

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Саміли Андрія Петровича

«Структурний та функціональний синтез радіоелектронних засобів імпульсної спектроскопії матеріалів з квадрупольними ядрами атомів»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій

Актуальність теми роботи. Тенденція розвитку радіотехнічних пристроїв та інтегральної електроніки, застосування високопродуктивних алгоритмів обробки сигналів ядерного квадрупольного резонансу (ЯКР) забезпечує можливість створення апаратури спостереження та реєстрації ядерних резонансних процесів у досліджуваних речовинах малого об'єму та маси, що має теоретичну та практичну цінність.

Розроблення експериментальних методів імпульсної Фур'є та релаксаційної спектроскопії ЯКР з метою дослідження внутрішньо молекулярної структури твердих речовин та вивчення їх фізико-хімічних властивостей є надзвичайно важливою задачею в області фізичного експерименту. Важливою практичною задачею експериментальних методів імпульсної Фур'є та релаксаційної спектроскопії є дистанційне виявлення вибухових та наркотичних речовин.

Зауважу, що особливе місце серед методів радіоспектроскопії займає метод ЯКР, а саме з одного боку, цей вид спектроскопії забезпечує можливість отримувати інформацію про тонкі деталі фізики і кристалохімії твердих тіл шляхом вивчення квадрупольних взаємодій між ядрами та їх електронним оточенням. З іншого боку, із застосуванням техніки ЯКР можна досліджувати динамічні процеси (наприклад, дифузію атомів, характер провідникових властивостей, коливання фрагментів ґратки) за допомогою вимірювань релаксаційних параметрів.

Важливим чинником реалізації радіоелектронних засобів імпульсної спектроскопії це підвищення функціональної складності і ступеня інтеграції ЯКР спектрометрів, що необхідно вирішувати шляхом підвищення енергетичної ефективності високочастотного передавача імпульсного радіоспектрометра ЯКР, розробки нових методів формування тестових сигналів та методів їх обробки.

Отже, тема дисертаційної роботи Саміли А.П. є актуальною і своєчасною, особливо з точки зору створення радіотехнічних засобів імпульсної спектроскопії ЯКР із покращеними сигнальними та енергетичними характеристиками. Актуальність напрямку дослідження підтверджується великою кількістю наукових праць вітчизняних та закордонних вчених присвячених даній темі.

Автором дисертації було виконано значний обсяг науково-дослідних робіт, як на замовлення організацій, так і за державним замовленням: «Розробка портативного цифрового багатоімпульсного спектрометра ЯКР для дослідження сенсорних властивостей, структури, дефектності шаруватих та органічних напівпровідників» (2017 р., номер державної реєстрації №0117U001148), а також у відповідності до поточних та перспективних планів наукової роботи кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича: «Фізико-технологічні проблеми

радіотехнічних пристроїв та засобів телекомунікацій і інформаційних технологій» (2014-2015 рр., номер державної реєстрації №0111U000183); «Методи та засоби передавання, оброблення і зберігання інформації в інфо-комунікаційних системах» (2016-2017 рр., номер державної реєстрації №0116U001433).

Наукові та практичні результати дисертаційної роботи впроваджені: у Львівському Науково-виробничому підприємстві “Карат” для дослідження структури кристалів напівпровідникових матеріалів та епітаксійних структур при розробленні технологій отримання новітніх матеріалів; в Чернівецькому відділенні Інституту проблем матеріалознавства імені І.М. Францевича Національної академії наук України для визначення за допомогою спектрів ЯКР співвідношення політипів у кристалах InSe і GaSe при розробленні технологій модифікації напівпровідникових кристалів АЗВ6; в Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича у навчальних курсах «Генерування і формування сигналів» та «Засоби передавання інформації в системах технічного захисту інформації».

Оцінка рівня наукової новизни. Центральним методом, за якими автором пропонується виконувати структурний та функціональний синтез радіоелектронних засобів імпульсної спектроскопії матеріалів з квадрупольними ядрами атомів є метод підвищення точності відтворення форми широкосмугових спектрів ЯКР шляхом подавлення перехідного процесу в приймальній котушці вхідного пристрою спектрометра, який, на відміну від існуючих, забезпечує послаблення впливу на приймальний тракт паразитної завади з частотою імпульсів зондування, що уможливило синтез структури портативного когерентного радіоспектрометра ЯКР.

Запропонований автором високочутливий метод реєстрації сигналів ЯКР, відрізняється від існуючих рознесенням опорної частоти синхронного детектора і частоти заповнення імпульсу збудження із забезпеченням синхронізації їх початкових фаз, що забезпечило синтез конфігураційної структури програмованого кристалу для реалізації чутливого цифрового приймача сигналів ЯКР з шириною смуги до 1 МГц та амплітудами меншими 10 мкВ у діапазоні частот ЯКР 0,5 – 50 МГц.

Цікавим є також запропонований метод формування когерентних із частотою-носієм синтезатора імпульсів збудження з довільними часовими інтервалами в діапазоні від 100 нс до 10 с за рахунок формування послідовностей кодів миттєвої лінійно-змінної фази сигналу 48-бітним акумулятором фази, який відрізняється від відомих мінімізацією часу затримки сигналу до 20 нс в структурі програмованого кристалу, що уможливило синтезування структури формувача імпульсних послідовностей для радіоспектроскопічних та релаксаційних методик в ЯКР.

Пропозиція автора щодо методу керування імпульсним спектрометром ЯКР, що відрізняється від відомих перехідними та вихідними функціями синтезованої машини кінцевих станів цифрового апаратно-програмного ядра, є досить вдалою, особливо з метою автоматизації радіофізичних експериментів шляхом формування та передавання інформаційних пакетів даних на пристрої виконання портативного імпульсного радіоспектрометра за допомогою зовнішнього інтерфейсу з високими швидкостями передачі даних.

З метою покращення ймовірності безпомилкової реєстрації імпульсного відгуку ядерної системи автором запропонований метод експрес ідентифікації спектрів ЯКР, який відрізняється від відомих застосуванням шумового збудження та проведенням статистичного кореляційного аналізу усереднених ітерацій крос-кореляційних функцій псевдовипадкових послідовностей і сигналів спаду вільної індукції за Пірсоном.

Важливою є модель однокотушкового когерентного Фур'є-радіоспектрометра в якій ЯКР-підсистема описується передавальною функцією, що є Фур'є-образом імпульсного відгуку мультирезонансної коливної системи. Це дало змогу вперше здійснити параметричну ідентифікацію перетворень сигналу вільної індукції в радіочастотному тракті імпульсного Фур'є-радіоспектрометра при синусоїдальному та шумовому збудженнях ЯКР у матеріалах з квадрупольними ядрами атомів. Крім того, запропонований портативний радіоспектрометр з покращеними сигнальними та енергетичними характеристиками також відповідає заявленим рівням наукової новизни.

Практична цінність результатів дисертаційного дослідження полягає у їх при безпосередньому застосуванні у подальшому розвитку імпульсного методу виявлення сигналів ЯКР із застосуванням швидкого перетворення Фур'є сигналів спінової індукції. Структурні та функціональні схеми, запропоновані та досліджені в дисертаційній роботі Саміли А.П. є обґрунтованими, а на їх основі запропоновано низку практичних рішень, зокрема – щодо побудови та виготовлення функціонально завершених генераторів гармонічних сигналів у діапазоні частот до 75 МГц з низьким рівнем спектральних складових вищих порядків для радіотехнічних та телекомунікаційних пристроїв на базі ПЛІС EP4CE15E22C8 та цифро-аналогового перетворювача AD9772AST із вбудованими інтерполяційними фільтрами. Розроблений алгоритм функціонування та структура формувача імпульсних послідовностей на базі ПЛІС EP4CE15E22C8 можуть бути використані при розробленні нових багатоімпульсних методів для систем реєстрації подвійних ЯКР-ЯМР і ЯКР-ЯКР резонансів, багатовимірної ЯКР спектроскопії, а також ЯКР-томографії напівпровідникових приладів твердотільної електроніки.

Виготовлений лабораторний макет енергоєфективного ширококутового передавача з робочим діапазоном частот 1 – 50 МГц та середньою вихідною потужністю 400 – 500 Вт може бути використаним при розробленні ЯКР детекторів вибухових та наркотичних речовин. Крім того, елементи конструкції та застосована елементна база запропонованого передавача уможливають його інтеграцію в портативні телекомунікаційні системи бездротового наземного зв'язку КХ та УКХ діапазонів як альтернативи більш дорогим закордонним аналогам. Цифрова система керування імпульсним Фур'є радіоспектрометром ЯКР лабораторного типу з реалізацією її головних функціонально-алгоритмічних методів на базі ПЛІС Cyclone EP1C12F324 може бути застосована як універсальна апаратна база для розроблення користувальницьких інтерфейсів радіотехнічних пристроїв.

Запропонована апаратно-програмна реалізація компактної системи збору даних (СЗД) для імпульсного спектрометра ЯКР, апаратні рішення якої базуються на основі мультипротокольного USB-245FIFO перетворювача, забезпечує передавання даних зі швидкістю до 480 Мб/с по двох незалежних каналах в одному апаратному інтерфейсі, що дозволяє її використання у вимірювальній системі на ПК з обмеженим числом USB портів

(ноутбук, планшетний ПК).

Синтезовано віртуальний інструмент LabVIEW для візуалізації та оброблення даних сигналів ядерної спінової індукції на базі засобів графічного об'єктно-орієнтованого програмування. Застосування запропонованої СЗД в портативних радіоспектрометрах ЯКР дає змогу суттєво знизити вартість лабораторного обладнання для проведення радіофізичних експериментів у галузях ШПФ-ЯКР та релаксаційної спектроскопії.

Формування синхроімпульсу запуску уможливорює використання розробленої СЗД у режимі багатократного експерименту з метою цифрового накопичення і усереднення даних. Показником високої інформативності запропонованої СЗД є візуалізація складних мультиплетних спектрів ЯКР з шириною смуги до 7,5 МГц та роздільною здатністю за частотою ≈ 200 Гц.

Використовуючи розроблені засоби імпульсної спектроскопії експериментально встановлено, що в напівпровідникових кристалах GaSe та InSe спостерігаються лінійні залежності частоти ЯКР від температури в інтервалі 20 – 130 °С (з точністю $\pm 0,05$ °С) та однобічного тиску в напрямку оптичної вісі c в діапазоні 50 – 100 кг/см². Також досліджено можливість визначення напрямку дії та оцінки величини індукції слабкого (0 – 10 Гс) зовнішнього магнітного поля унаслідок розщеплення резонансних ліній ЯКР ⁶⁹Ga та ¹¹⁵In. Це уможливорює розроблення чутливих і високочастотних ЯКР сенсорів на основі запропонованого портативного радіоспектрометра з покращеними сигнальними та енергетичними характеристиками.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації, їх достовірність. Ступінь обґрунтованості отриманих у дисертації наукових положень і висновків є достатнім та підтверджується проведенням досліджень із коректним застосуванням відомих теоретичних та чисельних методів, співпаданням теоретичних результатів з їх експериментальними даними та практичним ефектом, який підкріплений актами впровадження. Основні наукові положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи базуються на загальновідомих фундаментальних положеннях теорії ймовірності та математичної статистики, теорії системного аналізу, теорії радіотехнічних систем, сучасні методи математичного моделювання, а отже є достовірні. Отримані теоретичні і практичні результати не мають розбіжностей з відомими публікаціями обраного автором напрямку досліджень, органічно доповнюючи результати з літературних джерел.

Повнота викладу матеріалів досліджень у опублікованих працях.

Основні результати досліджень опубліковані у 46 наукових працях. Наукові результати і положення дисертації доповідалися на 19-ти міжнародних і державних науково-технічних конференціях та наукових семінарах (Мінськ, Львів, Чернівці, Одеса, Київ, Славське тощо).

Всього опубліковано 23 наукові статті у періодичних виданнях. Крім того, майже всі матеріали конференцій та 9 статей входять до наукометричної бази Scopus, решта публікацій індексуються іншими наукометричними базами, такими, як Index Copernicus тощо. Всього опубліковано та апробовано 19 матеріалів тез доповідей (згідно переліку).

Крім того основні положення та результати дисертаційних досліджень висвітлені автором у монографії.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності.

Матеріал дисертаційної роботи викладено логічно і продумано, з чітким розумінням мети та методів дослідження. Дисертаційна робота має логічну структуру і складається з переліку умовних скорочень, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і 5 додатків. Загальний обсяг роботи складає 330 сторінок друкарського тексту, із них 148 рисунків, 10 таблиць, список використаних джерел із 223 найменувань, 5 додатків на 33 сторінках. Додатки містять електричні принципи схеми, коди програмного забезпечення, акти впровадження результатів дисертаційної роботи, а також список праць автора.

У **вступі** наведена загальна характеристика роботи, обґрунтовано актуальність теми досліджень, сформульовані мета та завдання досліджень, розкритий зв'язок роботи з науковими планами та програмами, вказана новизна та практична цінність отриманих результатів, відзначений особистий внесок автора, наведені дані про апробацію та практичне впровадження, публікації та структуру роботи.

Перший розділ дисертаційної роботи «Ядерний квадрупольний резонанс та методи неруйнівного контролю параметрів первинних матеріалів електронної техніки» (стор. 42-87) присвячений аналізу сучасного стану розвитку методів радіоспектроскопії ядерного квадрупольного резонансу, серед широкого загалу яких під об'єкт дослідження дисертаційної роботи підпадають імпульсні методи, що базуються на основі перетворення Фур'є сигналів спаду вільної індукції.

У **другому розділі** дисертації «Моделі радіотехнічних систем імпульсного когерентного спектрометра ЯКР та параметрична ідентифікація сигнальних перетворень в його трактах» (стор. 88-133) розглядається моделювання функціональних систем для імпульсного спостереження ЯКР, пропонуються нові принципи побудови радіочастотних трактів спектрометра та метод ідентифікації багатокomпонентних спектрів при гармонійному та шумовому збудженні резонансу. Визначений перспективне розв'язання проблеми експрес ідентифікації частот ЯКР застосуванням сигналів, ширина частотної смуги яких не залежить, або слабо залежить від тривалості імпульсу збудження. Проведено комп'ютерне моделювання з використанням накопичення і усереднення отриманих результатів з метою підтвердження ефективності шумового збудження ЯКР.

У **третьому розділі** роботи «Методи програмних модулів для конфігурування пристроїв на основі синтаксису моделювання динамічних режимів логікових структур» (стор. 134-176) представлено конфігураційні структури розроблених на основі програмованих логікових інтегральних схем цифрового обчислювального ядра та системи керування радіоспектрометром, розглянуто особливості генерування гармонічних коливань для синтезу цифрових сигналів на основі вбудованих апаратних систем. Розглянуто особливості запропонованого методу формування багатоімпульсних послідовностей та його реалізація на основі багатофункціонального програмно керованого цифрового синтезатора частоти з можливістю швидкісної частотної та фазової модуляції.

Четвертий розділ «Схемотехнічна реалізація моделей функціональних модулів радіоспектрометра та їх експериментальні дослідження» (стор. 177-207) присвячений практичній реалізації апаратних модулів радіоспектрометра та результатам їх експериментальних досліджень, що підтверджують основні теоретичні положення роботи.

У п'ятому розділі «Апаратно-програмна реалізація системи збору даних для імпульсного спектрометра ЯКР» (стор. 208-231) розглянуто структуру та принцип реалізації системи збору даних радіоспектрометра. З використанням засобів графічного об'єктно-орієнтованого програмування синтезований віртуальний інструмент LabVIEW візуалізації та оброблення сигналів ядерної спінової індукції. Наведено особливості реалізації системи збору даних на мікросхемі мультипротокольного двонаправленого USB↔245FIFO перетворювача FT2232H зі швидкістю передавання даних до 480 Мб/с.

В шостому розділі «Апробація радіоелектронних засобів імпульсної спектроскопії шляхом експериментальних досліджень ЯКР у шаруватих напівпровідниках» (стор. 232-269) наведені результати експериментальних досліджень властивостей шаруватих напівпровідникових кристалів GaSe та InSe, отриманих з використанням розроблених методів імпульсної радіоспектроскопії ЯКР.

Додатки (стор. 298-330) до дисертації містять функції переходів та виходів машинного автомату системи керування спектрометром ЯКР, схеми електричні принципові апаратних функціональних модулів спектрометра ЯКР, віртуальний інструмент системи збору даних радіофізичних експериментів, акти впровадження результатів дисертаційної роботи, а також список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.

Дисертаційна робота є завершеною науково-дослідною працею, яку виконано та оформлено у відповідності з вимогами до кваліфікаційних наукових праць.

Дисертаційна робота та автореферат викладені логічно й послідовно, термінологія використовується коректно й за змістом відповідає паспорту заявленої спеціальності 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій.

Дисертаційна робота Саміли А.П. не містить положень, які виносилися на захист його кандидатської дисертації.

Зміст автореферату ідентично розкриває основні положення дисертації, її наукові результати, які отримані особисто здобувачем. Автореферат оформлено із дотриманням необхідних вимог.

Зауваження до роботи.

Загалом оцінка дисертаційної роботи здобувача Саміли А.П. є позитивною, проте слід зазначити деякі недоліки та зауваження:

1. В п.1.5 при розгляді теоретичних основ імпульсного методу спостереження ЯКР йдеться мова про розфазування спінів під час спаду вільної індукції. В п.2.1, коли автор проводить розроблення імітаційної моделі прямого імпульсного методу спостереження ЯКР, у формулі 2.1 відсутня інформація про фазу спектральних компонент. Також на с.121 сказано, що при наявності градієнта напруженості високочастотного поля в межах зразка в процесі формування сигналу відгуку спостерігається «розпливання» сумарного вектора намагніченості спінів, що приводить до розширення сигналу резонансу і зниження амплітуди його інтенсивності. Чи відображене розширення смуги внаслідок такого недоліку конструкції котушки в формулі 2.1?

2. На с.30 йдеться мова про "дистанційне виявлення небезпечних речовин". На якій відстані це можна робити, враховуючи, що рівень завад в просторі буде значно вищий за

рівень сигналу відгуку?

3. В розділі 2 приведено опис математичних та імітаційних моделей радіотехнічних систем імпульсного когерентного спектрометра ЯКР та параметрична ідентифікація сигнальних перетворень в радіочастотних трактах. Результати моделювань, як правило, розміщують у 3,4,5 розділах, а 2-3 розділи описують математичні моделі, методи та їх модифікації.

4. Для підвищення енергетичної ефективності дисертантом запропоновано режим імпульсного зміщення робочих точок транзисторів вихідного та проміжного каскадів передавача. Зрозуміло, що після зміни значення напруги зміщення на керуючому електроді активного елемента необхідний певний інтервал часу для встановлення заданого робочого режиму. Чи враховувалась ця обставина при розробленні методу імпульсного зміщення?

5. У висновках до третього розділу в пункті 3 дисертант пише, що перевагами цифрових синтезаторів частот, в яких перетворення фаза-амплітуда реалізоване на основі методу CORDIC, є найнижчий рівень нелінійних спотворень генерованого сигналу та підвищення точності форми сигналу за рахунок збільшення кількості ітерацій алгоритму, але не вказує числових значень.

6. В розділі 6 не вказано за допомогою яких методів або приладів проводилося калібрування сенсорів температури, тиску та магнітних полів.

7. В роботі зустрічаються деякі стилістичні та граматичні неточності, зокрема: с.99 другий абзац, не узгоджена фраза "... малою концентрацією резонують ядер..."; рис.1.19 русизм "ехо" замість "луна"; с.192 четвертий абзац, має бути слово "впливу", натомість "вплаву"; на графіку залежності ширини смуги частот від тривалості імпульсу збудження (рис. 2.6) сітка частот вісі ординат повинна бути в кілогерцах, а не в герцах; на с.226 є неточності в означенні змінних до формули, що викликає труднощі з її сприйняття.

До суті дисертаційної роботи зауважень немає. Загальна оцінка – висока. Робота є оригінальною. Відзначені недоліки не є визначальними і не впливають на загальний результат роботи.

Загальний висновок.

Дисертаційна робота Саміли Андрія Петровича «Структурний та функціональний синтез радіоелектронних засобів імпульсної спектроскопії матеріалів з квадрупольними ядрами атомів», відповідає вимогам чинного положення про «Порядок присудження наукових ступенів», затвердженого Кабінетом Міністрів України. Робота є завершеною науковою працею, в якій представлено розв'язання науково-прикладної проблеми покращення сигнальних характеристик (чутливості, точності, ширини реєстрованого спектру) із одночасним збереженням енергетичних характеристик (інтенсивності радіочастотного випромінювання) радіоелектронних засобів імпульсної спектроскопії ЯКР шляхом синтезу їх структурних, конфігураційних та принципових електричних схем. За актуальністю обраної теми, оригінальністю, обсягом та рівнем виконаних досліджень, повнотою вирішення наукових і практичних завдань, новизною, цінністю та ступенем обґрунтування отриманих результатів, висновків і практичних рекомендацій, дисертаційна робота відповідає вимогам до докторських дисертацій, а за своїм змістом – паспорту спеціальності 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій.

Автореферат достатньо ідентично розкриває зміст дисертаційної роботи. Результати роботи достатнім чином опубліковано та апробовано.

Отже, дисертаційна робота відповідає вимогам п. 9, 10, 12 положення про «Порядок присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, а її автор, Саміла Андрій Петрович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук,
професор кафедри телекомунікацій
і комп'ютерно-інтегрованих технологій
Хмельницького національного університету



Полікаровських О.І.

Підпис Полікаровських О.І. засвідчую
Учений секретар
Хмельницького національного університету



Тебляшкіна Л.І.