

УДК 621.396.621.5

Імітаційне моделювання цифрового квадратурного приймача сигналів ядерного квадрупольного резонансу

Саміла А. П.¹, Гресь О. В.¹, Русин В. Б.¹, Розорінов Г. М.², Архїєєва О. Г.²

¹Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

²Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

E-mail: a.samila@chnu.edu.ua

Розроблення надійних методів дистанційного виявлення малих концентрацій резонуючих ядер є на даний час актуальною задачею, вирішення якої потребує розв'язку менш об'ємних конкретних задач, зокрема із залученням спектроскопії ядерного квадрупольного резонансу (ЯКР). Аналіз інваріантності методів спостереження ЯКР, які ґрунтуються на дії потужних радіочастотних імпульсів збудження на досліджуваній зразок із послідовним застосуванням швидкого перетворення Фур'є сигналів спаду вільної індукції (СВІ) для отримання резонансних спектрів, дозволяє зробити висновок, що у більшості випадків детектування забезпечується перенесенням резонансного спектру в діапазон низьких частот. При виявленні сигналів СВІ виникають деякі труднощі, пов'язані із застосуванням квадратурного детектування. Однією із ключових проблем при цьому є підвищення чутливості вхідного пристрою та приймального тракту радіоспектрометра. Розроблено структуру цифрового квадратурного приймача сигналів ЯКР на основі технології програмно-визначених радіосистем (SDR) та принципу прямого оцифрування сигналу – Digital Down-Converter (DDC), що уможливило суттєве зменшення числа каскадів аналогового тракту. Цифрове оброблення сигналу СВІ відбувається у два етапи. Перший етап передбачає зниження на порядок частоти дискретизації сигналів, отриманих з виходів помножувачів, другий – фільтрацію компонент вищих порядків. Проведено синтез децимуючих та компенсаційних фільтрів радіоприймального тракту, частотні характеристики яких отримані шляхом розрахунку коефіцієнтів в MATLAB FDATool. Шляхом імітаційного MATLAB Simulink моделювання сигнальних перетворень в запропонованому приймальному тракті, встановлено, що застосування прямого оцифрування сигналу спаду вільної індукції дозволило істотно скоротити довжину аналогової частини приймача, а отже, зменшити до -100 дБ рівень шумів та позасмугових спектральних складових в діапазоні частот від 1 МГц до 50 МГц. В імітаційну модель SDR приймача інтегровано алгоритм на основі принципу чотириетапних фазових циклів CYCLOPS, що забезпечує зменшення квадратурних відбивань до 1 %.

Ключові слова: імітаційна модель; квадратурне детектування; приймальний тракт; радіозв'язок з програмованими параметрами компонентів; радіоспектрометр; цифрові фільтри; ядерний квадрупольний резонанс; ЯКР

DOI: [10.20535/RADAP.2019.76.37-43](https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.76.37-43)

Вступ

Дослідження фізичних властивостей речовин з використанням імпульсного електромагнітного випромінювання набуло широкого поширення в оптичній і радіохвильовій спектроскопії. Імпульсна Фур'є-спектроскопія ядерного квадрупольного резонансу (ЯКР) ґрунтується на збудженні резонансу потужними радіочастотними δ -подібними імпульсами та використанні приймальної апаратури високої чутливості [1, 2].

Методика детектування сигналів спаду вільної індукції (СВІ) потребує ґрунтовного аналізу, оскільки від її реалізації залежить точність візуалізації

складних резонансних спектрів, особливо якщо це стосується багатоімпульсних експериментів. Огляд алгоритмів детектування сигналів ЯКР, зроблений науковцями Лундського університету (Швеція) свідчить про необхідність покращення низки параметрів детекторів спінової індукції [3]. Один з варіантів реалізації детектора сигналів ЯКР описаний в роботі [4], автори якої наводять блок-схему спектрометра на базі програмованої логічної інтегральної схеми (ПЛІС) для цифрового накопичення сигналів відгуку та подальшого перетворення Фур'є. Для одержання задовільного значення амплітуди сигналу відгуку авторами застосовано усереднення 10000 циклів вимірювань, що на жаль, суттєво збільшує

час реєстрації сигналу. На сучасному етапі розвитку інтегральної схемотехніки значну увагу також приділяють розробленню компактних пристроїв з малими масо-габаритними показниками. В роботах [5, 6] запропоновані малогабаритні пристрої для реєстрації ЯКР, однак потужність передавача занадто низька (5 Вт) для ефективного збудження резонансу, особливо при малих концентраціях резонуючих ядер, що негативно відображається на відношенні сигнал/шум, незважаючи на наявність чутливого приймача сигналів спінової індукції. Саме тому важливим є удосконалення методів покращення відношення сигнал/шум. Оpubліковані в спеціальному виданні НАТО (серія «Наука для миру і безпеки») [7] результати досліджень, присвячених резонансним методам виявлення вибухових та інших заборонених речовин свідчать про високу зацікавленість передових країн та міжурядових організацій, зокрема Північноатлантичного альянсу.

З викладеного вище випливає, що розроблення надійних методів дистанційного виявлення малих концентрацій резонуючих ядер є на даний час актуальною задачею, вирішення якої потребує розв'язку менш об'ємних конкретних задач, зокрема із залученням ЯКР — спектроскопії. Однією із ключових проблем при цьому є підвищення чутливості вхідного пристрою та приймального тракту радіоспектрометра.

Метою даної роботи є розроблення імітаційної моделі приймального тракту радіоспектрометра, в якій для реалізації квадратурного детектора з системою фільтрації та пригнічення квадратурних відбивань вибрана технологія радіозв'язку з програмованими параметрами компонентів (РППК) [8].

1 Вибір методики детектування ЯКР

Аналіз інваріантності методів спостереження ЯКР, які ґрунтуються на дії потужних радіочастотних імпульсів збудження на досліджуваний зразок із послідовним застосуванням швидкого перетворення Фур'є сигналів СВІ для отримання резонансних спектрів, дозволяє зробити висновок, що у більшості випадків детектування забезпечується перенесенням резонансного спектру шириною Ω в НЧ діапазон [1–6].

Застосування швидкого перетворення Фур'є призводить до виникнення певних труднощів при встановленні тактової частоти для забезпечення синхронного детектування ω_0 . Безумовно, правильно було б вибрати ω_0 всередині резонансного спектру Ω (рис. 1 а), що уможливить використання для перетворення Фур'є тільки однієї спектральної складової $\omega_0 \pm \Omega/2$.

Іноді сигнали ЯКР реєструють з використанням методу, що ґрунтується на виборі ω_0 на границі

робочого інтервалу Ω (рис. 1 б) [9]. При цьому, амплітуда зареєстрованих сигналів матиме один знак (наприклад для смуги $\omega_0 + \Omega$), проте переналаштування частоти ЯКР забезпечить неефективний резонансний відгук та призведе до зниження чутливості. Іноді для вирішення даної проблеми застосовують окремі частоти збудження і детектування резонансу, що часто є технічно складним рішенням.

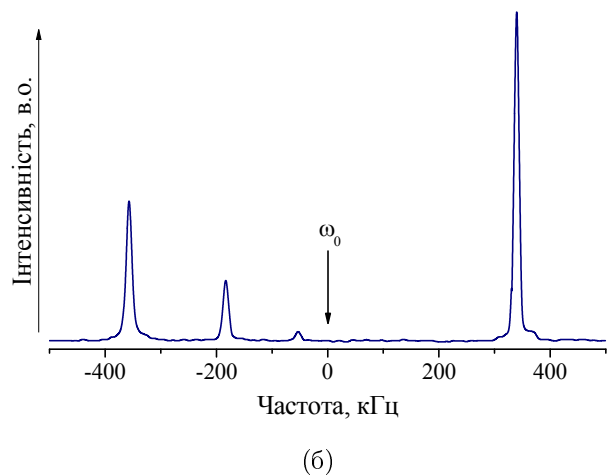
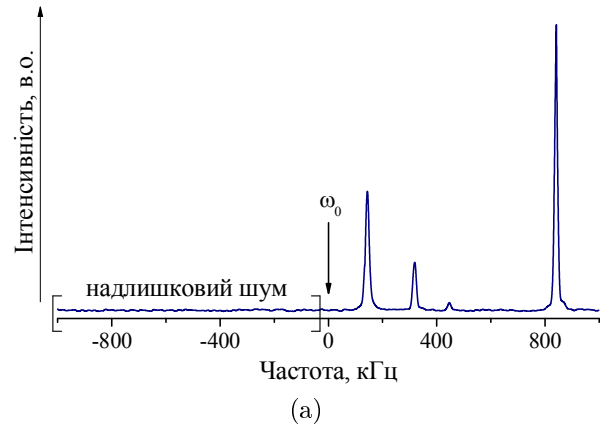


Рис. 1. Налаштування частоти ω_0 детектора у разі спостереження ЯКР імпульсним методом: (а) в центральній частині частотного діапазону Ω ; (б) на краю частотного діапазону Ω .

2 Імітаційне моделювання приймального тракту радіоспектрометра, розробленого за принципом прямого оцифрування сигналу

На рис. 2 зображена імітаційна модель ВЧ приймача імпульсного спектрометра ЯКР, в якій для реалізації квадратурного детектування, фільтрації та пригнічення квадратурних відбивань вибрана технологія РППК. Радіочастотний тракт побудований за принципом прямого оцифрування сигналу — Digital Down-Converter (DDC), що уможливило сут-

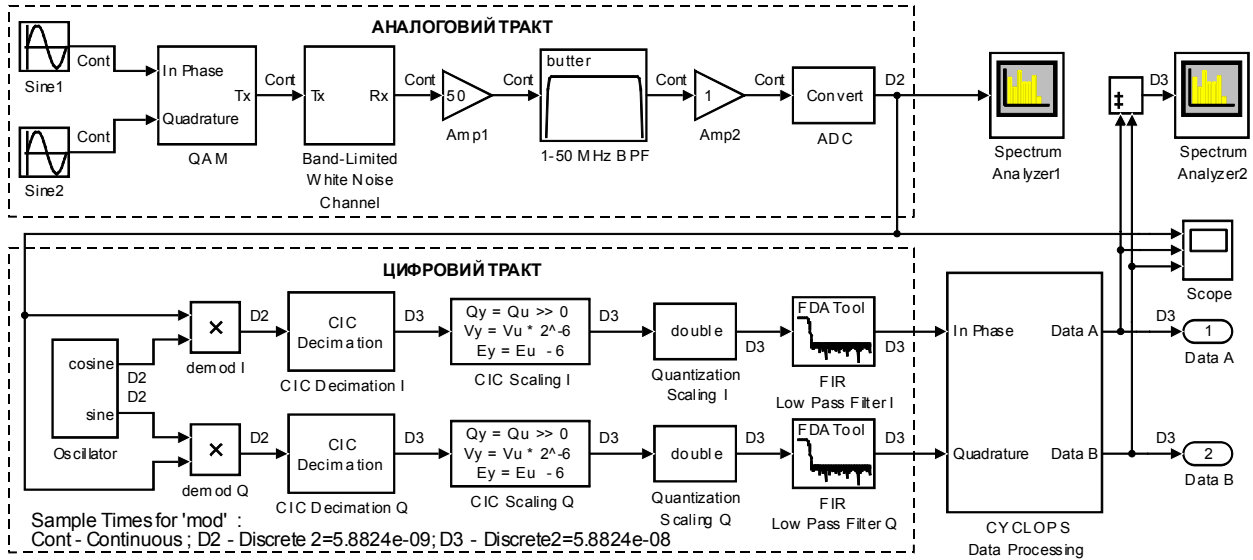


Рис. 2. Імітаційна модель приймального тракту радіоспектрометра ЯКР.

тево зменшити число каскадів аналогового тракту [10].

Імітаційне моделювання приймального тракту радіоспектрометра проведено в середовищі MATLAB Simulink. Тестовий сигнал з несною частотою 30 МГц та огинаючою, що є сумою гармонічних складових — 400 кГц і 800 кГц

$$s(t) = a(t)\cos(\Phi(t)) = a(t)\cos(\omega_0 t + \varphi(t)) \quad (1)$$

можна представити дійсною частиною комплексного сигналу $z(t)$ [11]:

$$z(t) = a(t)\cos(\omega_0 t + \varphi(t)) + j \cdot a(t)\sin(\omega_0 t + \varphi(t)) = z_m(t)\exp(j\omega_0 t), \quad (2)$$

з огинаючою:

$$z_m(t) = a(t)\exp(j \cdot \varphi(t)) = a(t)\cos(\varphi(t)) + j \cdot a(t)\sin(\varphi(t)) = I(t) + jQ(t). \quad (3)$$

В даному випадку модуляція ґрунтується на перемноженні огинаючої $z_m(t)$ на комплексну частоту $\exp(j\omega_0 t)$. Математичну модель синтезованого радіосигналу можна представити виразом [11]:

$$s(t) = \text{Re}[z(t)] = I(t)\cos(\omega_0 t) - Q(t)\sin(\omega_0 t). \quad (4)$$

Запропонований приймальний тракт імпульсно-го радіоспектрометра ЯКР містить аналогові та цифрові блоки (рис. 2). До функціональних елементів першого відносяться: малощумний підсилювач «Amp1», узгоджувальний підсилювач «Amp2» та смуговий фільтр «BPF». Застосування фільтра уможливило послаблення паразитних сигналів за межами робочої смуги радіоспектрометра. Функціональний елемент «ADC», який імітує роботу 12-ти розрядного АЦП при частоті дискретизації 170

МГц, слугує зв'язною ланкою з цифровими блоками приймального тракту.

Виділення комплексної обвідної радіосигналу $z_m(t)$ здійснюється в блоках «Demod I» та «Demod Q» при множенні (4) на $e^{-j\omega_0 t}$. Процес детектування, що забезпечує перенесення спектру в область нульових частот, призводить до одержання сигналу:

$$z_d(t) = s(t)e^{-j\omega_0 t} = A(t) + jB(t), \quad (5)$$

з компонентами:

$$A(t) = \frac{1}{2}I(t) + \frac{1}{2}I(t)\cos(2\omega_0 t) - \frac{1}{2}Q(t)\sin(2\omega_0 t), \\ B(t) = \frac{1}{2}Q(t) - \frac{1}{2}Q(t)\cos(2\omega_0 t) - \frac{1}{2}I(t)\sin(2\omega_0 t). \quad (6)$$

Цифрове оброблення сигналу СВІ(6) відбувається у два етапи. Перший етап передбачає зниження на порядок частоти дискретизації сигналів, отриманих з виходів помножувачів «Demod», другий — фільтрацію компонент з подвоєною частотою $2\omega_0$. Максимальна ширина Ω мультиплетних спектрів ЯКР не перевищує 1 МГц. В запропонованому РП-ПК приймачі використано 5-каскадні інтегрально-гребінчасті фільтри з нескінченною імпульсною характеристикою (НІХ) (блоки «CIC Decimation»), які слугують для зниження частоти дискретизації до 17 МГц. Особливістю функціонування НІХ-фільтрів є збільшення розрядності вихідних даних, що виникає унаслідок зниження частотної смуги. Штучне зменшення розрядності вихідного сигналу приймача до 16 біт забезпечується додатковими блоками «Quantization Scaling».

Недоліком НІХ-фільтрів є доволі полого АЧХ, яка спадає до 0 в околі частоти дискретизації. Блоки «FIR Low Pass Filter», які представлені нерекурсивними фільтрами з кінцевою імпульсною характеристикою (КІХ), застосовано для компенсації кривизни

зни частотної характеристики. Вибір типу фільтрів обумовлений вимогою розроблення приймального тракту радіоспектрометра з максимальною лінійністю його фазочастотної характеристики (ФЧХ) для впевненого детектування резонансних сигналів СВІ в широкому частотному діапазоні, при збудженні ЯКР послідовностями імпульсів із наперед визначеними їх початковими фазами.

Частотні характеристики НІХ та компенсаційного КІХ фільтрів, отримані шляхом розрахунку коефіцієнтів в MATLAB FDATool та імітаційного моделювання, зображені на рис. 3. Моделювання проводилось із врахуванням математичних моделей вихідного сигналу $y(n)$ та передавальної характеристики $H(z)$ КІХ фільтра:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)x(n-k), \quad (7)$$

$$H(z) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)z^{-k},$$

де $x(n)$ — вхідна дія, $h(k)$ — коефіцієнти імпульсної характеристики, N — число коефіцієнтів фільтра.

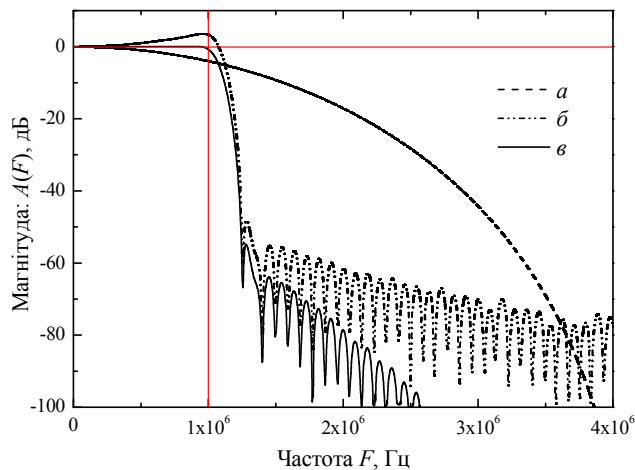


Рис. 3. Частотні характеристики цифрових фільтрів приймального тракту радіоспектрометра ЯКР, отримані шляхом імітаційного моделювання: (а) НІХ фільтр; (б) КІХ фільтр; (в) сумарна частотна характеристика.

Результатом імітаційного параметричного моделювання проходження сигналу СВІ в радіочастотних трактах запропонованого приймача імпульсного спектрометра ЯКР одержано сигналні (рис. 4) та спектральні характеристики (рис. 5) квадратурних складових резонансного відгуку. Низький вміст паразитних компонент та позасмугових складових у спектрі вихідного сигналу свідчить про високу ефективність квадратурного детектування із застосуванням технології прямого оцифрування сигналу. Зокрема, при частоті дискретизації 17 МГц та частоті зрізу компенсаційного ФНЧ 1 МГц рівень

бічних та позасмугових випромінювань в ефективній смузі пропускання РППК приймача склав не більше -100 дБ (рис. 5). Піки $F_1(-F_1)$ і $F_2(-F_2)$ відображають інформаційні компоненти сигналу.

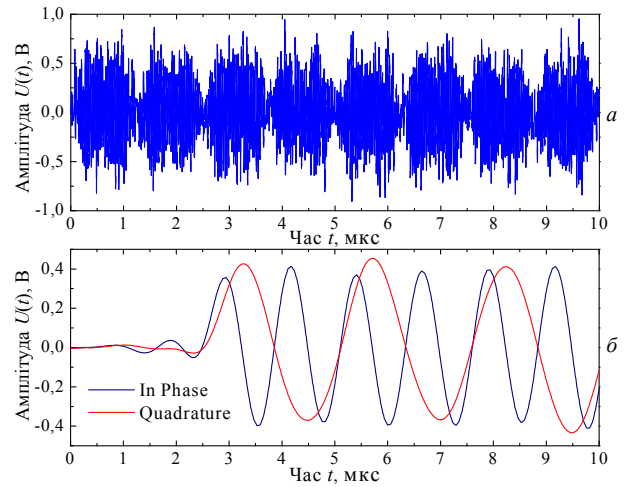


Рис. 4. Осцилограми сигналів у запропонованому приймальному тракту радіоспектрометра ЯКР: (а) вхідне модульоване коливання; (б) демодульовані компоненти вихідного сигналу.

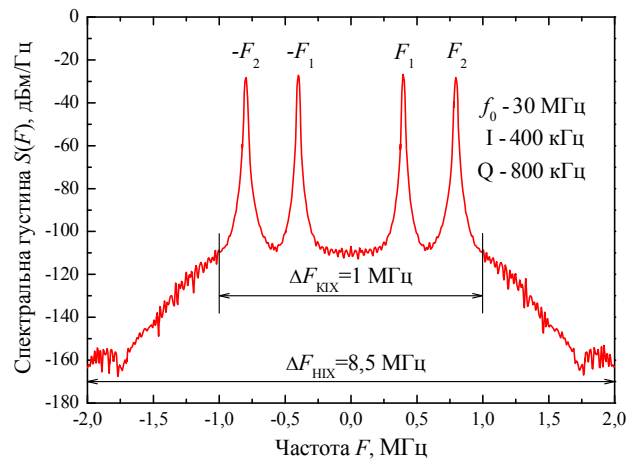


Рис. 5. Енергетичний спектр демодульованого сигналу на виході запропонованого приймача радіоспектрометра ЯКР, отриманий шляхом імітаційного моделювання.

3 Алгоритм фазових циклів CYCLOPS

Якщо в ЯКР експерименті додатково застосувати метод фазових циклів, то можна значно послабити залишкові квадратурні відбивання [12]. Дані, одержані після демодуляції квадратурних компонент ЯКР, записуються в дві окремі буфери динамічної оперативної пам'яті А і В (рис. 6 а).

Застосувавши усереднення сигналів для компенсації інваріантності параметрів каналів приймаль-

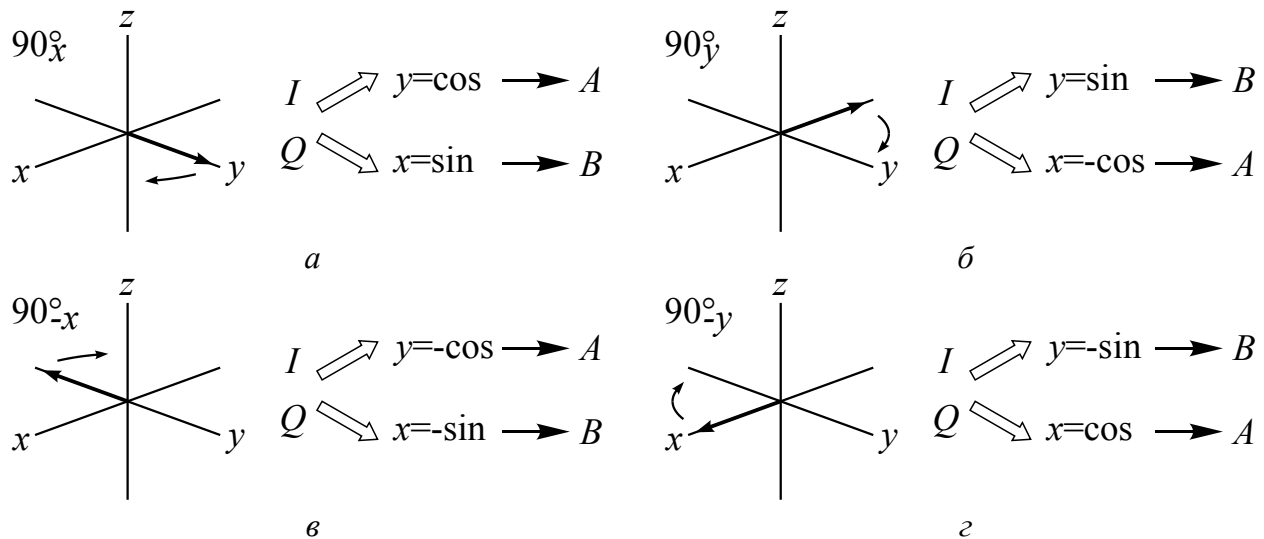


Рис. 6. Принципи функціонування циклу CYCLOPS.

ного тракту, отримаємо однакові дані в обох буферах. Оскільки, в один із них записують дані синфазної складової сигналу СВІ, а в інший — квадратурної, тому при зміні каналів потрібно змінювати також початкові фази сигналів. Динамічна зміна апаратних режимів роботи приймального тракту при спостереженні ЯКР може викликати паразитні ефекти, пов'язані з наявністю перехідних процесів. Щоб уникнути цього та забезпечити зміну даних між буферами А та В при одночасній зміні фази на 90° , достатньо зсунути фазу імпульсу збудження ЯКР на 90° . Це уможливить заміну сигналу поглинання на сигнал дисперсії. У даному випадку спостерігатиметься інверсія одного із сигналів, отже його необхідно помножити на -1 (рис. 6б). Наступний крок передбачає усереднення отриманих даних. Отже, результатом виконання описаної послідовності операцій буде двоетапний фазовий цикл, що при різних ітераціях забезпечує зміну початкової фази імпульсу збудження з 0° на 90° і одночасно перепризначає буфери пам'яті А і В.

У випадку реального експерименту, коли амплітуда сигналу відгуку ЯКР складає одиниці мікрівольт, у вхідному каскаді приймального тракту радіоспектрометра мають місце паразитні сигнали, фаза яких не залежить від фази імпульсу збудження. Для унеможливлення подальшого проходження цих сигналів у наступні каскади необхідно зсунути початкову фазу імпульсу збудження на 180° та змінити додавання даних в буферах А і В на їх віднімання (рис. 6в). Почергово сумістивши дану операцію з кожним проходженням двоетапних фазових циклів, отримаємо чотириетапний цикл CYCLOPS (CYCLically Ordered PhaSe cycle) [13]. В даному циклі значення фаз сигналів 0° , 90° , 180° і 270° відповідають осям x , y , $-x$, $-y$, як зображено на рис. 6.

Підпрограму виконання алгоритму описано-го циклу реалізовано блоком «CYCLOPS Data

Processing», який інтегрований в імітаційну модель РППК приймального тракту імпульсного радіоспектрометра ЯКР (рис. 2). Розглянуті методи реалізації запропонованої імітаційної моделі уможливають її ефективну апаратну імплементацію на основі ПЛІС із застосуванням бібліотек DSP System Toolbox та FDATool [14].

Висновки

1. Здійснено порівняння методів детектування слабких резонансних сигналів СВІ в імпульсних радіоспектрометрах ЯКР. Запропоновано імітаційну модель радіоприймального тракту, в якій для квадратурного детектування та пригнічення квадратурних відбивань застосовано технологію РППК.
2. Методика прямого оцифрування радіосигналу дозволила суттєво зменшити довжину аналогової частини приймального тракту, що своєю чергою уможливило послаблення рівня позасмутових спектральних складових вищих порядків та зашумленості сигналу СВІ.
3. Застосування цифрової фільтрації уможливило досягнення максимальних лінійностей фазових та частотних характеристик приймального тракту при збудженні ЯКР короткими послідовностями радіоімпульсів з наперед заданими початковими фазами в діапазоні частот від 1 МГц до 50 МГц.
4. Інтеграція алгоритму на основі принципу чотириетапних фазових циклів CYCLOPS в структуру імітаційної моделі РППК приймача забезпечила послаблення рівня квадратурних відбивань до 1 %.

Перелік посилань

1. Itozaki Hideo. Nuclear quadrupole resonance for explosive detection / Hideo Itozaki and Go Ota // Internati-

onal journal on smart sensing and intelligent systems. — 2007. — Vol. 1, № 3. — P. 705–715.

2. Hemnani Preeti. 14N NQR spectrometer for explosive detection: A Review / Preeti Hemnani, Gopal Joshi, A.K. Rajarajan, S.V.G. Ravindranath // IEEE International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques, Hinjawadi, Pune, India, Sep. — 2016. — pp. 1120–1125.
3. Butt Naveed R. An Overview of NQR Signal Detection Algorithms / Naveed R. Butt, Erik Gudmundson and Andreas Jakobsson. — Lund: Centre for Mathematical Sciences, Lund University, 2014. — 16p.
4. Chytil J. Detector for Nuclear Quadrupole Resonance Spectroscopy / J. Chytil and R. Kubasek // Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Guangzhou, China, Aug. — 2014. — pp. 1907–1910.
5. Begus Samo. A miniaturized NQR spectrometer for a multi-channel NQR-based detection device / Samo Begus, Vojko Jazbinsek, Janez Pirnat, Zvonko Trontelj // Journal of Magnetic Resonance. — 2014. — Vol. 247. — pp. 22–30.
6. Xinwang Z. A low-power compact nuclear quadrupole resonance (NQR) based explosive detection system : Diss. Doctor of Philosophy : El. Eng. / Xinwang Zhang. — Lincoln-Nebraska, 2014. — 205 p.
7. Apih T. Magnetic Resonance Detection of Explosives and Illicit Materials : NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics / T. Apih, B. Rameev, G. Mozzhukhin, J. Barras, (Eds.). — Springer, 2014. — 168p.
8. Полікаровських О. І. Технологія Software Defined Radio та перспективи її використання / О. І. Полікаровських, В. С. Гавронський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2012. — № 1, — С. 165–169.
9. Хандожко А. Г. Импульсный радиоспектрометр ЯКР с эффективным подавлением переходного процесса / А. Г. Хандожко, В. А. Хандожко, А. П. Саміла // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2013. — № 6/12(66). — С. 21–25.
10. Datasheet of AD9230 12-Bit, 170 MSPS 1.8 V Analog-to-Digital Converter <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9230.pdf>
11. Hotra O. Synthesis of the configuration structure of digital receiver of NQR radiospectrometer / O. Hotra, A. Samila, L. Politsansky // Przegląd Elektrotechniczny. — 2018. — Vol. 94, No. 7. — pp. 58–61.
12. Detlef Reichert. Receiver imperfections and CYCLOPS: An alternative description / Reichert Detlef, Gunter Hempel // Concepts in Magnetic Resonance. Part A. — 2002. — Vol. 14, Issue 2. — pp. 130–139.
13. Раннев Е.В. Цифровой квадратурный приемник ядерного магнитного резонанс - сигнала низкого разрешения / Е.В. Раннев // Интернет-журнал «Науковедение». — 2014. — № 1. — С. 1–11.
14. HDL Code Generation for FPGA and ASIC Development. The MathWorks, Inc. — 2017.

References

- [1] Itozaki H. and Ota G. (2008) Nuclear quadrupole resonance for explosive detection. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, Vol. 1, Iss. 3, pp. 705-715. DOI: 10.21307/ijssis-2017-315
- [2] Hemnani P., Joshi G., Rajarajan A. and Ravindranath S. (2016) 14N NQR spectrometer for explosive detection: A review. *2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT)*. DOI: 10.1109/icacdot.2016.7877761
- [3] Butt N.R., Gudmundson E. and Jakobsson A. (2014) An Overview of NQR Signal Detection Algorithms. *NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics*, pp. 19-33. DOI: 10.1007/978-94-007-7265-6_2
- [4] Chytil J. and Kubasek R. (2014) Detector for Nuclear Quadrupole Resonance Spectroscopy. *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Guangzhou, China*, pp. 1907-1910.
- [5] Beguš S., Jazbinšek V., Pirnat J. and Trontelj Z. (2014) A miniaturized NQR spectrometer for a multi-channel NQR-based detection device. *Journal of Magnetic Resonance*, Vol. 247, , pp. 22-30. DOI: 10.1016/j.jmr.2014.08.002
- [6] Zhang X. (2014) *A low-power compact nuclear quadrupole resonance (NQR) based explosive detection system* , Diss. Doctor of Philosophy : El. Eng., Lincoln-Nebraska, 205 p.
- [7] Apih T., Rameev B., Mozzhukhin G. and Barras J. (2014) *Magnetic Resonance Detection of Explosives and Illicit Materials : NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics*, Springer, 168 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7265-6
- [8] Polikarovskiykh O. I. and Havronskiy V. Ie. (2012) *Tekhnolohiia Software Defined Radio ta perspektyvy yii vykorystannia. Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsessakh*, No. 1, pp. 165-169.
- [9] Handozhko A. G., Handozhko V. A. and Samila A. P. (2013) Impulsnyi radiospektrometr YaKR s effektivnym podavleniem perehodnogo protsessa. *Vostochno-Evropeyskiy Zhurnal Peredoviyh Tehnologiy*, No. 6/12(66), pp. 21-25.
- [10] AD9230 12-Bit, 170 MSPS 1.8 V Analog-to-Digital Converter. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9230.pdf>
- [11] Hotra O. (2018) Synthesis of the configuration structure of digital receiver of NQR radiospectrometer. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY* , Vol. 1, Iss. 7, pp. 60-63. DOI: 10.15199/48.2018.07.14
- [12] Reichert D. and Hempel G. (2002) Receiver imperfections and CYCLOPS: An alternative description. *Concepts in Magnetic Resonance*, Vol. 14, Iss. 2, pp. 130-139. DOI: 10.1002/cmr.10004
- [13] Rannev E. (2014) Tsyfrovoi kvadraturnyi pryemnyk yadernoho mahnytnoho rezonans - syhnala nyzkoho razresheniya. *Naukovedenye*, No. 1, pp. 1-11.
- [14] HDL Code Generation for FPGA and ASIC Development. *The MathWorks, Inc.*.

Simulation modeling of the digital quadrature receiver of the nuclear quadrupole resonance signals

*Samila A. P., Hres O. V., Rusyn V. B.,
Rozorinov H. M., Arkhiereieva O. H.*

Introduction. The study of physical properties of substances using pulsed electromagnetic radiation has become widespread in optical and radio wave spectroscopy. Pulsed Fourier spectroscopy of nuclear quadrupole resonance (NQR) is based on powerful radio frequency excitation pulses and the use of highly sensitive equipment. In response to the short broadband δ -pulse, this method ensures the excitation of all resonance frequencies of the NQR spectrum. The method of detecting free induction decay signals (FID) requires a thorough analysis, since its implementation governs the accuracy of visualization of complex resonance spectra, especially when it comes to multi-pulse experiments. Recently, in the developed countries of the world, much work is in progress on the development of radiotechnical systems that are referred to collectively as Software Defined Radio (SDR).

The choice of NQR detecting methods. It is known that in the pulsed NQR, the FID signals are detected by transferring the resonance spectrum to the low frequency (LF) range by subtracting the reference frequency, which is close to the frequency of the resonating nucleus. The features of the Fourier transform create additional problems when selecting the reference frequency for the synchronous detector. Another option is to apply a quadrature detection of FID which allows an increase in the signal-to-noise ratio by a factor of square root. Apart from increasing sensitivity, the use of quadrature detection imposes some restrictions. In reality there are small residual signals - quadrature reflections in the spectra. Simulation modeling of the receive path of radiospectrometer developed on the principle of direct digitization of a signal. The structure and MATLAB Simulink model of a digital quadrature receiver of nuclear quadrupole resonance signals were developed. The synthesis of compensating filters and computer simulation of signal transformations in the receive path of radiospectrometer were performed. It was established that the application of the principle of direct digitization of the free induction decay signal made it possible to significantly reduce the length of the analog portion of the receiver, and, consequently, reduce the noise of the useful signal and the level of out-of-band higher order spectral components. In particular, with a sampling frequency of 17 MHz and a cutoff frequency of the compensating LPF of 1 MHz, the level of side and out-of-band emissions in the effective bandwidth of the SDR is not more than -100 dB.

Algorithm of phase cycles CYCLOPS. An algorithm based on the principle of four-phase cycles CYCLOPS is integrated into the SDR receiver simulation model, which ensures the reduction of quadrature reflections to 1 %. The concept of proposed model realization on the basis of DSP libraries System Toolbox and FDATool makes possible its efficient implementation on the basis of field-programmable gate arrays. In this case, the FPGA of Intel (Altera) or Xilinx are effective, since CAD systems of their configuration structures are closely integrated with MATLAB.

Key words: quadrature detection; receiving path; software defined radio; SDR; radio spectrophotometer; digi-

tal filters; nuclear quadrupole resonance; NQR; simulation model

Имитационное моделирование цифрового квадратурного приемника сигналов ядерного квадрупольного резонанса

*Самила А. П., Гресь А. В., Русын В. Б.,
Розорінов Г. М., Архирєєва О. Г.*

Разработка надежных методов дистанционного обнаружения малых концентраций резонирующих ядер является в настоящее время актуальной задачей, решение которой требует расчета менее объемных конкретных задач, в частности с привлечением спектроскопии ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР). Анализ инвариантности методов наблюдения ЯКР, основанных на действии мощных радиочастотных импульсов возбуждения на исследуемый образец с последующим применением быстрого преобразования Фурье сигналов спада свободной индукции (ССИ) для получения резонансных спектров, позволяет сделать вывод, что в большинстве случаев детектирование обеспечивается переносом резонансного спектра в диапазон низких частот. При обнаружении сигналов ССИ возникают некоторые трудности, связанные с применением квадратурного детектирования. Одной из ключевых проблем при этом является повышение чувствительности входного устройства и приемного тракта радиоспектрометра. Разработана структура цифрового квадратурного приемника сигналов ЯКР на основе технологии программно-определенных систем (SDR) и принципа прямой оцифровки сигнала - Digital Down-Converter (DDC), что позволило существенно уменьшить число каскадов аналогового тракта. Цифровая обработка сигнала ССИ происходит в два этапа. Первый этап предусматривает снижение на порядок частоты дискретизации сигналов, полученных с выходов умножителей, второй - фильтрации компонент высших порядков. Проведен синтез децимирующих и компенсационных фильтров радиоприемного тракта, частотные характеристики которых получены путем расчета коэффициентов в MATLAB FDATool. Путем имитационного MATLAB Simulink моделирования сигнальных преобразований в предложенном приемном тракте, установлено, что применение прямой оцифровки сигнала спада свободной индукции позволило существенно сократить длину аналоговой части приемника, а следовательно, уменьшить до -100 дБ уровень шума и внеполосных спектральных составляющих в диапазоне частот от 1 МГц до 50 МГц. В имитационную модель SDR приемника интегрировано алгоритм на основе принципа чотириетапних фазових циклов CYCLOPS, что обеспечивает уменьшение квадратурных отражений до 1 %.

Ключевые слова: имитационная модель; квадратурное детектирование; приемный тракт; радиосвязь с программируемыми параметрами компонентов; радиоспектрометр; цифровые фильтры; ядерный квадрупольный резонанс; ЯКР