

А. П. Войтер*, М. І. Доронін, А. М. Ковальов, І. О. Мазний*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна**Відповідальний автор: voiter@kinr.kiev.ua**ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА З ГНУЧКОЮ АРХІТЕКТУРОЮ
ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯДЕРНИХ РЕАКЦІЙ**

Розглянуто вимірювальну систему з гнучкою архітектурою для дослідження багатопараметричних ядерних реакцій, яка заснована на широкому використанні пристроїв із програмованою логікою. Описано технічні засоби системи та її програмне забезпечення.

Ключові слова: вимірювальні системи, ядерні реакції, ядерна електроніка, програмне забезпечення.

1. Вступ

Основою створення вимірювальної системи з гнучкою архітектурою є узагальнена декомпозиція функцій, що виконуються вимірювальними системами за різними ядерно-фізичними методами при дослідженні багатопараметричних ядерних реакцій. Елементи архітектури реалізують певні групи функцій системи, зокрема: амплітудного аналізу, аналізу часових інтервалів, відбору подій, їхнього підрахунку тощо.

Відмінною рисою архітектури даної системи є те, що вона орієнтована на реалізацію з широким використанням програмованої логіки, що забезпечує максимальну інваріантність системи відносно тієї чи іншої методики вимірювань.

Існуючі вимірювальні системи [1 - 5] здійснюють відбір необхідних подій у форматі {Амплітуда, Номер детектора} за допомогою фіксованої фронтальної електроніки. Якщо для дослідження потрібні інші кореляції, то перекомпоновується схема фронтальної електроніки і повторно проводяться вимірювання.

Ідеологія побудови запропонованої системи має дві основні відмінності від існуючих систем. Перша – гнучкість архітектури, полягає у відсутності жорсткого схемного відбору подій, що забезпечує можливість програмного реконфігурування системи під ту чи іншу методику чи задачу вимірювання. Друга – реєстрація максимально можливої кількості параметрів подій, включаючи енергію частинок (амплітуду сигналу з детектора), код тракту (номер детектора), час появи та інтервал часу між подіями з точністю, що забезпечує виділення, що збігаються. Така реєстрація дає змогу експериментатору при необхідності в будь-який час, не використовуючи повторно прискорювач, відтворити у цифровій формі на комп'ютері процес накопичення, наприклад для

того, щоб по-іншому обробити дані, виділити необхідні збіги подій, видалити ті дані, які він вважає пошкодженими в деякі періоди часу експерименту і т.п. При цьому час реєстрації подій не є обмежуючим фактором швидкодії системи, оскільки він не перевищує часових параметрів вхідних імпульсів.

2. Архітектура системи

Архітектура вимірювальної системи визначає перелік основних блоків ядерної електроніки, їхню структуру, функції та взаємозв'язок, формати даних, інтерфейси та види вхідних та вихідних сигналів. Загалом вимірювальна система складається з блока збігів та кодування часу, блока аналого-цифрового перетворювача (АЦП), блока лічильників і блока моніторного каналу, які об'єднані внутрішньою шиною даних і управління (рис. 1). Кожен із блоків має власну шину даних заданого формату та відповідний набір ліній управління.

Вхідними сигналами системи є сигнали із спектрометричних підсилювачів Vx_i , $i = \{1,8\}$ та сигнали з швидких підсилювачів Vx_j , $j = \{1,8\}$, а також сигнал від спектрометричного підсилювача моніторного каналу Vx_m .

Блок збігів та кодування часу здійснює відбір необхідних за логікою експерименту подій, фіксацію часу появи цих подій (формування часової відмітки), управління роботою блоків лічильників та АЦП, буферне накопичування зафіксованих цифрових кодів векторів подій. До коду події входять: один, два або три коди від АЦП по 10 біт, один, два або три номери входу АЦП (номери детектора – ND) по 3 біти, а також код часу появи події або збігу подій розміром 48 розрядів. Тобто залежно від режиму роботи системи (без збігів, подвійні або потрійні збіги) довжина коду може становити 63, 78, або 93 розрядів.

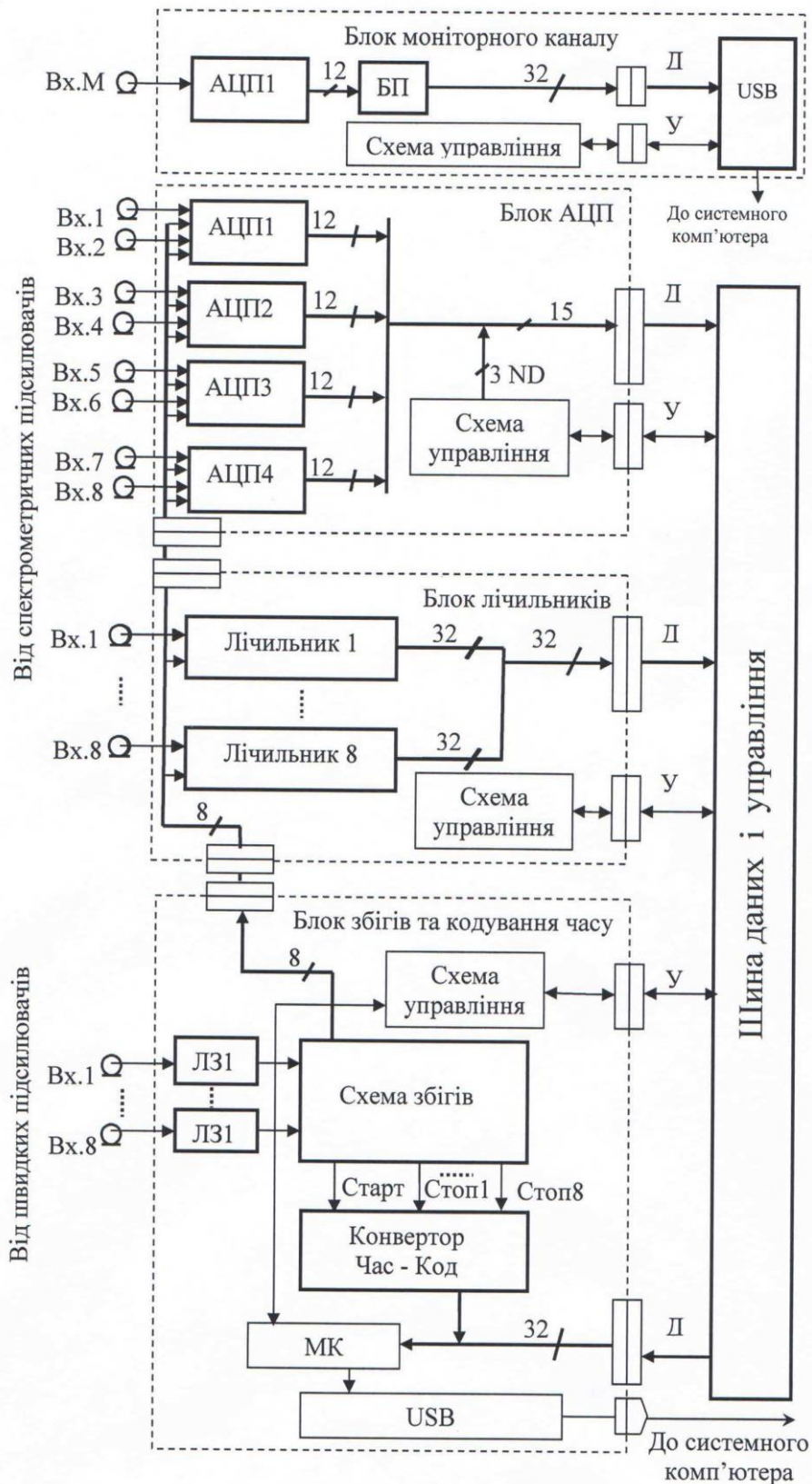


Рис. 1. Структурна схема виміральної системи з гнучкою архітектурою для дослідження ядерних реакцій.

БП – буферна пам'ять; МК – мікроконтролер, USB та інтерфейс;
 Д – лінії передачі даних; У – лінії управління; ЛЗ – лінії затримки.

Основними функціями блока збігів та кодування часу також є:
 реєстрація факту події та присвоєння їй мітки часу з відліком від початку експерименту;

визначення часу появи події;
 вироблення коду ND для кожної події;
 збір даних і управління режимами роботи блоків по внутрішній шині системи;

вирівнювання затримок між вимірювальними трактами детекторів телескопів;
 формування векторів подій у буферній пам'яті в зазначеному вище форматі;
 зв'язок із системним комп'ютером.

Через блок збігів та кодування часу зчитуються значення лічильників – 32 розряди.

Блок збігів та кодування часу працює під управлінням вбудованого мікроконтролера (МК), що здійснює не лише управління вказаними процедурами вимірювання, але й взаємодією системи з локальною мережею та/або локальним системним комп'ютером.

Мережева або локальна взаємодія вимірювальної системи із системним комп'ютером здійснюється під управлінням мікроконтролера і реалізована через інтерфейс USB.

Блок моніторного каналу призначений для перетворення в безперервному режимі сигналу від спектрометричного підсилювача моніторного каналу у цифровий код, накопичення кодів у гістограмній буферній пам'яті та підготовки даних до візуалізації. Зважаючи на високу інтенсивність потоку даних з моніторного каналу, він має власний незалежний від системного інтерфейс USB із системним комп'ютером.

Блок АЦП перетворює сигнали від восьми спектрометричних підсилювачів (наприклад,

чотирьох телескопів E - ΔE) у цифровий код амплітуди в режимі із стробуванням або в безперервному режимі.

Блок лічильників слугує для підрахунку загальної кількості подій, що відібрані та реєструються по кожному входу від спектрометричних підсилювачів.

Обмін даними (Д) та сигналами управління (У) між блоками системи здійснюється мікроконтролером по шині даних на управління.

2.1. Технічні складові

Представлена архітектура системи реалізована сукупністю спеціально створених блоків ядерної електроніки, а саме: моніторного каналу, спектрометричних АЦП, лічильників, збігів та кодування часу.

Блок моніторного каналу розроблено на основі міросхеми АЦП послідовного наближення AD7679 та програмованої логічної матриці EP3128ATC100-10N серії MAX3000, міросхеми EP3C40Q240C8N серії Cyclone фірми Altera, що надає певну гнучкість логіки роботи блока, тобто можливість корекції алгоритму роботи без будь-яких електромонтажних операцій. Для зв'язку з персональним комп'ютером використано інтерфейс USB (рис. 2).

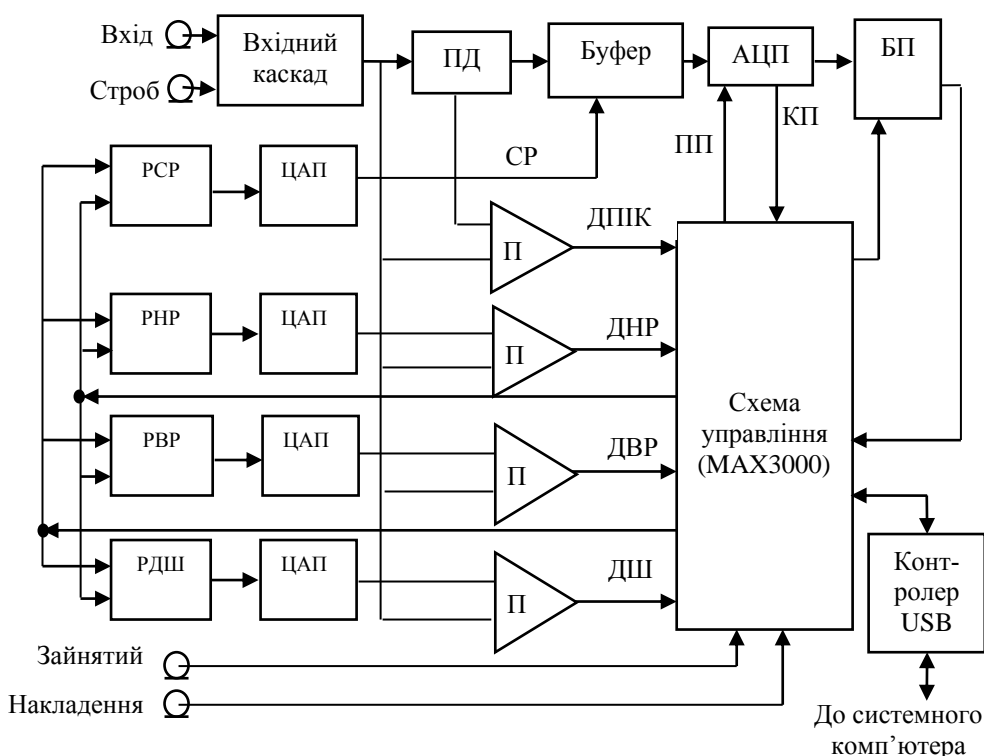


Рис. 2. Структурна схема блока моніторного каналу:

ПД – піковий детектор; RCP – регістр схеми розрівнювання; RNP - регістр нижнього рівня; RVP – регістр верхнього рівня; RDS – регістр шуму; П – схема пропускання; ДПК – дискримінатор піка вхідного імпульсу; ДНР – дискримінатор нижнього рівня; ДВР – дискримінатор верхнього рівня; ДШ- дискримінатор шуму; ПП – початок перетворення; КП – кінець перетворення; БП – буферна пам'ять; СР – сигнал розрівнювання.

Вибір мікросхеми AD7679 зумовлено перш за все її високою роздільною здатністю (18 біт без пропуску кодів) та невеликим часом перетворення (1,75 мкс).

Обмін даними та управління режимами роботи блока моніторного каналу здійснюється через інтерфейс USB.

Для отримання прийнятної для спектрометричних АЦП величини диференційної нелінійності в схемі використаний метод ковзної шкали [6].

Програмування блока моніторного каналу здійснюється від системного комп'ютера 16-розрядними словами, в яких 8 старших розрядів використані в якості адресних і 8 молодших розрядів для передачі коду операції.

Для запису в регістри порогів використовуються такі розряди слова: D15-D13 - номер каналу (входу), D10-D08 - код режиму записи порогів, D07-D00 - значення порогів.

Для запису в регістр управління використовуються розряди слова: D10, D09 - код режиму запису керуючого слова, D06 - інкремент лічильника розрівнювання/генератор псевдовипадкових кодів, D05 - запис в оперативну пам'ять (ОП) одновимірного спектра, D04 - оперативна пам'ять у режимі FIFO/оперативна пам'ять у режимі гістограм, D, D03 - збіги/антизбігів, D02 - автозапуск/стробування, D01, D00 - коефіцієнт перетворення АЦП 512, 1024, 2048, 4096.

Для запису в регістр читання використовуються розряди слова: D15-D13 - номер каналу, D10, D09 - код режиму читання, D04 - дозвіл/заборона читання часової мітки, D03 - читання даних з каналів/читання регістра стану, D02 - читання двовимірних спектрів з ОП, D01, D00 - читання двовимірних спектрів з ОП всіх або обраного каналу.

Вхідним сигналом блока є позитивні імпульси від стандартних спектрометричних підсилювачів з постійною часу формування від 0,25 до 20 мкс.

Дискримінатори нижнього і верхнього рівнів регулюються за допомогою 8 розрядних цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП) у діапазоні від 0 до 2,55 В та від 5 до 2,45 В відповідно.

Запуск роботи блока може здійснюватися або в режимі автозапуску, або в режимі стробування. При автозапуску процес перетворення ініціюється вхідним сигналом, який пройшов через схему відбору імпульсів, з амплітудою, яка відповідає виставленим значенням нижнього і верхнього порогів.

У режимі стробування до цих умов додається наявність на вході блока сигналу «Строб», який запускає процес перетворення.

Роботою розрівнюючого ЦАП можна управляти або за допомогою лічильника, вміст якого

збільшується на одиницю після кожного завершення циклу перетворення мікросхеми АЦП, або за допомогою генератора псевдовипадкових кодів, реалізованого в FPGA. Вибір проводиться при початковому програмуванні режиму роботи блока. Для поліпшення лінійності схеми розрівнювання в мікросхемі ЦАП використовуються лише сім старших розрядів.

До складу схеми управління блока також входять лічильник подій і лічильник живого часу, необхідний для корекції втрат через мертвий час за методом Гедке - Хейла [7]. Цей метод призначений для використання з однополярними аналоговими імпульсами з виходу спектрометричного підсилювача. При цьому використовуються сигнали зайнятості і накладення, що надходять від спектрометричного підсилювача для компенсації втрат від мертвого часу, викликаного накладенням імпульсів в підсилювачі.

В якості буферної пам'яті використовується SRAM-пам'ять фірми Cypress об'ємом 512 Кбіт (32К × 16). Для обміну даними із системним комп'ютером у мікросхемі EP3C40Q240C8N серії Cyclone фірми Altera реалізовано пам'ять в режимі FIFO з об'ємом 1К × 16 розрядів.

Блок розроблено з більш широким набором можливостей, ніж необхідно для роботи в моніторному каналі. Це зроблено для можливості його використання в якості автономного спектрометричного АЦП з роздільною здатністю 12 біт із вбудованою БП. Крім того, є можливість підключенням 8-входового аналогового мультиплексора отримати 8-входовий спектрометричний АЦП. Мультиплексор підключається через роз'єм на задній панелі блока. При роботі з мультиплексором дані з виходу АЦП можуть накопичуватися в оперативній пам'яті блока у вигляді гістограм. Для кожного з восьми входів виділена область розміром 4К × 16 розрядів. Реалізувати повний набір функцій блока можна при установці додаткових компонентів на передбачені місця на друкованій платі.

Основні технічні характеристики блока моніторного каналу:

Діапазон вхідних сигналів від 0 до 5,0 В.

Вхід стробування для сигналів TTL/NIM рівнів (вибір за допомогою перемикачів).

Роздільна здатність: 512, 1024, 2048, 4096 каналів (вибір програмно).

Диференційна нелінійність $\pm 1\%$.

Інтегральна нелінійність $\pm 0,05\%$.

Наявність гістограмного пам'яті та пам'яті з FIFO.

Лічильник подій і лічильник живого часу.

Режими автозапуску і зовнішнього стробування.

Час перетворення і зчитування 3 мкс.

255 градацій установки нижнього і верхнього порогів дискримінації.

На передній панелі модуля розташовані роз'єми LEMO для підключення аналогового вхідного сигналу, зовнішнього стробу, сигналів скидання, режекції накладень, зайнятості і роз'єм USB.

Блок реалізовано у стандартному модулі КАМАК подвійної ширини, в якому розміщено дві друковані плати: АЦП з роздільною здатністю 12 біт та інтерфейсу плати USB (рис. 3).

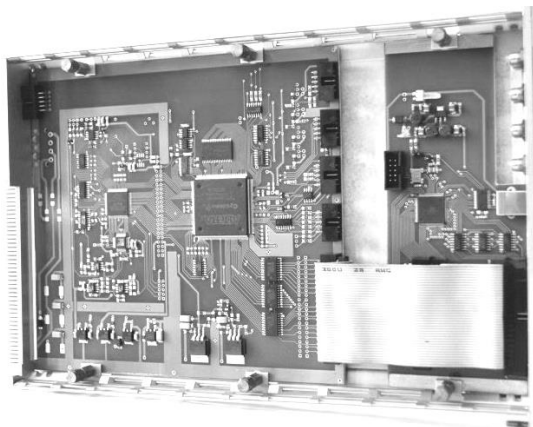


Рис. 3. Конструкція блока моніторного каналу.

Блок спектрометричних АЦП детально описано в [8].

Блок лічильників складається з восьми незалежних 32-розрядних лічильників, з яких чотири лічильника групи мають індивідуальні входи стробування, а чотири лічильника групи – без стробування.

Лічильники мають спільний вхід «Скидання», підключений до гнізда на передній панелі. Усі входи можуть приймати або імпульси негативної швидкої логіки NIM, або позитивні імпульси рівня TTL. Вибір проводиться індивідуальними для кожного входу перемикачами, розташованими на друкованій платі.

Блок розроблений на основі FPGA EP3C40Q240C8N серії Cyclone фірми Altera і розташований у стандартному модулі КАМАК подвійної ширини. Негативні вхідні імпульси повинні відповідати стандарту NIM логіки з фіксованим порогом 250 мВ на навантаженні 50 Ом. Частота вхідних негативних імпульсів може досягати 100 МГц. Позитивні імпульси повинні відповідати рівням TTL із частотою проходження до 25 МГц на навантаженні 1 кОм.

Управління режимами роботи лічильників здійснюється 16 розрядними словами, в яких 8 старших розрядів використовуються в якості адресних і 8 молодших розрядів використовуються для передачі коду операції.

Для запису в регістр управління використо-

вуються розряди слова: D10, D09 – код режиму запису керуючого слова; D04 – дозвіл рахунку під час зовнішнього стробу/заборона рахунку під час зовнішнього стробу; D03 – збіги підрахувати/збіги не брати до уваги; D02 – автозапуск/стробування; D01, D00 – вибір комбінацій використання лічильників.

Для запису в регістр управлінням читання використовуються розряди слова: D10, D09 – код режиму читання; D03 – читання вмісту регістра стану; D02 – читання вмісту регістра управління; D01, D00 – читання даних з усіх лічильників/читання даних із лічильника M/читання даних із лічильників збігів.

У блоці є регістр переповнення лічильників. При читанні його вмісту використовуються розряди слова: D11, D10 – ознака лічильника; D07 – D00 – номер лічильника.

Робота лічильників може проводитися або в режимі автозапуску, або в режимі стробування. При автозапуску процес рахунку ініціюється вхідним сигналом. У режимі стробування для запуску рахунку додається умова наявності зовнішнього імпульсу дозволу.

Індивідуальні входи стробування лічильників дозволяють працювати в режимах дозволу рахунку під час дії стробу або заборони рахунку на час дії стробу.

Зчитування даних із блока лічильників у блок збігів та кодування часу та управління режимами його роботи відбувається по локальній шині системи. Дані з лічильників використовуються для підрахунку:

- сумарної кількості накопичених подій; кількості подій по кожному із восьми входів відповідно до збігів різних пар телескопів детекторів;

- кількості подій, зареєстрованих детекторами, що дозволяє здійснювати моніторинг інтенсивності пучка та ефективну товщину мішені;

- кількості подій, зареєстрованих по кожному із восьми входів, для визначення інтенсивності потоків даних.

Технічні характеристики:

- Дев'ять незалежних вхідних каналів по 32 розряди кожен.

- Рівні вхідних сигналів лічильників і сигналу загального скидання мають негативне значення швидких сигналів стандарту NIM в діапазоні від -0,6 до -1,4 В з часом наростання і спаду від 1 до 300 нс на вхідному опорі 50 Ом або значення TTL рівнів на вхідному опорі 1 кОм.

- Входи стробування приймають сигнали TTL рівнів і мають вхідний опір 1 кОм.

- Сигнал на виході переповнення лічильників має рівні TTL на навантаженні 1 кОм.

- Максимальна швидкість рахунку для NIM сигналів 100 МГц, для TTL сигналів 25 МГц.

Блок лічильників реалізовано на друкованій платі що розміщується у стандартному модулі КАМАК (рис. 4).



Рис. 4. Загальний вигляд блока лічильників.

На передній панелі блока лічильників розташовано дев'ять роз'ємів LEMO для підключення входів лічильників, роз'єми LEMO для входу загального скидання і виходу сигналу переповнення лічильників, а також 40-контактний роз'єм для підключення до локальної шини даних і управління. Передбачено два варіанти конструкції блока. У першому варіанті можна використовувати чотири лічильники зі стробуванням, чотири лічильники без стробування плюс додатковий лічильник М. У другому варіанті можна використовувати дев'ять лічильників без стробування і додатковий 16-контактний роз'єм на передній панелі для підключення до блока збігів та кодування часу системи. Цей варіант може бути затребуваний при використанні в багатопараметричних кореляційних експериментах.

Блок збігів та кодування часу призначений для фіксації факту заданої кількості збігів імпульсів на вході вимірювальної системи, а також для фіксації часу появи імпульсу та формування відповідного коду часової відмітки (рис. 5).

Вхідні імпульси у форматі NIM від швидких виходів попередніх підсилювачів, а також від джерела синхронізації трансформуються в конверторі вхідних рівнів сигналу в TTL формат із тривалістю фронту 2,5 - 3,0 нс. Сформовані таким чином сигнали надходять на регульовані лінії затримки DS1023-100. Затримки встановлені по кожному з 9 входів блока. Основна їхня функція – компенсація різниці часу проходження сигналів, тобто компенсувати різницю в довжині кабельних з'єднань. Підгонку затримок блок виконує автоматично з точністю 0,25 нс.

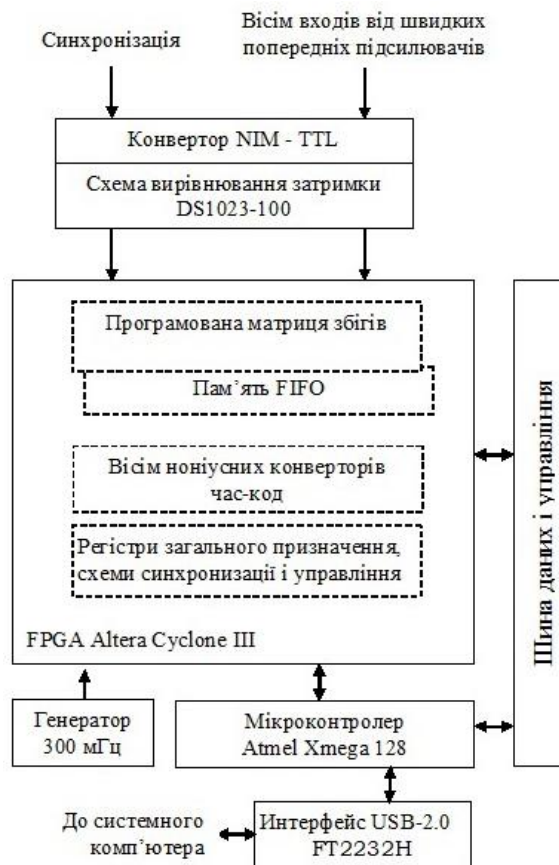


Рис. 5. Структурна схема блока збігів та кодування часу на основі програмованої логічної матриці FPGA EP3C40Q240C8N Cyclone II та мікроконтролера Atmel Xmega 128.

Матриця збігів та конвертор час-код реалізовані в мікросхемі FPGA EP3C40Q240C8N Cyclone III. Програмування збігів здійснюється із системного комп'ютера через діалоговий інтерфейс користувача. Як показано на рис. 6, вхід 0 є входом синхронізації, наприклад, сигнал від циклотрона, сигнал реперного генератора тощо. Цим сигналом запускається часовий проміжок очікування події $T_{оч}$. З рядка 1 видно, що синхронізуючись 0-м входом, протягом $T_{оч} = 50$ нс очікуємо збіг на входах 1 і 2, у рядку 2 – на входах 3 і 4, а в рядку 3 відлік $T_{оч}$ розпочинається від першого сигналу, який надійшов на входи 5 або 6. Матриця дає змогу програмувати також потрібні збіги.

Якщо будь-який із чотирьох рядків заповнити галочками, то скасовуються всі збіги і тим самим реалізується режим накопичення в навал. У цьому режимі здійснюється накопичення всіх подій протягом часу експерименту, причому кожна подія позначена часом її появи з точністю до 0,25 нс.

Крім фіксації збігів блок також фіксує час появи події на будь-якому з восьми входів. Для вимірювання часового інтервалу використовується комбінація методу послідовного підрахунку та інтерполюючого перетворювача [9]. Це дає змогу отримати часову відмітку події з точністю 0,25 нс. Максимальна тривалість експерименту 2 доби.

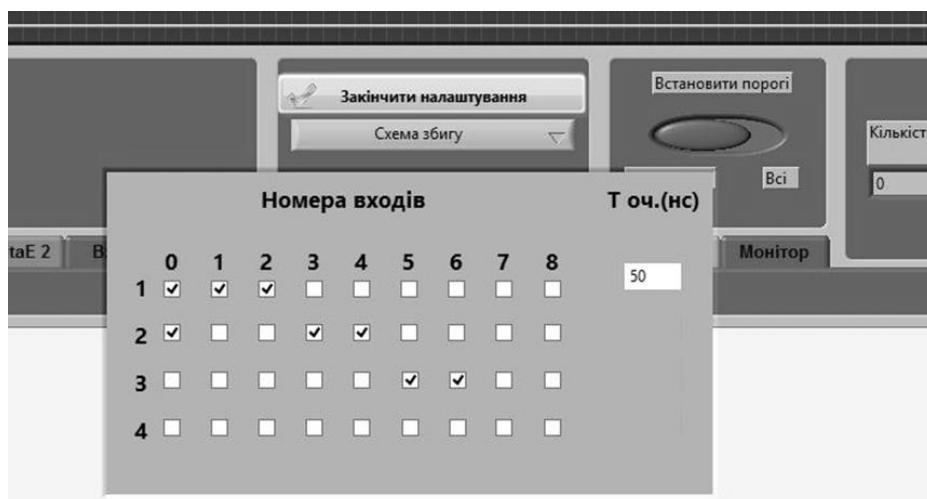


Рис. 6. Діалогове вікно програмування збігів.

Мікроконтролер здійснює загальне управління роботою системи, у тому числі накопичення в пам'яті FIFO кодів подій. Час реєстрації коду однієї події з урахуванням часу перетворення за записом у пам'ять становить 8 мкс.

Блок виконує також функції зв'язку із системним комп'ютером через інтерфейс USB. На системному комп'ютері дані експерименту накопичуються та паралельно відображаються на восьми графіках у вигляді гістограм.

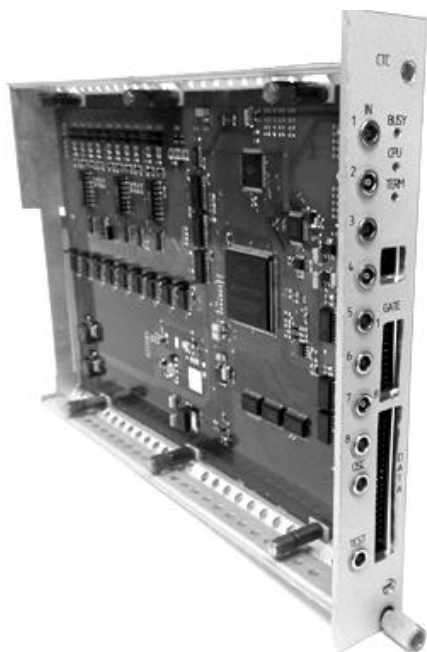


Рис. 7. Загальний вигляд блока збігів та кодування часу.

Блок збігів та кодування часу реалізовано в модулі КАМАК подвійної ширини (рис. 7).

2.2. Програмне забезпечення

Програмне забезпечення системи має дворівневу структуру. Управління експериментом здійснюється програмою нижнього рівня, яка напи-

сана засобами графічного програмування з використанням віртуальних приладів у вигляді панелей управління на екрані монітора, що значно спрощує інтерфейс користувача та суттєво підвищує швидкість реакції системи за рахунок потокового програмування операцій. Швидкість реакції системи з огляду на випадковий розподіл інтервалів надходження сигналів на вхід системи та високу їхню інтенсивність є критично важливим параметром при проведенні ядерно-фізичних експериментів на прискорювачах.

Другий рівень взаємодіє з першим через буферні накопичувачі, які містяться в блоках, і таким чином не має жорстких вимог по швидкості реакції і тому написаний звичайною текстовою мовою програмування C++. Він функціонує під управлінням системи реального часу. Налаштування в комплексі і робота з ним здійснюються оператором за допомогою діалогових вікон. Даний рівень може функціонувати як на одному комп'ютері, так і з використанням клієнт-серверних технологій у рамках розподіленої системи збору й обробки даних. Програмне забезпечення цього рівня вирішує такі задачі:

1. Запис інформації від усіх детекторів у форматі, який описано вище в розділі 2.

2. Фіксація умов проведення вимірювань. Перед запуском накопичення необхідно задати вхідні параметри, а саме: ім'я файла; кількість АЦП; кількість лічильників; час накопичення даних (або максимальну кількість подій), при накопиченні якого вимірювання буде зупинено, тощо. Також потрібно заповнити текстовий блок, в який записується супровідний документ файла (дата виконання експерименту, тип досліджуваної реакції, енергія пучка частинок, товщина і кут між площиною мішені і напрямком пучка, кути розміщення телескопів детекторів тощо).

3. Калібрування енергетичної шкали спектрометричних трактів.

4. Перегляд результатів вимірювань у вигляді одно- та двомірних гістограм та графіків. При цьому здійснюються різні маніпуляції із зображенням (завдання порогів, вибір вікон, зміна проєкцій тощо) та найпростіша обробка даних. Одномірні гістограми можна масштабувати, додавати, віднімати «прокручувати», співвідносити один з іншим. Також забезпечується маркерна обробка даних (система поточкових та інтервальних вимірювань), що дає змогу визначати відстань між будь-якою парою точок графічної площини і визначати значення в характерних точках. Крім того, режим обробки дає можливість робити експрес-обрахунок із виділеною на гістограмі ділянкою (вікном обробки) – обчислюються інтегральна сума, визначення положення піка, сума в ньому, а також відображаються як одномірні, так і двомірні спектри, у тому числі у вигляді проєкцій на одну із осей вибраної області (локуса) на двомірному (E_i , ΔE)-розподіленні.

5. Здійснення в реальному масштабі часу попередньої математичної обробки даних (визначення положення піка та площі під ним, обчислення напівширини на половині висоти піка тощо). Крім того, ведеться контроль за параметрами експерименту.

6. Після закінчення експерименту до файла з даними заноситься додаткова інформація: час експерименту, інтенсивності потоків даних по каналах реєстрації, інтегральне число подій у

будь-якому реперному піку у спектрі певного продукту реакції тощо. У текстовий блок файла вимірів додаються зауваження до вимірювань, що проводились.

7. Здійснення експорту даних у текстові файли для сервісних режимів вторинної обробки даних (конвертори у файли даних Matlab, Excel та ін.).

3. Висновки

Використання символічного програмування та мікросхем із програмованою логікою у спеціально розроблених блоках ядерної електроніки надало можливість варіації їхніх функціональних параметрів відповідно до вимог конкретного застосування. Реалізована на основі цих блоків та створеного програмного забезпечення вимірювальна система з гнучкою архітектурою може бути адаптована виключно програмними засобами до широкого кола експериментальних методик дослідження ядерних реакцій.

Наявність коду часу появи кожної події у форматі її кодування надає гнучкість і при обробці експериментальних даних, коли потрібно відтворити у цифровій формі на комп'ютері процес накопичення, наприклад для того, щоб по-іншому обробити дані, виділити необхідні збіги подій за їхніми часовими відмітками або обробити чи виділити дані, отримані в певні інтервали експерименту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. О.П. Вихлянецв и др. Аппаратурно-програмный комплекс для измерения энергетических и угловых распределений заряженных частиц, образующихся в ядерных реакциях. *Ядерная физика и инжиниринг* 4 (2016) 326.
2. В.І. Гранцев та ін. Модернізований експериментальний комплекс для дослідження ядерних реакцій на прискорювачі У-240. *Зб. наук. праць Ін-ту ядерних дослідж.* 12 (2004) 108.
3. Ю.М. Павленко та ін. Методика багатопараметричних кореляційних вимірювань для дослідження ядерних реакцій. *Зб. наук. праць Ін-ту ядерних дослідж.* 15 (2005) 151.
4. S. Carboni et al. Particle identification using the ΔE -E technique and pulse shape discrimination with the silicon detectors of the FAZIA project. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 664 (2012) 251.
5. E. Piasecki et al. *Project ICARE at HIL (Warsaw: Heavy Ion Laboratory, 2007)* 38.
6. Л.Е. Гаврилов. *Основы ядерной электроники. Часть 1.* (М.: НИЯУ МИФИ, 2010) 164 с.
7. Ron Jenkins et al. *Quantitative X-Ray Spectrometry (New York, Marcel Dekker Inc, 1981)* 266.
8. А.П. Войтер и др. Восьмиканальный спектрометрический АЦП с программируемой логикой. *Ядерная физика та енергетика* 17 (2016) 86.
9. С. Зайцев. Цифровые методы время-частотных измерений. *Современная электроника* 6 (2009) 20.

А. П. Войтер*, М. И. Доронин, А. Н. Ковалев, И. А. Мазный

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

*Ответственный автор: voiter@kinr.kiev.ua

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА С ГИБКОЙ АРХИТЕКТУРОЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Рассмотрена измерительная система с гибкой архитектурой для исследования многопараметрических ядерных реакций, которая основана на широком использовании устройств с программируемой логикой. Описаны технические средства системы и ее программное обеспечение.

Ключевые слова: измерительные системы, ядерные реакции, ядерная электроника, программное обеспечение.

A. P. Voiter*, M. I. Doronin, O. M. Kovalev, I. O. Maznyj

Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: voiter@kinr.kiev.ua

**DATA ACQUISITION SYSTEM WITH FLEXIBLE ARCHITECTURE
FOR THE RESEARCH OF NUCLEAR REACTIONS**

Data acquisition system with a flexible architecture for studying multiparameter nuclear reactions, based on the extensive use of the devices with programmable logic, is considered. The technical means of the system and its software are described.

Keywords: data acquisition systems, nuclear reactions, nuclear electronics, software.

REFERENCES

1. O.P. Vikhlyantsev et al. Hardware-software complex for measuring the energy and angular distributions of charged particles formed in nuclear reactions. *Yadernaya Fizika i Inzhiniring* 4 (2016) 326. (Rus)
2. V.I. Gratsev et al. Modified experimental complex for investigation of nuclear reactions at the U-240 accelerator. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 5 (2004) 108. (Ukr)
3. Yu.M. Pavlenko et al. The methods of multiparameter correlation measurements for the study of nuclear reactions. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 6 (2005) 151. (Ukr)
4. S. Carboni et al. Particle identification using the ΔE -E technique and pulse shape discrimination with the silicon detectors of the FAZIA project. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 664 (2012) 251.
5. E. Piasecki et al. *Project ICARE at HIL* (Warsaw: Heavy Ion Laboratory, 2007) 38.
6. L.E. Gavrilov. *Fundamentals of Nuclear Electronics*. Part 1. (Moskva: МЕРФІ, 2010) 164 p. (Rus)
7. Ron Jenkins et al. *Quantitative X-Ray Spectrometry* (New York, Marcel Dekker Inc, 1981) 586 p.
8. A.P. Voiter et al. Eight-channel spectrometric ADC with programmable logic. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 17 (2016) 86. (Rus)
9. S. Zaitsev. Digital time-frequency measurement methods. *Sovremennaya Elektronika* 6 (2009) 20. (Rus)

Надійшла 18.12.2018

Received 18.12.2018