

211/2100
вiд 14.02.2018р.

67-72-02/1
15.02.2018

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Саміли Андрія Петровича "Структурний та функціональний синтез радіоелектронних засобів імпульсної спектроскопії матеріалів з квадрупольними ядрами атомів", представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій

Актуальність теми дисертаційного дослідження. Розвиток теоретичних аспектів побудови систем спостереження і реєстрації надслабких сигналів резонансу в матеріалах з квадрупольними ядрами атомів та їх практична реалізація є актуальним науковим напрямом, що уможливує ефективне розроблення сучасних радіотехнічних пристроїв радіоспектроскопії, спінтроніки, магніто-резонансної діагностики, напівпровідникової сенсорики (прецизійні давачі температури, тиску, слабких магнітних полів). Особливо актуальним є застосування ядерного квадрупольного резонансу (ЯКР) у сфері національної безпеки – виявлення вибухових та наркотичних речовин малих об'ємів у неметалевих контейнерах.

В силу підвищення жорсткості вимог до стабільності, точності, впливу дестабілізуючих факторів на технічні параметри сучасних радіотехнічних засобів, потребують подальшого розвитку і удосконалення методи спостереження ЯКР. Забезпечення інваріантності параметрів радіоелектронних засобів імпульсної спектроскопії матеріалів з квадрупольними ядрами атомів – одна з важливих вимог пов'язана з їх мініатюризацією, енергетичними та вартісними характеристиками. Це накладає ряд обмежень на існуючі аналітичні методи їх синтезу і підвищує актуальність досліджень у напрямку розвитку теоретичних положень.

Метою дисертаційної роботи Саміли А. П. є синтез структурних, конфігураційних та принципових електричних схем радіоелектронних засобів імпульсної спектроскопії ядерного квадрупольного резонансу із покращеними сигнальними та енергетичними характеристиками. Саме мінімізація тривалості експерименту та підвищення енергетичної ефективності є одними з ключових вимог до сучасних портативних пристроїв для радіофізичних досліджень, адже уможливить їх ефективне використання на безпілотних літальних апаратах.

Актуальність представленої роботи Саміли А.П. підтверджується також тим, що вона виконана у відповідності до планів наукової тематики кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету, зокрема, державної бюджетної тематики «Розробка портативного цифрового багатоімпульсного спектрометра ЯКР для дослідження сенсорних властивостей, структури, дефектності шаруватих та органічних напівпровідників» (2017-2018 рр., номер державної реєстрації №0117U001148), у якій автор задіяний як відповідальний виконавець.

Тому наведені в дисертаційній роботі методи 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, безумовно є **актуальними**.

Обґрунтованість та достовірність отриманих результатів дисертаційної роботи Саміли А. П. досягається коректним використанням опробованих фізичних і математичних методів дослідження та підтверджується експериментально.

Аналіз структури та змісту дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

У вступі до основного змісту дисертаційної роботи 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.

В першому розділі проведено аналіз 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.

В другому розділі дисертації розглядається моделювання функціональних систем для імпульсного спостереження ЯКР, пропонуються нові принципи побудови радіочастотних трактів спектрометра та метод ідентифікації багатокомпонентних спектрів при гармонійному та шумовому збудженні резонансу. Розроблено імітаційну модель імпульсного методу спостереження ядерного квадрупольного резонансу на основі базової структури однокотушкового когерентного Фур'є-радіоспектрометра без перетворення несучої частоти. Проведено комп'ютерне моделювання сигнальних перетворень сигналу вільної індукції та спінової луни в радіочастотних трактах імпульсного радіоспектрометра при синусоїдальному та шумовому збудженні резонансу.

У третьому розділі 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.

Проведено параметричне оцінювання ефективності алгоритмів генерування цифрових періодичних сигналів на основі вбудованих апаратних систем, розроблено цифрову систему керування імпульсним Фур'є радіоспектрометром ЯКР лабораторного типу.

У четвертому розділі дисертації розглянута практична реалізація апаратних модулів радіоспектрометра та результати їх експериментальних досліджень, що підтверджують основні теоретичні положення роботи.

Проведено розрахунок та розроблено лабораторний макет енергоефективного ширококутового передавача, що може бути використаний при вивченні ізотопів з квадрупольними моментами ^{14}N , ^{35}Cl , ^{63}Cu , ^{69}Ga , ^{71}Ga , ^{113}In , ^{115}In та інших.

У п'ятому розділі дисертації 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. Застосування запропонованої системи в портативних радіоспектрометрах ЯКР дає змогу суттєво знизити вартість лабораторного обладнання для проведення радіофізичних експериментів у імпульсній та релаксаційній спектроскопії.

Показником високої інформативності запропонованої системи збору даних є візуалізація складних мультисплетних спектрів ЯКР з шириною смуги до 7,5 МГц та роздільною здатністю за частотою ≈ 200 Гц.

У шостому розділі дисертації приведені результати експериментальних досліджень властивостей шаруватих напівпровідникових кристалів *GaSe* та *InSe*, отриманих з використанням розроблених методів імпульсної радіоспектроскопії ЯКР.

Наукові результати роботи. Серед отриманих основних результатів варто відзначити наступні:

1. Вперше запропоновано метод підвищення точності відтворення форми широкосмугових спектрів ЯКР шляхом пригнічення до 100 дБ 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.

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

3. Вперше запропоновано 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.

4. Вперше запропоновано метод керування імпульсним спектрометром ЯКР, що відрізняється від відомих перехідними та вихідними функціями синтезованої машини кінцевих станів цифрового апаратно-програмного ядра. Це надає змогу автоматизувати радіофізичні експерименти за рахунок формування та передавання інформаційних пакетів даних на пристрої виконання портативного імпульсного радіоспектрометра за допомогою зовнішнього інтерфейсу зі швидкістю до 10 Мбіт/с.

5. Вперше запропоновано 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, що дало змогу покращити ймовірності безпомилкової ресстрації імпульсного відгуку ядерної системи.

6. Набула подальшого розвитку 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 тракці імпульсного Фур'є-радіоспектрометра при синусоїдальному та шумовому збудженнях ЯКР у матеріалах з квадрупольними ядрами атомів.

7. Набув подальшого розвитку метод підвищення енергетичної ефективності високочастотного широкосмугового передавача радіоспектрометра за рахунок забезпечення режиму імпульсного зміщення активних елементів проміжного і вихідного каскадів, внаслідок чого потужності розсіювання для радіоімпульсів шпаруватістю $10 \leq S \leq 1000$ знизилися на 45,8 – 98,39 %.

8. Набув подальшого розвитку метод сканування ЯКР у видовжених зразках із застосуванням передавально-приймальної котушки сідлоподібної форми, який відрізняється від відомих обмеженням робочої зони сканування зразків до 28,12% від повного об'єму котушки. Це дало змогу зменшити об'єм сканування монокристалічних злитків до $12 \times 18 \times 10 \text{ мм}^3$.

9. Вперше встановлено, що в напівпровідникових кристалах *GaSe* та *InSe* спостерігається лінійні залежності частоти ЯКР від температури в інтервалі 20 – 130 °C (з точністю $\pm 0,05$ °C) та одновісного 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 уможливило реалізацію чутливих і високоточних ЯКР сенсорів на основі запропонованого портативного радіоспектрометра з покращеними сигнальними та енергетичними характеристиками.

Практична значимість результатів роботи

1. Запропонований метод експрес-ідентифікації спектрів ЯКР, що полягає у збудженні резонансу короткими імпульсами з шумовим заповненням та статистичному обробленні крос-кореляційних функцій ПВП та СВІ, може ефективно застосовуватись в імпульсних спектрометрах ЯКР з ШПФ на частотах, що не виходять за межі робочого діапазону частот приймача спектрометра.

2. Розроблені принципова схема та конфігураційна структура ПЦСЧ на базі ПЛІС EP4CE15E22C8 та цифро-аналогового перетворювача AD9772AST із вбудованими інтерполяційними фільтрами уможливають виготовлення функціонально завершених генераторів гармонічних сигналів у діапазоні частот до 75 МГц з низьким рівнем спектральних складових вищих порядків для радіотехнічних та телекомунікаційних пристроїв і систем.

3. Алгоритм функціонування та структура формувача імпульсних послідовностей на базі ПЛІС EP4CE15E22C8 може бути використаний при розробленні нових багатоімпульсних методик для систем реєстрації подвійних ЯКР-ЯМР і ЯКР-ЯКР резонансів, багатовимірної ЯКР спектроскопії, а також ЯКР-томографії напівпровідникових приладів твердотільної електроніки.

4. Лабораторний макет енергоефективного широкосмугового 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.

5. 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 інтерактивних меню та користувальницьких інтерфейсів радіотехнічних пристроїв категорії «Смарт» шляхом модифікації структури машинного автомату та інтеграції необхідних функціональних модулів.

6. Запропонована апаратно-програмна реалізація компактної 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).

7. 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.

8. 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.

9. Використовуючи запропоновані 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 одночасного 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.

Повнота висвітлення результатів у наукових працях. Новизна та актуальність наукових результатів дисертаційної роботи підтверджуються 46 науковими працями, з них: 1 монографія у співавторстві; 15 статей у наукових журналах та збірниках наукових праць, що включені до Переліку наукових фахових видань України; 8 статей у наукових періодичних виданнях інших держав; 19 тез та матеріалів доповідей на конференціях.

5 наукових статей та 3 тезисні доповіді проіндексовано у міжнародній наукометричній базі WEB OF SCIENCE, 8 наукових статей та 3 тезисні доповіді проіндексовано у міжнародній наукометричній базі Scopus, 6 наукових статей проіндексовано у міжнародній наукометричній базі Index Copernicus.

Отримано три патенти України на корисну модель. Аналіз внеску автора в публікації з питань, висвітлених в дисертації, показав, що внесок А.П. Саміли є вирішальним.

ЗАГАЛЬНІ ЗАУВАЖЕННЯ ДО РОБОТИ

1. Потребує уточнення питання відповідності сигнальних («чутливість, точність, ширина рєєстрованого спектру» згідно текстів дисертації та автореферату) та енергетичних («інтенсивність радіочастотного випромінювання») характеристик радіоелектронних засобів імпульсної спектроскопії при формулюванні автором науково-прикладної проблеми, яка була розв'язана в роботі.

2. В дисертаційній роботі відсутня математична формалізація постановки наукового завдання дослідження, що ускладнює надання об'єктивної оцінки отриманих автором нових наукових результатів.

3. Потребує більш ретельної аргументації доведення достовірності отриманих автором окремих наукових результатів. Деякі результати, наведені у частині експериментальних досліджень (стор. 202-205, стор 228-230 тексту дисертації) не порівнювалися з розрахунковими даними (ні своїми, ні даними інших фахівців).

4. Дисертація не зовсім вдало структурована. Має місце нерациональний розподіл матеріалу досліджень по розділах. Зокрема, перший розділ, на мою думку, перенасичений оглядовим матеріалом, а структурному та функціональному синтезу радіоелектронних засобів присвячений лише один розділ.

5. В другому розділі дисертації представлені результати комп'ютерної параметричної ідентифікації сигнальних перетворень в трактах радіоспектрометра, зокрема спектрограма ЯКР, отримана при збудженні резонансу імпульсами зондування з шумовим заповненням (стор. 117-119; рис. 2.17-2.19 тексту дисертації). З тексту дисертації не зрозуміло, чи має даний результат експериментальне підтвердження.

6. В третьому розділі дисертації представлено конфігураційні структури програмованих логікових інтегральних мікросхем (рис. 3.13, 3.18, 3.19, 3.21, 3.22, 3.24 дисертації), проте не приводяться описи їх структурних одиниць та топологічні карти конфігурування програмованого кристалу. На мою думку, було б доцільним розглянути можливість реалізації цих структур у виді оригінальних спеціалізованих мікросхем.

7. Потребує пояснення, яким чином автором вирішено проблему затримки проходження сигналів на програмованому кристалі, що є актуальним при створенні швидкісних паралельних магістральних каналів зв'язку між конфігураційними одиницями.

8. У тексті автореферату та дисертації мають місце некоректні надання деяких аналітичних залежностей (наприклад, в тексті автореферату - стор. 18 (формула відношення сигнал/шум), стор. 21 (залежність частоти сигналу на виході гетеродину від опорної тактової частоти) та надаються загально відомі співвідношення, які не має сенсу наводити (наприклад вирази (2.8), (2.9) тексту дисертації).

9. У тексті дисертації та автореферату присутні окремі граматичні помилки та стилістичні неточності, а також при введенні позначень не завжди наводиться їх зміст.

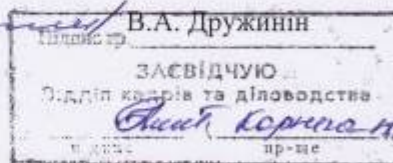
Вказані зауваження не мають принципового характеру і не впливають на загальну позитивну оцінку роботи. Загальний науковий рівень дисертації, безумовно, високий; новизна, достовірність, наукове та практичне значення отриманих результатів не викликають сумнівів. Стиль викладення в дисертації відрізняється логічністю та обґрунтованістю.

ВИСНОВОК. За актуальністю теми, обсягом виконаних досліджень, новизною, ступенем обґрунтованості наукових результатів та практичною цінністю рекомендацій дисертаційна робота Саміли Андрія Петровича є структурованою, цілісною, завершеною науково-дослідною працею.

Автореферат повністю висвітлює зміст дисертації, її мету та наукову новизну. Дисертація та автореферат оформлені у відповідності до вимог МОН України і відповідають паспорту спеціальності.

Представлена дисертаційна робота Саміли Андрія Петровича «Структурний та функціональний синтез радіоелектронних засобів імпульсної спектроскопії матеріалів з квадрупольними ядрами атомів», відповідає вимогам пунктів 9, 10, 12 положення про «Порядок присудження наукових ступенів» Кабінету Міністрів України, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри радіоприймання
та оброблення сигналів
Національного технічного університету
України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»



Підпис професора Дружиніна В.А. засвідчую.

Учений секретар Вченої ради
Національного технічного університету
України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»
кандидат філософських наук, доцент



А.А. Мельниченко