

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Факультет (навчально-науковий інститут) «Фізико-технічний факультет»

Кафедра фізики ядра та високих енергій імені О. І. Ахієзера

До захисту допущено

Кафедрою фізики ядра та високих енергій імені О. І. Ахієзера протокол № 10
від 15.05.2026 р.

завідувач кафедри

(підпис)

Юрій СЛЮСАРЕНКО

(ім'я, прізвище)

«15» травня 2026 р.

Кваліфікаційна робота

здобувача другого (магістерського) рівня вищої освіти
(першого (бакалаврського) / другого (магістерського))

Експериментальне розділення нейтронного та супутнього гамма
випромінювання
(назва роботи)

Спеціальність (спеціалізація) 105 - Прикладна фізика та наноматеріали
(код та найменування спеціальності; спеціалізації спеціальності - за наявності)

Освітня програма "Експериментальна ядерна фізика та фізика плазми"
(назва освітньої програми)

Виконавець

(підпис)

Андрій Доброжан

(ім'я, прізвище)

Науковий керівник

(підпис)

Іван Якименко

(ім'я, прізвище)

АНОТАЦІЯ

Доброжан А. І. Експериментальне розділення нейтронного та супутнього гамма випромінювання

Дипломна робота на здобуття ступеня вищої освіти «магістр» за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали». Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, 2026.

У дипломній роботі проведено апробацію та порівняльний аналіз цифрових методів дискримінації сцинтиляційних сигналів для розділення швидких нейтронів та гамма-квантів джерела $^{239}\text{PuBe}$. Дослідження виконано на базі програмно-апаратного комплексу, що складається з органічного сцинтилятора стильбену, кремнієвих фотопомножувачів (SiPM) та цифрового осцилографа, як доступної альтернативи спеціалізованим системам збору даних. Реалізація алгоритмів у середовищі MATLAB із впровадженням динамічного пошуку «підосви» піку дозволила мінімізувати вплив амплітудного джитера. За результатами автоматичної кластеризації k-means метод перетину нуля (ZC) та метод порівняння зарядів (CC) продемонстрували високу якість розділення (FoM 1,550 та 1,241 відповідно), що корелює з показниками професійного обладнання CAEN. Також апробовано метод асиметрії піку (PA), заснований на зміщенні центроїда сигналу, який підтвердив фізичну відмінність у морфології імпульсів ($\Delta t \approx 160$ нс для нейтронів проти 109 нс для гамма-квантів). Результати роботи підтверджують гіпотезу про можливість ефективного використання комплексу «осцилограф + комп'ютерна обробка» у наукових та освітніх цілях як економічно вигідної заміни дороговартісним спеціалізованим системам типу CAEN.

Ключові слова: n-γ дискримінація, стильбен, SiPM, осцилограф, Pulse Shape Discrimination, Charge Comparison, Zero-Crossing, центроїд, асиметрія піку, k-means, Figure of Merit

ANNOTATION

Dobrozhan A. I. Experimental Neutron-Gamma Discrimination

Master's thesis in Specialty 105 "Applied Physics and Nanomaterials". V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2026.

The Master's thesis provides an approbation and comparative analysis of digital scintillation signal discrimination methods for the separation of fast neutrons and gamma rays from a $^{239}\text{PuBe}$ source. The study was conducted using a hardware-software complex consisting of a stilbene organic scintillator, silicon photomultipliers (SiPM), and a digital oscilloscope as an accessible alternative to specialized data acquisition systems. The implementation of algorithms in the MATLAB environment, including the introduction of dynamic "foot" detection of the peak, allowed for minimizing the impact of amplitude jitter. Based on the results of k-means automated clustering, the Zero-Crossing (ZC) and Charge Comparison (CC) methods demonstrated high separation quality (FoM of 1.550 and 1.241, respectively), which correlates with the performance of professional CAEN equipment. The Peak Asymmetry (PA) method based on the signal centroid shift was also tested, confirming a physical difference in pulse morphology ($\Delta t \approx 160$ ns for neutrons versus 109 ns for gamma rays). The results of the work confirm the hypothesis of the possibility of effective use of the "oscilloscope + computer processing" complex for scientific and educational purposes as a cost-effective replacement for expensive specialized systems such as CAEN.

Keywords: n- γ discrimination, stilbene, SiPM, oscilloscope, Pulse Shape Discrimination, Charge Comparison, Zero-Crossing, centroid, peak asymmetry, k-means, Figure of Merit.

ЗМІСТ

Зміст

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	8
1.1 Переваги відомих методів розділення	8
1.2 Технічні проблеми гамма-нейтронного розділення	10
1.3 Порівняння обладнання	13
1.4 Огляд наукової літератури.....	15
1.5 Висновки до розділу 1.....	18
РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТ. РЕЗУЛЬТАТИ.....	20
2.1. Загальний опис експерименту	20
2.2. Детектор: тип детектора.....	25
2.3 Обробка експериментальних даних	26
2.4 Висновки до розділу 2.....	45
ВИСНОВКИ.....	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	49

ВСТУП

Оскільки джерела радіоактивних нейтронів, як правило, супроводжуються супутнім γ -випромінюванням, ефективна робота нейтронних детекторів, зокрема органічних сцинтиляторів, неможлива без надійних методів розділення цих двох типів сигналів. Ключовим підходом до вирішення цієї задачі є використання методів розрізнення форм імпульсів (Pulse Shape Discrimination, PSD), що базуються на аналізі часових характеристик сцинтиляційних світлових імпульсів.

Фізична основа PSD полягає у відмінностях механізмів збудження та релаксації сцинтиляційного середовища під дією різних типів іонізуючого випромінювання. Зокрема, γ -кванти, взаємодіючи зі сцинтилятором через електронні процеси (переважно комптонівське розсіяння), формують імпульси з домінуванням швидкої компоненти випромінювання, що відповідає короткоживучим збудженим станам. Натомість нейтрони, які передають енергію через пружні зіткнення з ядрами (переважно протонами), індукують складніший спектр збуджених станів, що проявляється у наявності як швидкої, так і повільної (затриманої) компоненти флуоресценції. Саме різниця у співвідношенні цих компонент і використовується як дискримінаційна ознака у більшості методів розділення [1].

Підвищення ефективності нейтронно-гамма дискримінації може досягатися не лише алгоритмічними методами обробки сигналів, але й на рівні матеріалознавства. Оптимізація складу органічних сцинтиляторів, зокрема застосування багатокомпонентних (наприклад, потрійних) флуорофорних систем [2], дозволяє модифікувати спектрально-часові характеристики випромінювання. Це, зокрема, включає кероване зміщення довжини хвилі та зміну часу життя збуджених станів, що покращує роздільну здатність PSD-методів.

Застосування сцинтиляційних детекторів у поєднанні з методами PSD охоплює широкий спектр задач. У сфері ядерної безпеки ці технології є

критично важливими для ідентифікації та виявлення спеціальних ядерних матеріалів [3, 4], де необхідна висока селективність до нейтронного випромінювання на фоні інтенсивного γ -поля. В екологічному моніторингу вони використовуються для аналізу радіаційного забруднення, зокрема в задачах дослідження ґрунтів [5, 6]. Крім того, методи нейтронної діагностики знаходять застосування у міждисциплінарних дослідженнях, таких як неруйнівний аналіз об'єктів культурної спадщини [7] чи сканування з метою картографування, гуманітарного розмінування [8], де важлива висока проникна здатність нейтронів у поєднанні з чутливістю до елементного складу матеріалів.

Математичні методи розділення гамма-нейтронного випромінювання базуються на відмінностях у формі світлового імпульсу, що виникає при взаємодії різних частинок зі сцинтилятором.

Метою роботи є апробація цифрових методів дискримінації сцинтиляційних сигналів для розділення швидких нейтронів та гамма-квантів із використанням стандартного лабораторного обладнання. Робота спрямована на підтвердження ефективності програмної обробки даних, отриманих за допомогою цифрового осцилографа та персонального комп'ютера, як альтернативи спеціалізованим системам збору даних (діджитайзерам CAEN) для вирішення завдань ідентифікації частинок у реальному часі та при постаналізі.

Об'єктом дослідження є процес формування, реєстрації та цифрового перетворення сцинтиляційних імпульсів, що виникають в органічному кристалі стильбену при взаємодії з випромінюванням джерела $^{239}\text{PuBe}$. Досліджуються часові характеристики швидкої та повільної компонент флуоресценції, а також їхнє відображення у вигляді цифрових масивів даних при зчитуванні за допомогою кремнієвих фотопомножувачів (SiPM).

Предмет дослідження:

Стабільність та роздільна здатність алгоритмів Pulse Shape Discrimination (PSD) — порівняння зарядів (CC), перетину нуля (ZC) та

авторського методу асиметрії піку (РА). Предметом аналізу є показник якості розділення (Figure of Merit), отриманий шляхом математичної обробки RAW-сигналів у середовищі MATLAB з використанням динамічного визначення часових меж імпульсу.

Методи дослідження:

- Експериментальний метод: реєстрація фізичних сигналів сцинтиляційного детектора за допомогою цифрового осцилографа Keysight з наступним накопиченням та експортом масивів даних для цифрової обробки.
- Цифрова обробка сигналів: застосування алгоритмів фільтрації, віднімання базової лінії та динамічного пошуку «підшви» піку для забезпечення інваріантності методів до амплітудного джитера.
- Методи автоматичної кластеризації: використання алгоритму k-means для групування подій на два класи (нейтрони та гамма-кванти) за розрахованими PSD-параметрами без попереднього використання розмічених навчальних вибірок.
- Статистичний аналіз: застосування апроксимації подвійним Гаусовим розподілом (DG fit) для розрахунку параметрів розподілів та визначення інтегрального критерію якості дискримінації FoM, що дозволило порівняти ефективність апробованих комп'ютерних методів із показниками спеціалізованого обладнання.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Переваги відомих методів розділення

Метод порівняння зарядів (Charge Comparison, CC) визначає тип частинки через відношення інтегралу заряду «повільної» компоненти імпульсу до його повного заряду. Основним параметром дискретизації виступає відношення цих двох інтегралів, отриманих за допомогою спеціально налаштованих часових воріт. Метод є стандартним для органічних рідких сцинтиляторів, таких як BC501A, NE213, а також сучасних пластикових сцинтиляторів серії EJ-276 та EJ-299.

Метод інтегрування заряду (Charge Integration, CI) є класичним підходом, де аналізується відношення заряду в «хвості» імпульсу до його повної площі або амплітуди. Він вважається найпростішим у реалізації як у цифровій, так і в аналоговій формі. Головною перевагою методу є висока швидкість обчислень, проте він демонструє гірші результати при низьких енергіях випромінювання, де сигнали часто перекриваються.

Метод перетину нуля (Zero-Crossing, ZC) базується на вимірюванні часу від початку імпульсу до моменту, коли сформований біполярний сигнал перетинає нульову позначку. Параметром дискретизації є часовий інтервал «перетину нуля», який залежить від швидкості затухання сцинтиляцій. Його часто застосовують у великих детекторах на основі NE213 або BC501A, де потрібен широкий динамічний діапазон енергій.

Метод апроксимації кривої (Curve Fitting, CF) полягає у математичному моделюванні «хвоста» імпульсу за допомогою експоненціальних функцій для пошуку константи затухання. Головним параметром дискретизації є обчислена константа затухання λ , яка відрізняється для протонів віддачі та електронів. Найкраще метод зарекомендував себе при роботі з рідкими сцинтиляторами NE213 у цифрових системах з високою частотою дискретизації.

Таблиця 1.1

Порівняльна таблиця методів нейтрон-гамма розділення

Назва методу	Суть методу	Головна перевага
Charge Integration	Порівняння площі хвоста до всього імпульсу	Максимальна простота та швидкість
Charge Comparison	Порівняння заряду повільної компоненти до повного сигналу	Простота алгоритму та апаратної реалізації
Zero-Crossing	Вимірювання часу перетину нульового рівня сигналу	Ефективність при низьких енергіях випромінювання
Curve Fitting	Апроксимація затухання сигналу математичною кривою	Висока точність за рахунок фільтрації шумів
Pattern Recognition	Порівняння сигналів за допомогою векторного аналізу	Поєднання точності з високою швидкістю обробки

Метод розпізнавання образів (Pattern Recognition, PR). Техніка розпізнавання образів розглядає оцифрований сигнал як вектор і порівнює його з еталонним вектором за допомогою скалярного добутку. Основним параметром дискретизації є косинус кута між об'єктним та референтним векторами, що відображає ступінь схожості форм. Метод демонструє високу ефективність для детекторів NE213, забезпечуючи швидку обробку сигналів. Перелік математичних та аналітичних методів гамма-нейтрон розділення, а також їх головні переваги приведено в табл. 1.1.

1.2 Технічні проблеми гамма-нейтронного розділення

Проблема розділення гамма-нейтронного випромінювання виникає через те, що обидва види випромінювання створюють подібні за формою електричні сигнали при взаємодії з сцинтиляційним детектором. Основним фізичним принципом, що дозволяє їх розрізнити, є різниця у питомій йонізаційній здатності вторинних частинок. Швидкі електрони від гамма-квантів та важкі протони віддачі від нейтронів збуджують різні стани молекул сцинтилятора. Це призводить до появи «швидкої» та «повільної» компонент висвічування, де нейтрони демонструють значно інтенсивніший «хвіст» імпульсу (табл. 1.2).

Також важливим ускладненням наукомісткої задачі є те, що при низьких енергіях амплітуди сигналів стають порівнянними з рівнем шумів електроніки, що призводить до перекриття розподілів частинок на спектрах дискримінації. Якість розділення критично залежить від світлового виходу детектора, оскільки низька кількість фотоелектронів збільшує статистичні флуктуації форми імпульсу. Таким чином, розробка методів розділення спрямована на досягнення мінімального порогу реєстрації при збереженні високої швидкості обробки даних у змішаних полях випромінювання.

Для якісного відтворення форми імпульсу цифрові системи повинні працювати на частотах порядку 1-10 ГГц, що породжує величезні масиви даних. Тому частота дискретизації та швидкість обробки є дуже важливим фактором для гамма-нейтронного розділення. Висока частота дозволяє точно фіксувати часові параметри, такі як перетин нуля або форма затухання, проте це вимагає розробки алгоритмів, що здатні працювати в режимі реального часу без накопичення затримок.

Також важливо зауважити, що сцинтилятори на основі стильбену або рідких сумішей мають компоненти висвічування, що тривають сотні наносекунд, що визначає мінімально необхідний час інтегрування або спостереження за одним сигналом. Якщо час збору даних занадто короткий,

втрачається інформація про «хвіст» імпульсу, а якщо занадто довгий — збільшується імовірність накладання сигналів (pile-up), що робить дискримінацію проблематичною, або взагалі неможливою.

Основним критерієм успішності розділення сигналів є фактор якості (Figure of Merit), який відображає ступінь перекриття піків гамма-квантів та нейтронів на гістограмі відповідності. При зменшенні енергії частинок піки наближаються один до одного, а їх ширина зростає через статистичний розкид кількості фотоелектронів, що створює проблему помилкової ідентифікації низькоенергетичних подій.

Детектори, які використовуються в ядерних дослідженнях, мають забезпечувати розділення у широкому діапазоні енергій, від десятків кеВ до декількох МеВ. Проблема полягає у тому, що параметри дискримінації часто змінюються залежно від амплітуди сигналу, що вимагає складного калібрування або застосування методів, де параметр розділення залишається стабільним незалежно від енергії. У детекторах великого об'єму виникає проблема багаторазового розсіювання нейтронів на протонах, що розмиває часові характеристики світлового спалаху. Це погіршує роздільну здатність у порівнянні з маленькими контрольними зразками детекторів через неоднорідність збору світла від сцинтилятора та часові затримки поширення фотонів у великому об'ємі матеріалу сцинтилятора.

Таблиця 1.2

Консолідована таблиця проблем експериментального розділення
гамма-нейтронного випромінювання

Параметр якості	Технічна сутність проблеми та шляхи вирішення	Джерела
Поріг розділення	При низьких енергіях (нижче 100 keVee) розподіли частинок перекриваються через статистичні флуктуації. Використання методу Zero-Crossing або цифрового розпізнавання образів дозволяє знизити цей поріг до 30–40 keVee. +2	[9], [11]
Чистота спектра	Недостатній вихід фотоелектронів призводить до «витоку» гамма-подій у нейтронне вікно. Висока якість розділення прямо корелює з високим виходом фотоелектронів, наприклад, 2300 ± 100 phe/MeV для детектора BC501A.	[9], [10]
Статистична валідність	Для кількісної оцінки використовується фактор якості (FOM). Значення $FOM > 1.2$ свідчить про прийнятне розділення, а показники вище 1.5 при енергії 100 keV вважаються відмінними для сучасних систем.	[9-12]
Пропускна здатність	Повільні компоненти висвічування, що тривають до 1 мкс, обмежують частоту реєстрації та створюють ризик накладання імпульсів. Цифрова обробка (DSP) дозволяє аналізувати форму кожного імпульсу окремо навіть при високих завантаженнях. +1	[10-11]
Стабільність	Метод перетину нуля (Z/C) демонструє значно вищу стабільність параметрів дискримінації у широкому динамічному діапазоні енергій порівняно з методом порівняння заряду.	[9]
Точність обробки	Висока частота дискретизації (наприклад, 10 ГГц) необхідна для точного відтворення форми імпульсу та мінімізації похибок при математичній апроксимації кривої або векторному порівнянні.	[11]
Геометрична чіткість	У детекторах великого об'єму багаторазове розсіювання нейтронів на протонах призводить до розширення нейтронного піка та зниження фактору якості.	[9]

1.3 Порівняння обладнання

Сучасні системи реєстрації ядерного випромінювання виконують критичну задачу перетворення аналогового сигналу від фотоелектронного помножувача в цифрову форму з подальшою ідентифікацією типу частинок у режимі реального часу. Головним викликом для таких приладів є забезпечення високої точності визначення параметрів «швидкої» та «повільної» компонент висвічування сцинтилятора для розрахунку фактора якості розділення FOM. Вирішення цих задач вимагає інтеграції складних математичних алгоритмів, таких як цифрове інтегрування заряду, векторний аналіз або апроксимація кривих, безпосередньо в обчислювальну архітектуру приладів.

CAEN DT5730/V1730 базується на 14-бітному аналого-цифровому перетворювачі з частотою дискретизації 500 MS/s, що оптимізовано для роботи з органічними сцинтиляторами середньої тривалості висвічування. Пристрій використовує спеціалізовану прошивку DPP-PSD, яка дозволяє автоматично виконувати алгоритм цифрового порівняння заряду (Charge Comparison) на рівні вбудованої матриці FPGA. Завдяки такій архітектурі прилад забезпечує високу пропускну здатність даних при мінімальному мертвому часі, що є критичним для сучасних багатодетекторних масивів, таких як DEMON або EDEN.

LeCroy WavePro 7000 представляє клас широкосмугових цифрових осцилографів, які забезпечують надвисоку частоту дискретизації до 10 ГГц з кроком оцифрування 0.1 нс на канал. Така виняткова часова роздільна здатність дозволяє використовувати прилад як еталонний інструмент для реалізації методу розпізнавання образів (Pattern Recognition), де сигнал аналізується як багатовимірний вектор. Використання подібного обладнання мінімізує похибки від високочастотних шумів за допомогою методів ковзного середнього, забезпечуючи майже повне розділення гамма-нейтронних піків навіть при низьких енергіях протонів віддачі.

Спеціалізований модуль NDE 202 (EUROBALL) був розроблений для систем розділення, де пріоритет надається методу перетину нуля (Zero-Crossing) у широкому динамічному діапазоні енергій. Прилад інтегрує в собі константний дискримінатор (CFD) та схеми детектування біполярних сигналів, що дозволяє досягати порогу розділення на рівні 30–40 кеВ енергії електронів віддачі. Незважаючи на розвиток повністю цифрових систем, блоки цієї серії залишаються еталоном стабільності параметра дискримінації, що підтверджено тривалою експлуатацією в нейтронних детекторах EUROBALL Neutron Wall.

Agilent U5303A є високошвидкісним оцифровуючим пристроєм у форматі PCIe, що забезпечує 12-бітну роздільну здатність при частоті дискретизації до 3.2 ГГц на канал. Завдяки відкритій архітектурі FPGA та можливості передачі даних безпосередньо в пам'ять ПК через шину PCIe, модуль дозволяє реалізувати найбільш ресурсомісткі математичні алгоритми, такі як багатопараметрична апроксимація кривої затухання (Curve Fitting). Висока пропускна здатність та низький рівень власних шумів роблять цей пристрій оптимальним для лабораторних досліджень, де необхідно поєднувати високу частоту дискретизації з гнучкістю програмного налаштування алгоритмів розділення в середовищах на кшталт MATLAB.

В таблиці 1.3 приведено порівняння ключових характеристик наукового та лабораторного обладнання для гамма-нейтронного розділення, яке широко застосовується в світових наукових лабораторіях.

Таблиця 1.3

Порівняння ключових характеристик обладнання для гамма-нейтронного розділення

Модель приладу	Основний алгоритм	Робоча частота (Sampling rate)	Робочі енергії	Головна перевага
CAEN x730	Charge Comparison (DPP-PSD)	500 MS/s	60 кеВ – 4 МеВ	Висока швидкість обробки багатьох каналів
LeCroy WavePro	Pattern Recognition	10 GS/s +1	Від 800 кеВ (протони)	Еталонна точність відтворення форми імпульсу
Agilent U5303A	Curve Fitting	До 3.2 GS/s	Широкий діапазон	Гнучкість налаштування алгоритмів на ПК
NDE 202	Zero-Crossing (ZC)	Аналого-цифровий	Від 30 кеВ	Стабільність у великому динамічному діапазоні

1.4 Огляд наукової літератури

В науковій статті [13] проведено пряме порівняння цифрових версій методів перетину нуля ZC та порівняння зарядів CC з використанням рідкого сцинтилятора NE213 та 8-бітного дигітайзера з частотою 1 GS/s. Експериментальні результати показали, що метод ZC забезпечує вищу якість розділення з показником FOM = 1.05 при енергії 100 кеВee, тоді як метод CC

за тих самих умов продемонстрував $FOM = 0.88$. Автори встановили, що метод Z/C є значно стійкішим до зміни амплітуди сигналів: при зміні енергії від 100 кеВее до 1 МеВее зміщення параметра дискримінації для Z/C склало лише 2%, у той час як для СС воно досягло 12%. Це підтверджує перевагу Z/C для експериментів з широким динамічним діапазоном, де важливо уникати енергетичної залежності порогу розділення. Також було показано, що при використанні цифрового ZC поріг ефективної реєстрації нейтронів можна знизити до 40 кеВее без суттєвого зростання витоку (leakage) гамма-квантів. Отримані дані вказують на те, що висока частота дискретизації (1 ГГц) дозволяє методу ZC краще нівелювати вплив низької розрядності АЦП (8 біт).

Також важливо згадати роботу [9], де запропоновано та детально досліджено метод аналізу градієнта імпульсу (PGA), який базується на порівнянні поточної амплітуди оцифрованого сигналу з його значенням через певний час затримки. Експеримент проводився з рідким сцинтилятором NE213 (діаметром та висотою 50 мм) та дигітайзером з частотою 250 MS/s та розрядністю 12 біт. Автор встановив оптимальний час затримки для градієнта на рівні 28–32 нс після піка імпульсу, що дозволило максимізувати різницю між швидкою та повільною компонентами висвічування. Результати показали, що метод PGA забезпечує показник $FOM = 1.07$ при дуже низькій енергії 40 кеВее, що значно перевищує можливості стандартного методу порівняння заряду СС у цьому діапазоні. При енергії 100 кеВее метод досяг значення $FOM = 1.63$, демонструючи високу стійкість до електронних шумів та статистичних флуктуацій. Важливою технічною перевагою PGA є його обчислювальна ефективність: алгоритм потребує лише однієї операції порівняння та ділення на одну подію, що робить його в 3–4 рази швидшим за методи апроксимації кривих при реалізації в MATLAB або FPGA.

Розробка системи PSD на базі FPGA (матриця Xilinx Kintex-7) з використанням 12-бітного АЦП та частоти дискретизації 500 MS/s описана у роботі [14]. Автори реалізували метод порівняння зарядів (СС), оптимізований для роботи в умовах екстремально високих завантажень — до 1.08 млн відліків

за секунду (Mcps). В експерименті з джерелом ^{252}Cf та рідким сцинтилятором BC501A система продемонструвала стабільний показник $\text{FOM} = 1,15$ при енергетичному порозі 100 кеВее. Завдяки паралельній архітектурі обробки в FPGA, мертвий час системи на одну подію було скорочено до 200 нс, що дозволило уникнути значних втрат даних при високій інтенсивності випромінювання. Порівняння з офлайн-обробкою на ПК показало ідентичність результатів при значному вигоді у швидкості (обробка в реальному часі). Дослідження підтвердило, що конфігурація 500 МГц є достатньою для точного розділення «швидкої» компоненти (тривалістю $\sim 10\text{--}30$ нс) та «хвоста» імпульсу.

У роботі [15] представлена цифрова реалізація методу перетину нуля ZC, де анодний сигнал від сцинтиляторів EJ-276 та EJ-309 оцифровувався з частотою 500 MS/s та розрядністю 14 біт. Автори впровадили рекурсивний цифровий фільтр для формування біполярного сигналу, що дозволило досягти значення $\text{FOM} = 1.32$ для пластикового сцинтилятора EJ-276 при енергії 100 кеВее. Для рідкого сцинтилятора EJ-309 показник якості склав $\text{FOM} = 1,83$ у тому ж енергетичному діапазоні. Експериментально доведено, що метод забезпечує стабільне розділення частинок при енергіях від 40 кеВее, що є критичним для реєстрації швидких нейтронів низьких енергій. Окремо відмічено, що похибка визначення базової лінії (baseline) була мінімізована до рівня $<1\%$, що дозволило уникнути дрейфу піка дискримінації. За результатами тестів, цей цифровий алгоритм ZC перевершив класичні аналогові методи за параметром чистоти відбору нейтронних подій на 15%.

У роботі [16] досліджено можливість використання 64-канальної спеціалізованої мікросхеми TOFPET2 ASIC для ідентифікації частинок у піксельних детекторах на основі органічних сцинтиляторів. Експериментальна установка складалася з масиву 4×4 кристалів транс-стильбену (розміром $6 \times 6 \times 30$ мм кожен), з'єднаних з масивом кремнієвих фотопомножувачів (SiPM) SensL J-series. Оскільки TOFPET2 спочатку була розроблена для медичної PET-томографії, автори адаптували її для PSD, використовуючи метод

вимірювання часу над порогом (Time-over-Threshold, ToT) для оцінки заряду. При робочій перенапрузі SiPM у 3В, система продемонструвала максимальний фактор якості FOM $\approx 1,2$ при енергії 478 кеВee (край Комптона для лінії 662 кеВ). Дослідження підкреслює, що незважаючи на компактність та низьку вартість на канал, використання методу ToT замість прямого оцифрування форми імпульсу обмежує якість розділення при низьких енергіях. Однак отримані результати підтверджують придатність TOFPET2 для створення портативних систем з великою кількістю каналів, де важливо поєднувати енергетичну роздільну здатність, часові характеристики та базові можливості n-γ дискримінації.

1.5 Висновки до розділу 1

На основі аналізу сучасної академічної літератури та результатів останніх експериментальних досліджень можна зробити обґрунтований висновок, що задача нейтрон-гамма розділення на сьогодні трансформувалася з вузькоспеціалізованого питання ядерної фізики у фундаментальний міждисциплінарний виклик. Актуальність розробки надійних методів дискримінації частинок за формою імпульсу стрімко зростає не лише в традиційних дослідницьких колах, а й у стратегічно важливих прикладних сферах. Зокрема, у сучасній медицині це критично для точності адронної терапії; у виробництві та мистецтвознавстві — для проведення неруйнівного елементного аналізу; а в безпековому секторі — для вирішення гуманітарних задач, таких як високоточне розмінування територій та виявлення прихованих загроз.

Проте незважаючи на високу затребуваність, практична реалізація цих методів стикається з серйозними технологічними бар'єрами, що стосуються апаратної бази. Аналіз показує, що переважна більшість існуючих рішень, здатних забезпечити прийнятний рівень фактора якості (FOM), є стаціонарними та громіздкими комплексами. Вони фактично позбавлені

мобільності, що унеможлиблює їхнє ефективне застосування в динамічних польових умовах або в портативних діагностичних пристроях.

Критичним аспектом залишається швидкість обробки сигналу та частота дискретизації. Сучасне обладнання здебільшого обмежене робочими частотами в межах 500 МГц — 1 ГГц, що виявляється недостатнім для повноцінного відтворення надшвидких компонент висвічування новітніх сцинтиляторів. Відсутність можливості працювати з вищими частотами дискретизації призводить до виникнення "апаратного шуму" та нівелювання дрібних відмінностей у формі фронту сигналу. Це неминуче веде до деградації якості корисного сигналу, розмиття меж між фазовими розподілами частинок та суттєвого підвищення енергетичного порогу, за яким ідентифікація стає неможливою. Таким чином, існує чіткий науковий запит на створення малогабаритних високошвидкісних систем збору даних, здатних забезпечити лабораторну точність у мобільному виконанні.

Таким чином, дослідження підходів реалізації високочастотних методів розділення нейтронного та супутнього гамма-випромінювання є актуальним.

РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТ. РЕЗУЛЬТАТИ

2.1. Загальний опис експерименту

Було поставлено завдання дослідити розділення змішаного нейтрон-гамма випромінювання з використанням різних технік. Зібрана експериментальна установка представлена на Рис. 2.1. Джерело $^{239}\text{Pu-Be}$ розміщене безпосередньо на корпусі сцинтилятора стильбену (5 мм стінка корпусу) розмірами 50×50 мм. Сцинтилятор знаходиться в оптичному контакті з фотопомножувачем R1307 Hamamatsu (PMT) з можливістю заміни. Високовольтний блок живлення налаштовано з урахуванням загального підсилення тракту, обрано робочу напругу 550 В. Сигнал з РМТ надходить на підсилювач із коефіцієнтом підсилення $\times 10$ та з полосою не гірше 100 МГц.

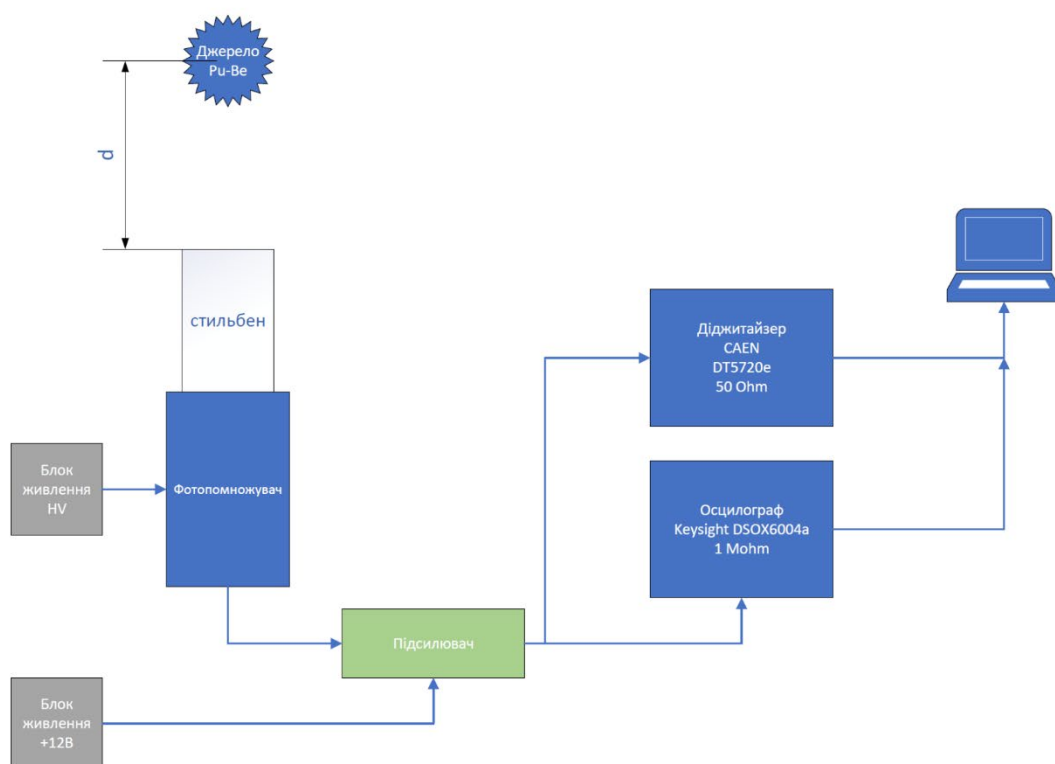


Рис. 2.1 Експериментальна установка

Сигнал з підсилювача надходить до контрольного діджитайзера CAEN DT5720e з узгодженням 50 Ом. Сигнал додатково відбирається через пробник

осцилографом Keysight DSOX6004a. Типові осцилограми сигналів наведено на Рис.2.2.

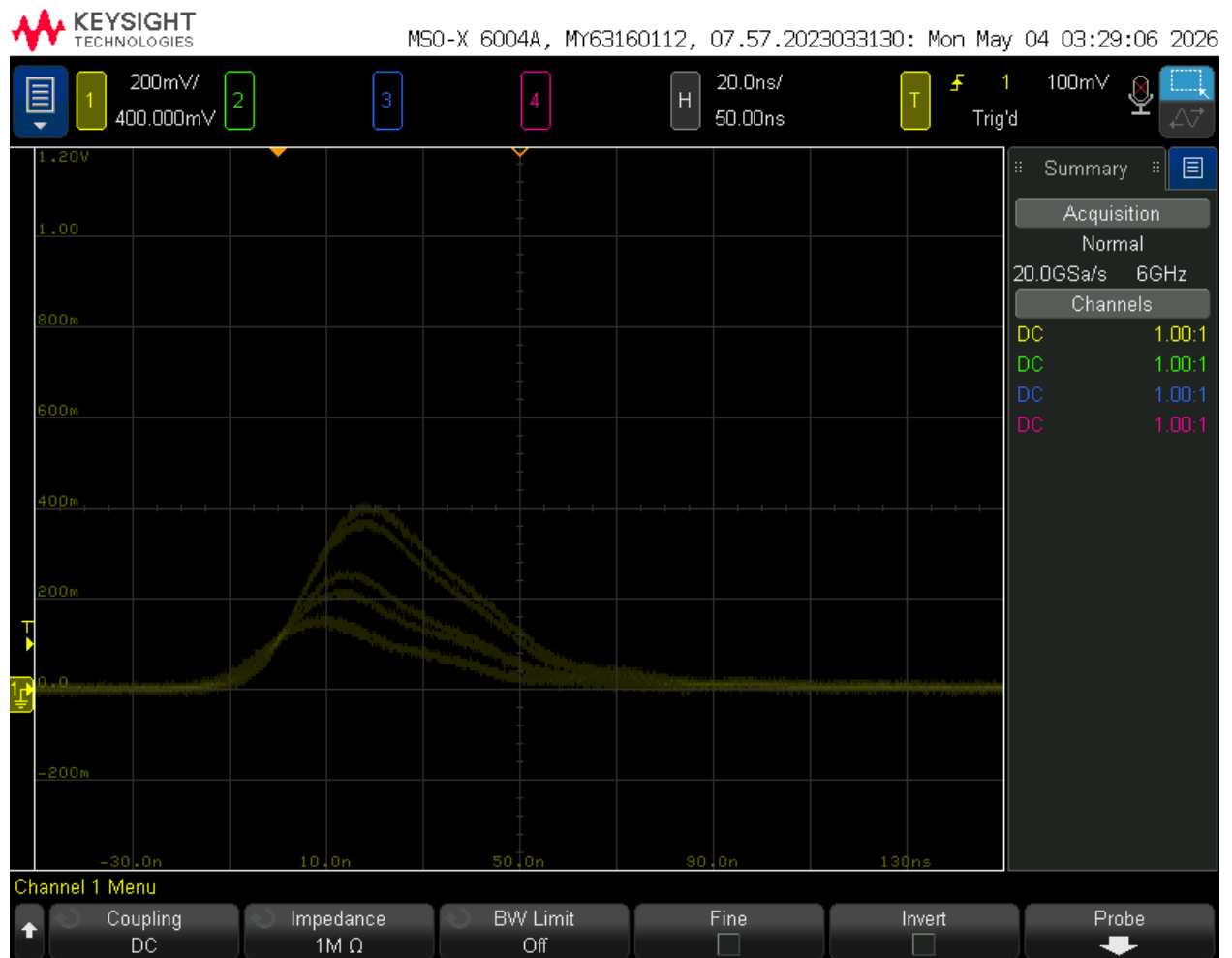


Рис. 2.2 Типові осцилограми сигналів. Швидкість наростання сигналу до максимуму 20-35 нс, спадання 70-80 нс

Сигнали з осцилографа накопичувалися автоматизовано на комп'ютері за допомогою скрипта. Сигнал з діджитайзера оброблювався онлайн в програмі Compass. На рисунку Рис. 2.3 наведено форму сигналу в програмі Compass, тривалість імпульсів становить орієнтовно 90-110 нс із затягнутим заднім фронтом. За формою сигнали ідентичні як на осцилографі, так і на діджитайзері.

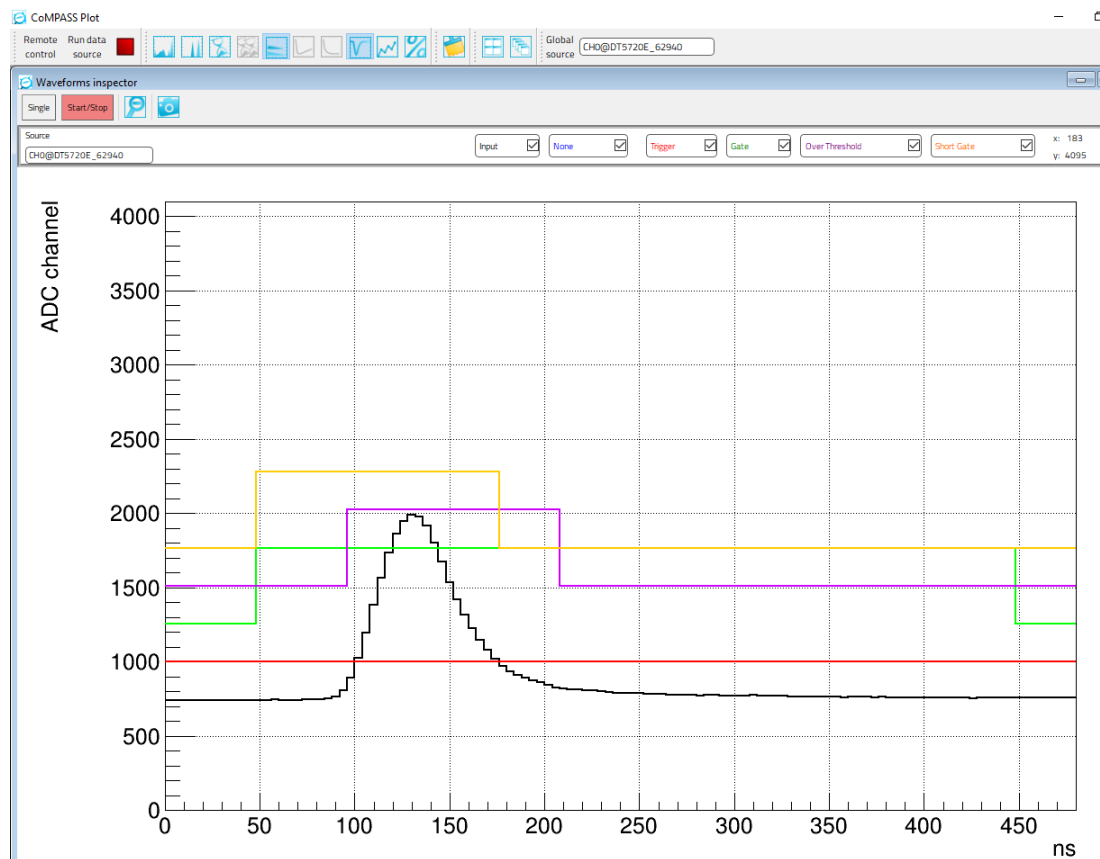


Рис. 2.3 Форма сигналу в програмі Compass. Довжина сигналу (зелена база) 400 нс, швидкість фіксації згасання (жовта база) 120 нс, відділений від фону сигнал (фіолетова база) 110 нс

Використане в експериментах джерело $^{239}\text{Pu-Be}$, його розпад відбувається за схемою Рис. 2.4, через випромінювання альфа-частинок. Реакція альфа частинок на ^9Be продукує супутнє гамма-випромінювання з енергією 4,43 MeV, що виникає внаслідок непружного розсіювання нейтронів з енергією ~ 4 MeV на ядрах вуглецю [17].

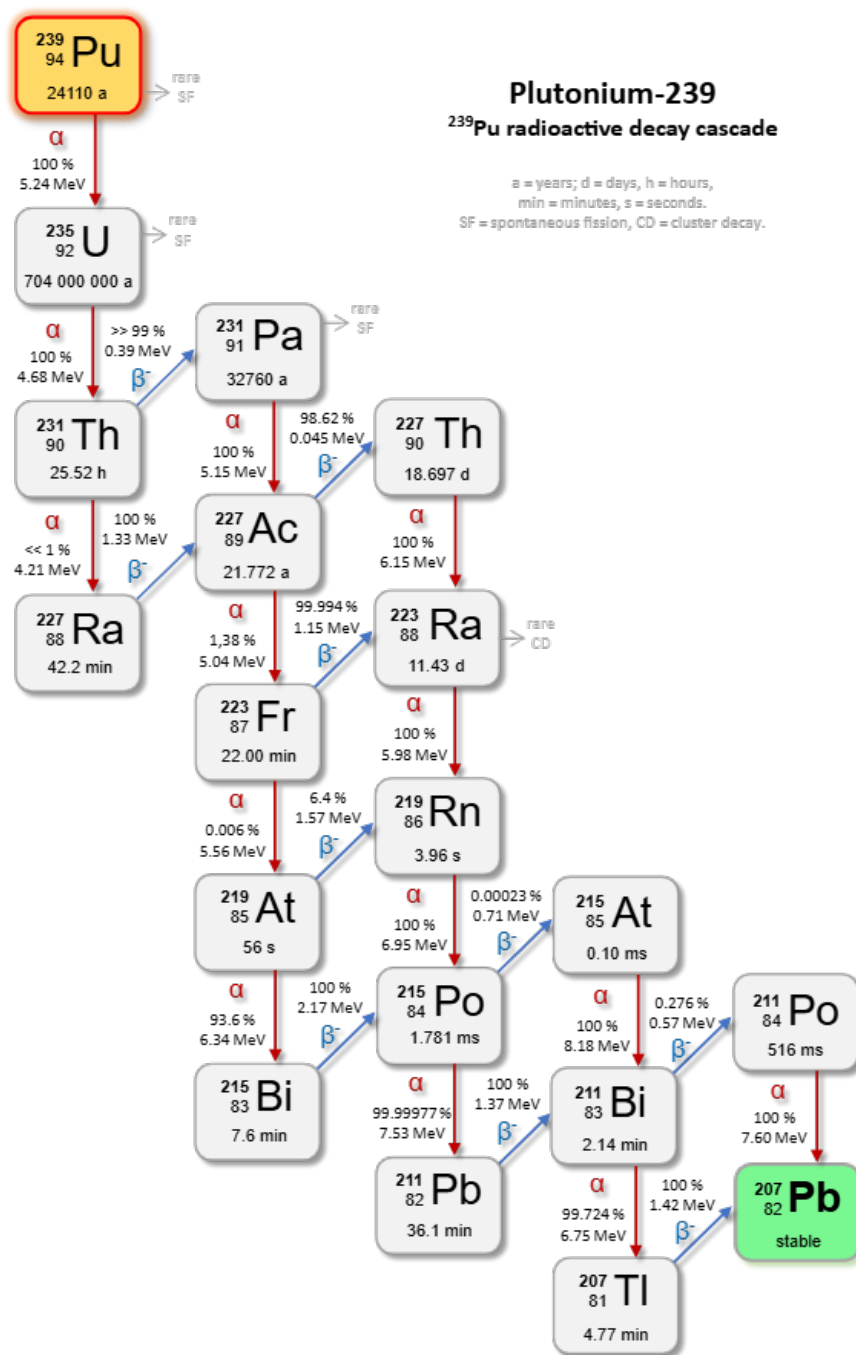


Рис. 2.4 Розпад джерела через альфа канал

Типовий спектр нейтронів Pu-Be джерела наведено Рис. 2.5 [18]. Поріг реєстрації сигналів обрано 100 мВ, що відповідає енергії 300 кеВ.

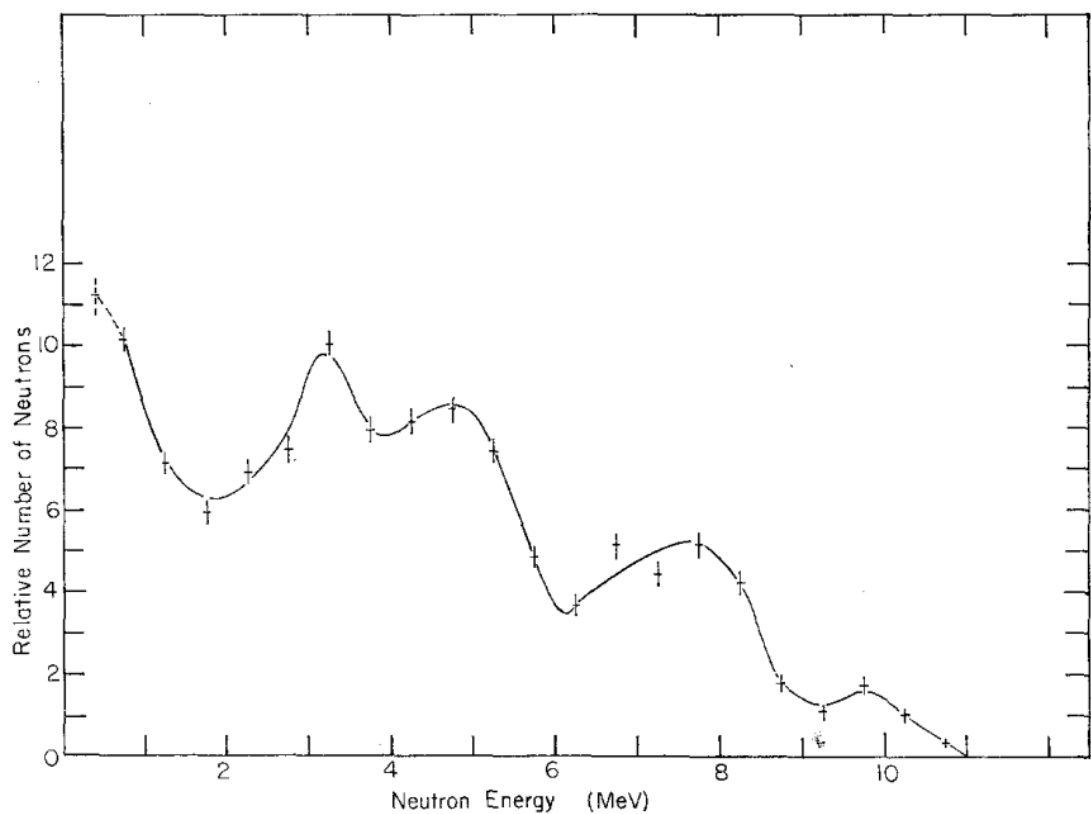


Рис. 2.5 Перейнятий у [18] спектр нейтронного випромінювання джерела Рс-Ве, що містив 80 г плутонію

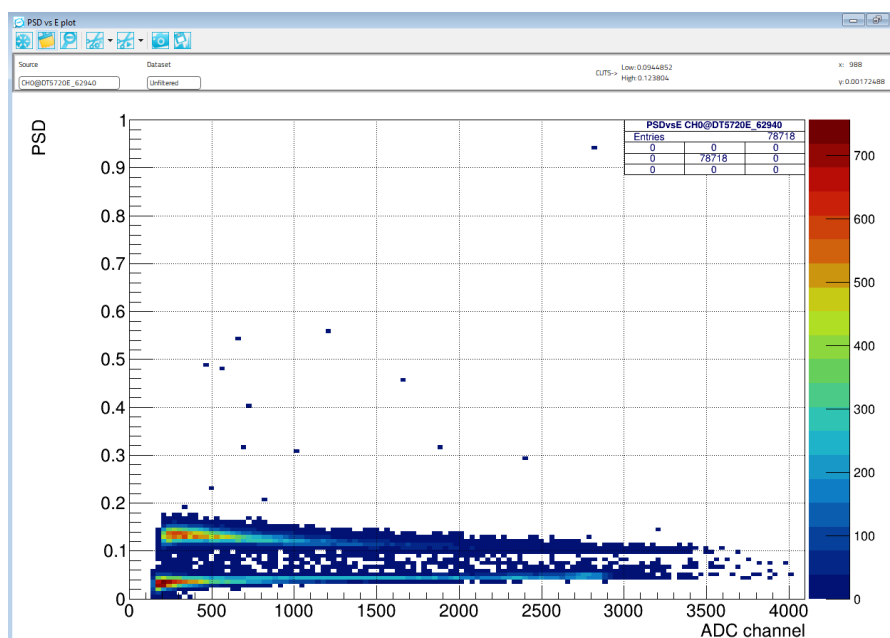


Рис.2.6 PSD vs E графік. Результат розділення 78718 імпульсів за допомогою CAEN за формою сигналів, видно нейтрони та гамма випромінювання з характерним порогом, що обумовлено характеристикою сцинтилятора

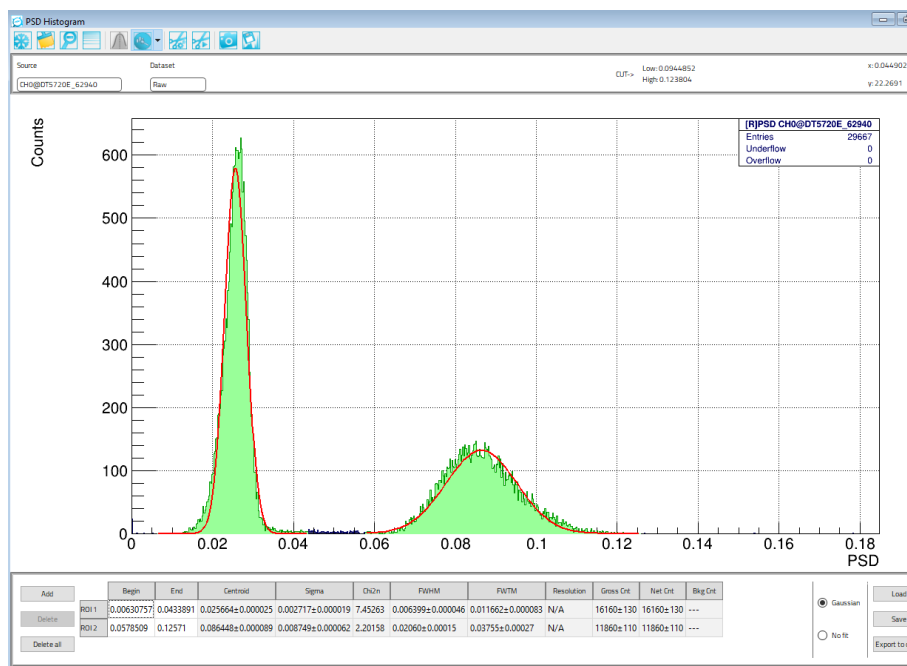


Рис.2.7 PSD Histogram перейнята з дослідження за допомогою CAEN, результат розділення 29667 імпульсів, FOM = 2,1

2.2. Детектор: тип детектора

Сцинтилятор Scintinel™ Stilbene [19] являє собою органічний кристалічний матеріал, який спеціально розроблений для ідентифікації швидких нейтронів у середовищах з високим потоком гамма-випромінювання. Його фізичні властивості роблять його зручним та безпечним у використанні, оскільки він є твердою, незаймистою та нетоксичною речовиною, що не вимагає герметичного пакування через відсутність гігроскопічності. Кристали стильбену мають моноклінну структуру просторової групи $P2_1/a$ та характеризуються високою прозорістю до власного випромінювання.

Основною перевагою стильбену є його здатність забезпечувати відмінну дискримінацію між нейтронним та гамма-випромінюванням завдяки ефекту розділення форми імпульсу. Сцинтиляційний спалах у цьому матеріалі складається зі швидкої та запізнілої флуоресценції, причому інтенсивність повільної компоненти залежить від типу частинки, що взаємодіє з кристалом. Таке явище дозволяє досягати високих показників фактора якості (FoM), що

зафіксований на рівні 4,7 при енергіях поблизу 500 кеВee. Максимум випромінювання стильбену припадає на довжину хвилі 380 нм, що добре узгоджується з областю чутливості фотоелектронних помножувачів та сучасних кремнієвих фотодетекторів.

Матеріал демонструє високу чутливість до швидких нейтронів з кінетичною енергією вище 1 МеВ, зберігаючи при цьому інформацію про напрямок, час та енергію джерела. Власна ефективність реєстрації нейтронів від джерела ^{252}Cf для дводюймового кристала становить 15,1%, збільшуючись до 38,6% при використанні чотиридюймового зразка. Завдяки своїм характеристикам стильбен є кращою альтернативою рідким та пластиковим сцинтиляторам у задачах ядерного нерозповсюдження, безпеки та фундаментальних наукових досліджень.

Таблиця 2.1

Характеристики сцинтилятора ScintinelTM Stilbene [19]

Параметр	Значення
Точка плавлення	124°C
Густина	1,15 г/см ³
Показники заломлення (при 589 нм)	1,703, 1,724, 1,844
Максимальна довжина хвилі емісії	380 нм
Час затухання (швидка компонента)	4,3 нс
Час наростання	0,1 нс

2.3 Обробка експериментальних даних

Метод цифрової обробки імпульсів для дискримінації за формою сигналу, або Digital Pulse Processing for Pulse Shape Discrimination (DPP-PSD), є сучасним підходом у ядерній спекторметрії, який ґрунтується на аналізі часової структури електричних імпульсів, сформованих детекторами під дією

різних типів частинок чи випромінювання. Основна ідея полягає в тому, що різні частинки — наприклад, нейтрони та γ -кванти — створюють у сцинтиляційному матеріалі імпульси світла, які мають однакову загальну амплітуду, але різну часову форму. Ці відмінності виникають через різні механізми збудження та релаксації молекул сцинтилятора. Якщо у випадку γ -квантів енергія передається швидко і викликає короткий спалах світла, то при взаємодії з нейтроном процес збудження має більш тривалий характер, у результаті чого формується імпульс з помітною «повільною» складовою [20].

У класичних аналогових системах розрізнення таких імпульсів здійснювалося шляхом інтеграції сигналів у різних часових вікнах за допомогою RC-ланцюгів, що мало низку недоліків, зокрема температурну нестабільність, неможливість гнучкої зміни параметрів і значні втрати інформації. У цифровому варіанті ці обмеження усуваються, оскільки форма сигналу повністю зберігається в цифровому вигляді після оцифрування високошвидкісним аналого-цифровим перетворювачем. Це дає змогу не лише виконувати обчислення інтегралів у різних часових інтервалах з високою точністю, а й аналізувати кожен імпульс за складнішими алгоритмами, включаючи фільтрацію, згладжування та машинне навчання.

Реалізація методу DPP-PSD відбувається таким чином. Сигнал від фотопомножувача або кремнієвого фотопомножувача, який реєструє світловий спалах у сцинтиляторі, подається на вхід АЦП з частотою дискретизації, як правило, від 100 до 500 мегасемплів на секунду (Рис. 2.8). Отримані цифрові відліки обробляються спеціалізованими алгоритмами, які обчислюють повний заряд імпульсу, що відповідає його енергії, а також заряд у «повільній» частині сигналу, яка містить інформацію про тип частинки. Співвідношення між повільною та загальною складовими сигналу використовується як дискримінаційний параметр. Для нейтронів це відношення зазвичай більше, ніж для γ -квантів, що дозволяє легко відокремити два типи подій на двовимірній діаграмі «дискримінаційний параметр — енергія».

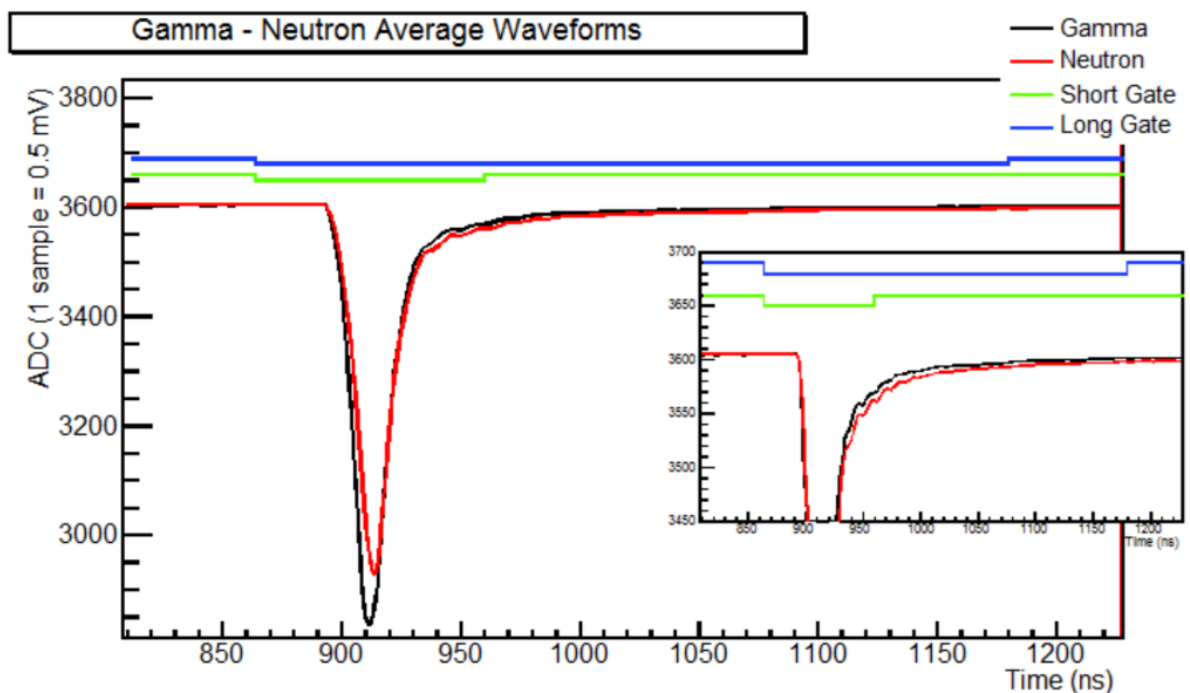


Рис. 2.8 - Графік типових форм γ -n сигналів

В основі алгоритму лежить динамічний метод ковзного усереднення. Система постійно обчислює базову лінію як середнє арифметичне заданої кількості послідовних відліків вхідного сигналу. Це "ковзне вікно" дозволяє алгоритму адаптивно відстежувати повільні дрейфи опорного рівня, забезпечуючи точне його визначення.

У момент спрацьовування тригера, що означає реєстрацію події, алгоритм фіксує поточне розраховане значення базової лінії. Це заморожування відбувається за кілька тактів до початку інтеграційних воріт і триває протягом усього часу інтеграції та тригерної затримки. Фіксоване значення використовується як точкова опора для всіх подальших обчислень енергії та заряду для цієї конкретної події, що гарантує їхню точність.

Після завершення обробки події та закінчення періоду заморожування алгоритм автоматично відновлює динамічний розрахунок базової лінії. Важливо, що при цьому враховуються відліки сигналу, які були отримані ще до моменту заморожування. Такий механізм забезпечує безперервність

обробки та мінімізує мертвий час системи, дозволяючи їй ефективно працювати навіть при високих частотах подій.

Моментом спрацьовування тригера в алгоритмі CFD вважається точний момент, коли спеціально сформований біполярний сигнал перетинає нульовий рівень. Ця методика реалізована апаратно в ПЛІС за допомогою двох паралельних шляхів обробки вхідного сигналу. Один шлях вводить затримку сигналу, а другий — послаблює його амплітуду на заданий коефіцієнт. Після інвертування послабленого сигналу та його підсумовування із затриманим оригіналом формується біполярний сигнал, який має чіткий перехід через нуль.

Оскільки сигнал дискретизований у часі, точний момент перетину нуля рідко збігається з моментом дискретизації. Для визначення цього моменту із надрозріджуючою точністю застосовується лінійна інтерполяція між останнім позитивним відліком і першим негативним відліком сформованого CFD-сигналу. Формула для розрахунку дробової частини часу має вигляд:

$$T_{\text{fine}} = \frac{\text{midScale} - \text{SBZC}}{\text{SAZC} - \text{SBZC}} \cdot T_{\text{sample}}, \quad (2.1)$$

де T_{fine} — це розрахований дробовий інтервал часу, midScale — це числове значення, що відповідає нульовому рівню в середині динамічного діапазону АЦП, SBZC — це значення відліку безпосередньо перед перетином нуля, SAZC — це значення відліку безпосередньо після перетину нуля, а T_{sample} — це період дискретизації сигналу. Сумарний час події визначається як сума цілочисельного часового штампу та цього розрахованого дробового інтервалу, що дозволяє досягти тимчасової роздільної здатності на рівні пікосекунд:

$$\text{ZC} = T_{\text{coarse}} + T_{\text{fine}}, \quad (2.2)$$

Digital Leading Edge — це простий метод, при якому тригер спрацьовує в момент, коли амплітуда сигналу перевищує заданий поріг. Основним недоліком цього підходу є амплітудна залежність моменту спрацьовування, що призводить до ходової похибки. Коли сигнали мають різну амплітуду, але однакову форму, їхній фронт перетинає поріг у різні моменти часу. Це обмежує тимчасову роздільну здатність системи. CFD використовує складнішу обробку сигналу для усунення цієї залежності. Він формує біполярний сигнал, де момент перетину нульового рівня відповідає постійній частці амплітуди оригінального імпульсу незалежно від його величини. Це забезпечує стабільний тимчасовий маркер з мінімальною похибкою. Однак реалізація CFD вимагає додаткових апаратних ресурсів у ПЛІС та уважного налаштування параметрів, таких як затримка та коефіцієнт ослаблення. Таким чином, вибір між цими методами визначається вимогами експерименту. Leading Edge пропонує простоту та ефективність для застосувань, де не потрібна висока точність часу. CFD є необхідним для точних timing-вимірювань, де усунення амплітудної залежності є критичним, незважаючи на складність його імплементації.

Метод згладжування вхідного сигналу реалізується через фільтр ковзного середнього. Для реалізації згладжування по 4-ом точках кожен новий відлік вхідного сигналу замінюється на середнє арифметичне значення чотирьох попередніх відліків. Цей процес відбувається безперервно в реальному часі при проходженні кожного нового відліку через фільтр. Апаратна реалізація в ПЛІС передбачає створення буфера зберігання для останніх чотирьох відліків. При надходженні нового значення від АЦП найстаріший відлік видаляється з буфера, а новий додається, після чого обчислюється середнє арифметичне всіх чотирьох значень у буфері. Отримане усереднене значення надходить на подальші етапи обробки - порогове детектування та інтеграцію заряду. Так само реалізувати алгоритм можливо за допомогою програмних рішень, але для записаного сигналу легше налаштувати згладження від 2 або до 16 точкок експериментальної залежності.

Ефект від такого згладжування проявляється у значному пригніченні високочастотних шумових компонентів сигналу, що особливо важливо для запобігання хибних спрацьовувань тригера на шумових викидах. Однак слід враховувати, що застосування цього методу призводить до деякого "розмиття" швидких фронтів сигналу та незначного зменшення амплітуди імпульсів, що є компромісом для досягнення кращої спроможності розрізнення корисних сигналів.

Загалом, треба відзначити, що PSD (Pulse Shape Discrimination) — це числовий параметр, який кількісно визначає форму імпульсу від детектора з метою розрізнення типів заряджених частинок. Він розраховується за формулою, що виражає відношення різниці значень інтегралів між довгим і коротким зарядом до довгого заряду. Фізично цей параметр відображає частку загального заряду, що міститься в повільній компоненті світіння сцинтилятора. Принцип його роботи ґрунтується на тому, що різні типи частинок, наприклад, гамма-кванти та нейтрони, взаємодіючи з детектором, породжують імпульси з характерною формою. Гамма-кванти зазвичай генерують імпульси з переважанням швидкої компоненти, що призводить до нижчих значень PSD. На противагу цьому нейтрони утворюють імпульси з більш вираженою повільною компонентою, що проявляється у вищих значеннях PSD. Таким чином, вимірюючи цей параметр для кожної події разом із її енергією, можна ефективно розділяти частинки різної природи на двовимірному спектрі, де по одній осі відкладається енергія, а по іншій — значення PSD.

Базуючись на алгоритмах та виконанні рішення CAEN CoMPASS, у програмному забезпеченні користувач також повинен самостійно визначити та задати тривалість Short Gate та Long Gate, ґрунтуючись на аналізі форми імпульсів від свого детектора та сцинтилятора. Цей процес є ключовим для успішної роботи PSD-методу та виконується в програмному забезпеченні (наприклад, CAEN CoMPASS). Користувач спостерігає захоплені форми

імпульсів від різних типів частинок (наприклад, гамма-квантів і нейтронів). Аналізуючи ці форми, користувач визначає характерні часові параметри:

- Для Short Gate користувач встановлює тривалість, яка повністю охоплює швидку компоненту імпульсу. Це зазвичай час, за який імпульс слідує до точки, де швидкий спад завершується і починається повільний "хвіст". Мета — інтегрувати весь заряд від швидкої світлової вспышки.
- Для Long Gate користувач задає значно більшу тривалість, яка повинна охопити повний імпульс, включно з повільним хвостом, аби гарантовано зібрати весь заряд, генерований частинкою. Ця тривалість зазвичай вибирається такою, щоб досягти повернення сигналу до базової лінії.

Таким чином, оптимальні значення воріт не є універсальними; вони визначаються експериментально для конкретної комбінації детектора, сцинтилятора та умов експерименту. Правильність їх вибору безпосередньо впливає на якість поділу піків гамма-квантів і нейтронів на PSD-спектрі.

Було проведено дослідження джерела нейтронного випромінювання $^{239}\text{Pu-Be}$ відповідно до описаної у п. 2.1 схеми експериментальної установки. Дані, отримані за допомогою контрольного діджитайзера CAEN DT5720e приведені у рис. 2.6-2.7, дозволяють оцінити якість розділення (FoM) гамма-нейтронного сигналу на різних вибірках експериментальних сигналів. Також з приведених рис. 2.2 та рис. 2.3 можна зробити висновок, що сигнал з реєструючого фотодетектора збігається з сигналами діджитайзера CAEN за амплітудою та часовим проміжком, а значить може бути зареєстрований та оцифрований високошвидкісним осцилографом та переданий на персональний комп'ютер для подальшої обробки онлайн чи вибірками даних.

Згідно до розглянутих у п. 1.1 (табл. 1.1) методів розділення нейтрон-гамма сигналів було застосовано два загальновідомі методи (CC та ZC) та розроблено авторський математичний метод з метою перевірки можливості використання сетапу цифрового осцилографа та комп'ютера вирішувати задачі по розділенню гамма-нейтронного випромінювання без використання спеціалізованого діджитайзера CAEN.

Результати аналізу вибірок даних по 19999 імпульсів приведено нижче. Отримані результати аналізу експериментального датасету методом порівняння зарядів (СС) свідчать про високу ефективність ідентифікації частинок за формою імпульсу. Дослідження охопило масив із 19999 сцинтиляційних сигналів, кожен з яких містить 1989 часових відліків (нс). У межах реалізованого алгоритму для кожного імпульсу визначалася динамічна точка початку розрахунку — «підшва» піку, яка для контрольного сигналу склала 417 нс. Типовий вигляд імпульсу приведено на рис. 2.9. Розрахунок повного інтеграла заряду Q_{total} проводився від цієї стартової позиції протягом часового вікна, визначеного параметром t_{gate} , який у поточному аналізі становив 700 нс. Таким чином, межа розділення між швидкою та повільною компонентами заряду варіювалася для досягнення максимальної роздільної здатності методу.

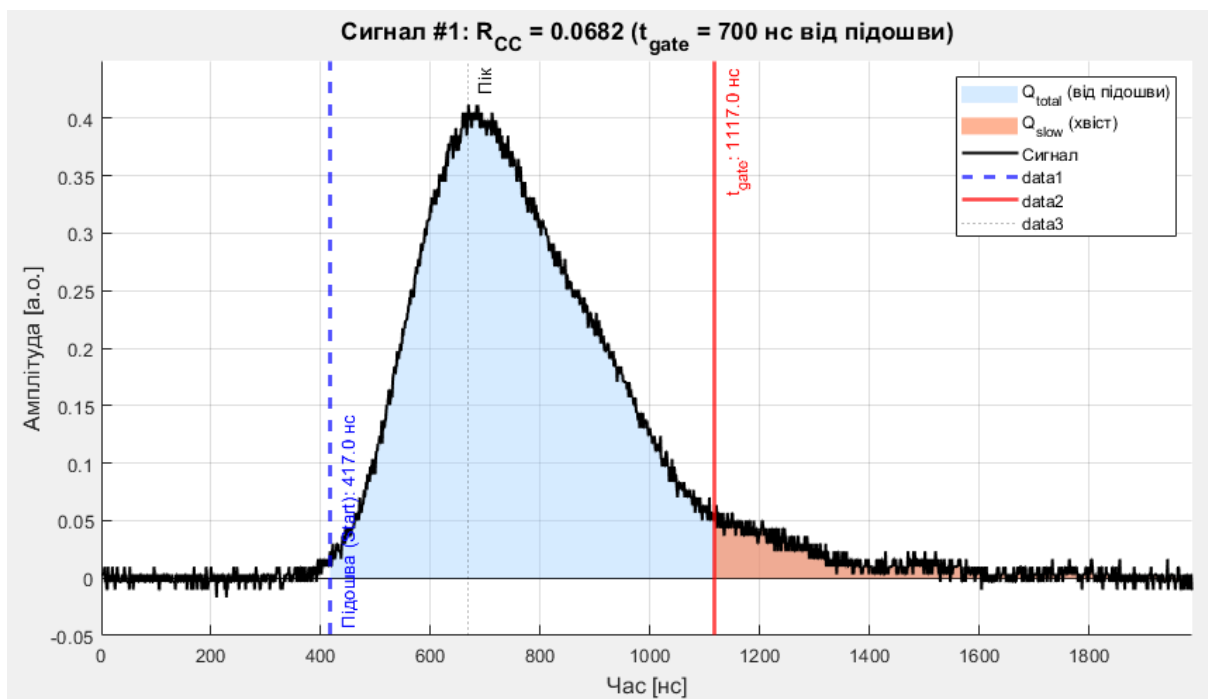


Рис. 2.9 – Типовий вигляд імпульсу (нейтронного) та позначені параметри методу порівняння зарядів (СС) – початок відліку імпульсу Q_{total} / Q_{slow} , та закінчення опрацювання інтегралу Q_{total} – параметр t_{gate} .

Класифікація подій на два класи — нейтрони та гамма-кванти — здійснювалася за допомогою методу k-means та апроксимації подвійним Гаусовим розподілом. Метод k-means є алгоритмом автоматичної кластеризації, який розподіляє об'єкти на задану кількість груп (у нашому випадку дві) таким чином, щоб мінімізувати суму квадратів відстаней від кожної точки до центру відповідного кластера. Це дозволяє об'єктивно розділити події за значенням параметра R_{CC} без попереднього навчання системи. Апроксимація подвійним Гаусовим розподілом (DG fit) полягає у математичному моделюванні отриманої гістограми як суми двох нормальних розподілів. Цей метод дозволяє точно визначити математичне очікування та стандартне відхилення для кожної групи частинок, що необхідно для коректного розрахунку показника якості розділення.

За результатами кластеризації було ідентифіковано 9207 подій гамма-випромінювання та 10792 нейтронні події. Середнє значення дискримінуючого параметра R_{CC} для гамма-квантів склало 0,1007, тоді як для нейтронів воно було значно вищим R_{CC} — 0,4037, що підтверджує наявність суттєвої повільної компоненти флуоресценції у відгуках на нейтронне збудження. Розрахований показник якості Figure of Merit (FoM) за методом k-means склав 1,241, а за методом апроксимації Гаусом досяг значення 1,7520 (рис. 2.10). Обидва результати суттєво перевищують 1, підтверджуючи відмінну роздільну здатність системи.

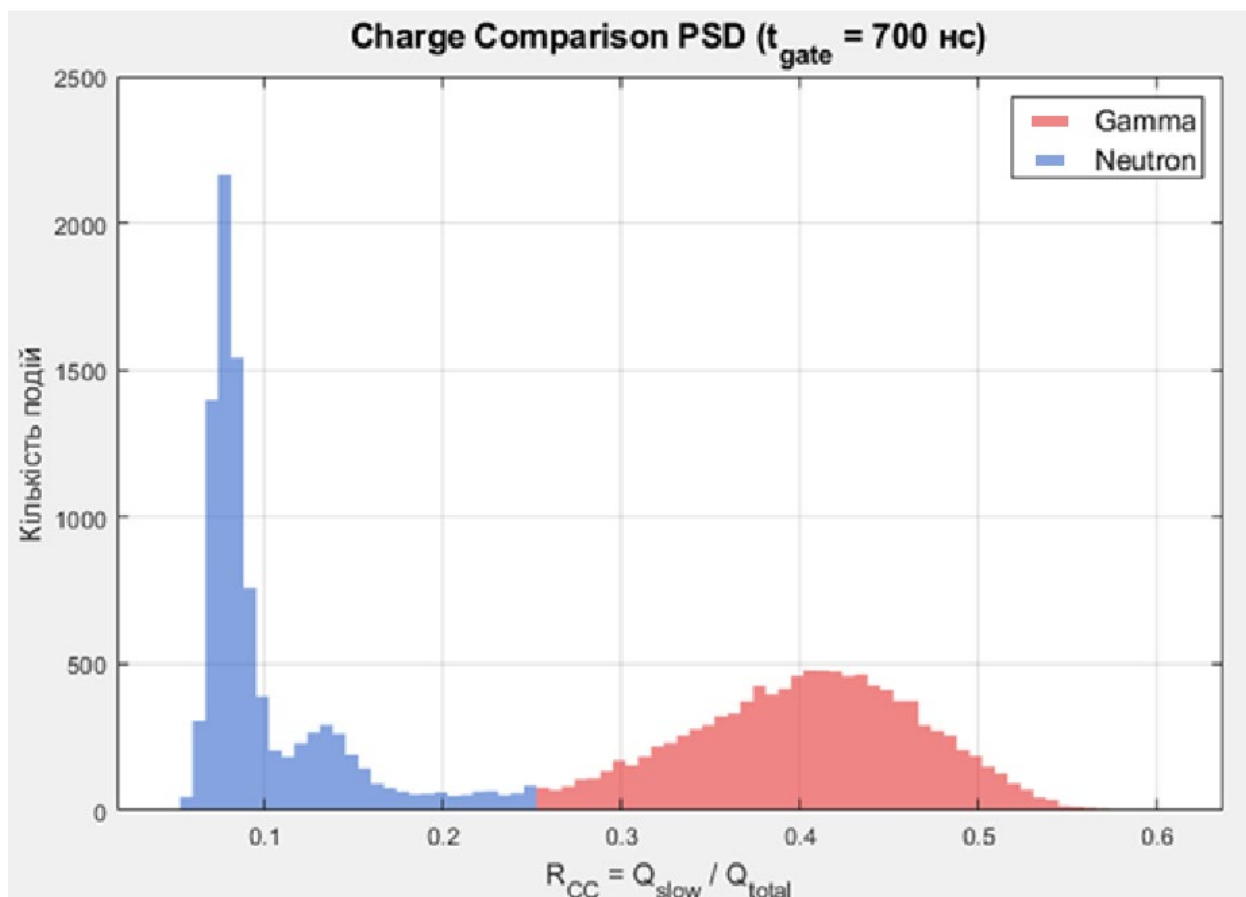


Рис. 2.10 – Результат обробки датасету 19999 імпульсів за методом порівняння зарядів (CC) з визначеним значенням FoM за методом k-means 1,241

Результати апробації модифікованого методу перетину нуля (Zero-Crossing, ZC) для дискримінації сцинтиляційних сигналів свідчать про високу роздільну здатність алгоритму при обробці експериментальних даних. Аналіз охопив масив із 19999 імпульсів, кожен з яких був успішно верифікований та класифікований. Ключовою особливістю реалізованого підходу стало використання нової логіки визначення часового параметра R , що базується на динамічному пошуку «підосви» імпульсу як початкової точки відліку. Типовий сигнал з датасету та результат обробки приведено на рис. 2.11. Це дозволило мінімізувати вплив амплітудного шуму та часового джитера на кінцевий результат класифікації.

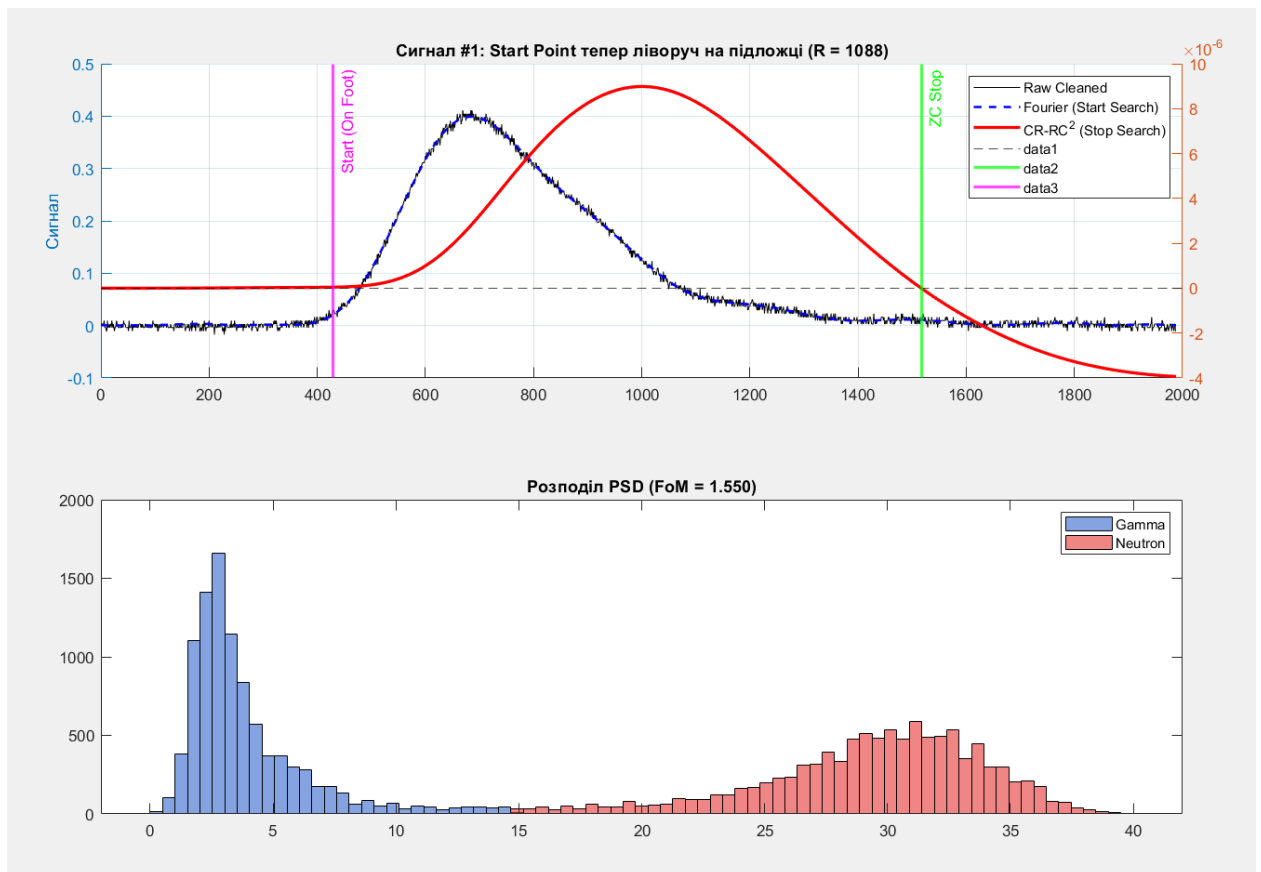


Рис. 2.11 - Типовий сигнал з датасету гамма-нейтронних імпульсів та результат обробки за методом ZC (верхній). Результат обробки датасету за методом перетину нуля (ZC) з визначеним значенням FoM за методом k-means 1,55

Класифікація подій за допомогою алгоритму k-means дозволила виділити дві чітко розмежовані групи, що відповідають взаємодіям гамма-квантів та нейтронів. Група гамма-подій склала 9 680 імпульсів із середнім значенням параметра R на рівні 3.89, тоді як нейтронна група охопила 10 319 подій із центром розподілу 29.45. Суттєвий часовий розрив між центрами цих розподілів підтверджує ефективність методу у виявленні повільної компоненти флуоресценції, характерної для нейтронних взаємодій у пластикових скінтіляторах.

Якість дискримінації оцінювалася за показником Figure of Merit (FoM), який розраховувався двома методами: безпосередньо через результати кластеризації k-means та шляхом апроксимації подвійним Гаусовим

розподілом (DG fit). Значення FoM за методом k-means склало 1,5504, тоді як використання Гаусової підгонки продемонструвало ще вищий результат — 2,4049. Обидва значення радикально перевищують 1, що вказує на виняткову роздільну здатність запропонованої модифікації алгоритму. Лінія розділення класів (crossing line), визначена за допомогою Гаусової апроксимації, зафіксована на рівні 12,6017, що забезпечує мінімальне статистичне перекриття між двома типами подій.

Фізична концепція авторського методу асиметрії піку базується на фундаментальних відмінностях у механізмах збудження молекул органічного сцинтилятора під впливом різних типів іонізуючого випромінювання. Основна гіпотеза запропонованого підходу полягає в тому, що часовий розподіл висвічування фотонів, який формує сцинтиляційний імпульс, має різний ступінь асиметрії відносно положення максимуму амплітуди для гамма-квантів та швидких нейтронів. Такий підхід дозволяє відійти від традиційного пошуку точок перетину порогів та зосередитися на аналізі загальної геометричної форми сигналу.

При взаємодії частинки з речовиною сцинтилятора виникають два ключові компоненти флуоресценції. Швидка компонента згасає протягом кількох наносекунд і є практично ідентичною для обох типів випромінювання. Натомість повільна або запізніла флуоресценція, спричинена анігіляцією триплетних збуджень, проявляється значно інтенсивніше при реєстрації нейтронів. З точки зору фізики, зареєстрований детектором імпульс є статистичним розподілом фотонів у часі, а центроїд цього розподілу відображає математичне сподівання або середній час випромінювання фотона під час одиначної події.

Математична реалізація методу РА використовує концепцію «центру ваги» для кількісної оцінки асиметрії імпульсу. Центроїд часу визначається як зважене середнє значення по всій формі піку, де амплітуда сигналу в кожен момент часу виконує роль статистичної ваги. Оскільки форма імпульсу сприймається як функція щільності ймовірності, обчислений центроїд стає

аналогом першого моменту розподілу. Головним дискримінуючим фактором при цьому виступає параметр часового зміщення, що дорівнює різниці між часом центроїда та моментом досягнення пікової амплітуди.

Для кількісної оцінки асиметрії в межах методу РА використовується поняття «центру ваги» (центроїда) піку. Математично центроїд часу t_{centroid} визначається як перший момент розподілу амплітуди сигналу:

$$t_{\text{centroid}} = \sum (t_i \cdot A_i) / \sum A_i \quad (2.3)$$

де A_i — амплітуда сигналу в момент часу t_i , що виконує роль статистичної ваги.

Основним дискримінуючим фактором виступає параметр часового зміщення Δt :

$$\Delta t = t_{\text{centroid}} - t_{\text{peak}} \quad (2.4)$$

- Гамма-кванти: генерують відносно симетричні імпульси, де центроїд майже збігається з часом максимуму амплітуди, що призводить до значень $\Delta t \approx 0$.
- Нейтрони: через інтенсивну повільну флуоресценцію «центр ваги» імпульсу зміщується вправо від піку, забезпечуючи позитивне значення $\Delta t > 0$.

Для подій, викликаних гамма-випромінюванням, характерною є висока ступінь симетрії сигналу, внаслідок чого обчислений центр ваги практично збігається з часом максимуму амплітуди. У таких випадках значення дискримінуючого фактора наближається до нуля. Навпаки, інтенсивний «хвіст» нейтронного імпульсу створює додаткову вагу праворуч від піку, що призводить до фізичного зміщення центроїда в область більшого часу. Чим вищою є питома вага повільної флуоресценції, тим сильніше часовий центр відхиляється від вершини імпульсу, що забезпечує чітке розділення частинок.

Важливою перевагою методу центроїда над класичними інтегральними підходами, такими як метод порівняння зарядів, є його позиційна природа. Якщо традиційні методи вимагають ретельного підбору часових вікон для виділення енергетичних компонент, то метод асиметрії піку фокусується на

морфології всього імпульсу. Це робить алгоритм менш чутливим до амплітудних шумів на підшві сигналу та дозволяє враховувати найдрібніші зміни у формі спаду, які можуть бути втрачені при простому інтегруванні площі під кривою. Таким чином, метод РА є більш стійким та адаптивним інструментом для ідентифікації частинок в умовах високого фонового шуму.

Результати дослідження сцинтиляційних сигналів за допомогою методу асиметрії піку (Peak Asymmetry, РА) підтверджують ефективність використання позиційних характеристик форми імпульсу для ідентифікації типу випромінювання. В основі цього методу лежить гіпотеза про відмінність у часовому розподілі фотонів, що проявляється через зміщення центроїда («центру ваги») сигналу відносно його амплітудного максимуму (рис. 2.13). Для експериментального масиву даних було проведено класифікацію 19 999 подій, де дискримінуючим фактором виступив параметр часового зміщення Δt .

Класифікація, здійснена за допомогою алгоритму k-means, дозволила виділити 14 053 події гамма-випромінювання та 5 946 нейтронних подій. Для гамма-квантів середнє значення зміщення центроїда склало приблизно 109.71 нс, тоді як для нейтронів цей показник зафіксовано на рівні 176.81 нс.

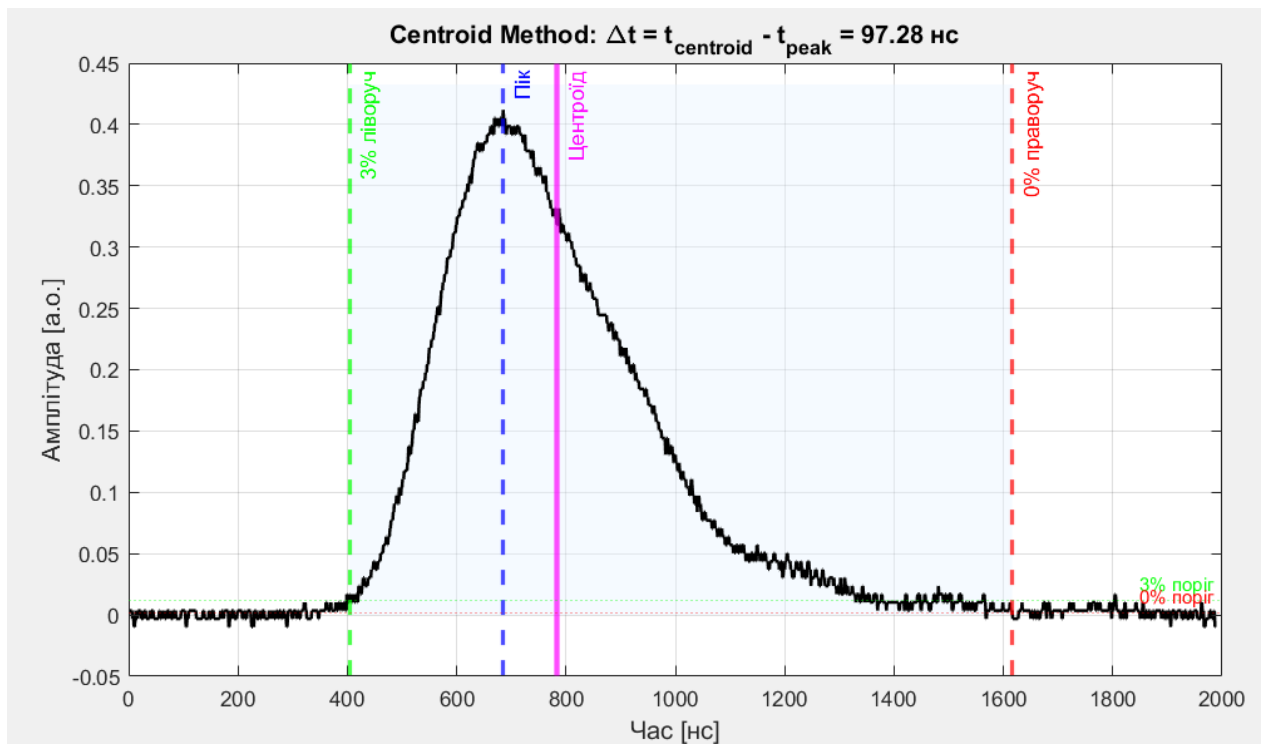


Рис. 2.13 - Типовий вигляд імпульсу та позначені параметри застосованого авторського методу асиметрії піку - пороги інтегрування для визначення піку та положення центроїду відносно максимуму імпульсу піку

Показник якості FoM (рис. 2.14), отриманий за допомогою методу k-means, склав 0,836, у той час як Гаусова апроксимація продемонструвала значення 0,7441. Процедура ітераційного пошуку (Grid Search) підтвердила стабільність алгоритму, визначивши оптимальні пороги інтегрування на рівні 0.3% для правого схилу та 3% для лівого. Це вказує на те, що для досягнення найвищої роздільної здатності необхідно враховувати майже повну геометрію спаду імпульсу.

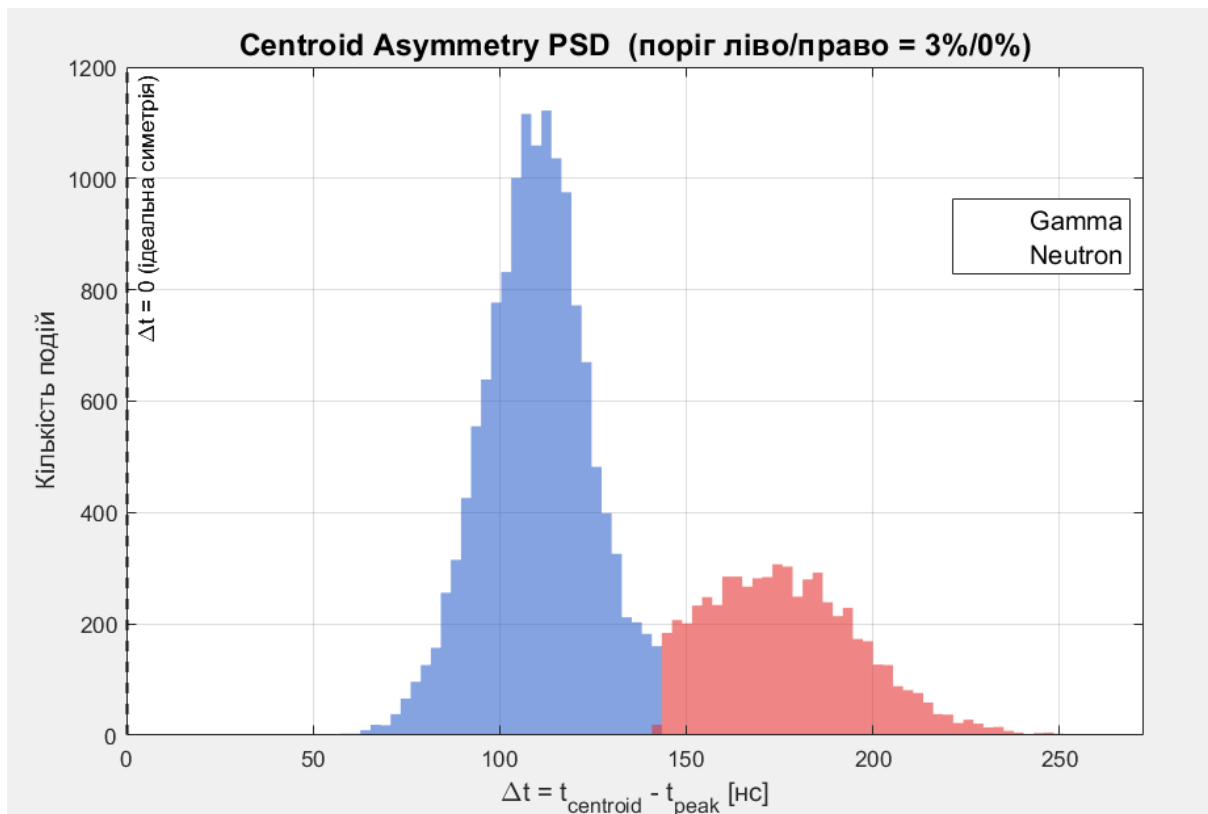


Рис. 2.14 – Результат обробки датасету 19999 імпульсів за авторським методом асиметрії піків (РА) з визначеним значенням FoM за методом k-means 0,836

Детальний аналіз морфології сигналів виявив значну різницю у часовій структурі відгуків. Абсолютне зміщення між середніми центроїдами нейтронів та гамма-квантів склало 18.70 нс. Зокрема, середня асиметрія нейтронних імпульсів (≈ 160 нс) суттєво перевищує аналогічний показник для гамма-подій (≈ 109.3 нс). Таке фізичне відхилення «центру ваги» вправо для нейтронів обумовлене інтенсивнішим збудженням повільної компоненти флуоресценції. Отримані дані свідчать про те, що метод асиметрії піку є інструментом дискримінації, який використовує внутрішню часову структуру сцинтиляційного процесу, але порівняно з іншими методами, потребує доопрацювання.

Процес апробації цифрових методів дискримінації на базі осцилографа та персонального комп'ютера підтвердив життєздатність такої архітектури як повноцінної альтернативи спеціалізованим модулям збору даних. Основна

увага в роботі була зосереджена на аналізі стабільності та роздільної здатності алгоритмів порівняння зарядів (CC), перетину нуля (ZC) та асиметрії піку (РА) при обробці експериментальних сигналів низької амплітуди. Оцінка якості розділення базувалася на показниках автоматичної кластеризації k-means, що дозволило отримати об'єктивні результати FoM без суб'єктивного впливу параметрів апроксимації.

Аналіз продемонстрував високу якість розділення для методів CC та ZC (рис. 2.15). Зокрема, метод порівняння зарядів показав стабільне значення FoM на рівні 1,241, що підтверджує надійність інтегрального підходу при використанні динамічної «підшви» піку як початкової точки відліку. Модифікований метод перетину нуля продемонстрував ще вищу ефективність із показником FoM 1,550, що свідчить про суттєву перевагу часових методів у виявленні різниці у формі імпульсів при тривалій інтеграції повільної компоненти.

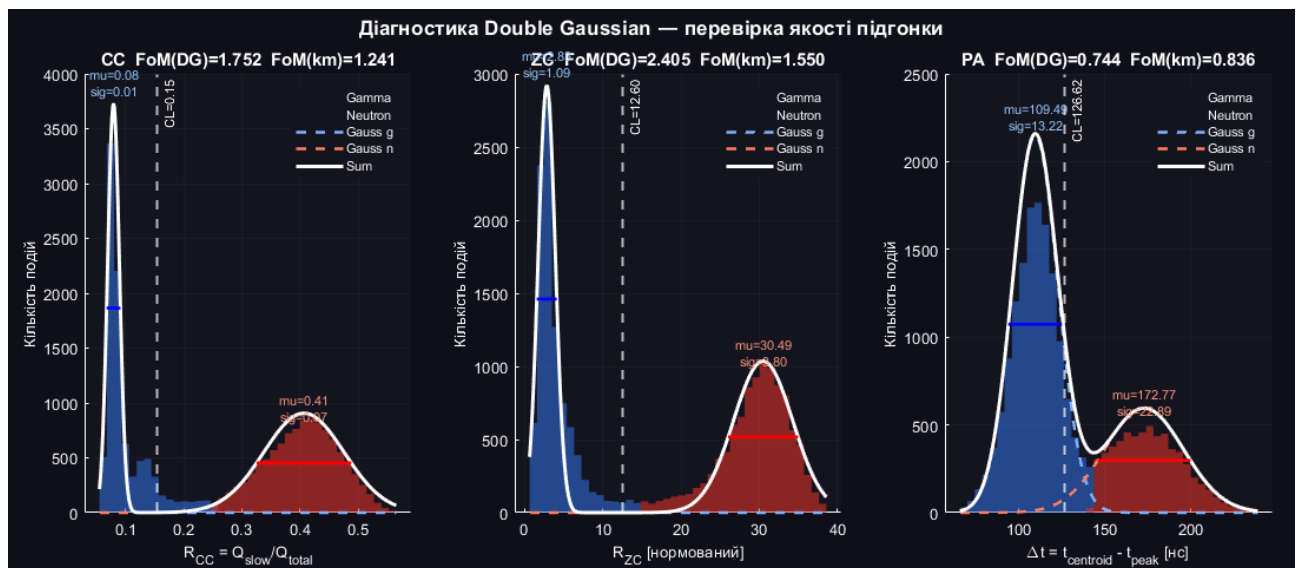


Рис. 2.15 – Зведені результати FoM розділення датасету 19999 гамма-нейтронних імпульсів за розглянутими методами CC та ZC і авторським методом РА

Водночас результати авторського методу асиметрії піку виявилися менш стабільними порівняно з класичними застосованими методами (рис.

2.16). Значення FoM для методу PA, розраховане через k-means, склало 0,836. Хоча цей показник формально перевищує базовий бенчмарк для класичного ZC, він демонструє більшу чутливість до джитера та амплітудних флуктуацій сигналу, що проявляється у меншій відстані між центрами кластерів та більшій ширині розподілів.

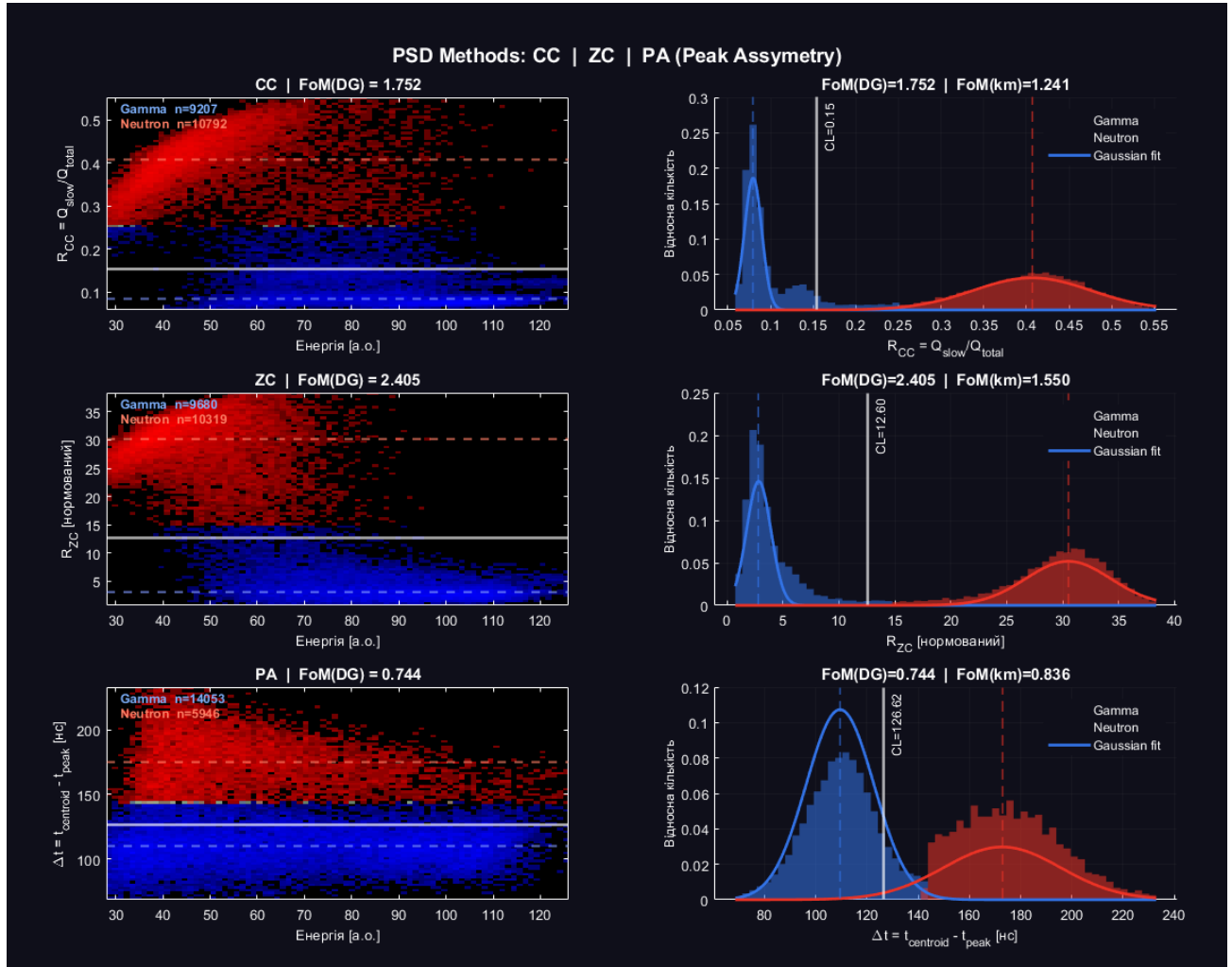


Рис. 2.16 - PSD матриці сигналів в залежності від типу визначеного сигналу (синій – нейтронне випромінювання, червоне - гамма) та енергії частинки

Враховуючи отримані результати, рекомендується зосередити зусилля на подальшому доопрацюванні методу асиметрії піку для досягнення показників FoM, порівнюваних із методами CC та ZC. Необхідно оптимізувати

алгоритми згладжування та процедуру динамічного визначення меж центроїда, щоб підвищити стабільність «центру ваги» сигналу. Успішна модернізація методу РА дозволить використовувати його як незалежний інструмент верифікації в комплексних системах ідентифікації частинок, реалізованих на базі стандартного лабораторного обладнання.

2.4 Висновки до розділу 2

У межах проведеного дослідження було розроблено та практично реалізовано експериментальну установку для реєстрації змішаного нейтрон-гамма випромінювання на базі органічного сцинтилятора стильбену, цифрового осцилографа Keysight DSOX6004a та контрольного діджитайзера CAEN DT5720e. Проведені експерименти та подальша математична обробка даних дозволяють зробити такі висновки:

1. Валідність експериментальної схеми. Порівняльний аналіз часових та амплітудних характеристик сигналів підтвердив ідентичність форм імпульсів, зареєстрованих осцилографом та спеціалізованим діджитайзером. Це доводить принципову можливість використання доступного лабораторного обладнання (високошвидкісного осцилографа та ПК) як повноцінної альтернативи стаціонарним системам збору даних для вирішення завдань n-у дискримінації.

2. Ефективність класичних методів. Апробація методу порівняння зарядів (СС) та модифікованого методу перетину нуля (ZC) продемонструвала високу роздільну здатність системи. Застосування динамічного пошуку «підшови» піку дозволило мінімізувати вплив амплітудного джитера, забезпечивши значення фактора якості FoM на рівні 1,241 для методу СС та 1,550 для методу ZC (за результатами кластеризації k-means).

3. Апробація авторського методу асиметрії піку (РА). Фізична концепція методу, заснована на аналізі зміщення центроїда («центру ваги») сигналу, підтвердила наявність статистично значущої різниці в морфології імпульсів: середня асиметрія для нейтронів (≈ 160 нс) суттєво перевищує аналогічний показник для гамма-квантів (≈ 109 нс). Хоча поточна реалізація методу показала нижчу стабільність ($FoM = 0,836$) порівняно з класичними підходами, вона є перспективним інструментом для вивчення внутрішньої часової структури сцинтиляційного процесу.

4. Статистична значущість та результати кластеризації. Використання алгоритму k-means та подвійної Гаусової апроксимації дозволило успішно ідентифікувати та розділити потоки частинок у масиві з 19999 подій. Отримані значення FoM для класичних методів перевищують одиницю, що свідчить про надійну роботу алгоритмів в умовах низькоамплітудних сигналів та високого фонового шуму.

Загалом, результати розділу підтверджують гіпотезу про можливість досягнення високої якості нейтрон-гамма розділення шляхом програмної обробки сигналів, отриманих за допомогою універсального вимірювального обладнання, та вказують на потенціал подальшого вдосконалення авторських математичних алгоритмів для підвищення точності дискримінації.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження обґрунтовано фізичні засади та практично реалізовано методику ідентифікації частинок за формою сцинтиляційного імпульсу в органічних сцинтиляторах і побудованій експериментальній схемі реєстрації гамма-нейтронного випромінювання $^{239}\text{Pu-Be}$ джерела. Теоретичний аналіз механізмів збудження молекул підтвердив, що наявність інтенсивної повільної компоненти флуоресценції при реєстрації швидких нейтронів є ключовим фактором для n - γ дискримінації. Виявлено, що використання цифрової обробки сигналів, отриманих за допомогою осцилографа та персонального комп'ютера, забезпечує високу гнучкість у налаштуванні фільтрації та виборі часових вікон аналізу порівняно з апаратними методами.

Апробація класичних цифрових методів на експериментальних даних показала високу якість розділення подій. Метод порівняння зарядів (СС) продемонстрував значення фактора якості FoM на рівні 1,241, а модифікований метод перетину нуля (ZC) виявився ще більш стійким до умов низькоамплітудних сигналів, зі значенням FoM 1,550. Отримані значення роздільної здатності для СС та ZC виявилися порівнянними за якістю з результатами, що зазвичай досягаються на спеціалізованому обладнанні фірми CAEN, що підтверджує ефективність застосованого програмно-апаратного підходу.

Паралельно проведена апробація авторського методу асиметрії піку (РА), заснованого на аналізі часового зміщення центроїда сигналу відносно його максимуму. Експериментально встановлено, що середня асиметрія нейтронних імпульсів складає приблизно 160 нс, тоді як для гамма-квантів цей показник становить близько 109 нс. Попри фізичну обґрунтованість концепції, поточна реалізація методу РА продемонструвала нижчий показник FoM (0,836) порівняно з методами СС та ZC. Така різниця в якості розділення

обумовлена високою чутливістю позиційного параметра центроїда до флуктуацій форми сигналу в умовах експерименту.

Порівняльний аналіз застосованих комп'ютерних методів вказує на доцільність подальшої модернізації алгоритму асиметрії піку. Основним напрямком вдосконалення визначено оптимізацію процедур динамічного визначення меж інтегрування та впровадження стійких методів цифрового згладжування для стабілізації положення центроїда. Досягнення показників FoM, що наближатимуться до значень методів СС та ZС, дозволить інтегрувати метод РА як додатковий незалежний фактор ідентифікації в комплексних системах моніторингу змішаних полів випромінювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zaitseva, N., Rupert, B. L., Pawełczak, I., Glenn, A., Martinez, H. P., Carman, L., Faust, M., Cherepy, N., & Payne, S. (2012). Plastic scintillators with efficient neutron/gamma pulse shape discrimination. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 668, 88–93.
2. Montbarbon, E., Zhang, Z., Grabowski, A., Woo, R., Tromson, D., Dehé-Pittance, C., Pansu, R. B., Bertrand, G. H. V., & Hamel, M. (2019). The role of the secondary fluorophore in ternary plastic scintillators aiming at discriminating fast neutrons from gamma-rays. *Journal of Luminescence*, 213, 67–74.
3. Park, J. Y., Mun, J., Lee, J. H., Yeon, Y.-H., Chae, M., Lee, M., & Lee, N.-H. (2022). Development of a dual-modality gamma-ray/fast neutron imaging system for air cargo inspection. *Applied Sciences*, 12(19), 9775.
4. Vasiljević, J., & Cederwall, B. (2022). Performance evaluation of an imaging radiation portal monitor system. *Applied Sciences*, 12(18), 9001.
5. Almisned, G., Al-Abdullah, T., Liadi, F., & Hawsawi, A. (2022). Improving a PGNA technique to detect heavy metals in solid samples. *Applied Sciences*, 12(7), 3714.
6. Almisned, G., Tekin, H. O., Zakaly, H. M. H., Issa, S. A. M., Kilic, G., Saudi, H. A., Algethami, M., & Ene, A. (2021). Fast neutron and gamma-ray attenuation properties of some HMO tellurite-tungstate-antimonate glasses: Impact of Sm^{3+} ions. *Applied Sciences*, 11(21), 10168.
7. Giuntini, L., Castelli, L., Massi, M., Fedi, M., Czelusniak, C., Gelli, N., Liccioli, L., Giambi, F., Ruberto, C., Mazzinghi, A., et al. (2021). Detectors and cultural heritage: The INFN-CHNet experience. *Applied Sciences*, 11(8), 3462.
8. Onyshchenko, G., Yakymenko, I., Sidletskiy, O., Kuznietsov, P., Tarasenko, O., Shchus, O., Tolkunov, I., Kudin, O., Kuzin, O., Dobrozhan, A., & Lytovchenko, S. (2025). Analysis of Radiation Methods for Explosive Materials Detection. *East European Journal of Physics*, (4), 682-695.

9. Nakhostin, M. (2015). A comparison of digital zero-crossing and charge-comparison methods for neutron/ γ -ray discrimination with liquid scintillation detectors. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A-accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*, 797, 77-82.
10. Grodzicka- Kobylka, M., Szczesniak, T., Swiderski, L., Brylew, K., Moszyński, M., Valiente-Dobón, J., Schotanus, P., Grodzicki, K., Mazerewicz, P., Szymanowski, J., & Mianowska, Z. (2021). Comparison of detectors with pulse shape discrimination capability for simultaneous detection of gamma-rays, slow and fast neutrons. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*.
11. Takaku, D., Oishi, T., & Baba, M. (2011). Development of neutron-gamma discrimination technique using pattern-recognition method with digital signal processing. *Progress in nuclear science and technology*, Vol. 1, p. 210-213.
12. G. F. Knoll Radiation Detection and Measurement. *John Wiley & Sons*, 2010.
13. Nakhostin, M., & Walker, P. M. (2010). A comparison of digital zero-crossing and charge-comparison methods for neutron-gamma pulse shape discrimination. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 621(1-3), 498-501.
14. Shen, W., Zhang, X., & Liu, G. (2018). FPGA implementation of 500 MHz high count rate pulse shape discrimination for neutron-gamma separation. *Nuclear Science and Techniques*, 29(11), 164.
15. Korolczuk, S., Linczuk, M., Grodzicka-Kobylka, M., & Szczesniak, T. (2020). Development of a digital method for neutron-gamma pulse shape discrimination based on the zero-crossing technique. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*.
16. Weinfurther, K. J., Marleau, P., & Sweany, M. (2023). Pulse shape measurements for neutron/gamma discrimination using the TOFPET2 ASIC. *Journal of Instrumentation (JINST)*, 18(07), P07015.

17. Drake, D., Hopkins, J., Martin, J., & Condé, H. (1968). The use of $\text{Pu}\alpha\text{Be}$ as a calibrated gamma ray source. *Nuclear Instruments and Methods*, 62(3), 349–350.
18. Anderson, M. E., & Bond, W. H. (1963). Neutron spectrum of a plutonium-beryllium source. *Nuclear Physics*, 43, 330–338.
19. C.S. Sosa et al. (2019) Improved neutron-gamma discrimination at low-light output events using conical trans-stilbene”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 42.
20. CoMPASS Multiparametric DAQ Software for Physics Applications User Manual - 2025, P. 143.