

УДК 621.373.52:539.1.078

**Саміла А.П.**

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

**Розорінов Г.М.**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

**Гресь О.В.**

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

## РОЗРОБЛЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ МЕТОДІВ РАДІОСПЕКТРОСКОПІЇ ЯДЕРНОГО КВАДРУПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСУ НА ОСНОВІ ПРОГРАМОВАНОЇ ЛОГІЧНОЇ ІНТЕГРАЛЬНОЇ СХЕМИ

*Запропоновано формувач імпульсних послідовностей для проведення досліджень із застосуванням радіоспектроскопічних та релаксаційних методик в ядерному квадрупольному резонансі. Відмінною особливістю розроблення є його реалізація із застосуванням багатофункціонального програмно керованого синтезатора частоти з можливістю швидкісної амплітудної та фазової маніпуляцій.*

**Ключові слова:** ЯКР, імпульсна послідовність, програмована логічна інтегральна схема, синтезатор частоти.

**Постановка проблеми.** Застосування методів релаксаційної спектроскопії є інструментом для вивчення структури, дефектності та динамічних характеристик кристалічної ґратки напівпровідникових структур шляхом ядерного квадрупольного резонансу (далі – ЯКР) [1; 2].

Імпульсні методи спостереження ЯКР широко застосовуються для вирішення різних завдань фізики твердого тіла і мають низку важливих переваг порівняно зі стаціонарними методами радіоспектроскопії. Зокрема, це можливість швидкого і точного вимірювання часів релаксації. У разі використання імпульсного методу дослідження спектральних характеристик ЯКР можливе отримання додаткової інформації за результатами вимірювань часу поперечної та спін-ґраткової релаксацій, що є результатом взаємодії всередині спінової системи та з іншими ступенями свободи в решітці. Дані параметри якісно характеризують динаміку решітки та спінів.

Важливим функціональним елементом імпульсного Фур'є-спектрометра ЯКР є формувач багатоімпульсних послідовностей, що задає програму формування імпульсів збудження ЯКР відповідно до наперед заданого алгоритму. Програматор повинен формувати імпульсні послідовності з наперед заданою точністю та забезпечувати функ-

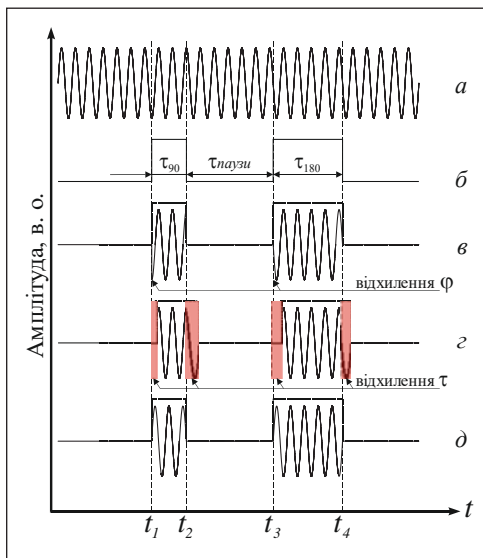
ції регулювання часових параметрів імпульсів і пауз між ними, а також початкових фаз. Якщо з допомогою даного пристрою формувати серію імпульсів збудження і послідовно повертати систему ядерних спінів, то отримуємо низку сигналів, які поступово затухають і через декілька десятків імпульсів можуть не спостерігатися. Це зумовлено некогерентністю обертання спінів або втратою «фазової пам'яті» унаслідок різних взаємодій мікросистеми [3].

Більшість пристроїв формування імпульсів збудження для проведення ядерних резонансних і релаксаційних досліджень в області ЯКР – ЯМР виконані у вигляді плат розширення персонального комп'ютера і потребують розроблення спеціалізованого програмного забезпечення, що накладає обмеження на їхню мобільність [4]. Крім того, через багатофункціональність і, як наслідок, високу ціну, використання таких пристроїв є економічно необґрунтованим для багатьох наукових лабораторій.

У роботі представлено реалізацію конфігураційної структури програмованої логічної інтегральної схеми (далі – ПЛІС) EP4CE15E22C8, яка уможливіє реалізацію функціонального програмно керованого формувача імпульсних послідовностей для впровадження багатоімпульсних

методів ЯКР. Використання ПЛІС забезпечило формування імпульсів збудження ЯКР із наперед заданою високою точністю та можливістю зміни конфігурації параметрів послідовностей не тільки на етапі розроблення, але й під час проведення радіофізичних експериментів з ЯКР.

**Обґрунтування вибору методики.** Наявні на даний час апаратні методи імпульсної Фур'є-спектроскопії та релаксометрії ЯКР умовно розділяють на когерентні та некогерентні системи, що відрізняються наявністю синхронізації фази імпульсів збудження з коливаннями несучої частоти (рис. 1). Створені пакети коливань несучої частоти (рис. 1, г) слугують імпульсами зондування, передні фронти яких формуються імпульсами запуску (рис. 1, б) і синхронізовані за фазою з коливанням несучої частоти (рис. 1, а), що забезпечує цілковиту когерентність роботи імпульсного спектрометра.



**Рис. 1. Часові діаграми формування імпульсів збудження ЯКР: коливання несучої частоти й огинаюча імпульсу збудження (а, б); імпульси зондування за некогерентного, когерентного формування і застосування керованого синтезатора (в, г, д)**

У проведенні релаксаційних досліджень важливі як когерентність сформованих імпульсів, так і точність встановлення часових параметрів 90°-го, 180°-го імпульсів і пауз між ними.

Оскільки частота сигналу ЯКР для певної сполуки залежить від величини градієнта електричного поля, то часто значення частоти резонансу невідоме до проведення експерименту. Тому постає необхідність зміни частоти заповнення та тривалості 90°-го і 180°-го імпульсів у кожному конкретному випадку. У разі використання методики, наведеної в [5], розв'язання цієї задачі про-

блематичне, оскільки внаслідок фазової прив'язки імпульсів зондування до несучого коливання виникає часова похибка, що накопичується зі збільшенням кількості імпульсів у послідовності (рис. 1, г).

Широкий спектр методик спостереження ЯКР потребує застосування формувачів із можливістю встановлення та зміни багатьох параметрів імпульсів у послідовностях, що підвищує складність реалізації, а отже, вартість апаратури для спостереження ЯКР. Поява реконфігурованих програмованих логікових інтегральних схем спрощує дану задачу й уможливує реалізацію імпульсних методів ЯКР на їх основі, оскільки використання ПЛІС дозволяє створити не тільки носійні коливання зі строго заданою частотою і початковою фазою, але і гнучку систему формування когерентних імпульсів збудження сигналів ЯКР.

**Розроблення алгоритму для ПЛІС.** Для розроблення формувача імпульсних послідовностей на основі синтезатора частот із програмним керуванням запропоновано схему конфігураційної структури ПЛІС (рис. 2). Запропонований формувач імпульсних послідовностей для імпульсного спектрометра ЯКР являє собою програмно-апаратне розроблення. Програмний алгоритм розроблено засобами моделювання і розроблення надвеликих інтегральних схем і систем-на-кристали фірми Intel (Altera) [6].

Відмінною особливістю запропонованого методу формування багатоімпульсних послідовностей є його реалізація на основі багатofункціонального програмно керованого цифрового синтезатора частоти з можливістю швидкісної частотної та фазової маніпуляцій (рис. 3). Крім формування неперервних коливань, що слугують для заповнення імпульсів зондування в діапазоні резонансних частот ЯКР від 2 МГц до 50 МГц (ізотопи  $^{14}N$ ,  $^{69}Ga$ ,  $^{71}Ga$ ,  $^{113}In$ ,  $^{115}In$  та інші), запропонований синтезатор частот також є джерелом опорних сигналів синусоїдальної та косинусоїдальної форм для високочастотного квадратурного детектора.

Конфігураційна структура синтезатора (рис. 3), реалізованого за принципом побудови прямих цифрових синтезаторів частот (далі – ПЦСЧ) на основі прямого табличного синтезу, розроблена в програмному середовищі ALTERA Quartus II Web Edition. Основою запропонованого синтезатора є 48-бітний акумулятор фази “altaccumulate 0”, що формує послідовність кодів миттєвої лінійно-змінної фази генерованого сигналу. Значення відліків вихідного сигналу синтезатора частоти, записані в таблицю енергонезалежної пам'яті

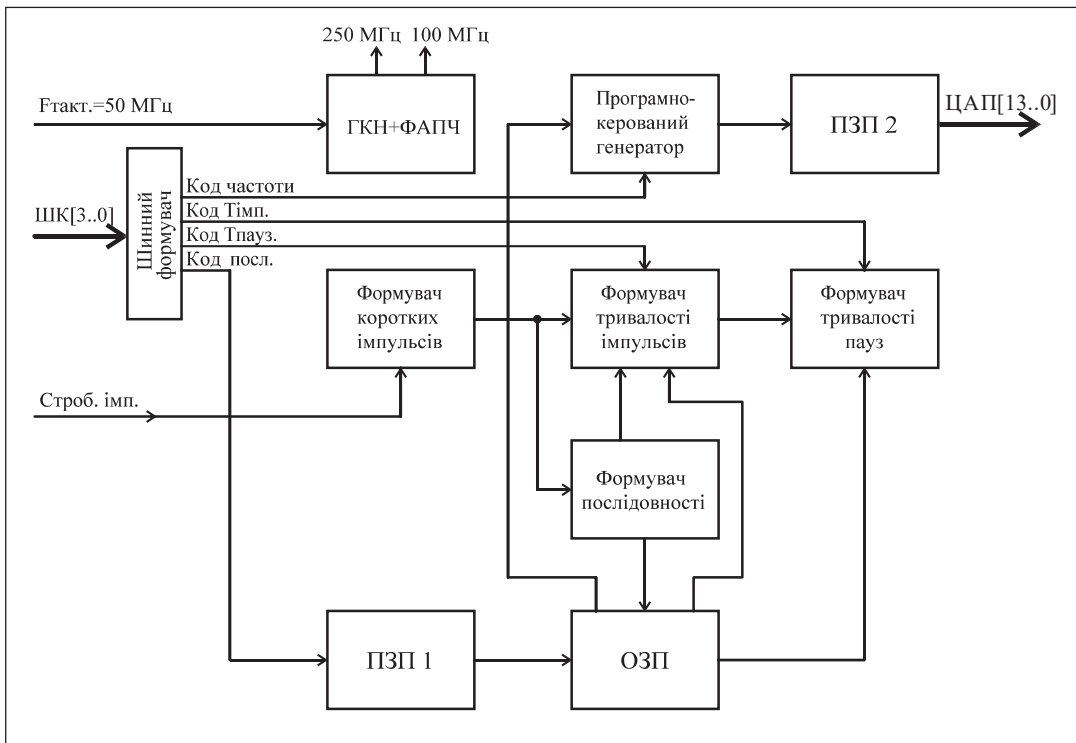


Рис. 2. Структурна схема формування багатоімпульсних послідовностей на основі синтезатора із програмним керуванням

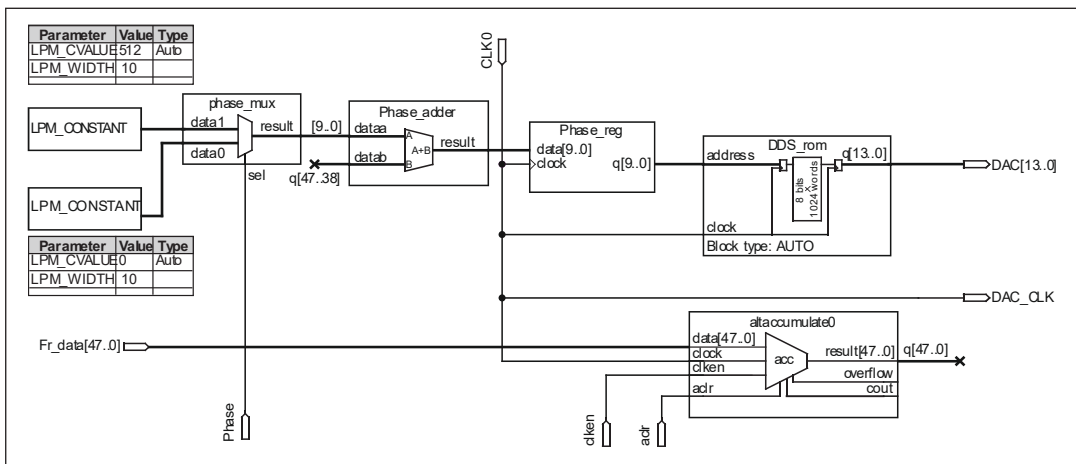


Рис. 3. Конфігураційна структура ПЦСЧ, розроблена в програмному середовищі ALTEA Quartus II Web Edition

ПЛІС “DDS\_rom” – ПЗП2. Розрахунок табличних значень одного періоду гармонічного коливання, що змінюється в часі за законом  $y = \sin(x)$ , здійснено в програмному середовищі Origin Pro v8. Період одного коливання складається із 2 048 14-бітних відліків. Циклічно повторювані значення відліків вихідного сигналу, що записані в таблицю ПЗП2 “DDS\_rom”, забезпечують формування сигналу на виході ПЦСЧ у вигляді періодичної функції  $y(t) = A \sin(2\lambda t + A)$ . Додаткові модулі запропонованої конфігураційної структури ПЦСЧ “phase\_mux”, “phase\_adder” і “phase\_reg” слугують для здійснення

фазової маніпуляції несучої частоти вихідного сигналу.

Схема формування імпульсних послідовностей у програмному редакторі ALTEA Quartus II Web Edition, що відповідає розробленому алгоритму, наведена на рис. 4.

Модуль PLL є програмованою системою ФАПЧ, що забезпечує формування коливань із частотами  $f_{макс1} = 250$  МГц та  $f_{макс2} = 100$  МГц із використанням зовнішнього тактового генератора, що працює на частоті 50 МГц. Частота  $f_{макс1}$  є опорною для цифрового

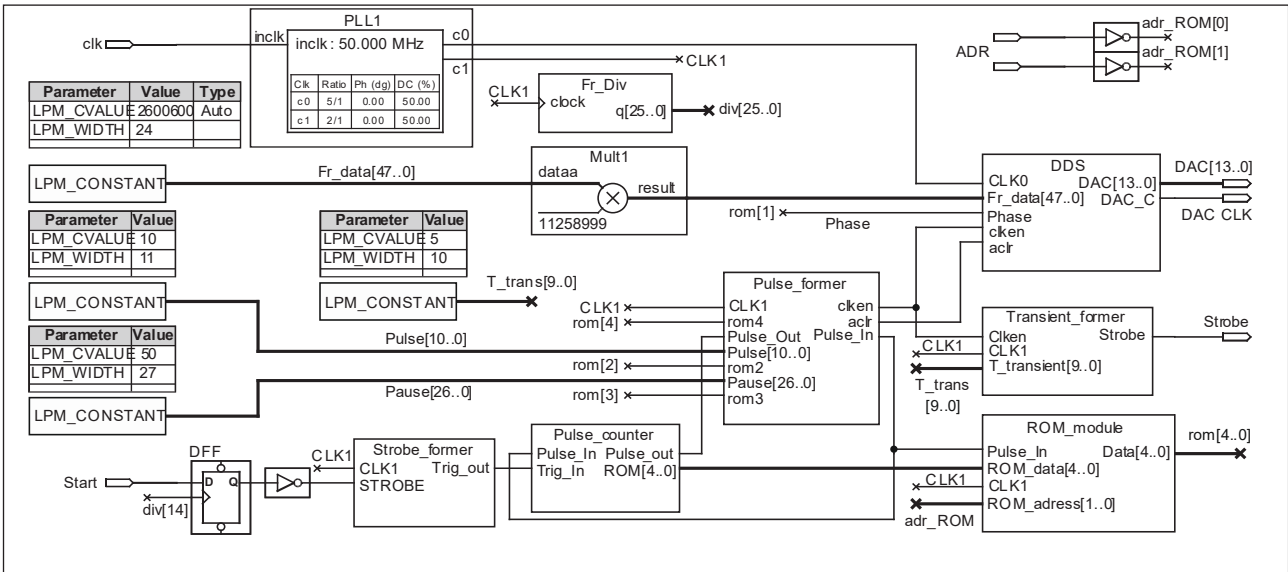


Рис. 4. Конфігураційна структура формувача імпульсних послідовностей, розроблена в програмному середовищі ALTERA Quartus II Web Edition

синтезатора частоти, а  $f_{макс2}$  – для роботи схеми формування імпульсів із мінімальною тривалістю  $\tau = 100$  нс.

Помножувач “mult 1” забезпечує можливість введення вхідного коду частоти безпосередньо у вигляді числової константи відповідної передбачуваному числовому значенню частоти генерованого сигналу. Він помножує вхідний код частоти  $K_1$  на константу  $K_2 = 11\,258\,999$ , що задає крок перебудови синтезатора величиною  $\Delta f = 10$  Гц.

Залежність частоти сигналу  $f_{вих}$  на виході генератора із числовим управлінням від опорної тактової частоти  $f_{макс1}$ , розрядності акумулятора фази  $M$  та коду частоти  $K$  визначається таким виразом [7]:

$$f_{вих} = \frac{K \times f_{такт}}{2^M} \quad (1)$$

Крок перебудови частоти не залежить від її значення і дорівнює:

$$\Delta f_{вих} = \frac{f_{такт}}{2^M} \quad (2)$$

У нашому разі робоча частота акумулятора фази “altaccumulate 0” розрядністю  $M = 48$  біт дорівнює  $f_{макс1} = 250$  МГц. Отже, крок перебудови частоти становитиме  $\Delta f_{вих} \approx 1 \times 10^{-6}$  Гц. Для формування сигналу із частотою  $f_{вих}$  на вхід “Fr\_data [47..0]” синтезатора необхідно подавати 24-бітний код частоти, що визначається так:

$$K_1 = \frac{2^M}{f_{такт} K_2} = 25 \times 10^6 \frac{f_{вих}}{f_{такт}} \quad (3)$$

Формування послідовності розпочинається синхронно із вхідним імпульсом стробування на вході “Start”. Дані про частоту носійного коливання, тривалість 90°-го імпульсу, тривалість паузи між імпульсами та тип послідовності

поступають із блоку керування спектрометром за чотирьохрозрядною шиною керування ШК [3..0]. Тривалість 90°-го імпульсу задається в діапазоні 0,1–20 мкс із кроком 0,1 мкс. Проміжок між імпульсами регулюється в діапазоні 0,1 мкс – 1 с. Інші часові довжини, наприклад, у послідовності Карра-Паррселла, довжина 180°-их імпульсів і проміжків між ними встановлюються автоматично, згідно з вибраною програмою, записаною в ПЗПІ. Кількість імпульсів у серії задається в межах 1–30. Дані про параметри тієї чи іншої послідовності через буферну оперативну пам’ять ОЗП поступають на відповідні виконуючі пристрої конфігураційної структури, що зображена на рис. 4 (програмно керований генератор, формувачі тривалості імпульсів та пауз між ними).

Структура фрагмента файлу, записаного в ПЗПІ (рис. 5), відображає розташування інформаційних бітів у словах. Перший біт відповідає за наявність імпульсу в послідовності. Наступні біти надають можливість керування тривалостями імпульсів і пауз, їхніми початковими фазами та стартом активації ПЦСЧ.

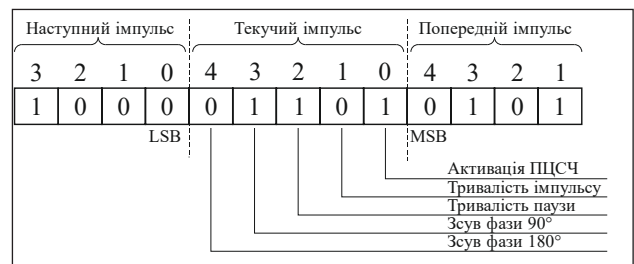


Рис. 5. Структура запису пам’яті ПЗПІ

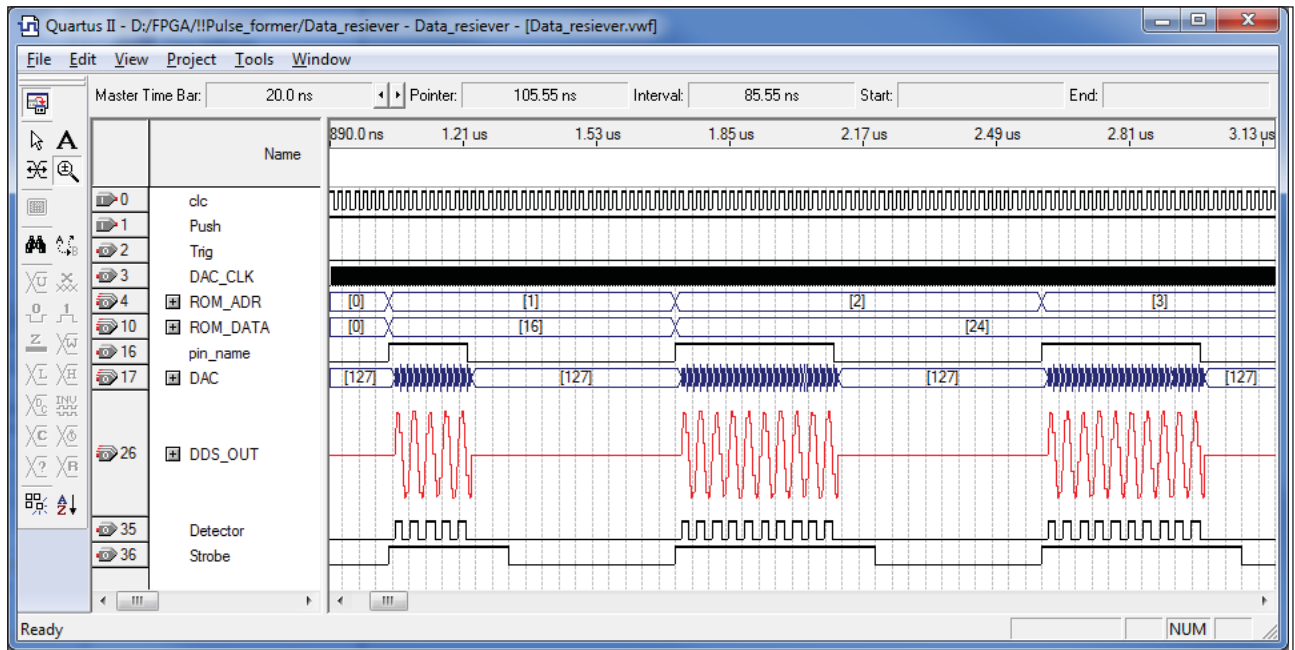


Рис. 6. Симуляція роботи пристрою для повного циклу формування послідовності імпульсів

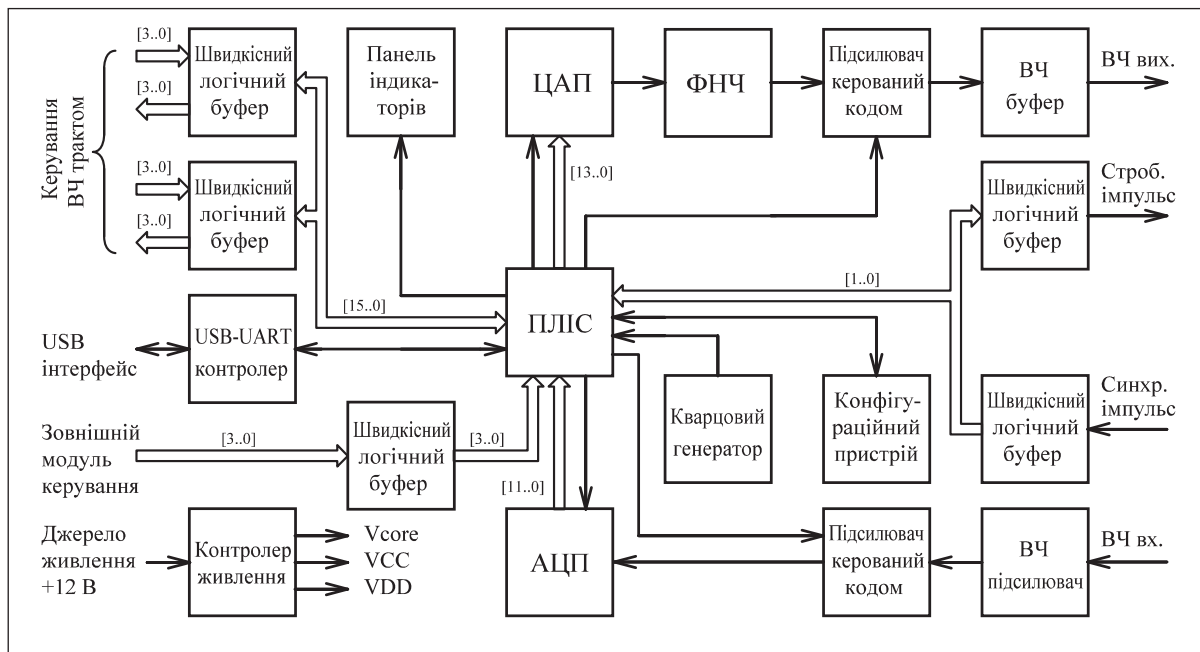


Рис. 7. Структурна схема системної плати спектрометра ЯКР

Розроблений програмний алгоритм та відповідна конфігураційна структура ПЛІС для генерування мультимпульсних послідовностей збудження ЯКР також передбачають формування опорного сигналу для роботи квадратурного детектора цифрового приймального тракту й імпульсів стробування для керування пристроєм комутації вхідного кола радіоспектрометра (рис. 6).

**Апаратна реалізація й експеримент.** Для апаратної реалізації цифрового обчислювального

ядра імпульсного ЯКР-спектрометра розроблена системна плата, що містить цифро-аналоговий та аналогово-цифровий перетворювачі, фільтр нижніх частот, узгоджувальні та буферні підсилювачі, схеми конфігурації та живлення, а також інші функціональні елементи (рис. 7). Основою запропонованого розроблення є ПЛІС EP4CE15E22C8 сімейства Altera Cyclone IV [8]. Внутрішня структура даної ПЛІС містить понад 15 000 логічних елементів, на базі яких можна реалізувати циф-

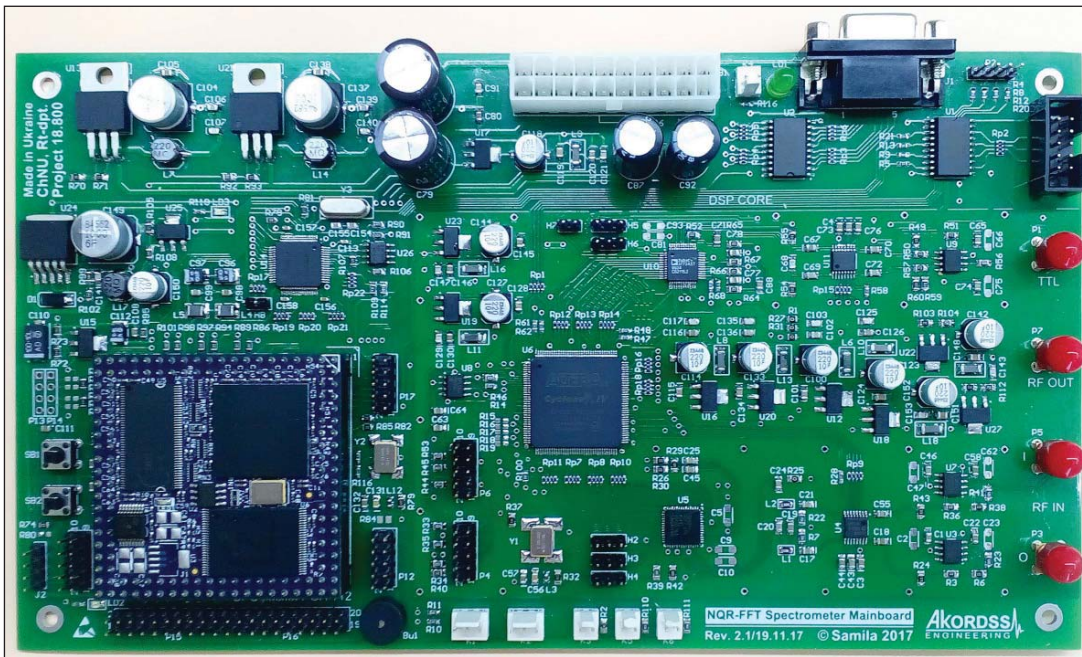


Рис. 8. Системна плата імпульсного спектрометра ЯКР

рові функціональні блоки шляхом синтаксису моделювання динамічних режимів логікових структур. Особливістю застосованої ПЛІС є наявність у ній чотирьох функціонально незалежних модулів ФАПЧ.

Цифро-аналогове перетворення вихідного сигналу ПЦСЧ забезпечується зовнішнім 14-розрядним ЦАП AD9772AASZT, що містить вбудовані цифрові інтерполяційні фільтри. Додаткова фільтрація побічних спектральних складників вищих порядків, зумовлених нелінійністю роботи ЦАП, забезпечується еліптичним аналоговим фільтром нижніх частот 7-го порядку із частотою зрізу приблизно 70 МГц. Регулювання величини амплітуди генерованих коливань здійснюється підсилювачем, керованим кодом AD8369ARU, коефіцієнт підсилення якого задається програмно із ПЛІС. Узгодження вихідного опору пристрою із вхідним опором підсилювача потужності високої частоти здійснюється за допомогою операційного підсилювача AD8055ARZ зі смугою пропускання 300 МГц. Для завантаження програмного алгоритму в конфігураційну пам'ять передбачені інтерфейсні порти JTAG та Active Serial. На передній панелі системної плати спектрометра встановлені коаксильні роз'єми для підключення передавального та приймального тракту радіоспектрометра, а також органи індикації роботи синтезатора і передавання даних. Обмін даних із комп'ютером через USB-інтерфейс забезпечує апаратний USB-UART-контролер FT2232HL.

Фото лабораторного макета системної плати імпульсного спектрометра зображено на рис. 8. Розроблений пристрій забезпечує формування імпульсних послідовностей і реалізацію функцій оброблення сигналів відгуку ЯКР та повне керування функціональними вузлами Фур'є-спектрометра. Зокрема, передбачено канал аналогово-цифрового перетворення на основі мікросхем 12-розрядного АЦП AD9230BCPZ-170 і узгоджувального операційного підсилювача AD8138 для реалізації цифрового квадратурного детектування та фільтрації сигналів СВІ. Два TTL-сумісні канали синхронізації, розроблені з використанням швидкодіючих логічних буферів 74LVC244, забезпечують передавання сигналів керування на апаратні модулі передавача та приймача імпульсного портативного радіоспектрометра ЯКР. Процесорний модуль на основі Altera NIOS-EVALKIT-1C12 забезпечує керування користувальницькими функціями та режимами роботи системної плати радіоспектрометра за програмним алгоритмом, реалізованим на основі машини кінцевих станів. Алгоритм роботи та принцип реалізації процесорного модуля представлені в роботах [9; 10].

В енергонезалежній пам'яті ПЛІС записано алгоритми формування 30-ти різних типів імпульсних послідовностей, застосування яких забезпечує реалізацію широкого спектра радіоспектроскопічних та релаксаційних методик в ЯКР. Зокрема, для визначення часів релаксації  $T_1$  і  $T_2$

(послідовність типу CPMG), забезпечення накопичення слабких сигналів ЯКР (послідовності SSFP і SLSE) за швидкої та повільної релаксації, усереднення неоднорідного уширення спектральної лінії із застосуванням послідовності чергування фаз імпульсів (PAPS) та нутаційної спектроскопії.

Конфігурація, що завантажується в ПЛІС, може зберігатися як у статичній пам'яті (SRAM), так і в постійному запам'ятовуючому пристрої (EEPROM або Flash). Мікросхема EP4CE15E22C8 відноситься до SRAM-конфігураційних ПЛІС, тому збереження конфігураційної інформації здійснюється шляхом використання зовнішньої мікросхеми ПЗП EPCS16 із послідовним інтерфейсом. У розробленому пристрої передбачено два режими програмування: активний послідовний (Active Serial) та через JTAG-інтерфейс. Вибір режиму конфігурування визначається комбінацією на входах MSEL мікросхеми ПЛІС Altera Cyclone IV.

Розроблений пристрій досліджено як в одно-, так і в багатоімпульсному режимах. Осцилограми напруги на виході пристрою під час формування найбільш поширених в ЯКР послідовностей наведені на рис. 9. Діапазон робочих частот розробленого пристрою – 1–50 МГц, що обмежується частотами ЯКР актуальних ядер ізотопів  $^{14}\text{N}$ ,  $^{35}\text{Cl}$ ,  $^{63}\text{Cu}$ ,  $^{69}\text{Ga}$ ,  $^{71}\text{Ga}$ ,  $^{113}\text{In}$ ,  $^{115}\text{In}$  та ін.

**Висновки.** Розроблена структура та принципова електрична схема системної плати спектрометра, цифрове обчислювальне ядро якої реалізоване на базі ПЛІС EP4CE15E22C8. Застосування двокаскадної фільтрації засобами вбудованих інтерполяційних фільтрів та зовнішнього ФНЧ із частотою зрізу 70 МГц уможливило генерацію сигналів збудження ЯКР із низьким рівнем спектральних складників вищих порядків.

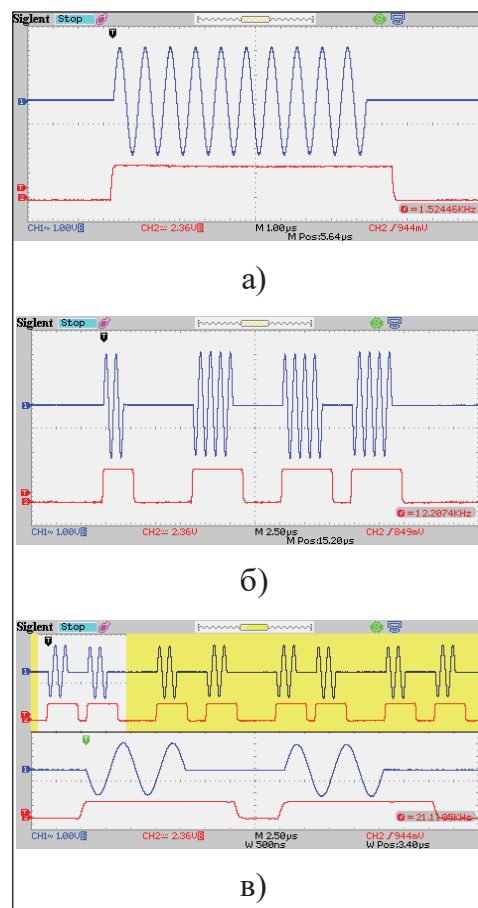


Рис. 9. Осцилограми напруг на виході формувача імпульсних послідовностей: одиничний імпульс (а); послідовність Карра-Пурселла (б); послідовність MREV-8 (WANUNA) (в)

Результати експериментальних випробувань показали, що пристрій забезпечує формування імпульсних послідовностей, необхідних для проведення релаксаційних досліджень ЯКР у діапазоні частот 1–50 МГц.

#### Список літератури:

1. Саміла А., Хандожко В., Ковалюк З. Ядерний квадрупольний резонанс і сенсорні властивості шаруватих напівпровідникових кристалів GaSe та InSe. Ж. наноелектрон. фіз. 2015. Т. 7. № 3. С. 1–5.
2. Саміла А., Ластівка Г., Хандожко В. Вимірювання індукції магнітного поля із застосуванням ефекту Зеемана в ядерному квадрупольному резонансі сполук GaSe та InSe. Ж. нано-електрон. фіз. 2016. Т. 8. № 4. С. 1–4.
3. Shen Jie, Ying Liu, Jianqi Li, Gengying Li. A powerful graphical pulse sequence programming tool for magnetic resonance imaging. Magnetic resonance materials in physics, biology and medicine. 2005. Vol. 18. № 6. P. 332–342.
4. Radio Processor-G™ Owner's Manual // Spin Core Technologies, Inc. URL: [http://www.spincore.com/CD/RadioProcessor-G/RadioProcessor-G\\_Manual.pdf](http://www.spincore.com/CD/RadioProcessor-G/RadioProcessor-G_Manual.pdf) (дата звернення: 27.09.2015).
5. Хандожко А., Хандожко В., Саміла А. Импульсный радиоспектрометр ЯКР с эффективным подавлением переходного процесса. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. № 6/12 (66). С. 21–25.
6. Three Quartus® Prime editions to meet your system design requirements // Intel Corporation. URL: <https://www.altera.com/downloads/download-center.html> (дата звернення: 07.12.2016).
7. Ридико Л. DDS: прямой цифровой синтез частоты. Компоненты и технологии. 2001. № № 7, 8. С. 50–56.

8. Cyclone IV FPGA Device Family Overview // Altera Corporation. URL: [https://www.altera.com/content/dam/altera-www/global/en\\_US/pdfs/literature/hb/cyclone-iv/cyiv-51001.pdf](https://www.altera.com/content/dam/altera-www/global/en_US/pdfs/literature/hb/cyclone-iv/cyiv-51001.pdf) (дата звернення: 12.10.2016).
9. Samila Andriy, Khandozhko Alexander, Hryhorchak Ivan, Politsans'kyu Leonid, Kazemirskiy Taras. A Control Unit for a Pulsed NQR-FFT Spectrometer. IAPGOS. 2015. Vol. 5 (4). P. 55–58.
10. Саміла А. Застосування статично-конфігурованої ПЛІС у цифровій системі керування радіоспектрометром ЯКР. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2016. № 4 (53). С. 73–82.

### **РАЗРАБОТКА ИМПУЛЬСНЫХ МЕТОДОВ РАДИОСПЕКТРОСКОПИИ ЯДЕРНОГО КВАДРУПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСА НА ОСНОВЕ ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИЧНОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ**

*Предложен формирователь импульсных последовательностей для проведения исследований с применением радиоспектроскопических и релаксационных методик в ядерном квадрупольном резонансе. Отличительной особенностью разработки является ее реализация с применением многофункционального программно управляемого синтезатора частот с возможностью скоростной амплитудной и фазовой манипуляций.*

**Ключевые слова:** ЯКР, импульсная последовательность, программируемая логическая интегральная схема, синтезатор частоты.

### **IMPLEMENTATION OF PULSED NQR RADIOSPECTROSCOPY METHODS ON FPGA**

*A multi-functional programmer of pulse sequences for NQR Fourier spectrometer has been developed on the basis of FPGA. The experimental test results have shown that the device assures shaping of pulsed sequences necessary for the pursuance of relaxation research in the frequency range of 1–50 MHz. The proposed programmer allows shaping of one, two and multi-pulsed sequences which enables the experiments on measuring relaxation times using the methods of Hahn, Carr-Purcell, Meiboom-Gill, et al. Owing to a wide range of change in pulse lengths and the possibility of shaping various sequences, this programmer assures a change in parameters  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_2$ . Digital shaping of pulse sequences implemented in the proposed product assures high stability and accuracy of all temporal relations. The programmer guarantees phase binding of high-frequency filling of video pulses to pulse fronts.*

**Key words:** NQR, pulse sequence, Field – Programmable Gate Array, frequency synthesizer.