$ – пояснюючі коефіцієнти, u_i – невраховані елементи моделі, m – кількість параметрів моделі, j – комплексна одиниця. Пояснюючі коефіцієнти шукаються у вигляді квадратурних складових

$$x_{2l-1,i} = \sin(\omega_l \cdot i \cdot \Delta t); \quad x_{2l,i} = \cos(\omega_l \cdot i \cdot \Delta t), \quad (2)$$

де ω_l – частота спектральної складової, вибраної для опрацювання, Δt – коефіцієнт, що залежить від періоду дискретизації вхідного набору. Коефіцієнти моделі шукаються методом найменших квадратів із використанням вхідного набору дискретизованих значень сигналу. За квадратурними коефіцієнтами моделі $A_{R,l}, A_{I,l}$ оцінюються вибрані спектральні складові. Даний метод опрацювання сигналу дозволяє шукати амплітуду і фазовий кут тих стаціонарних спектральних складових сигналу, частота яких задана пояснюючими коефіцієнтами регресійної моделі. Використання регресійної моделі для представлення стаціонарних гармонійних сигналів дозволяє позбутися впливу ефекту витікання спектра на близькі за частотою спектральні складові, присутні у вхідному дискретизованому сигналі, обмеженому в часі.

При дослідженні промислових об'єктів сигнал відклику додатково містить сторонні складові. Введення в регресійну модель інформації про частоту сторонніх сигналів зменшує невизначеність, яку описує коефіцієнт u_i , а вплив введеної частотної складової на всі описані в моделі сигнали зменшується. Таким чином після врахування сторонніх сигналів із

домінуючими амплітудами усувається необхідність фільтрування сигналу для виділення спектральних складових корисного сигналу.

Одним із методів визначення спектральної щільності сигналу відклику є оцінка окремих спектральних складових для множини частот у заданому діапазоні. Реалізація методу визначення спектральної щільності сигналу відклику для множини окремих частот в сукупності сторонніх сигналів передбачає по чергове збудження парою синхронних гармонійних сигналів із рівними амплітудами. Сигнал збудження формується амплітудною модуляцією, в результаті чого утворюється пара гармонійних сигналів. Частота несучого сигналу визначає частоту дослідження. Частоти пари гармонійних сигналів розташовані настільки близько одна від одної, щоб можна було вважати, що на них однаковою мірою впливають сторонні завади. В результаті завади, які однаково впливають на складові збуджуючого сигналу, відділяються за рахунок віднімання миттєвих амплітуд пари гармонійних сигналів через період модулюючого сигналу. Завади, які нерівномірно впливають на амплітуди пари гармонійних сигналів, вводяться в регресійну модель. Для цього визначається частота, на якій діє завада.

Частоти домінуючої за амплітудою складової завади визначаються за її взаємодією з амплітудами складових збуджуючого сигналу. Взаємодія при синхронному спостереженні проявляється у вигляді «биття» амплітуд складових збуджуючого сигналу. Частота биття визначається сумою чи різницею частот сигналів збудження і завади. Оскільки частоти двох складових збуджуючого сигналу відомі і на кожну з них впливає одне й те саме стороннє коливання, то можна визначити знак впливу. При близькості частоти завади ω_3 до частот пари їх амплітуда змінюється із частотою $\omega_{13} = (\omega - \Delta\omega) \pm \omega_3$ і $\omega_{23} = (\omega + \Delta\omega) \pm \omega_3$. Приймавши $\omega_{12} = 2 \cdot \Delta\omega$, частоту завади можна визначити за формулою:

$$\omega_3 = \begin{cases} (\omega - \Delta\omega) - \omega_{13}, & \omega_{23} > \omega_{12}, \\ (\omega + \Delta\omega) + \omega_{23}, & \omega_{13} > \omega_{12}, \\ (\omega - \Delta\omega) + \omega_{13}, & \text{інакше.} \end{cases} \quad (3)$$

Якщо частота завади збігається з частотою одного з опорних сигналів, його амплітуда буде більшою за іншу і змінюватися не буде.

Складові регресійної моделі (1) визначаються послідовним пошуком домінуючих за амплітудою гармонійних складових завади за їх впливом на амплітуди складових збуджуючого сигналу.

З використанням запропонованих залежностей побудовано алгоритм визначення параметрів сигналу в умовах дії стаціонарних завод. Алгоритм передбачає формування пари гармонійних сигналів збудження, частоти яких знаходяться на відстані $\pm \Delta\omega$ від ω_0 , подачу сформованого сигналу в досліджуваний канал, дискретизацію вхідного сигналу, побудову регресійної моделі з використанням частот пари сигналів збудження, аналіз амплітуди коливань цієї пари, визначення дисперсії зміни амплітуд. Якщо дисперсія більша за вибрану, то треба визначити частоту завади і перебудувати модель, доки не буде досягнуто прийняттого рівня дисперсії синхронно визначених

амплітуд. В кінці розрахувати різницю амплітуд пари сигналів у момент, коли їх вектори в протифазі, і вибрати фазу однієї зі складових.

У результаті виконаних перетворень отримується спектральна щільність сигналу відклику для сукупності частот, заданих збуджуючим сигналом при зменшеному впливі сторонніх сигналів без використання додаткових фільтрів, які вносять фазові і амплітудні похибки.

З використанням запропонованого підходу до представлення сигналу у вигляді регресійної моделі було розроблено метод визначення параметрів вільних коливань досліджуваного об'єкта. При побудові моделі прийнято, що вільні коливання досліджуваного об'єкта на вибраній частоті мають форму синусоїдального сигналу з експоненціально згасаючою амплітудою, тому описуються частотою, амплітудою і коефіцієнтом згасання амплітуди коливання.

Початкове визначення частоти вибраної моди, на якій відбувається згасаюче коливання, проводиться за допомогою дискретного перетворення Фур'є. Уточнення частоти вибраної моди ω_l із дискретизованого вхідного сигналу проводиться за допомогою ітераційного підбору параметрів ω' і δ' регресійної моделі виду:

$$y_i = A_0 \cdot x_{0,i} + e^{-\delta' \cdot i \cdot \Delta t} \cdot (A_R \cdot x_{1,i} + j \cdot A_I \cdot x_{2,i}) + u_i, \quad (4)$$

де A_0, A_R, A_I – коефіцієнти моделі, $x_{0,i}, x_{1,i}, x_{2,i}$ – пояснюючі коефіцієнти, які шукаються у вигляді квадратурних складових $x_{1,i} = \sin(\omega' \cdot i \cdot \Delta t)$; $x_{2,i} = \cos(\omega' \cdot i \cdot \Delta t)$; u_i – невраховані елементи моделі.

Спочатку із набору дискретизованих значень вхідного сигналу шукається уточнене значення частот вільних коливань згідно з алгоритмом (рис. 1, а). Критерієм правильності підбору частоти коливання, при якому $\omega_l = \omega'$, є максимальне значення амплітуди коливання $A = \sqrt{A_R^2 + A_I^2}$. Так само за допомогою ітерації уточнюється коефіцієнт згасання вибраної моди ($\delta_l = \delta'$), але вже за мінімумом СКВ коефіцієнтів u_i (рис. 1, б).

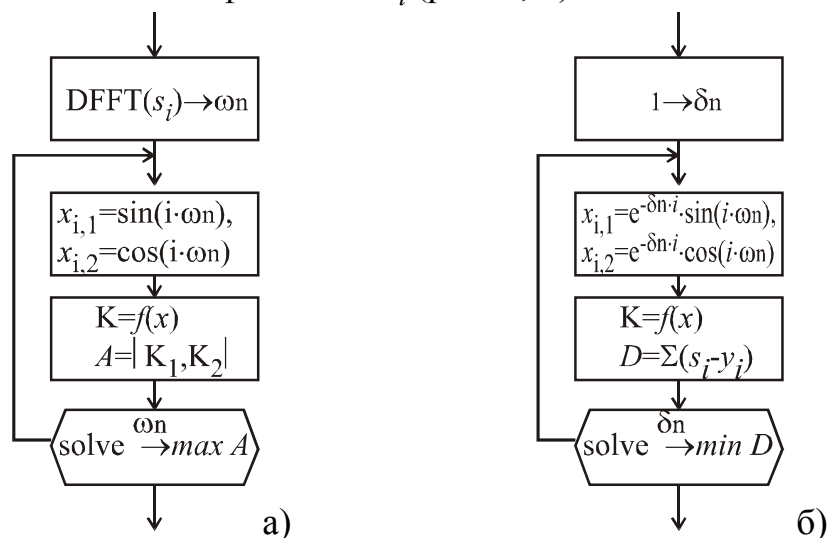


Рис. 1 – Алгоритми рекурсивного пошуку параметрів мод коливної системи: а – частоти; б – коефіцієнта згасання

Використання даного методу опрацювання дискретизованого сигналу дозволяє по черзі уточнити частоти власних коливань, що не збігаються із гармоніками дискретизованих значень, а також знайти коефіцієнт затухання кожної з мод при відомій функціональній залежності амплітуди окремих спектральних складових сигналу відклику від часу.

При невідомій функціональній залежності амплітуди досліджуваних спектральних складових від часу оцінюється миттєва амплітуда вибраної спектральної складової сигналу. Розроблено метод опрацювання сигналів, який дозволяє збільшити інформативність оцінки амплітуди вибраної спектральної складової в часі. Збільшення інформативності досягається скороченням довжини вікна, на якому визначається амплітуда. Визначення амплітуди спектральної складової у ковзному вікні, коротшому за період сигналу, відбувається після синтезу всього періоду за його фрагментом.

Можливість відтворення форми гармонійного коливання за його фрагментом пояснюється представленням окремої спектральної складової сигналу вектором, який, обертаючись із частотою цієї складової, своєю вершиною описує коло (рис. 2, а).

Дві половини описаного вектором кола симетричні між собою. За допомогою перенесення значень однієї половини періоду в іншу із відповідною корекцією знаку відновлюється форма всього періоду (рис. 2, б). Використовуючи перетворення Гільберта для всього набору вхідних значень s_i , шукається ортогональна форма сигналу so_i , в тому числі і досліджуваної спектральної складової. Це дозволило за четвертиною періоду синтезувати половину і за половиною – вже цілий період.

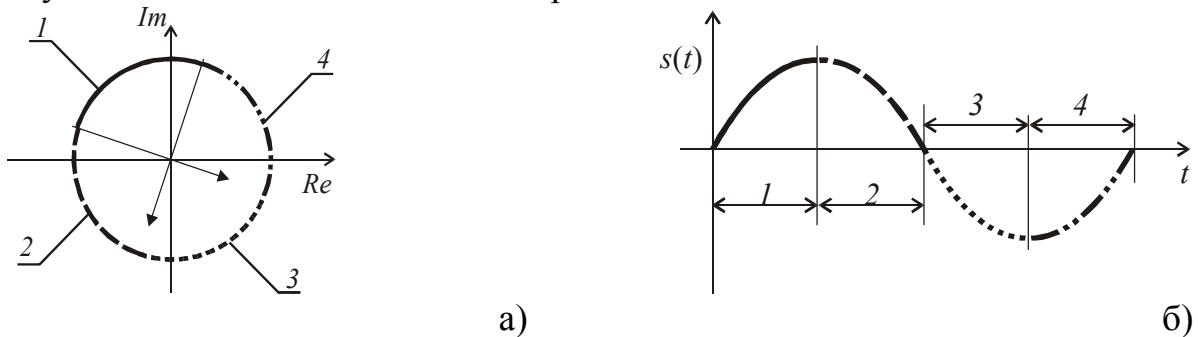


Рис. 2 – До методу синтезу повного періоду за однією його частиною: а – векторне представлення гармонійного сигналу; б – часове представлення гармонійного сигналу

Дослідження миттєвої амплітуди вибраної спектральної складової сигналу із частотою ω_1 у вхідному дискретизованому сигналі відбувається за допомогою ковзного вікна, тривалість якого визначається четвертою частиною періоду цієї складової. Кількість точок, яка відповідає тривалості четвертини періоду, визначається за формулою

$$N_{14} = \frac{N}{T} \frac{\pi}{2 \cdot \omega_1}, \quad (5)$$

де N – кількість точок усього вхідного набору, T – тривалість спостереження всього вхідного набору.

Формується масив даних вікна тривалістю $N_1 = 4N_{14}$ за допомогою синтезуючого оператора, який описується наступним чином:

$$ss_i = \begin{cases} s_{i+q}, & \text{для } 0 \leq i < N_{14}, \\ so_{i+q}, & \text{для } N_{14} \leq i < 2N_{14}, \\ -s_{i+q}, & \text{для } 2N_{14} \leq i < 3N_{14}, \\ -so_{i+q}, & \text{для } 3N_{14} \leq i < N_1, \end{cases} \quad (6)$$

де i – поточна змінна в межах вікна, приймає значення від 0 до $N_1 - 1$; q – поточне положення вікна в межах усього вхідного набору, що приймає значення від 0 до $N - N_1 - 1$.

Відтворена форма вибраної спектральної складової має ознаки тієї ділянки реального сигналу, з якої її синтезовано. Таким чином за один період досліджуваної спектральної складової сигналу отримується чотири оцінки її амплітуди. При опрацюванні великого набору даних ковзним вікном зростання інформативності оцінки амплітуди в часі дозволяє отримати точніше відтворення форми огинаючої вибраної спектральної складової в сумарному сигналі.

З огляду на розширення поняття імпедансу до оцінки властивостей досліджуваних об'єктів було удосконалено метод визначення фазового кута гармонійного сигналу відклику, який поширюється від точки прикладання збуджуючої сили до точки вимірювання за час, більший за тривалість свого періоду. Пошук цього часу на вибраній частоті передбачає формування кадру фазоманіпульованого гармонійного сигналу досліджуваної частоти. Модулюючий сигнал має форму симетричного прямокутного імпульсу з періодом, тривалішим за час поширення сигналу в досліджуваному середовищі. Автокореляційна функція такого сигналу має форму симетричного трикутного імпульсу, що дозволяє представити її в аналітичному вигляді за допомогою вектора, вершина якого при обертанні описує квадрат. Таким чином за координатами вектора можна знайти фазовий кут, на який змістився кадр після проходження по досліджуваному середовищу.

Координати вектора визначаються за допомогою взаємокореляційних коефіцієнтів, отриманих із використанням вхідного і множини опорних сигналів упродовж часу, що дорівнює тривалості кадру. Опорні сигнали є квадратурними по відношенню до сигналів несучого і модулюючого, які використовуються при формуванні кадру. Модулюючий сигнал формується у вигляді

$$p(i \cdot \Delta t) = \text{sgn}(\sin[\omega_M \cdot i \cdot \Delta t]), \quad (7)$$

де Δt – період дискретизації вхідного сигналу, ω_M – частота модулюючого сигналу. Опорні сигнали формуються у вигляді

$$\begin{aligned} s_{00,i} &= p(i \cdot \Delta t) \cdot \sin(\omega_H \cdot i \cdot \Delta t), & s_{09,i} &= p\left(i \cdot \Delta t + \frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin(\omega_H \cdot i \cdot \Delta t), \\ s_{90,i} &= p(i \cdot \Delta t) \cdot \sin\left(\omega_H \cdot i \cdot \Delta t + \frac{\pi}{2}\right), & s_{99,i} &= p\left(i \cdot \Delta t + \frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin\left(\omega_H \cdot i \cdot \Delta t + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

Види опорних сигналів, які використовуються для пошуку взаємкореляційних коефіцієнтів, наведено на рис. 3.

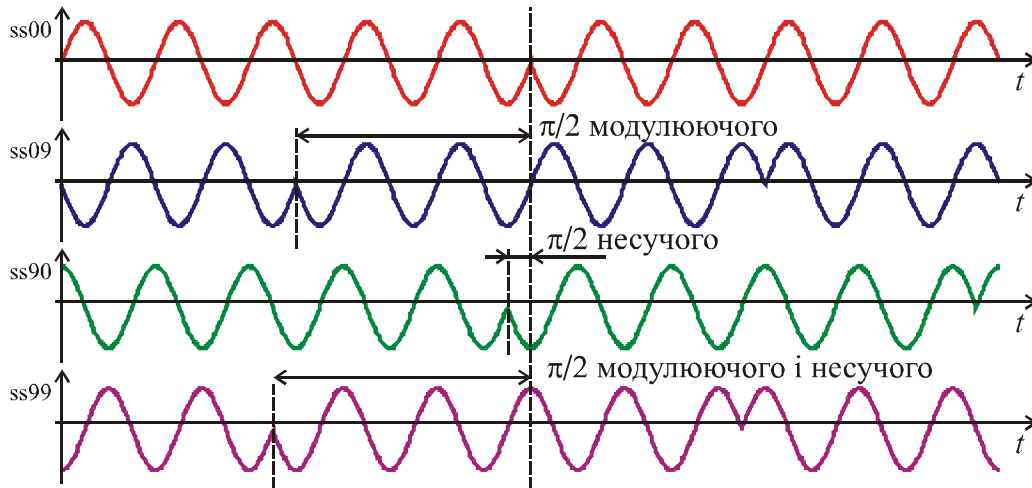


Рис. 3 – Опорні сигнали для пошуку взаємкореляційних коефіцієнтів із вхідним сигналом

Взаємкореляційні коефіцієнти визначаються за наступною формулою

$$R_{xy_\tau} = \sum_{i=0}^{N-1} s_i \cdot s_{xy_i}, \quad (9)$$

де xy – індекси 0 чи 9 зміщення несучого і модулюючого сигналу.

Горизонтальна складова вектора, який описує автокореляційну функцію кадру, шукається за формулою:

$$Rr_\tau = \sqrt{R_{00\tau}^2 + R_{90\tau}^2} - \sqrt{R_{09\tau}^2 + R_{99\tau}^2}, \quad (10)$$

а вертикальна складова – за формулою:

$$Ri_\tau = \sqrt{(R_{90\tau} + R_{99\tau})^2 + (R_{00\tau} + R_{09\tau})^2} - \sqrt{(R_{00\tau} - R_{09\tau})^2 + (R_{90\tau} - R_{99\tau})^2}. \quad (11)$$

Залежність кожної зі складових вектора від часу затримки кадру τ в межах одного періоду наведено на рис. 4.

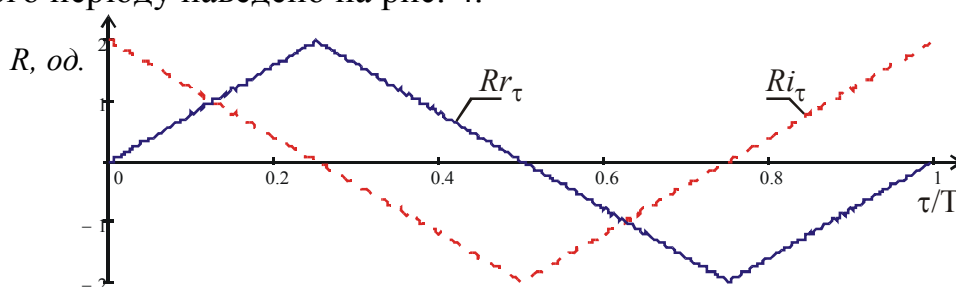


Рис. 4 – Залежність квадратурних складових кореляційного вектора при різній затримці кадру

Розглядаючи знайдені коефіцієнти вертикальної і горизонтальної складових як комплексну координату вектора, що описує АКФ кадру, шукається фазовий кут цього вектора φ^c_τ .

Через складну функціональну залежність фазового кута вектора АКФ від

значення взаємкореляційних коефіцієнтів, при розрахунку періодично виникає похибка близько 1%. Значення кута уточнюється з використанням коефіцієнтів взаємної кореляції, опорними сигналами для яких є квадратурні складові двох частот $\omega_1 = \omega_H + \omega_M$ і $\omega_2 = \omega_H - \omega_M$. За допомогою додатково знайдених коефіцієнтів кореляції $R1rx_{\tau}$, $R1ix_{\tau}$ і $R2rx_{\tau}$, $R2ix_{\tau}$ шукаються уточнюючі кути $\varphi_{1\tau}$, $\varphi_{2\tau}$ в межах періоду ω_1 , ω_2 . На рис. 5 наведено приклад залежності фазових кутів від часу затримки кадру.

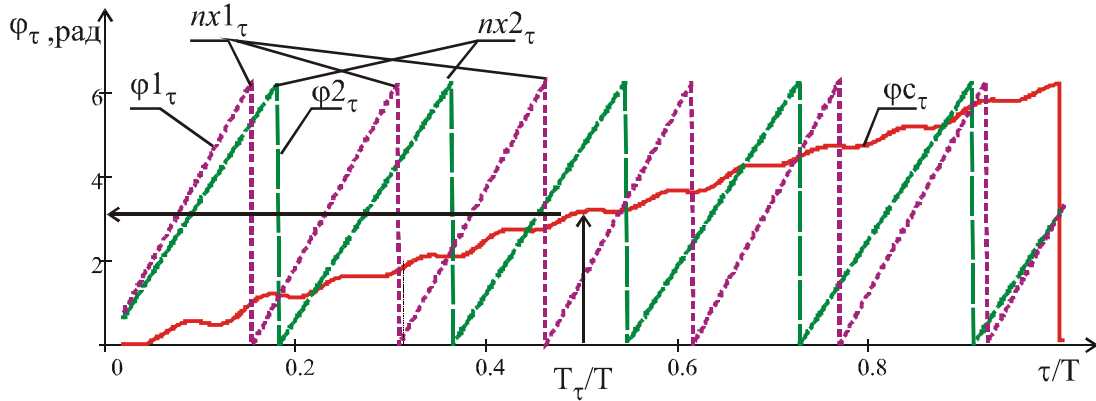


Рис. 5 – Залежність кутів, знайдених за кореляційними коефіцієнтами, від часу затримки кадру вхідного сигналу

За кутом вектора $\varphi_{c\tau}$ шукається номер періоду для $\varphi_{1\tau}$ чи $\varphi_{2\tau}$, значення яких є лінійним, але період їх коротший за час спостереження. Пошук кількості цілих періодів від початку кадру до значення, отриманого в результаті вимірювання, відбувається за допомогою формул

$$nx1_{\tau} = \left\langle \frac{\varphi_{c\tau} \cdot n1}{2\pi} \right\rangle, \quad nx2_{\tau} = \left\langle \frac{\varphi_{c\tau} \cdot n2}{2\pi} \right\rangle, \quad (12)$$

де $n1$, $n2$ – кількість періодів відповідного сигналу в кадрі, $\langle \rangle$ – операція округлення до цілого значення.

Попередній час затримки визначається формулою

$$T_{c\tau} = \frac{\varphi_{c\tau}}{2\pi} \cdot T_k. \quad (13)$$

Після цього шукаються допоміжні часи затримки за формулами:

$$T1_{\tau} = T_k \cdot \frac{\varphi_{1\tau} + 2\pi \cdot nx1_{\tau}}{2\pi \cdot n1}, \quad T2_{\tau} = T_k \cdot \frac{\varphi_{2\tau} + 2\pi \cdot nx2_{\tau}}{2\pi \cdot n2}. \quad (14)$$

Оскільки $\varphi_{c\tau}$ нелінійний, то часи потребують корекції, яка відбувається за наступним алгоритмом:

$$\text{якщо } (T1_{\tau} > T_{c\tau}) \wedge (T2_{\tau} > T_{c\tau}), \text{ то } T2_{\tau} = T_k \cdot \frac{\varphi_{2\tau} + 2\pi \cdot (nx2_{\tau} - 1)}{2\pi \cdot n2};$$

$$\text{якщо } (T1_{\tau} < T_{c\tau}) \wedge (T2_{\tau} < T_{c\tau}), \text{ то } T2_{\tau} = T_k \cdot \frac{\varphi_{2\tau} + 2\pi \cdot (nx2_{\tau} + 1)}{2\pi \cdot n2};$$

$$\text{якщо } |T_{c\tau} - T1_{\tau}| < |T_{c\tau} - T2_{\tau}|, \text{ то } T\tau = T1_{\tau} \text{ інакше } T\tau = T2_{\tau}.$$

При наявності остаточного часу затримки кадру $T\tau$ і періоду несучого коливання $T\omega_H$ шукається фазовий кут сигналу $\varphi_{\tau} = 2 \cdot \pi \cdot T\tau / T\omega_H$.

У результаті проведених перетворень отримано час затримки кадру, який знайдено з використанням восьми коефіцієнтів кореляції, отриманих у процесі прийому кадру без запису всього масиву вхідного дискретизованого сигналу в пам'ять.

Розроблено основні методи опрацювання та представлення сигналів, які використовуються при подальшому визначенні спектрального імпедансу вибраного параметра досліджуваного об'єкта.

У третьому розділі на основі розроблених методів опрацювання сигналів розроблено ІВС для визначення перехідного електричного спектрального імпедансу між підземним трубопроводом і оточуючим ґрунтом. Складовою частиною перехідного імпедансу є перехідний опір ізоляційного покриття, який є важливим показником захисту від електрохімічної корозії підземного металевого трубопроводу. Зв'язок між електричними параметрами ділянки підземного металевого трубопроводу описується моделлю у вигляді електричної схеми, вид якої залежить від наявності пошкоджень ізоляційного покриття (рис. 6). Знаючи спектральний імпеданс на ділянці трубопроводу і вибираючи певну модель (1 чи 2), за відомими методиками знаходиться перехідний опір $R_{П11}$ чи $R_{П12}$ ізоляційного покриття.

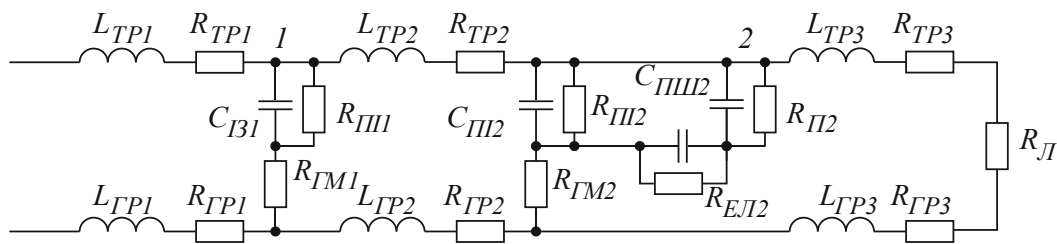


Рис. 6 – Види схем заміщення електричних параметрів ділянки трубопроводу із різним станом ізоляційного покриття

Перехідний імпеданс вибраної ділянки поверхні на множині частот визначається відношенням комплексної напруги між металевою поверхнею трубопроводу і ґрунтом, який до неї прилягає, до комплексного струму, який витікає з цієї поверхні у ґрунт.

У ході досліджень було визначено фактори, які ускладнюють вимірювання амплітуди і фазового зсуву сигналу у всіх точках вздовж підземного трубопроводу. Через велику довжину підземного трубопроводу при поширенні електричного сигналу в його стінках необхідно враховувати розподілені електричні параметри системи «трубопровід–ґрунт». Велика площа поверхні довгого трубопроводу спричиняє значні втрати струму, тому струм сильно згасає. В підземному металевому трубопроводі концентруються блукаючі струми, які формують завади в широкому спектрі частот, а особливо на промисловій частоті 50 Гц і її гармоніках. Оскільки трубопровід занурений у ґрунт, то кількість доступних для електричних вимірювань місць є обмеженою. Тому окремо вирішуються задачі вимірювання напруги і струму на вибраній для дослідження ділянці.

Струм, який проходить через поверхню труби у ґрунт, вимірюється за різницею струмів на сусідніх із досліджуваною ділянках. Напруга вздовж

трубопроводу із незначними відхиленнями описується законом для довгої електричної лінії. Тому при відомому коефіцієнті поширення хвилі напруга на вибраній ділянці розраховується. Коефіцієнт поширення хвилі розраховується за результатами вимірювання напруги на кінцях трубопроводу, в пристосованих для цього місцях. З огляду на великий рівень втрат сигналу при проходженні по стінках підземного трубопроводу і великий рівень завад окремо шукаються амплітудна і фазова складові коефіцієнта поширення хвилі.

Пошук амплітудного коефіцієнта поширення напруги здійснюється після визначення амплітуди корисного сигналу напруги на кінцях трубопроводу. Амплітуда напруги визначається методом її синхронного усереднення. Усереднення дозволяє усунути вплив відносно швидкоплинних процесів впродовж часу усереднення. При цьому енергія вищих спектральних складових перетворюється в енергію нижчих складових і може бути відділена у вигляді постійної складової.

Необхідною умовою усереднення сторонніх складових до нульового значення є симетричний закон розподілу значень складових завади. Однак наперед гарантувати наявність сигналу завади із симетричним законом розподілу не можна. Тому симетричний вид розподілу формується маніпуляцією стороннього сигналу біполярною функцією виду $c(t) = \pm 1$ із достатньою швидкістю. Внаслідок маніпуляції закон розподілу значень стороннього сигналу (рис. 7, а) набуває симетричного вигляду (рис. 7, б).

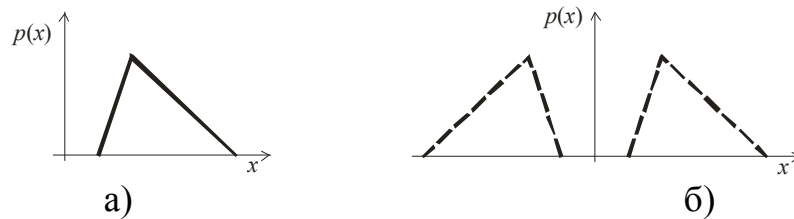


Рис. 7 – Формування симетричного закону розподілу випадкової величини маніпуляцією її значень біполярною функцією: а – довільний закон розподілу, б – закон розподілу після біполярної маніпуляції

Біполярна маніпуляція спочатку застосовується до корисного сигналу, який після цього подається в досліджувану ланку. Після прийому виконується демодуляція сукупності корисного і сторонніх сигналів. Корисний сигнал відтворює свою форму, а завада набуває значень із симетричним законом розподілу і усувається усередненням. Функціональну схему перетворень сигналу зображено на рис. 8.

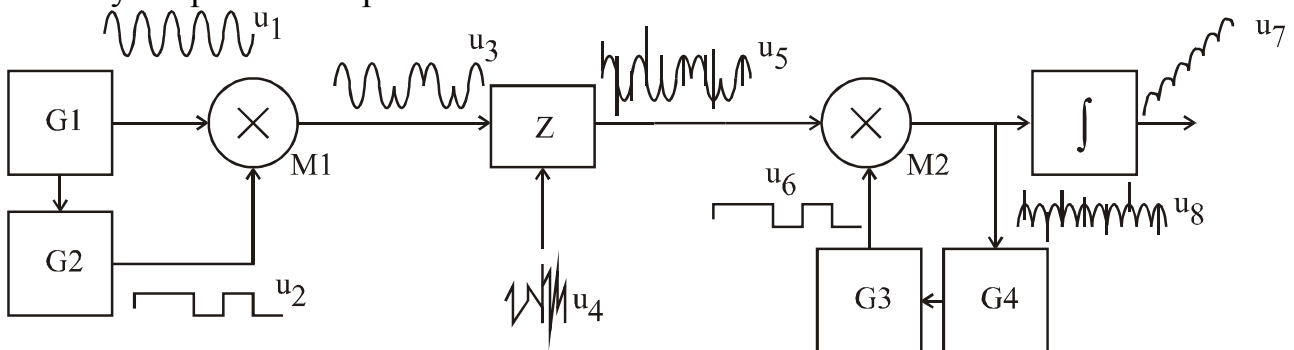


Рис. 8 – Функціональна схема виділення корисного сигналу із сукупності завад

Генератор гармонійного сигналу G1 формує корисний сигнал u_1 із досліджуваною частотою. Синхронно із періодом сигналу u_1 формується сигнал синхронізації, який подається на вхід генератора випадкової послідовності G2. Генератор G2 синхронно із періодом u_1 формує біполярний модулюючий сигнал u_2 . Після балансного модулятора M1 формується фазоманіпульований сигнал u_3 , який подається на досліджувану ланку Z.

Спотворений сторонніми сигналами u_4 прийнятий сигнал u_5 приходиться на вхід демодулятора. Демодулятор синхронізується місцевим генератором G3. Демодульований сигнал u_8 надходить на вхід схеми автоналаштування фази і відновлення модулюючого сигналу G4, а також на вхід синхронного суматора \int . На виході суматора накопичується синхронно випрямлений корисний сигнал u_7 і усереднюються сторонні завади.

Опрацювання сигналів здійснюється за допомогою розроблених спецпроцесорів для модуляції при формуванні сигналу збудження і демодуляції при прийомі сигналу відклику. Структурну схему вузла формування наведено на рис. 9.

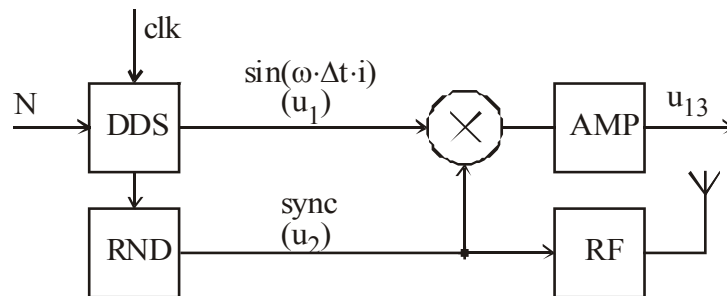


Рис. 9 – Структурна схема вузла формування сигналу збудження

Формувач синусоїдального сигналу DDS тактується системним синхросигналом clk . Частота генерованого сигналу задається зовнішнім кодом N . Синхронно із генерованим синусоїдальним сигналом формується випадкова послідовність біт модулем RND. В результаті на виході балансного модулятора отримується фазоманіпульований сигнал, синхронно модульований прямокутним випадковим сигналом. Цей модульований сигнал подається на підсилювач потужності AMP, із виходу якого сигнал подається до металеві стінки підземного трубопроводу. Синхронний із переключенням сигнал фази надходить на блок високочастотної модуляції RF і з нього через зовнішню антену передається для синхронізації до приймача.

Структурну схему вузла прийому сигналу наведено на рис. 10.

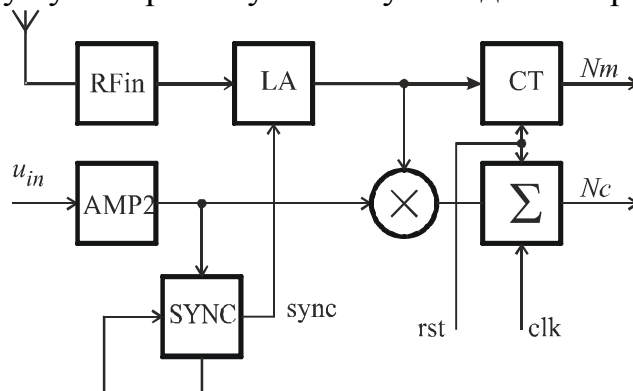


Рис. 10 – Структурна схема вузла обробки прийнятого сигналу

Отримана за допомогою виносних активних електродів, напруга між трубопроводом і ґрунтом надходить на вхід нормуючого підсилювача АМР2. З виходу цього підсилювача сигнал надходить на вузол відновлення синхронізації із періодом корисного сигналу SYNC. На виході цього вузла формується прямокутний сигнал sync, синхронний із півперіодом прийнятого сигналу і тому незалежний від його фазової маніпуляції. Цей сигнал надходить на логічний блок LA. На вхід блока LA також надходить сигнал зміни полярності із радіоканалу RFin від модулятора. На виході LA формується сигнал демодулюючої функції $c(t)$. Кількість прийнятих періодів вхідного сигналу рахується лічильником СТ і подається на вихід Nm. Код, пропорційний демодульованій амплітуді вхідного сигналу, формується синхронним суматором Σ і подається на вихід Nc.

Важливим елементом демодулятора є блок синхронізації SYNC, який формує синхросигнали sync, автоналаштуваючи фазу по зашумленому вхідному сигналу.

Для того, щоб налаштування фази відбувалося в межах від $-\pi/2$ до $\pi/2$, сигнал помилки фази шукається згорткою сигналів вхідного з генерованим і добутком цієї згортки на генерований сигнал, зсунутий на $\pi/2$ згідно з формулою:

$$\Delta U = K \cdot \sum_{i=0}^{N-1} [U_{in_i} * P(\omega_0 \cdot i \cdot \Delta t)] \cdot \text{sign} \left[P \left(\omega_0 \cdot i \cdot \Delta t + \frac{\pi}{2} \right) \right], \quad (15)$$

де K – узгоджуючий коефіцієнт, ω_0 – частота досліджуваного сигналу, P – функція сигналу місцевого генератора. Залежність функції автоналаштування від фазового зсуву наведено на рис. 11.

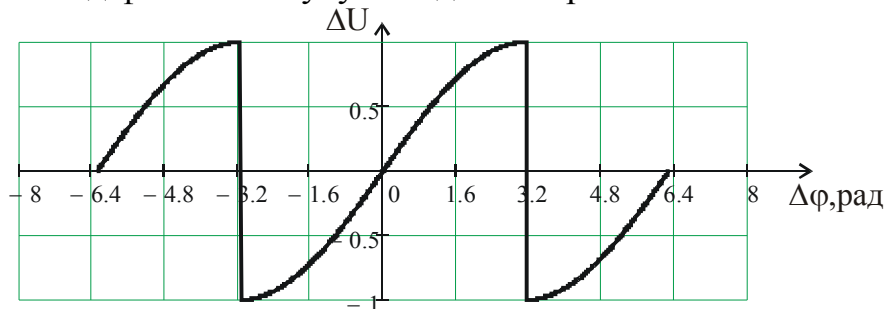


Рис. 11 – Залежність коду налаштування ГКН від помилки фази

Структурну схему блока синхронізації наведено на рис. 12. Керований кодом генератор G отримує код N_2 , який визначає частоту генерації. Фаза генерування визначається сигналом із блока K. Генератор формує два сигнали однієї частоти, але зсунуті між собою на кут $\pi/2$. Ці сигнали надходять на окремі балансні модулятори 0° і 90° . З виходів балансних модуляторів сигнали надходять на суматори Σ . Таким чином протягом певної кількості періодів, яка визначається дільником N_1 , формуються дві суми, які є результатом згортки квадратурних сигналів генератора G вхідним сигналом. По закінченні періоду розрахунку ці суми записуються у вихідні регістри RG1 і RG2, а лічильники

обнуляються. Код U_2 використовується для пошуку знаку помилки фази за допомогою компаратора CMP. Сигнал порівняння надходить на ще один балансний модулятор, що формує сигнал помилки автоналаштування, який після масштабування впливу використовується для корекції фази генератора для його узгодження із вхідним сигналом.

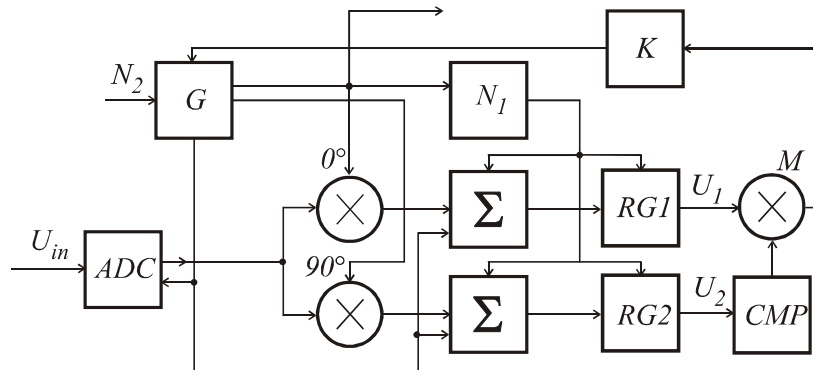


Рис. 12– Структурна схема модуля синхронізації SYNC

Всі обчислення відбуваються із використанням розробленого спецпроцесора на основі ПЛІС FPGA, схему якого наведено на рис. 13.

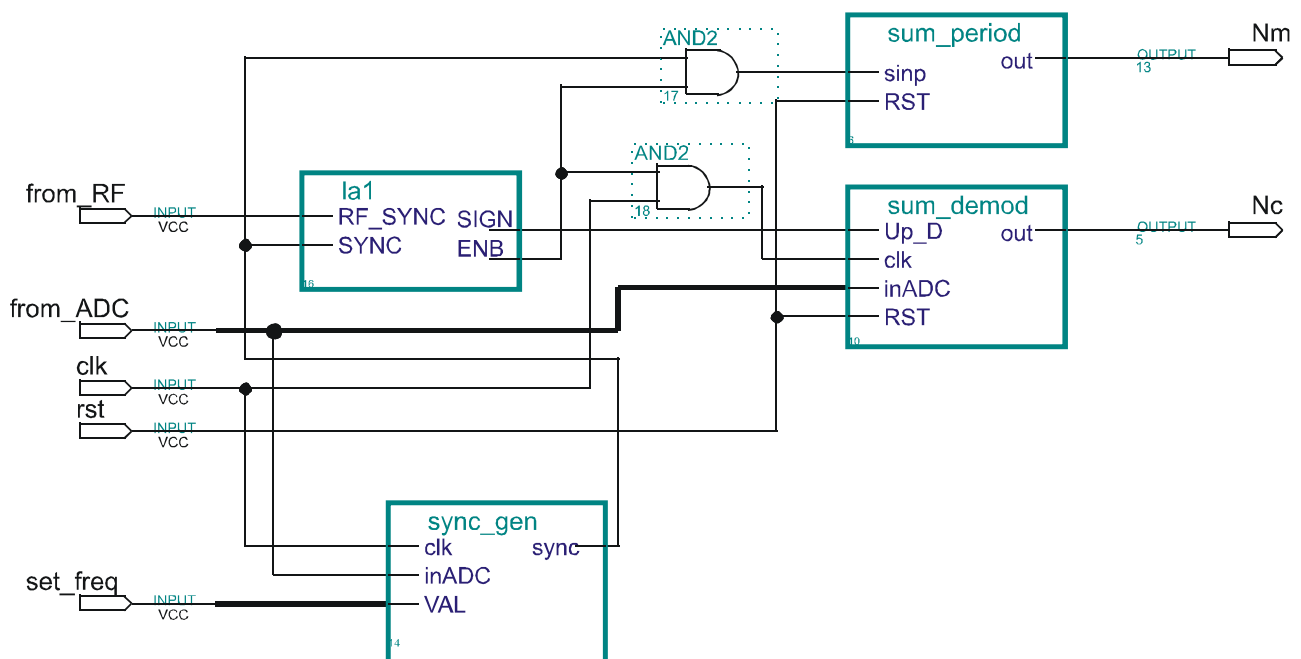


Рис. 13 – Схема спецпроцесора для визначення амплітуди напруги після демодуляції і усереднення сторонніх завад

Схема містить чотири модулі, серед яких логічний блок *la1*, синхронізатор *sync_gen*, суматор періодів *sum_period* і синхронний суматор *sum_demod*. Обробка допоміжних сигналів здійснюється мікропроцесорною системою.

Таким чином шукається коефіцієнт затухання амплітуди при поширенні хвилі вздовж трубопроводу. Пошук фазового коефіцієнта поширення хвилі здійснюється з використанням методу визначення затримки кадру. Вказані

коефіцієнти використовуються при визначенні напруги між трубою і ґрунтом на досліджуваних ділянках трубопроводу.

Амплітуда струму визначається методом побудови регресійної моделі сигналу за допомогою пари гармонійних коливань. Фазовий коефіцієнт струму на сусідніх із досліджуваною ділянках має мале значення і вимірюється за допомогою розробленого спецпроцесора із використанням ПЛІС FPGA, схему якого наведено на рис. 14.

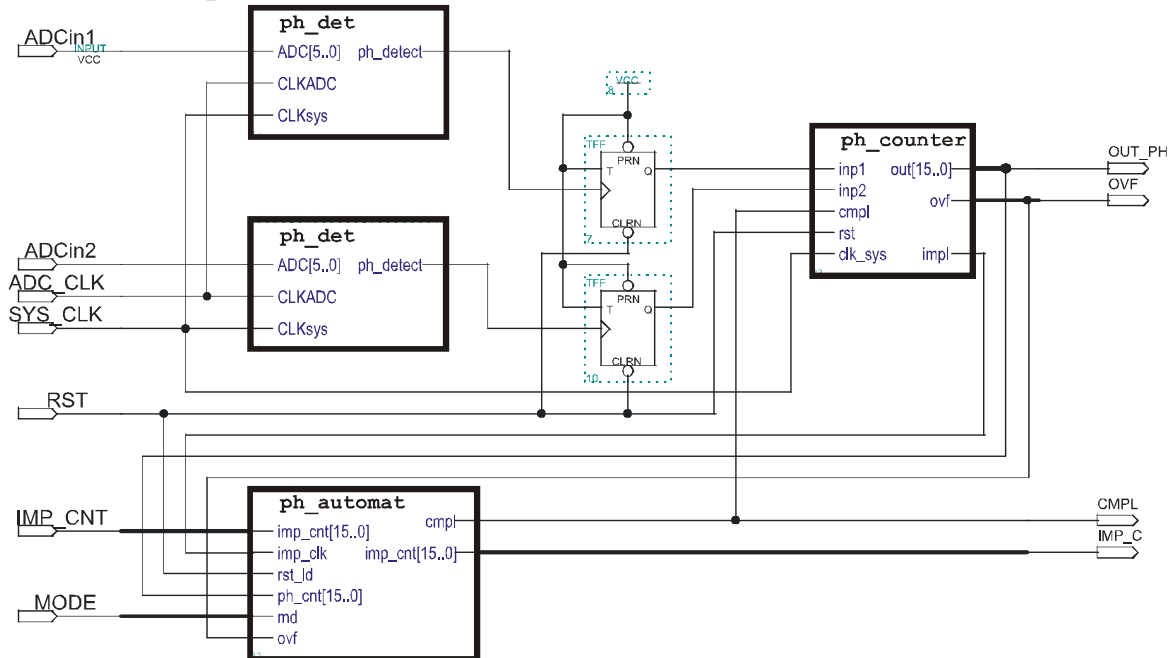


Рис. 14 – Схема спецпроцесора визначення середньої різниці фаз із компенсацією амплітудних зміщень вхідних сигналів

Спецпроцесор містить чотири модулі, два з яких ph_det – детектори фази, вузол автоматики ph_automat і лічильник середнього значення фази ph_counter. З огляду на наявність сторонніх шумів у вимірюваному сигналі детектори фази виконано на основі пошуку мінімуму ковзної оцінки інформаційної ентропії сигналу, яка в гармонійному сигналі зменшується двічі на період в моменти досягнення екстремумів.

Структурну схему модуля визначення ковзної оцінки інформаційної ентропії сигналу наведено на рис. 15.

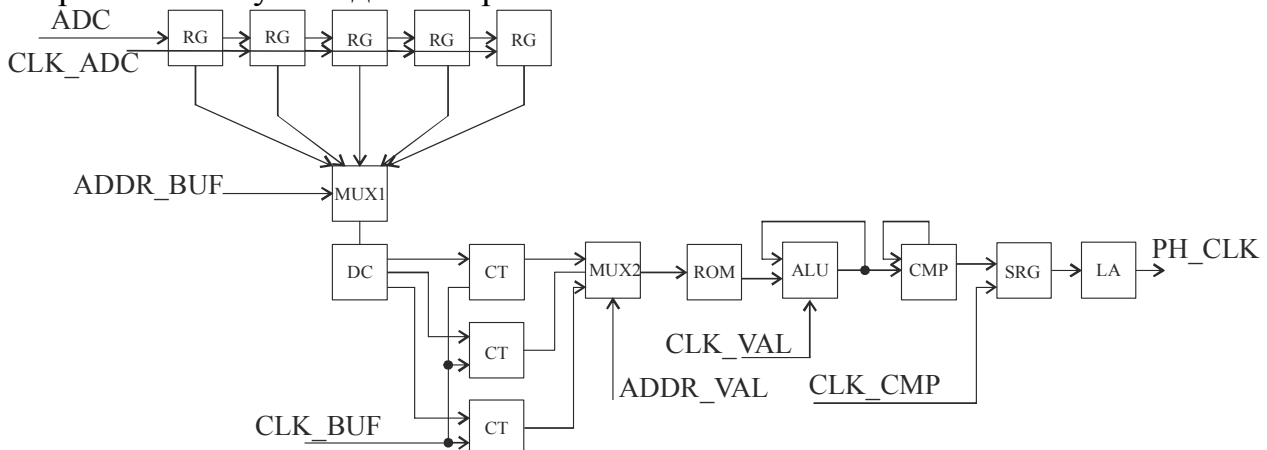


Рис. 15 – Структурна схема частини модуля ph_det формувача синхроімпульсу фази сигналу за ковзною оцінкою інформаційної ентропії

Вхідними сигналами для нього є дані, які надходять від зовнішнього АЦП синхронно із тактовим сигналом CLK_ADC. Цей сигнал зсуває вміст внутрішнього буфера, утвореного послідовною ланкою регістрів RG. По закінченні кожного такту CLK_ADC вміст буфера поелементно опитується через мультиплексор MUX1. Адреси регістрів вибираються сигналом ADDR_BUF і подаються на адресні входи мультиплексора MUX1. Значення вибраного таким чином регістра надходить на декодер DC, який в залежності від цього значення збільшує вміст одного з лічильників СТ. Після закінчення перебору всіх адрес регістрів у лічильниках буде знаходитися сумарна кількість значень, присутніх у регістрах, причому для певного значення буде відповідна сума.

Вміст лічильників містить код, пропорційний щільності ймовірності вхідного дискретизованого сигналу. Пораховані значення по черзі подаються на мультиплексор MUX2, який здійснює подачу значення вибраного лічильника на вхід таблиці ROM відповідності між кількістю, яка відповідає ймовірності, і добутку ймовірності на її логарифм. Значення таблиці формуються заздалегідь.

Визначена таким чином ентропійна оцінка подається на вхід наступного модуля, що шукає мінімуми, якими формується дискретний сигнал, синхронний за фазою із вхідним.

Загальну схему модуля фазового детектора ph_det наведено на рис. 16.

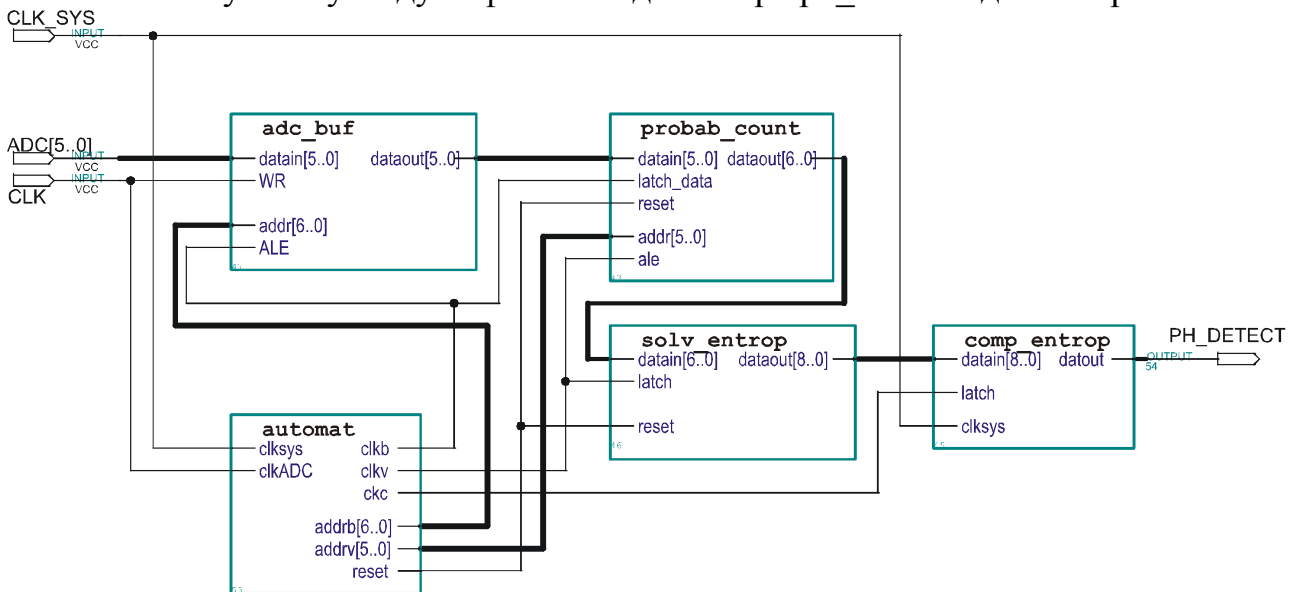


Рис. 16 – Схема модуля ph_det формувача синхроімпульсу фази сигналу за оцінкою інформаційної ентропії

Схема містить п'ять модулів. Роботою всіх модулів шляхом формування двох адресних і чотирьох синхросигналів керує модуль автоматики automat. Після визначення ентропії модуль автоматики подає сигнал на порівняння чергового значення в модуль comp_entrop, який містить компаратор поточних значень, послідовний регістр із попередніми результатами порівняння і комбінаційну схему, налаштовану на вибір коду «всі нуль, окрім молодшого».

Розроблені спецпроцесори є складовими частинами ІВС, призначеної для опрацювання сигналів при визначенні спектрального імпедансу об'єктів із

розподіленими параметрами, і в даному випадку використані при дослідженні якості протикорозійного захисту підземного трубопроводу.

У четвертому розділі на основі розроблених методів опрацювання сигналів розроблено ІВС дослідження механічних властивостей систем за їх механічним спектральним імпедансом. Механічний спектральний імпеданс системи значною мірою залежить від власних коливань об'єкта. Власні коливання визначаються його фізичними властивостями, тому дослідження значення їх частоти і, зокрема, зміни має велике значення при контролі стану об'єкта. В такому випадку спектральний імпеданс визначається із врахуванням значення цих частот. З огляду на можливі втрати в коливальній системі чи, навпаки, високу її добротність для збудження коливань використовується квазірезонансний режим збудження, при якому підтримуються коливання, сумарна амплітуда яких незмінна. Початкове збудження задається ширококутовим сигналом. Надалі аналізується сигнал відклику і на його основі формується передаточна характеристика фільтра, який модифікує спектр ширококутового збуджуючого сигналу перед повторною подачею на досліджувану ланку.

Структурну схему пристрою для збудження механічних коливань із врахуванням особливостей об'єкта зображено на рис. 17. Ширококутовий сигнал формується генератором шуму rnd. Керуючий блок вибирає коефіцієнт передачі $K = 1 - t_{OUT}$, який визначає амплітуду спектральних складових сигналу rnd. Від його значення залежить початкове зрушення із стану спокою.

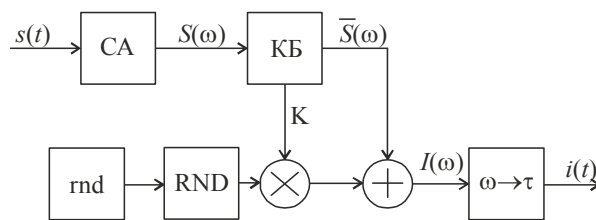


Рис. 17 – Структурна схема ІВС збудження коливань механічної системи із розподіленими параметрами

Підготовлений ширококутовий сигнал змішується із сигналом усередненого спектра $\bar{S}(k) = t_{OUT} \cdot H_k$ і у вигляді сигналу $i(t)$ подається на досліджуваний об'єкт. Механічні коливання об'єкта перетворюються у сигнал $s(t)$, який подається на спектральний аналізатор СА. Спектр $S(\omega)$ надходить на вхід керуючого блока, який шукає коефіцієнти узгодженого фільтра і усереднює спектр $\bar{S}(\omega)$ для подальшого збудження.

При підтриманні середньої амплітуди збуджуючого сигналу на одному рівні спектральні складові відклику перерозподіляються пропорційно до затухання по кожній із них. Керуючи швидкістю зміни коефіцієнтів фільтра регулюється час наростання коливань. В шумоподібному сигналі енергія спектральної смуги, яка визначає амплітуду коливання, формується хаотичними коливаннями з різними амплітудами і фазами. Тому для механічного розгону досліджуваного об'єкта на заданій частоті витрачається

час, обернено пропорційний до добротності системи та ймовірнісних властивостей джерела сигналу.

Основою підбору коефіцієнтів фільтра є виділення із сигналу відклику ознак зосередження спектральної енергії на певних частотах. З цією метою використовується усереднення у вигляді ковзної згортки сигналу відклику збуджуваного об'єкта із функцією, яка описує резонансну залежність механічних чи електричних коливних систем у частотній області.

Використовуючи описаний спосіб збудження коливаний, розроблено ІВС дослідження структури металевої деталі. Механічні коливання в деталі збуджуються натягнутою металевою струною. Імпеданс натягнутої струни залежить від властивостей всієї системи, в тому числі від властивостей деталі, тому струна є чутливим елементом.

У результаті проведених досліджень встановлено, що в складних коливальних системах власні частоти модульовані за частотою і залежать від втрат механічної енергії. Приймаючи частоту коливання першої моди за опорну, введено оцінку відхилення частот коливаний вищих мод від гармоніки першої моди за допомогою коефіцієнта приведенної частоти гармоніки (ПЧГ) згідно з формулою:

$$q_n = \frac{n \cdot \omega_1}{\omega_n}, \quad (16)$$

де n – номер моди, ω_1 – частота коливаний 1-шої моди; ω_n – частота коливаний n -ної моди. Для ідеальної натягнутої струни, кінці якої зафіксовані, даний коефіцієнт дорівнюватиме 1. Для пошуку коефіцієнта q_n було розроблено і виготовлено дослідну установку, яка складається з механічного блока, електронного блока підтримання коливаний і блока визначення коефіцієнтів відношення, приведених до частоти мод гармонік першої моди.

Загальну функціональну схему ІВС для визначення коефіцієнта q_n наведено на рис. 18. Чутливим елементом ІВС є струна 1, натягнута в полі постійного магніту 2 між двома нерухомими опорами 3, жорстко закріплених на досліджуваному взірці 4.

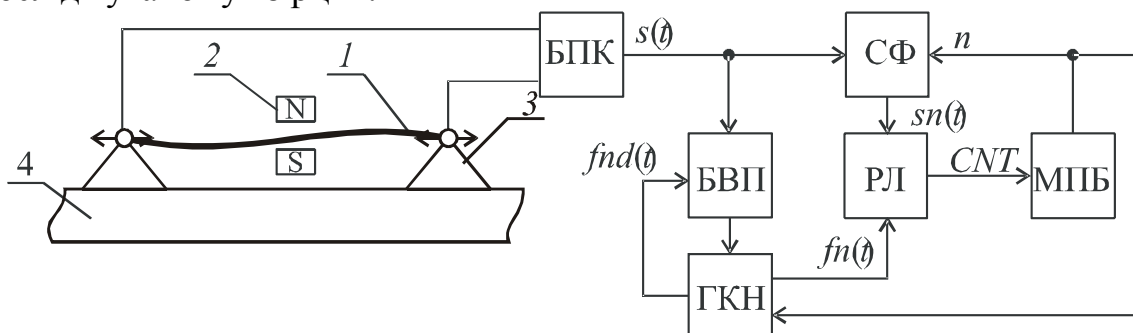


Рис. 18 – Структурна схема ІВС для визначення коефіцієнта ПЧГ

Для визначення частоти першої моди, яка модулюється за частотою згинаючими коливаннями деталі, використовується система автоналаштування частоти генератора, керованого напругою (ГКН). Основою підсистеми автоналаштування частоти ГКН є блок визначення помилки (БВП), який формується за різницею інтегральних оцінок спектральної щільності пари сигналів.

ГКН налаштовується на середину спектральної щільності першої моди $fnd(t)$ і надалі служить джерелом сигналу гармоніки першої моди $fn(t)$. Сигнал помилки налаштування формується з різниці спектральних щільностей двох сигналів, отриманих перенесенням сигналу першої моди в область низьких частот шляхом дискретизації. Дискретизація сигналу першої моди синхронізується двома сигналами, отриманими амплітудною модуляцією з сигналу ГКН і тому за частотами симетричними відносно частоти ГКН. Середина спектральної щільності першої моди знаходиться поміж частотами утворених модуляцією сигналів. Тому перенесені в область низьких частот спектральні щільності будуть рівними тільки при симетричності частот сигналів, утворених модуляцією, і частоти вхідного сигналу, а це буде тоді, коли частота ГКН буде збігатися із серединою спектральної щільності сигналу першої моди. Сигнал ГКН є синхронізуючим надалі при пошуку відношення частот.

Саме відношення шукається для частот мод коливань, які формуються із сигналу коливання $s(t)$, що надходить на смуговий фільтр (СФ) і виділяє сигнал вибраної моди $sn(t)$.

Визначення відношення частот відбувається із використанням реверсивного лічильника (РЛ), який формує дискретний сигнал, пропорційний різниці частот. Дискретне значення різниці частот служить вихідною інформацією про відхилення частоти моди і гармоніки. Цей дискретний сигнал надходить в мікропроцесорний блок (МПБ), апроксимується лінійною моделлю і використовується для пошуку відношення частот.

Таким чином, використовуючи поняття спектрального імпедансу, поширеного на довгі об'єкти із розподіленими механічними параметрами, розробивши відповідні методи опрацювання сигналів, було створено цифрову ІВС, яка дає змогу визначати втрати енергії при циклічних коливаннях, що служить інформативним параметром при визначенні стану цього об'єкта.

У п'ятому розділі з використанням розроблених методів опрацювання сигналів розроблено ІВС для дослідження електричного спектрального імпедансу електрохімічних реакцій, які виникають на поверхні обладнання при пошкодженні захисного покриття і впливають на структуру матеріалу цього обладнання.

Особливістю таких досліджень є необхідність використання широкого частотного діапазону при аналізі сигналів і тривалого часу спостереження. Формування сигналу збудження гармонійної форми в широкому діапазоні частот без застосування протипідмінних фільтрів відбувається з використанням синтезатора сигналу гармонійної форми із використанням кусково-лінійної апроксимації. При такому способі синтезу четвертина гармонійного сигналу розділяється на чотири проміжки, в межах яких відтворюється лінійною функцією, коефіцієнт якої є степенем числа 2 (рис. 19). Кожна із ділянок синтезу має свій коефіцієнт множення $k_1 - k_3$ і коефіцієнт зміщення $b_2 - b_4$.

Використання коефіцієнтів множення 4,2,1,0 дозволяє легко реалізувати множення цифровими методами на основі логічних перетворень. Відтворивши

код, який відповідає четвертині гармонійного сигналу, надалі шляхом маніпуляцій з індексами будується форма всього періоду.

Синтезований сигнал подається в досліджувану ланку. Після проходження по вимірювальній ланці сигнал відклику дискретизується АЦП і потрапляє на квадратурні суматори по струму і напрузі.

Долання домінуючої за амплітудою спектральної складової в сигналі відклику на 3 гармоніці відбувається з використанням цифрового фільтра, синхронного з генератором синтезатора. Фільтр використовує згортку сигналу відклику із прямокутним сигналом із щільністю 3, у яких відсутня третя гармоніка в спектральній щільності.

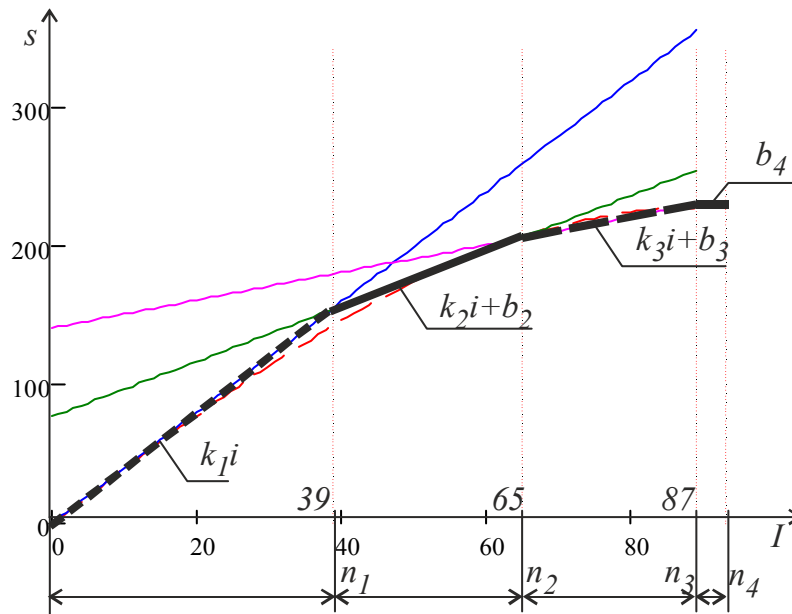


Рис. 19 – Метод синтезу четвертини періоду гармонійного сигналу кусково-лінійними функціями

Реалізація методу визначення спектрального імпедансу електрохімічної комірки проводиться за допомогою розробленого спецпроцесора, структурна схема якого представлена на рис. 20.

Синтез реалізується блоком \sin . Дискретні синтезовані значення подаються на ЦАП (DAC) і з виходу його на буфер А. Сигнал з виходу цього буфера надходить на досліджувану ланку Z . Спад напруги на ланці через буфер В надходить на вхід АЦП (ADC1). Струм через ланку Z з буфера С перетворює в напругу і подається на вхід ADC2. Дискретизовані сигнали надходять на згорткові блоки. Згорткові блоки утворені фазовими модуляторами MU0, MU90, MI0, MI90, які синхронізуються прямокутними сигналами із щільністю 3 і по фазі зсунуті на $\pi/4$. Перемножені дані надходять на вхід суматорів SU0, SU90, SI0, SI90. Таким чином реалізовано синхронне роздільне визначення комплексних значень напруги і струму. Результати виводять у вигляді квадратурних компонент для струму і напруги.

Перед початком визначення подається дискретний сигнал $start$. Після проходження заданої в NP кількості періодів сигналу робота системи припиняється і на виході $stop$ виставляється активний сигнал. Частота генерованого сигналу залежить від частоти тактового генератора G , коефіцієнта

попереднього ділення N і кількості тактів на період синтезованого гармонійного сигналу, який залежить від K .

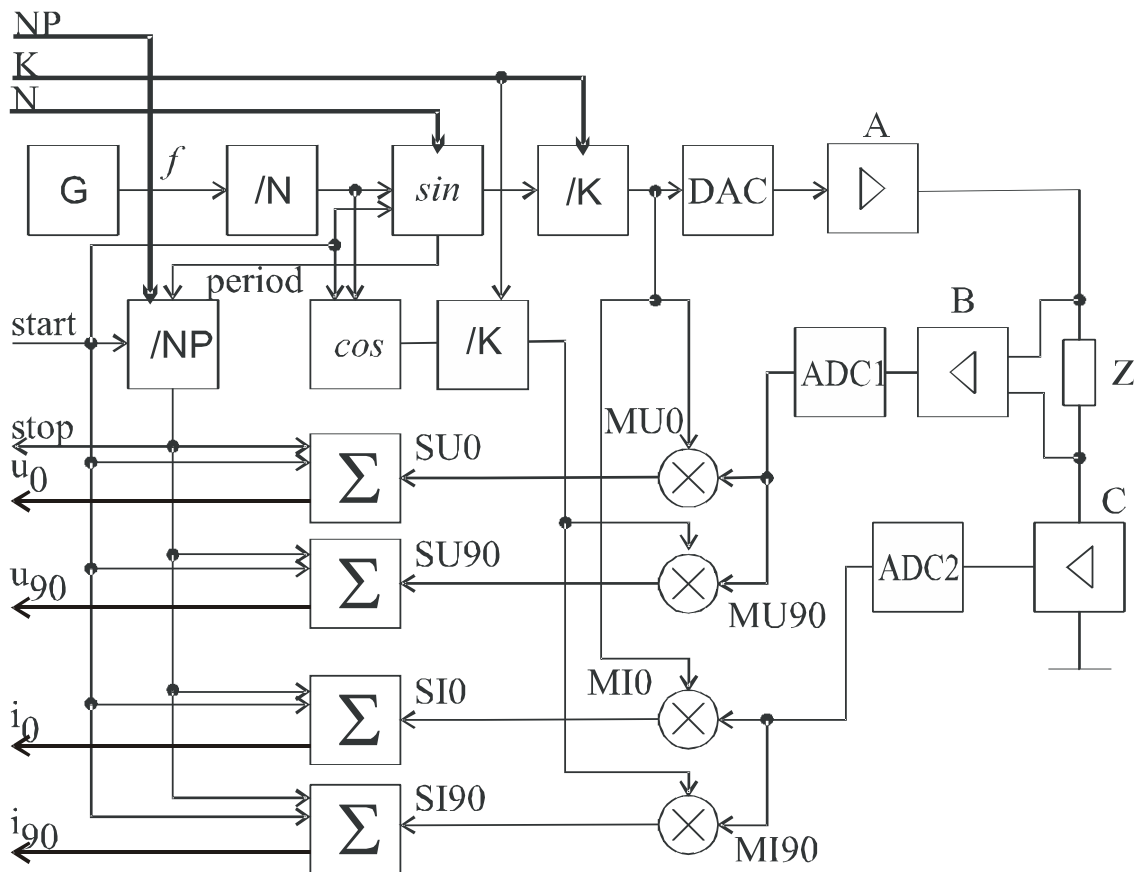


Рис. 20 – Будова спецпроцесора синтезу форми сигналу і визначення квадратурних компонент імпедансу

Результат моделювання роботи синтезатора гармонійного сигналу із синхросигналами цифрового фільтра, отриману в середовищі моделювання ModelSim, наведено на рис. 21.

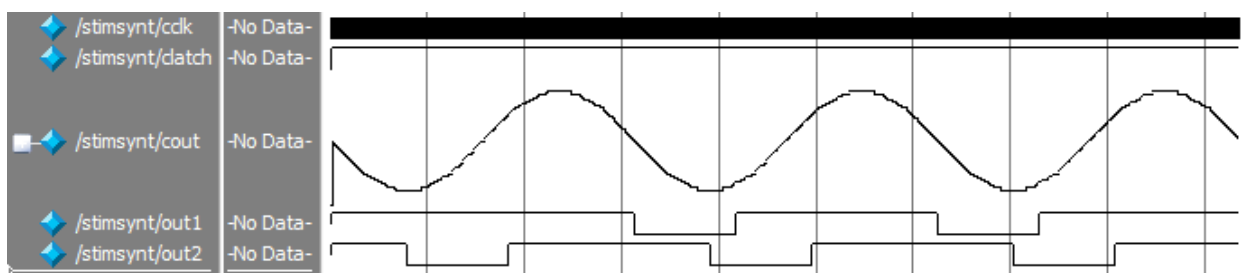


Рис. 21 – Результат моделювання роботи спецпроцесора при синтезі сигналу гармонійної форми і синхросигналів цифрового фільтра

Після застосування цифрового фільтра найбільше амплітудне значення в сигналі має третя гармоніка синтезованої частоти і її рівень менший -70дБ.

Структурну схему ІВС для вимірювання спектрального імпедансу електрохімічної комірки з використанням розробленого спецпроцесора наведено на рис. 22.

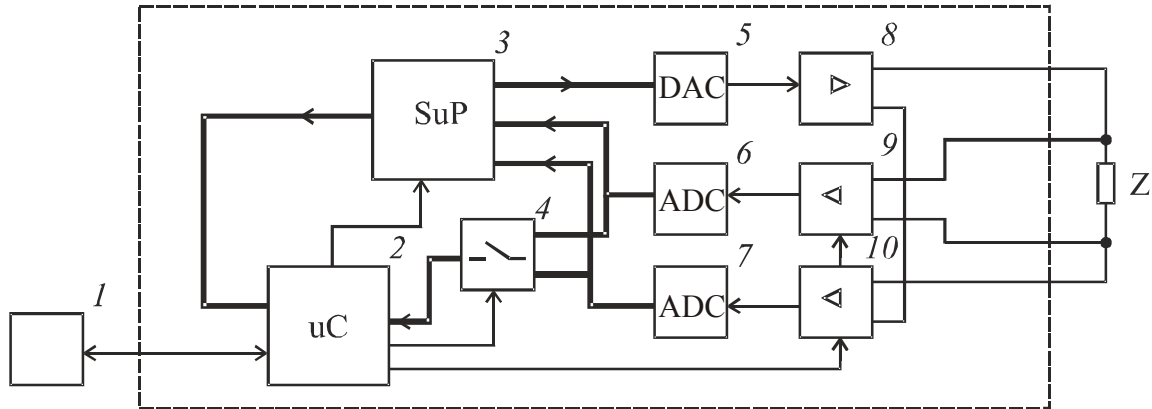


Рис. 22 – Структурна схема ІВС для визначення електричного спектрального імпедансу з використанням спецпроцесора

Режими роботи пристрою й інтерфейс із користувачем здійснює мікроконтролер 2 за допомогою блока інтерфейсу 1. Мікроконтролер 2 формує сигнали для завантаження спецпроцесора 3. Також він здійснює підбір коефіцієнтів підсилення вхідних сигналів. Для цього мікроконтролер відслідковує сигнали АЦП 6 і 7 за допомогою комутатора 4. При потребі коефіцієнт підсилення міняється в блоках буферної обробки 9 і 10. Спецпроцесор 3 формує код, що надходить на блок ЦАП 5 і на буферний підсилювач 8, який формує вихідний сигнал у вигляді струму.

Максимальна частота дослідження імпедансу визначається частотою роботи синтезатора. На формування одного періоду необхідно щонайменше 12 тактів системного синхросигналу. Мінімальна частота синтезу визначається ємністю лічильників, які формують стани синтезатора. За рахунок подальшої обробки з використанням цифрового фільтра зменшується вплив вищих непарних гармонік, тому частотна смуга дослідження без застосування протипідмінного фільтра визначається шириною смуги синтезатора.

На основі розроблених методів побудовано ІВС визначення спектрального імпедансу електрохімічної системи. Надалі ці результати використано для контролю електрохімічних процесів на поверхні підземного металевого трубопроводу, дослідження матеріалів із розвиненою площею поверхні і пошуку швидкості електрохімічної реакції на поверхні металевого трубопроводу.

У шостому розділі на основі запропонованого узагальненого підходу до оцінки відклику об'єкта на збуджуючу силу розроблено ІВС дослідження локальних відмінностей у теплопровідності металевих пластин із використанням спектрального імпедансу. Збудження теплового поля відбувається з використанням знакозмінного теплового потоку. Частота зміни теплового поля при фіксованому тепловому потоці визначається амплітудою температури поверхні нагрівання.

Періодичний температурний потік формується із врахуванням теплоємності деталі. Тому форма сигналу теплового потоку буде періодичною у вигляді спотвореної трикутної форми. Для виділення спектральної складової першої гармоніки такого сигналу використовується кореляційний фільтр, опорними сигналами якого є прямокутний біполярний сигнал зі щільністю 2 і

3. Фільтр переналаштовується на частоту формованого теплового поля, оскільки синхронний із сигналом формування сигналу збудження.

Зменшення впливу парних гармонік здійснюється фільтром, структурну схему якого наведено на рис. 23, а. Структурну схему фільтра для зменшення впливу непарних гармонік наведено на рис. 23, б.

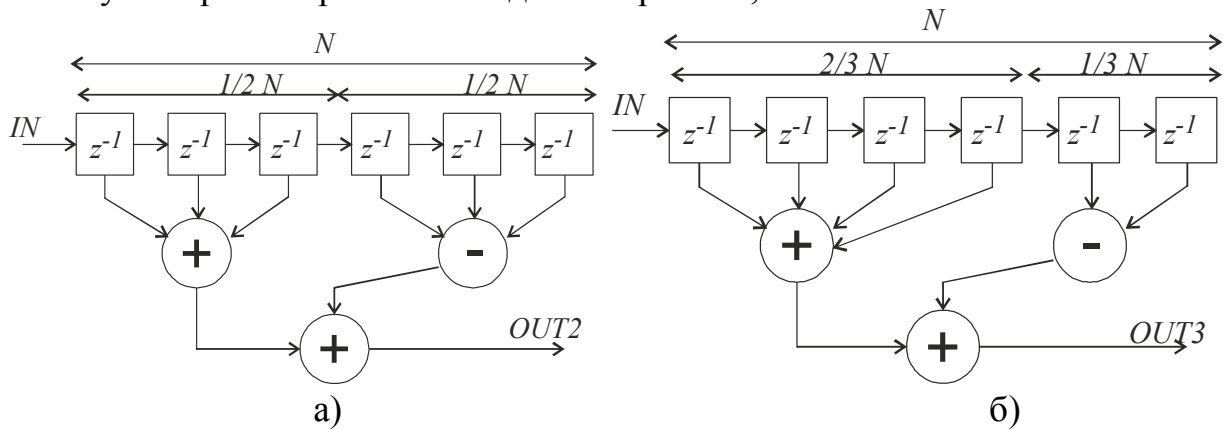


Рис. 23 – Структурні схеми виконання операцій кореляції із прямокутним сигналом: а – для додання парних гармонік, б – для додання непарних гармонік

Фільтри використовують множину дискретних значень N . У випадку додання вищих парних гармонік шукається взаємкореляційна функція із симетричним прямокутним сигналом. Додавання непарних гармонік здійснюється пошуком взаємкореляційної функції із прямокутним сигналом зі щільністю 3. Опрацювання сигналів, необхідне для виділення першої гармоніки із сигналу температурних датчиків, відбувається з використанням розробленого спецпроцесора. Схему ІВС, який використовує розроблений спец процесор, наведено на рис. 24.

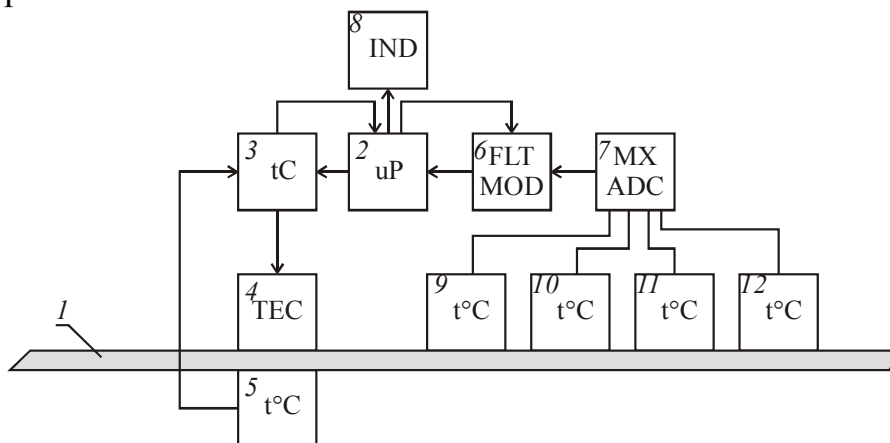


Рис. 24 – Структурна схема системи для дослідження теплового спектрального імпедансу ділянки металевої пластини

Управління вимірюванням здійснює мікропроцесор 2. Під його управлінням виставляється сигнал температури блока контролера нагрівання 3. Блок контролера нагрівання подає сигнал на термоелектроконвертор 4, який здійснює формування заданого теплового потоку. Контроль температури нагрівника здійснюється термосенсором 5. В даному випадку він встановлений на протилежній стороні досліджуваної металевої пластини 1.

Після визначення часових параметрів для формування теплового поля в заданих межах мікропроцесорний блок виставляє код періоду формованого теплового сигналу блока фільтрування і виділення амплітуди 6. Теплове поле, поширюючись по пластині, вимірюється лінійкою термосенсорів 9–12. Сигнал цих термосенсорів по черзі через блок комутації і дискретизації 7 потрапляє на вхід блока фільтрування 6 і далі на мікропроцесор. Мікропроцесор здійснює остаточне опрацювання результатів і представляє його на індикатор 8.

З огляду на складність формування знакоперемінного температурного поля було розроблено спосіб опрацювання сигналів відклику при збудженні досліджуваного об'єкта широкосмуговим температурним сигналом, у якого тепловий потік має стрибкоподібну форму. Така форма сигналу описується функцією Хевісайда. Температурний спектральний імпеданс $Z_t(\omega)$ визначається відношенням спектральних щільностей сигналів температури $\Delta T(\omega)$ і теплового потоку $Q(\omega)$. Для отримання лінійного виду спектральної щільності цього відношення визначається похідна за часом сигналу температури і теплового потоку, а вже після цього шукається спектральна щільність.

Температура представлена набором дискретних значень T_i . Коректне значення похідної із набору дискретних значень шукається після представлення цього набору аперіодичною функцією другого порядку, яка отримується апроксимацією із використанням дискретизованого сигналу температури $T_i \xrightarrow{\text{апрокс}} \Delta T_{\text{АПЕР}}(t)$, $\Delta T_{\text{АПЕР}}(t) \rightarrow \frac{dT(t)}{dt}$. Тепловий потік представлений функцією із відомою спектральною характеристикою, тому приймається, що похідна по тепловому потоку в часі є одиницею.

Таким чином, після визначення похідної температури по часу і пошуку спектральної щільності буде отримано результат, пропорційний тепловому спектральному імпедансу ділянки від точки прикладання теплового потоку до точки вимірювання температури:

$$Z_t(\omega) \leftarrow \frac{dT(t)}{dt}, \quad (17)$$

що дає змогу оцінювати з точністю до коефіцієнта пропорційності температурний спектральний імпеданс досліджуваної ділянки із використанням імпульсного джерела збудження теплового потоку.

Проведені дослідження показали, що тепловий спектральний імпеданс ділянки із пластичною деформацією суттєво відрізняється. Тому за допомогою вимірювання температурного поля в множині точок на поверхні металевій пластини в режимі нестационарного теплообміну і знаходження за їх результатами температурного спектрального імпедансу ділянки встановлюються зміни в структурі металу, які виникли внаслідок її пластичної деформації.

У сьомому розділі наведено структурні і принципові схеми вузлів ІВС та ІВС, які на основі розроблених методів здійснюють пошук спектрального імпедансу сукупності параметрів, що визначають стан металу стінки підземного металевого трубопроводу.

Наведено алгоритми функціонування та структурні схеми ІВС для визначення спектрального імпедансу ізоляційного покриття. Обґрунтовано вимоги до параметрів джерела сигналу збудження. Розроблено протоколи обміну між генератором сигналу і приймальним пристроєм.

Розроблено принципові схеми ІВС для аналізу спектрального імпедансу електрохімічних комірок. Розроблено схеми ІВС для визначення швидкості корозії (ІК-1) за зміною поляризаційного імпедансу електрохімічної реакції, призначеного для польових досліджень в автономному режимі. Наведено результати його випробовувань у порівнянні з існуючими аналогами, призначеними для лабораторних експериментів (рис. 25).

Розроблено принципові схеми ІВС для дослідження механічних властивостей деталей за аналізом коефіцієнта відношення власних частот і їх гармонік згідно з коефіцієнтом ПЧГ. Для збудження коливань в досліджуваній деталі використано металеву струну. Проведено лабораторні дослідження запропонованого методу дослідження, в результаті якого виявлено залежність між структурою металу зірця і коефіцієнтом q .



Рис. 25 – Результати випробовування розробленого ІВС для контролю швидкості корозії в порівнянні з існуючими аналогами

Розроблено принципові схеми ІВС для визначення теплового спектрального імпедансу. Наведено результати практичних досліджень теплового імпедансу між ділянками металевих зірців із різними структурними неоднорідностями, які підтвердили правильність розроблених методів.

Наведено фотографії ІВС, впроваджених у виробництво, і результати їх роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-прикладну проблему створення ІВС неруйнівного контролю елементів промислових систем в основі роботи якої є багаточастотна оцінка досліджуваного елемента, подана у вигляді спектрального імпедансу, шляхом розробки нових методів формування сигналів збудження спеціальної форми і цифрового опрацювання сигналів їх відгуків.

При цьому отримані такі основні теоретичні та практичні результати і наукові висновки

1. На основі проведеного аналізу літературних джерел і результатів лабораторних випробувань було встановлено, що внаслідок тривалої експлуатації обладнання без надмірних навантажень у металі, можуть змінюватися фізичні розміри внаслідок дії корозійних процесів чи механічного зношення; мінятися кристалічна структура металу, в тому числі змінюються параметри крихкості внаслідок дії електрохімічних процесів здебільшого за рахунок наводнення, що дало можливість вибрати інформативні методи дослідження зміни стану металу в процесі експлуатації.

2. На основі аналізу небезпек, які виникають при експлуатації підземних металевих трубопроводів, було встановлено, що найбільш вагомим чинником, внаслідок дії якого змінюються фізичний розмір і крихкість металу підземного трубопроводу, є вплив оточуючого ґрунтового електроліту, від якого метал захищає ізоляційне покриття, тому його суцільність є важливим параметром стану трубопроводу і потребує ретельного контролю шляхом визначення перехідного опору ізоляційного покриття в сукупності сторонніх параметрів, які хоч і мають малу інформативність для оцінки стану, але впливають на вимірювані електричні параметри сигналу, що супроводжують дослідження спектрального імпедансу електрохімічної системи, утвореної ділянкою поверхні трубопроводу в ґрунті на частотах від 1 Гц до 5000 Гц.

3. За рахунок розширення спектра сигналу кодовою послідовністю розроблено спосіб формування бінарного фазоманіпульованого сигналу, несучий сигнал якого має досліджувану частоту і генерується джерелом напруги, підключеним до підземного трубопроводу, та метод опрацювання сигналів, отриманих при вимірюванні розробленим спецпроцесором, розробленого на основі ПЛІС FPGA із реалізацією модулів мовою Verilog, що дало змогу, демодулюючи отриманий сигнал, усереднити сторонні завади, підвищити точність визначення амплітуди напруги вздовж трубопроводу в доступних для вимірювання місцях, будувати апроксимаційну залежність для пошуку напруги на проміжних ділянках трубопроводу і забезпечити похибку вимірювання до 1 % при дії широкосмугових завад на рівні 20 дБ.

4. На основі покадрового кореляційного аналізу синхронно-бінарно-фазоманіпульованого сигналу розроблено метод визначення затримки поширення коливань у підземному металевому трубопроводі із затуханнями і при впливі сторонніх завад, що дало можливість визначити фазовий зсув сигналу досліджуваної частоти, більший за 2π , при вимірюванні на кінцях довгої ділянки і використати отримані результати для пошуку фазового коефіцієнта поширення електромагнітної хвилі, необхідного при визначенні

комплексної напруги в проміжних точках цієї ділянки без зберігання дискретизованого сигналу в процесі вимірювання, що зменшує вимоги до об'єму цифрових сховищ.

5. На основі методу рекурсивної побудови матриці пояснюючих коефіцієнтів регресійної моделі з використанням оцінки її правильності розроблено спосіб опрацювання балансно модульованого дискретизованого сигналу, який генерується джерелом струму, підключеним до підземного трубопроводу, і складається із двох гармонійних коливань, шляхом синхронного визначення їх різниці амплітуд, що дало змогу зменшити вплив стаціонарних когерентних завад і підвищити точність визначення амплітуди струму вздовж трубопроводу на сусідніх ділянках при вимірюванні струму через поверхню трубопроводу на частотах від 1 Гц до 5000 Гц.

6. На основі теорії власних коливань фізичного і математичного маятників і з використанням широкосмугового шумоподібного сигналу розроблено метод опрацювання дискретизованих сигналів відклику коливальної системи для адаптивного підбору коефіцієнтів смугового фільтра в колі зворотнього зв'язку системи підтримання коливань, що дало можливість на прикладі натягнутої металеві струни збудити і підтримувати всі власні коливання тривалий час та підвищити точність їх визначення з роздільною здатністю 0.01 Гц в діапазоні частот від 1 Гц до 20 кГц.

7. Використовуючи теорію коливання струни і принципів формування коливань у механічних системах із розподіленими параметрами, розроблено метод визначення частот власних коливань системи, модульованих її фізичними властивостями, та аналізу співвідношення гармонік першої моди до частот вищих мод, що дало можливість розраховувати числове значення коефіцієнта, який описує ступінь втрати механічної енергії в досліджуваному взірці на різних частотах, і на основі проведених лабораторних досліджень серії взірців розробленим пристроєм встановити, що при наявності пластично деформованої ділянки у взірця коефіцієнт приймає значення до 1.002, і відповідно у взірців без ділянок із пластичною деформацією вказаний коефіцієнт на окремих гармоніках зменшувався до 0.998.

8. З використанням рекурсивного методу пошуку коефіцієнтів регресійної моделі експоненціального затухаючого коливання розроблено метод декомпозиції затухаючого коливання механічної системи, описаного дискретизованим сигналом переміщення, що дало можливість визначити параметри затухаючого коливання окремих мод механічної системи і на прикладі декомпозиції затухаючого коливання системи із натягнутою металеві струною розрахувати її власні частоти та встановити, що на третій моді частота власних коливань менша за розрахункову, а також коефіцієнт затухання менший, що свідчить про наявність у коливальній системі взірця, яка резонує в околі частоти третьої моди, що служить додатковою діагностичною інформацією про досліджувану коливальну систему.

9. Використовуючи принцип еквівалентності між тепловими і електричними полями та змінний температурний потік, розроблено метод опрацювання сигналів і спецпроцесор, який за сигналами від напівпровідникових температурних сенсорів, встановлених радіально від точки

прикладання теплового потоку, визначає температурний спектральний імпеданс між сусідніми ділянками, що дало можливість встановити наявність локальної зміни кристалічної структури металу, яка виникла внаслідок локальної пластичної деформації металевієї пластини.

10. Використовуючи теорію електрохімічних реакцій і на основі представлення кінетики електрохімічних процесів в електроліті еквівалентною електричною схемою заміщення розроблено метод формування гармонійного сигналу кусково-лінійними функціями із коефіцієнтами, пристосованими до реалізації цифровими методами, та метод опрацювання сигналу відклику досліджуваної ланки на збуджуючий сигнал, що дало можливість розробити цифрову структуру у вигляді спецпроцесора, розробленого на основі ПЛІС FPGA типу FLEX 10k, для визначення електричного спектрального імпедансу ділянки кола без застосування об'ємної таблиці дискретизованої форми сигналу в діапазоні частот від 0.001 Гц до 12 МГц та підвищило точність результату за рахунок зменшення фазових зсувів, які виникають у протипідмінних фільтрах, і спростити побудову ІВС неруйнівного контролю.

11. На основі фазової маніпуляції півперіоду гармонійного сигналу, використання перетворення Гільберта і віконного ковзного дискретного перетворення Фур'є розроблено метод оцінки амплітуди огинаючої певної спектральної складової за четвертиною її періоду в сукупному сигналі, що збільшило інформативність оцінки миттєвої амплітуди цієї складової до 4 разів і зменшило отриманий внаслідок розрахунку час наростання амплітуди огинаючої по відношенню до віконного способу спектрального аналізу при стрибкоподібній появі вибраної спектральної складової у вхідному сигналі.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Стрілецький Ю.Й. Визначення змінної складової струму в підземному трубопроводі / Ю.Й. Стрілецький, І.С. Кісіль // *Методи та прилади контролю якості*. – 2002. – № 9. – С. 46–47. *Дисертантові належить розробка структурної схеми і алгоритму роботи пристрою*

2. Стрілецький Ю.Й. Встановлення оптимальної віддалі між приймальними котушками в складі системи для вимірювання змінного струму в стінках підземних трубопроводів / Ю.Й. Стрілецький // *Методи та прилади контролю якості*. – 2006. – № 16. – С.32–33.

3. Автоматизированная многоканальная установка циклирования электрохимических ячеек / [И.М. Гасюк, В.В. Угорчук, Ю.Й. Стрилецкий и др.] // *Датчики и системы*. – 2007. – № 6. – С. 39–40. [РИНЦ]. *Дисертантові належить розробка структурної схеми і алгоритму роботи пристрою і надання результатів випробувань.*

4. Євчук О.В. Використання аналогових кодеків для наукових досліджень / О.В Євчук, В.А. Ровінський, Ю.Й. Стрілецький // *Методи та прилади контролю якості*. – 2006. – № 17. – С. 110–115. *Дисертантові належить виготовлення системи і надання результатів випробувань.*

5. Стрілецький Ю.Й. Аналіз розподілу напруженості магнітного поля в результаті протікання струму в стінках підземних трубопроводів / Ю.Й. Стрілецький, Р.Т. Боднар // *Методи та прилади контролю якості*. – 2007. –

№ 18. – С. 36–39. *Дисертантові належить розроблення і виготовлення системи, надання та аналіз результатів її випробувань*

6. Стрілецький Ю.Й. Методика і пристрій для визначення швидкості корозії / Ю.Й. Стрілецький // *Методи та прилади контролю якості*. – 2008. – № 20. – С. 55–58.

7. Стрілецький Ю.Й. Моніторинг положення осі трубопроводу / Ю.Й. Стрілецький // *Методи та прилади контролю якості*. – 2008. – № 21. – С. 48–51.

8. Стрілецький Ю.Й. Система вимірювання віддалі між точками на осі підземного трубопроводу / Ю.Й. Стрілецький // *Методи та прилади контролю якості*. – 2009. – № 23. – С. 111–115.

9. Стрілецький Ю.Й. Дослідження пасивуючих плівок на поверхнях сталевих металевих конструкцій електромагнітним методом / Ю.Й. Стрілецький, І.С. Кісіль, І.З. Лютак // *Методи та прилади контролю якості*. – 2010. – № 24. – С. 112–115. *Дисертантові належить постановка задачі та аналіз результатів випробувань.*

10. Євчук О.В. Використання графічних процесорів в задачах цифрової обробки сигналів в реальному часі / О.В. Євчук, В.А. Ровінський, Ю.Й. Стрілецький // *Методи та прилади контролю якості*. – 2010. – № 25. – С. 97–110. *Дисертантові належить постановка задачі і розробка алгоритму опрацювання даних.*

11. Костів Б.В. Безконтактний контроль стану ізоляційного покриття підземних трубопроводів з допомогою системи КІ-1 / Б.В. Костів, Ю.Й. Стрілецький, М.М. Семененко // *Методи та прилади контролю якості*. – 2011. – № 26. – С. 30–33. *Дисертантові належить розробка алгоритму роботи системи та аналіз результатів її випробувань.*

12. Євчук О.В. Особливості реалізації нелінійних опорів в системах цифрової обробки сигналів / О.В. Євчук, В.А. Ровінський, Ю.Й. Стрілецький // *Методи та прилади контролю якості*. – 2011. – № 27. – С. 91–95. *Дисертантові належить постановка задачі і розробка алгоритму опрацювання даних.*

13. Євчук О.В. Використання графічних процесорів NVIDIA для підвищення продуктивності обчислень коротких розгортки в задачах трансверсальної фільтрації / О.В. Євчук, В.А. Ровінський, Ю.Й. Стрілецький // *Наукові вісті. Галицька академія*. – 2010. – № 2. – С. 35–40. *Дисертантові належить постановка задачі і співучасть у розробці алгоритму опрацювання даних.*

14. Ровінський В.А. Використання цифрових хвильових фільтрів у задачах технічної вібродіагностики / В.А. Ровінський, О.В. Євчук, Ю.Й. Стрілецький // *Метрологія та прилади*. – 2011. – № 6. – С. 68–70. *Дисертантові належить постановка задачі і співучасть у розробці алгоритму опрацювання даних.*

15. Євчук О.В. Реалізація аналогових активних елементів керованих напругою, в системах цифрової обробки сигналів // О.В. Євчук, В.А. Ровінський, Ю.Й. Стрілецький // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. – 2012. – № 4. – С.96–101. **[РИНЦ]** *Дисертантові належить співучасть у розробці алгоритму опрацювання даних.*

16. Євчук О.В. Використання технології CUDA в задачах спектрального та частотно-часового аналізу сигналів / О.В. Євчук, В.А. Ровінський, Ю.Й. Стрілецький // *Вісник Східноукраїнського національного*

університету ім. В. Даля. – 2012. – № 10 (81). – С. 81–86. *Дисертантові належить співучасть у розробці алгоритму опрацювання даних.*

17. Стрілецький Ю.Й. Вплив відстані між паралельними трубопроводами на формування електромагнітного поля навколо них / Ю.Й. Стрілецький, О.В. Євчук, В.А. Ровінський // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2012. – №18 (189). – С. 267–276. *Дисертантові належить постановка задачі і розробка алгоритму проведення дослідження.*

18. Стрілецький Ю.Й. Цифрова обробка сигналів при дослідженні ізоляційного покриття підземних нафтогазопроводів / Ю.Й. Стрілецький, В.А. Ровінський, О.В. Євчук // Методи та прилади контролю якості. – 2013. – № 30. – С. 33–38. *Дисертантові належить постановка задачі, розробка алгоритмів проведення дослідження та аналіз їх результатів.*

19. Інформаційна технологія моделювання біполярних транзисторів хвилевими цифровими фільтрами / В.А. Ровінський, О.Ю. Фуфалько, Ю.Й. Стрілецький, О.В. Євчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 5. – С. 81–84. **[РИНЦ]** *Дисертантові належить співучасть у розробці алгоритму опрацювання даних.*

20. Стрілецький Ю.Й. Метрологічне дослідження пристрою для прецизійного вимірювання різниці температур / Ю.Й. Стрілецький, А.Г. Винничук, О.Є. Середюк // Системи обробки інформації. – 2015. – Вип. 2 (127). – С. 100–103. **[Copernicus]** *Дисертантові належить розробка структурної схеми і алгоритму роботи пристрою і надання результатів випробувань.*

21. Ровінський В.А. Розширення можливостей діагностування нафтодобувного обладнання за швидкісними характеристиками привідного електродвигуна / В.А. Ровінський, О.В. Євчук, Ю.Й. Стрілецький // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2015. – № 1 (54). – С. 65–71. *Дисертантові належить співучасть у розробці алгоритму опрацювання даних.*

22. Лютак І.З. Удосконалення методу контролю стінок трубопроводів ультразвуковим методом із застосуванням інформаційно-програмного забезпечення / І.З. Лютак, З.П. Лютак, Ю.Й. Стрілецький // Методи та прилади контролю якості. – 2015. – № 35. – С. 27–37. *Дисертантові належить співучасть у аналізі та опрацюванні даних.*

23. Striletskyi Yu. Method of studying corrosion processes of metal electrodes by surface voltage fluctuations / Yu. Striletskyi, V. Rovinskyi, O. Yevchuk // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – № 3 (9). – С. 24–29. **[Scopus]** *Дисертантові належить розробка структурної схеми, алгоритму роботи пристрою та аналіз результатів його роботи..*

24. Стрілецький Ю.Й. Використання коливань струни для збудження хвиль у металі / Ю.Й. Стрілецький // Методи та прилади контролю якості. – 2016. – № 37. – С. 79–84.

25. Стрілецький Ю.Й. Дослідження перехідного імпедансу ізоляційного покриття підземних металевих трубопроводів / Ю.Й. Стрілецький // Методи та прилади контролю якості. – 2017. – № 38. – С. 14–21.

26. Стрілецький Ю.Й. Спосіб дослідження нерівномірності температурного імпедансу металевої пластини / Ю.Й. Стрілецький // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2017. – № 2 (80), Т. 1. – С. 97–101. **[Copernicus]**

27. Стрілецький Ю.Й. Спосіб дослідження параметрів затухаючих коливань механічних систем / Ю.Й. Стрілецький, Р.Б. Дунець // *Методи та прилади контролю якості*. – 2017. – № 39. – С. 33–39. *Дисертантові належить постановка задачі, розробка алгоритму проведення дослідження та аналіз їх результатів.*

28. Стрілецький Ю.Й. Збудження механічних коливальних систем для вивчення їх властивостей із використанням спектрального імпедансу / Ю.Й. Стрілецький, Р.Б. Дунець // *Прикарпатський вісник НТШ. Число*. – 2017. – № 2 (38). – С. 123–132. *Дисертантові належить постановка задачі, розробка алгоритму проведення дослідження та аналіз їх результатів.*

29. Пат. 28731 України, МПК⁶ G01R19/00. Спосіб безконтактного визначення струмів у підземних трубопроводах і пристрій для його реалізації / Ю.Й. Стрілецький, І.С. Кісіль.– №97094501; заявл. 05.09.1997; опубл. 16.10.2000, Бюл. №5.

30. Пат. 73617 України, МПК (2012.01) G01F 3/00. Лічильник газу / О.Є. Середюк, А.Г. Винничук, Ю.Й. Стрілецький, Р.Я. Тимків, О.Р. Зелінський.– № u201205199; заявл. 27.04.12; опубл. 25.09.12. Бюл. №18.

31. Пат. 114372 України, МПК (2017.01) C25D7/04, C25D17/12, C25D19/00 Пристрій для локального формування покриттів із електроліту на довгомірних деталях / Л.Я. Роп'як, М.Й. Бурда, О.В. Рогаль, Ю.Й. Стрілецький. – № a201600557; заявл. 25.01.2016; опубл. 25.05.2017. Бюл. №10.

32. Пат. 112046 України, G01N 27/26. Пристрій для вимірювання електричного імпедансу / Ю.Й. Стрілецький, В.А. Ровінський, О.В. Євчук, С.І. Мельничук, І.М. Лазарович. – № a201512001; заявл. 03.12.15; опубл. 11.04.2016. Бюл. №7.

33. Пат. 112047 України, МПК (2016.01) G01N 17/00, G01N 27/28. Методика і пристрій для визначення швидкості корозії / Ю.Й. Стрілецький, О.В. Євчук, В.А. Ровінський. – № 201512504; заявл. 17.12.15; опубл. 11.04.2016. Бюл. №7.

34. Стрілецький Ю.И. Вариант разработки автоматизированной многоканальной установки циклирования электрохимических ячеек / Стрилецкий Ю.И., Гасюк И.М., Угорчук В.В. // *Фундаментальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах*. – Уфа, 2006 р.– С. 315.

35. Стрілецький Ю.Й. Визначення відносних переміщень підземних магістральних нафтогазопроводів в експлуатаційних умовах // *Міжнар. наук.-техн. конф. «Приладобудування-2008»*, Київ, 22–23 квітня 2008 р.: тези. – Київ, 2008. – С. 219.

36. Стрілецький Ю.Й. Вплив ґрунту на результати вимірювання струму в підземних металевих трубопроводах // *Міжнар. наук.-техн. конф. «Приладобудування-2009»*, Київ, 28–29 квітня 2009 р.: тези доп. – Київ, 2009. – С. 269–270.

37. Стрілецький Ю.Й. Дослідження посивуючих плівок на поверхні сталевих трубопроводів / Ю.Й. Стрілецький // *Міжнар. наук.-техн. конф. «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазпромислового обладнання»*, Івано-Франківськ, 29 листопада – 2 грудня, 2011 р.: тези доп. – Івано-Франківськ, 2011. – С. 235–237.

38. Стрілецький Ю.Й. Визначення зміщень підземних магістральних газопроводів в процесі їх експлуатації / Ю.Й. Стрілецький, Б.В. Костів // Міжнар. наук.-техн. конф. «Приладобудування-2010», Київ, 27–28 квітня 2010 р.: тези доп. – Київ, 2010. – С. 219.

39. Стрілецький Ю.Й. Дослідження руху ґрунтового флюїду поблизу підземних металевих трубопроводів / Ю.Й. Стрілецький // Національна наук.-техн. конф. «Неруйнівний контроль і технічна діагностика», Київ, 20–23 листопада 2012 р.: тези доп. – Київ, 2012. – С. 337–338

40. Стрілецький Ю.Й. Розроблення прецизійного пристрою для вимірювання малих перепадів температур / Ю.Й. Стрілецький, А.Г. Винничук, О.Є. Середюк // Наук.-техн. конф. молодих вчених і спеціалістів «Сварка и родственные технологии», Київ, 22–24 травня 2013 р.: тези доп. – Київ, 2013. – С. 185.

41. Тодорів В.І. Дослідження активності іонів у розчинах електролітів ґрунтового флюїду / В.І. Тодорів, Ю.Й. Стрілецький // Наук.-техн. конф. студентів і молодих вчених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання», Івано-Франківськ, 26–27 листопада 2013 р.: тези доп. – Івано-Франківськ, 2013. – С. 174.

42. Стрілецький Ю.Й. Оцінка втрати механічних властивостей металу після тривалої експлуатації / Ю.Й. Стрілецький, М.М. Липчук, З.П. Лютак // Міжнар. наук.-техн. конф. «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання», Івано-Франківськ, 25–28 листопада 2014 р.: тези доп. – Івано-Франківськ, 2014. – С. 84.

43. Підвищення точності контролю товщини металу безеталонним методом / [З.П. Лютак, Ю.Й. Стрілецький, Д.В. Нестерук та ін.] // Міжнар. наук.-техн. конф. «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання», Івано-Франківськ, 25–28 листопада 2014 р.: тези доп. – Івано-Франківськ, 2014. – С. 79.

44. Стрілецький Ю.Й. Особливості визначення коефіцієнта теплопровідності металеві пластина / Ю.Й. Стрілецький, В.А. Ровінський // Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання», Івано-Франківськ–Яремче, 23–28 травня 2016 р.: тези доп. – Івано-Франківськ, 2016. – С. 31–33.

45. Стрілецький Ю.Й. Дослідження температурного імпедансу пластично-деформованих ділянок металу при неруйнівному контролі / Ю.Й. Стрілецький, О.Є. Середюк // Національна наук.-техн. конф. «Неруйнівний контроль і технічна діагностика», Київ, 22–24 листопада 2016 р.: тези доп. – Київ, 2016. – С. 190–192.

46. Стрілецький Ю.Й. Використання імпедансу для опису властивостей об'єкта / Міжнар. наук.-практ. конф. «Прикладні науково-технічні дослідження», Івано-Франківськ, 5–7 квітня 2017 р.: тези доп. – Івано-Франківськ, 2017. – С. 80.

47. Стрілецький Ю.Й. Спосіб формування множини оціночних сигналів для дослідження функціонального простору об'єкта / Ю.Й. Стрілецький, В.А. Ровінський // Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні технології та

комп'ютерне моделювання», Івано-Франківськ, 15–20 травня 2017 р.: тези доп. – Івано-Франківськ, 2017. – С. 4–7.

48. Стрілецький Ю.Й. Використання широкосмужової модуляції сигналів при дослідженні електричного імпедансу / Ю.Й. Стрілецький // Міжнар. наук.-техн. конф. «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання», Івано-Франківськ, 14–16 листопада 2017 р.: тези доп. – Івано-Франківськ, 2017. – С. 19–20.

49. Стрілецький К.Р. Обробка сигналів при томографічних дослідженнях структури ґрунтових масивів за допомогою сигналів із розширеним спектром / К.Р. Стрілецький, Ю.Й. Стрілецький // Всеукр. наук.-практ. конф. студентів і молодих вчених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання», Івано-Франківськ, 15–16 листопада 2017 р.: тези доп. – Івано-Франківськ, 2017. – С. 70.

50. Школяр А.А. Дослідження пластичних властивостей металевої пластини за частотами мод натягнутої над нею струни / А.А. Школяр, Ю.Й. Стрілецький // Всеукр. наук.-практ. конф. студентів і молодих вчених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання», Івано-Франківськ, 15–16 листопада 2017 р.: тези доп. – Івано-Франківськ, 2017. – С. 82.

АНОТАЦІЇ

Стрілецький Ю. Й. Методи та засоби опрацювання сигналів при дослідженні спектрального імпедансу елементів промислових систем. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2018.

У дисертації започатковано нові та розвинуто вже відомі теоретичні і методологічні засади в області цифрового опрацювання сигналів у комп'ютерних системах неруйнівного контролю, зокрема компонентах спектрального аналізу масивів дискретизованих даних, компонентах формування завадостійких сигналів збудження і їх опрацювання в інформаційно-вимірювальних каналах.

Запропоновано методи опрацювання дискретизованих вимірювальних сигналів, що формуються в результаті взаємодії контрольованого середовища із зовнішнім збуджуючим сигналом, на основі чого визначається спектральний імпеданс середовища як відношення спектральних щільностей опрацьованих сигналів. Розвинено теорію спектрального аналізу дискретизованого сигналу шляхом рекурсивної побудови регресійної моделі сигналу у вигляді лінійної комбінації гармонійних сигналів.

На основі запропонованих методичних підходів реалізовано готові технічні рішення у вигляді спецпроцесорів, які дають можливість створювати спеціалізовані інформаційно-вимірювальні системи неруйнівного контролю із більшою інформативністю.

Ключові слова: спектральний імпеданс, спектральна щільність сигналу, лінійна регресія, кореляційний аналіз, кореляційний фільтр, цифровий синтез сигналу, множина спектральних оцінок, тепловий імпеданс.

Striletskyi Yu. Y. Signal Processing Methods and Means in Spectral Impedance Investigation of Industrial Systems Elements. – Manuscript. Thesis for Sc.D (Doctor of Technical Sciences) degree by specialty 05.13.05 – Computer Systems and Components. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

The thesis launched new and developed already known theoretical and methodological principles in the field of digital signal processing in computerized systems of non-destructive testing, including components of spectral analysis of sampled data arrays, components of noise-proof excitation signal generation and their processing in the information-measuring channels necessary for propagation a generalization approach to the creation of new means of non-destructive control of industrial objects.

Processing methods of discrete measurement signals, which are formed as a result of interaction of a controlled medium with external excitatory signal, are proposed. Using these methods the spectral impedance of the medium is determined as the ratio of spectral densities of processed signals obtained in the form of excitation and response. The theory of spectral analysis of discrete signal is developed by recursive construction of regression signal model in the form of linear combination of harmonic signals, which made it possible to increase the accuracy of frequency components representation, reducing influence of the discreteness in time domain.

Presentation of response signal from physical object in form of a regression model was used for designing the method of determining parameters of spectral component in the noisy signal by recursive analysis of interaction of extraneous spectral components with a synchronous pair of harmonic excitation signals.

Signal description in form of regression model constructed using the values of the sampled signal obtained during free vibrations of physical objects was used to reproduce the time variations of the amplitude of the individual spectral components and to increase the informativeness of signal representation which is necessary for the investigation of mechanical properties of objects. The proposed method of reproduction of one period of a separate spectral component by its fragment increased the informativeness of the estimation of its amplitude in the aggregate sampled signal.

The developed method of exciting oscillations in a physical system by use of frequency selective feedback allowed identifying the characteristic frequencies of the investigated mechanical object and diagnosing by their ratio the damages associated with energy absorption during cyclic deformation. Propagation of concept of spectral impedance to assess the thermal properties of metal and application of digital methods for processing signals obtained during the measurement of heat flows in the nonstationary mode allowed to develop a method for detecting the local change in the heat conductivity of the metal parts that arose as a result of damage.

Based on the proposed methodical approaches technical solutions are realized in the form of special processors that make it possible to create specialized information-measuring systems of non-destructive control with greater informativity.

The special processors are designed for signal processing for reproducing the shape of noise-distorted signal and its synchronous demodulation, the search for small phase angles of noisy signals, digital synthesis of the harmonic waveform and its subsequent transformation in order to improve spectral purity and for processing of periodic signals obtained from thermal field transformation into an electrical signal.

Thus, a methodological and hardware basis for the use of spectral evaluation of the properties of industrial objects in the tasks of non-destructive control was created.

Key words: spectral impedance, spectral density of a signal, linear regression, correlation analysis, correlation filter, digital signal synthesis, spectral estimates of signal, thermal impedance

Стрилецкий Ю. И. Методы и средства обработки сигналов при исследовании спектрального импеданса элементов промышленных систем. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.05 – Компьютерные системы и компоненты. – Национальный университет «Львовская политехника» Министерства образования и науки Украины, Львов, 2018.

В работе предложены новые и развиты уже известные теоретические и методологические основы в области цифровой обработки сигналов в компьютерных системах неразрушающего контроля, в частности компонентах спектрального анализа массивов дискретизированных данных, компонентах формирования помехоустойчивых сигналов возбуждения и обработки сигналов откликов в информационно-измерительных каналах.

Разработаны методы обработки дискретизированных измерительных сигналов, формируемых в результате взаимодействия контролируемой среды с внешним возбуждающим сигналом, на основании чего определяется спектральный импеданс среды как отношение спектральных плотностей обработанных сигналов. Развита теория спектрального анализа дискретизированного сигнала путем рекурсивного построения регрессионной модели сигнала в виде линейной комбинации гармонических сигналов.

На основе предложенных методических подходов реализованы готовые технические решения в виде спецпроцессоров, позволяющих создавать специализированные информационно-измерительные системы неразрушающего контроля с большей информативностью.

Ключевые слова: спектральный импеданс, спектральная плотность сигнала, линейная регрессия, корреляционный анализ, корреляционный фильтр, цифровой синтез сигнала, множество спектральных оценок, тепловой импеданс.