

РОЗРОБКА МЕТОДІВ ДИСКРИМІНАЦІЇ ЗА ФОРМОЮ НИЗЬКОЕНЕРГЕТИЧНИХ СЦИНТИЛЯЦІЙНИХ СИГНАЛІВ ВІД ШУМІВ ФОТОПОМНОЖУВАЧА

Ф. А. Даневич¹, С. С. Нагорний¹, С. С. Юрченко^{1,2}

¹Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

Розроблено методику аналізу низькоенергетичних сцинтиляційних сигналів за формою для дискримінації їх від шумів фотопомножувача. Запропоновано спосіб отримання вибірок таких сигналів без домішок шумів та їх попередньої цифрової обробки для визначення початку сигналу та базової лінії. Проведено порівняльний аналіз різних методів дискримінації за формою: визначення “середнього часу”, оптимального цифрового фільтра, найменших квадратів та штучних нейронних мереж. Досягнуто 100 %-ну дискримінацію сигналів сцинтилятора CdWO_4 з енергіями ≥ 15 кеВ від шумів фотопомножувача.

Вступ

Експериментальні дослідження таких рідкісних процесів, як двонейтринний подвійний електронний захват, α - та β -розпади з великими періодами напіврозпаду, пошуки гіпотетичних частинок темної матерії Всесвіту, вимагають надзвичайно низького рівня фону та енергетичного порога детектора. Для зниження фону дослідники розробляють різноманітні системи пасивного та активного захисту, розташовують вимірювальні прилади глибоко під землю, проводять комплексний аналіз експериментальних даних, зокрема аналіз за формою імпульсів. Останній підхід дає змогу розділяти сигнали для іонізуючих випромінювань різних типів. Це важливо не лише для їх дискримінації, а також і для коректної інтерпретації вимірюваного спектра, що завжди важливо в низькофонових експериментах. Яскравим прикладом ефективного застосування аналізу імпульсів за формою є результати експерименту з пошуку 2β -розпаду ядра ^{116}Cd [1 - 3], в якому використовувались сцинтиляційні кристали вольфрамату кадмію ($^{116}\text{CdWO}_4$), збагачені цим ізотопом до 83 %.

Окрім боротьби з радіоактивним фоном, у цих експериментах, враховуючи досить низьку енергію подій, необхідно також знижувати внесок шумів фотоелектронних помножувачів (ФЕП) [4 - 7]. У даній роботі досліджується дискримінація шумів ФЕП за допомогою аналізу імпульсів за формою. Це пов'язано з підготовкою експериментів із пошуку двонейтринного електронного захвату в ядрах ^{64}Zn та ^{106}Cd за допомогою сцинтиляторів ZnWO_4 та CdWO_4 (при цьому очікується енерговиділення ≈ 17 кеВ та ≈ 49 кеВ відповідно), α -розпаду ^{151}Eu (≈ 250 кеВ у шкалі енергій γ -квантів) із сцинтилятором $\text{CaF}_2(\text{Eu})$, а також дослідження β -розпаду ^{113}Cd (CdWO_4) з періодом напіврозпаду $7,7 \cdot 10^{15}$ р ($Q_\beta = 316$ кеВ). Ведеться розробка детектора на основі сцинтилятора ZnWO_4 для пошуку добових модуляцій частинок темної матерії Всесвіту (очікувана енергія подій становить кілька кеВ). Експерименти плануються в Солотвинській підземній лабораторії ІЯД НАН України та Національній лабораторії Гран Сассо (Італія).

Шуми ФЕП

Як уже було відзначено, шуми ФЕП починають відігравати важливу роль при реєстрації низькоенергетичних подій. Типовими шумами ФЕП є одиночні імпульси, але трапляються й такі, що за формою дуже нагадують сцинтиляційні сигнали (рис. 1). Щоб зменшити вплив шумів, ФЕП охолоджують, установлюють на сцинтилятор принаймні два ФЕП і включають їх у схему збігів, заземлюють фотокатод, ретельно підбирають компоненти високовольтних дільників, мінімізують поверхневі струми та оптичний зв'язок між фотокатодом та останніми динодами й анодом. Після того, як прийняті всі можливі заходи для зменшення впливу шумів ФЕП, постає необхідність розробки та вдосконалення методів їх дискримінації за формою.

Вимірювання низькоенергетичних сцинтиляційних сигналів

Для розробки та оцінки ефективностей методик дискримінації шумів було проведено вимірювання форм низькоенергетичних сигналів від сцинтилятора CdWO₄. Завданням цих вимірювань було отримання "чистих" (без домішок шумових імпульсів ФЕП) вибірок корисних сигналів.

Схему вимірювань показано на рис. 2. Сцинтиляційні сигнали від кристала CdWO₄ розмірами Ø 40 × 30 мм (2) потрапляли на фотокатод ФЕП-2 (3) через коліматор світлового потоку (4). Коліматор світлового потоку являє собою тонкий диск з отворами, що розміщені у вершинах та центрах правильних шестикутників для забезпечення максимальної симетрії та зменшення неоднорідності світлозбору з різних точок кристала. З анода ФЕП-2 імпульси через попередній підсилювач надходили на вхід оцифровувача форм (6) з розрядністю 12 біт і частотою 20 МГц, розробленого на основі мікросхеми AD9022 Analog Devices [8]. Для передачі даних з пам'яті оцифровувача в ПК (7) схемою (5) вироблялись сигнали тригера. Для їх формування використовувались сигнали від ФЕП-1 (1), оптично з'єднаного із сцинтиляційним кристалом CdWO₄. Схема (5) генерувала сигнал дозволу лише за умови, коли в сцинтиляторі реєструвався γ-квант ¹³⁷Cs (662 кеВ у піку повного поглинання). Щоб забезпечити прив'язку по енергії і по часу, схема генерації тригера працювала за стандартною методикою швидко-повільних збігів.

Після вимірювань із двома ФЕП, з метою енергетичної калібровки, набирались форми від сцинтилятора CdWO₄, оптично з'єднаного до ФЕП-2 із рентгенівськими та γ-квантами від ⁵⁵Fe (6 кеВ), ¹³⁷Cs (30 кеВ) та ²⁴¹Am (17 і 60 кеВ). Таким чином, за допомогою вищеприписаної методики вдалось отримати вибірки форм сцинтиляційних сигналів в енергетичному діапазоні від 4 до 36 кеВ.

Попередня цифрова обробка сигналів

Перед тим як аналізувати сигнал за формою, необхідно здійснити його попередню цифрову обробку, яка полягає у визначенні границь сигналу та базової лінії. Від цих параметрів залежить правильність визначення форми та площі (енергії) сигналу. Труднощі обробки низькоенергетичних сигналів полягають у специфічності їхньої форми. Чим нижчу енергію

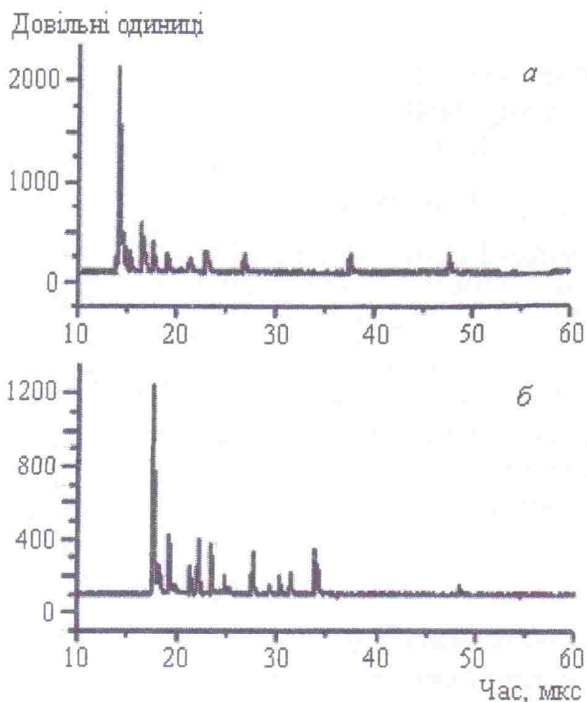


Рис. 1. Форми шумового сигналу (а) та сцинтиляційного (CdWO₄) з енергією 5 кеВ (б).

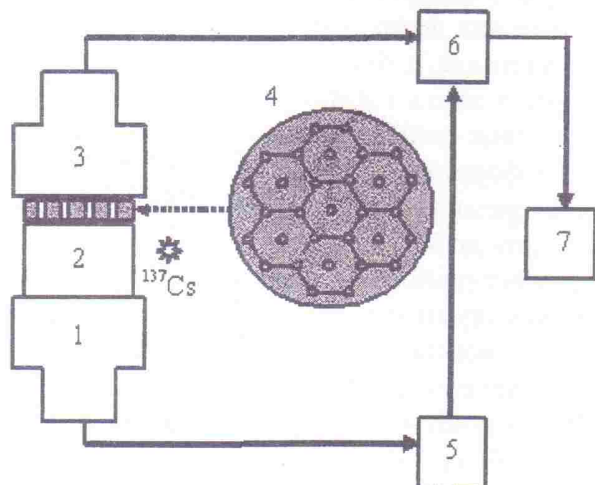


Рис. 2. Схема вимірювань форм низькоенергетичних сцинтиляційних сигналів: 1 – ФЕП-1; 2 – CdWO₄; 3 – ФЕП-2; 4 – коліматор світла; 5 – схема генерації тригера; 6 – оцифровувач форм; 7 – ПК.

тично з'єднаного до ФЕП-2 із рентгенівськими та γ-квантами від ⁵⁵Fe (6 кеВ), ¹³⁷Cs (30 кеВ) та ²⁴¹Am (17 і 60 кеВ). Таким чином, за допомогою вищеприписаної методики вдалось отримати вибірки форм сцинтиляційних сигналів в енергетичному діапазоні від 4 до 36 кеВ.

має сигнал, тим більш дискретна його структура – він являє собою угруповання одиночних імпульсів. При такій формі сигналу випадкові шумові імпульси ускладнюють визначення часу його початку та рівня базової лінії, а накладання шумів на сигнал призводять до збільшення флуктуацій його амплітуди.

Для пошуку та попередньої обробки сигналів було розроблено та застосовано такий алгоритм:

- 1) локалізація окремих одиночних імпульсів градієнтними методами;
- 2) пошук їхніх угруповань;
- 3) вибір найоптимальнішого з них як кандидата на реальний сигнал;
- 4) обрахунок базової лінії з використанням інтервалу до початку сигналу з відкинутими на ньому всіма випадковими шумовими імпульсами.

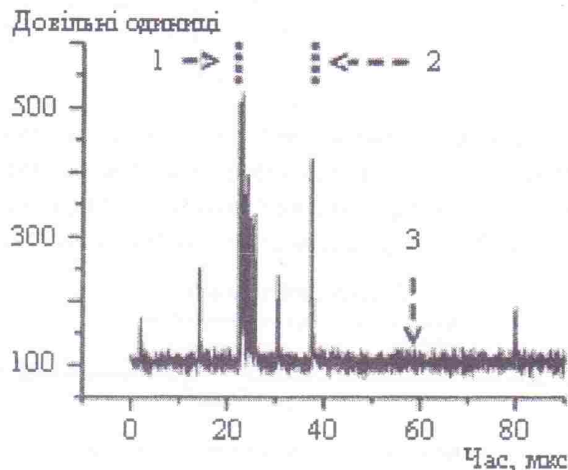


Рис. 3. Типова форма низькоенергетичного сигналу від сцинтилятора CdWO₄: 1 – старт сигналу; 2 – кінець; 3 – базова лінія.

Приналежність одиночного імпульсу до сигналу перевірялась шляхом використання оціненої (та перевіреної за допомогою аналізу сигналів з енергією 4 кеВ) максимальної відстані (~ 6 мкс) між сусідніми одиночними імпульсами. Типовий низькоенергетичний сцинтиляційний сигнал із результатом попередньої цифрової обробки зображено на рис. 3.

Методи аналізу сигналів за формою

Після того як вдалось визначити межі сигналу та базову лінію, можна приступати безпосередньо до аналізу виділених сигналів за формою. Серед традиційних підходів, що широко використовуються, розглянемо найбільш відомі.

Метод оптимального цифрового фільтра (ОЦФ) полягає у визначенні так званого індикатора форми [9]

$$SI = \frac{\sum_k f(t_k) \times P(t_k)}{\sum_k f(t_k)} \quad (1)$$

Вагова функція $P(t)$ визначається як

$$P(t) = \frac{\bar{f}_\gamma(t) - \bar{f}_{ns}(t)}{\bar{f}_\gamma(t) + \bar{f}_{ns}(t)} \quad (2)$$

де $f(t_k)$ – оцифрована амплітуда (у момент часу t_k) даного сигналу; $\bar{f}_\gamma(t)$ і $\bar{f}_{ns}(t)$ – усереднені форми імпульсів для γ -квантів і шумових сигналів відповідно. Сумування проводилось по часових каналах від початку імпульсу до визначеного кінця.

Метод побудовано на визначенні “середнього часу” сигналу [4]

$$\langle t \rangle = \frac{\sum_k (f(t_k) \cdot t_k)}{\sum_k f(t_k)} \quad (3)$$

Використання критерію χ^2 (метод найменших квадратів, МНК) для визначення мінімальної відмінності досліджуваного сигналу від однієї із усереднених форм

$$D = \sqrt{\sum_k (f(t_k) - \bar{f}_\gamma(t_k))^2} - \sqrt{\sum_k (f(t_k) - \bar{f}_{ns}(t_k))^2} \quad (4)$$

Цю різницю можна також трактувати як визначення мінімальної відстані в евклідовому просторі від кінця одиничного вектора, що описує досліджуваний сигнал, до одного із кінців таких самих одиничних векторів, що описують виміряні форми сигналів від сцинтилятора та шумів. Початки всіх векторів знаходяться в центрі системи відліку.

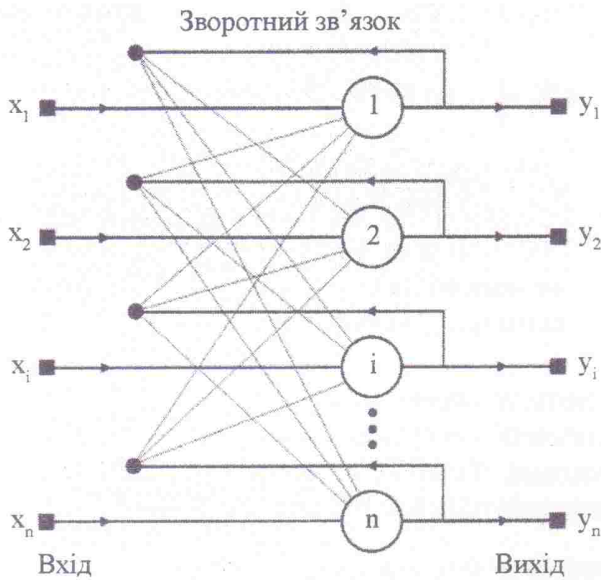


Рис. 4. Структурна схема мережі Хопфілда.

Як альтернативу традиційним підходам у даній роботі ми також застосували штучну нейронну мережу (ШНМ). В якості робочої мережі була організована асоціативна пам'ять на базі ШНМ типу Хопфілда (рис. 4). На стадії ініціалізації мережі вагові коефіцієнти синапсів встановлювались [10] як

$$w_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=0}^{m-1} x_i^k x_j^k, & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases} \quad (5)$$

де i та j – індекси передсинаптичного та постсинаптичного нейронів відповідно; x_i^k , x_j^k – i -й та j -й елементи вектора k -го зразка.

Алгоритм функціонування мережі був такий (p – номер ітерації):

1. На входи подавався досліджуваний сигнал

$$y_i(0) = x_i, \quad i = 0 \dots n - 1. \quad (6)$$

2. Розраховувались нові стани нейронів

$$s_j(p+1) = \sum_{i=0}^{n-1} w_{ij} y_i(p), \quad j = 0 \dots n - 1 \quad (7)$$

i нові вихідні сигнали

$$y_j(p+1) = f[s_j(p+1)], \quad (8)$$

де f – порогова активаційна функція:

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \quad (9)$$

3. Далі йшла перевірка – чи змінились вихідні значення аксонів за останню ітерацію. Якщо так, – здійснювався перехід до процедури 2; якщо ні (виходи стабілізувались), – кінець і перехід до наступного сигналу. При цьому вихідний вектор був зразком, що найкращим чином узгоджувався із вхідними даними, а величина D_{out} , що відповідала відхиленню вихідного сигналу від модельного, обчислювалась за формулою (4). Надалі кожен із величин SI , $\langle t \rangle$, D , та D_{out} називатимемо індикатором форми.

Результати та обговорення

Дискримінація сцинтиляційних сигналів від шумів здійснювалась при частоті слідування останніх ~ 5 кГц. На практиці рівень шумів високоякісних спектрометричних ФЕП не перевищує цієї позначки навіть при такому енергетичному порозі, коли реєструються одноелектронні сигнали. Корисні сигнали слідували із частотою $10 \div 15$ Гц.

Унаслідок попередньої цифрової обробки сигналів та застосування методів аналізу сигналів за формою було досягнуто хорошої дискримінації від шумів для сцинтиляційних сигналів CdWO_4 з енергіями від 5 кеВ і вище (рис. 5). Для γ -квантів з енергією 15 кеВ розділення практично ідеальне, що дає підстави застосувати методику в сцинтиляційних експериментах із пошуку рідкісних процесів. Слід відзначити, що для сигналів з енергією ≈ 3 кеВ принципово неможливо проводити дискримінацію від шумів. Це пов'язано з тим, що вони мають вигляд одиничних імпульсів. Аналогічна форма спостерігається й для більшості шумових сигналів ФЕП. Усі підходи, що використовувались для аналізу сигналів, надійно працювали з приблизно однаковою ефективністю для енергій ≥ 5 кеВ. Тому ми обмежились графічними представленнями для методу ОЦФ, який найчастіше використовується з цією метою.

В експерименті важливо виділити якнайбільше корисних сигналів (при цьому потрібно знати відсоток втрачених сигналів) і якнайменше шумових (таких, що були невідокремлені за формою від корисних сигналів). Тому для кількісної оцінки ефективностей дискримінації за формою застосовувались два підходи. У першому обчислювався відсоток зареєстрованих корисних сигналів при заданому рівні шумів у визначеному діапазоні значень індикатора форми (рис. 6, а). Рівень шумів визначався як відношення кількості шумів до загальної кількості зареєстрованих сигналів (корисні + шуми). У другому підході визначався відсоток шумів, що були зареєстровані як корисні сигнали при заданих ефективностях відбору корисних сигналів, які визначались як відношення відібраних корисних сигналів до загальної кількості виміряних корисних сигналів. Рис. 6 (б) демонструє ефективність дискримінації шумів при заданій ефективності відбору корисних подій. Уже для 6 кеВ рівень шумів дуже низький за вимоги реєстрації 99 % сцинтиляційних сигналів.

Оскільки для вищих енергій усі розглянуті методики дискримінації за формою працюють однаково добре, порівняльний аналіз їх представлено для найскладнішого випадку – дискримінації від шумів γ -квантів з енергією 4 кеВ (рис. 7). У даному випадку будувалась залежність відсотка зареєстрованих шумів від відсотка зареєстрованих сигналів. Як видно з рисунка, метод χ^2 виявився найменш ефективним, а інші три підходи давали приблизно однакові значення. З огляду на те, що у випадку ШНМ неможливо варіювати різні рівні відсіч-

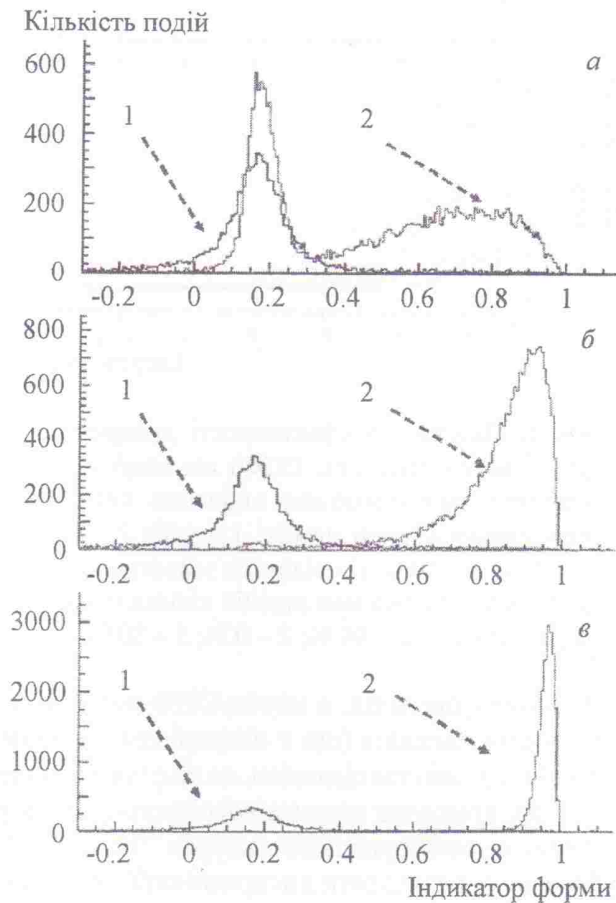


Рис. 5. Результати дискримінації сцинтиляційних сигналів CdWO_4 (2) і шумів ФЕП (1) методом ОЦФ для γ -квантів з енергією: 4 кеВ (а); 5 кеВ (б); 15 кеВ (в).

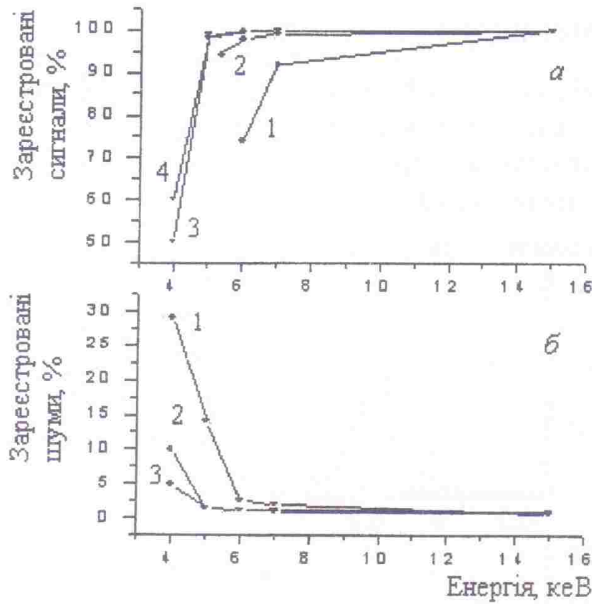


Рис. 6. Залежність ефективності дискримінації γ -квантів (методом ОЦФ) від енергії: *а* – відсоток зареєстрованих корисних сигналів при заданому рівні шумів: 1 – 1%; 2 – 2%; 3 – 5%; 4 – 10%. *б* – відсоток зареєстрованих шумових сигналів при заданій кількості корисних сигналів: 1 – 99%; 2 – 0%; 3 – 50%.

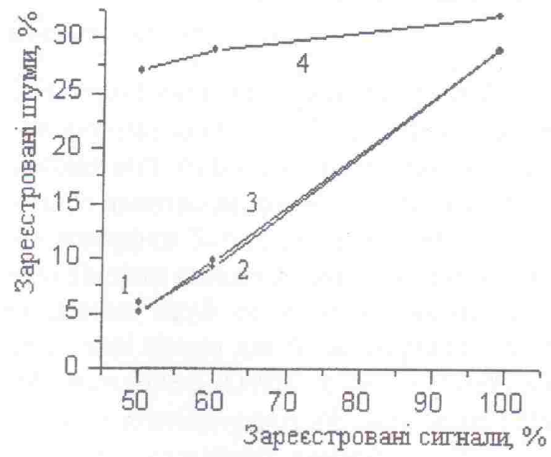


Рис. 7. Ефективності дискримінації γ -квантів з енергією 4 кеВ від шумів ФЕП різними методами аналізу за формою: 1 – ШНМ Хопфілда (одне значення); 2 – визначення „середнього часу”; 3 – ОЦФ; 4 – МНК.

ки шумових сигналів, а метод ОЦФ вимагає володіння апріорною інформацією про усереднені форми сигналів (що є нетривіальною задачею при реєстрації низькоенергетичних сигналів), найдоцільнішим підходом, на наш погляд, є метод визначення “середнього часу”.

Як приклади ефективного застосування розроблених методик на рис. 8 і 9 представлено спектри калібрувальних джерел ^{55}Fe (6 кеВ) та ^{241}Am (17 кеВ) відповідно. Рисунок (б) відображають результати дискримінації шумів за допомогою методу ОЦФ.

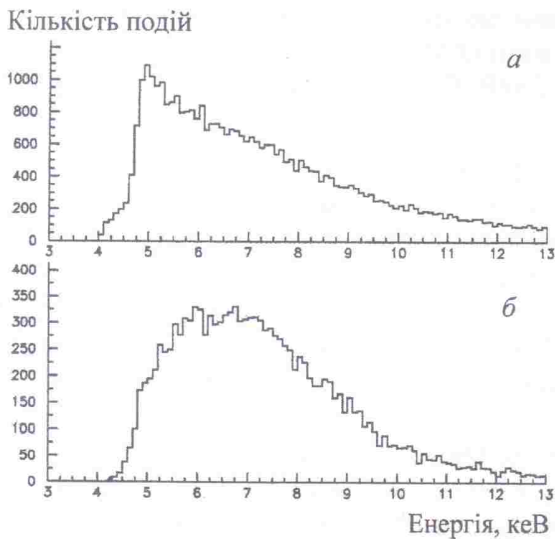


Рис. 8. Спектр ^{55}Fe (корисні сигнали + шуми ФЕП) (*а*) та результати застосування методу ОЦФ для дискримінації від шумів (*б*).

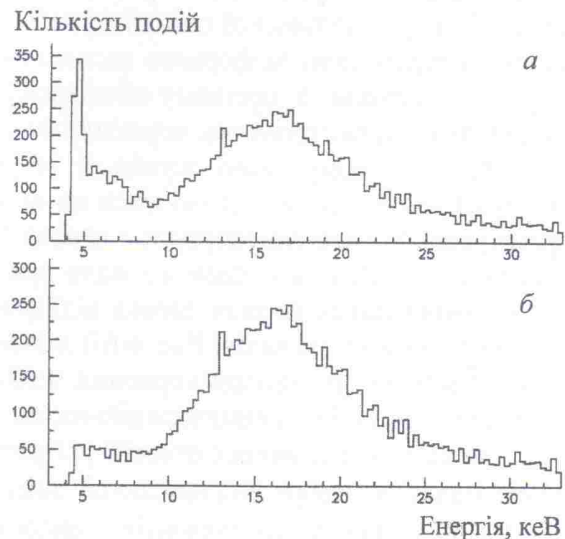


Рис. 9. Спектр ^{241}Am (корисні сигнали + шуми ФЕП) (*а*) та результати застосування методу ОЦФ для дискримінації від шумів (*б*).

Висновки

У даній роботі, з метою розробки та перевірки методів дискримінації низькоенергетичних сигналів у сцинтиляторах CdWO_4 від шумів фотопомножувача, було застосовано експериментальну методику набору форм низькоенергетичних сцинтиляційних сигналів без домішок шумів фотоелектронного помножувача. Це дало змогу отримати сигнали від сцинтилятора CdWO_4 з енергіями, починаючи від 4 кеВ. Представлено алгоритм попередньої цифрової обробки низькоенергетичних сцинтиляційних сигналів. Проведено порівняння ефективності застосування різних методів дискримінації сигналів від шумів: ОЦФ, критерію χ^2 , визначення “середнього часу” та ШНМ типу Хопфілда. Досягнуто 100 %-ну дискримінацію сигналів з енергіями ≥ 15 кеВ від шумів. Показано, що для дискримінації сцинтиляційних сигналів від шумів ФЕП найбільш доцільно застосувати метод визначення “середнього часу”. Розроблені методи можуть бути застосовані для дискримінації шумів ФЕП у вимірюваннях з різними сцинтиляторами, час висвітлювання яких суттєво перевищує час спаду шумових імпульсів фотопомножувача.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Danevich F.A., Georgadze A.Sh., Kobychhev V.V. et al.* New results of ^{116}Cd double β decay study with $^{116}\text{CdWO}_4$ scintillators // *Phys. Rev. C.* - 2000. - Vol. 62. - P. 045501.
2. *Danevich F.A., Georgadze A.Sh., Kobychhev V.V. et al.* α -activity of natural tungsten isotopes // *Phys. Rev. C.* - 2003. - Vol. 67. - P. 014310.
3. *Danevich F.A., Georgadze A.Sh., Kobychhev V.V. et al.* Search for 2β decay of cadmium and tungsten isotopes: Final results of the Soltvina experiment // *Phys. Rev. C.* - 2003. - Vol. 68. - P. 035501.
4. *Bernabei R., Belli P., Landoni V. et al.* New limits on WIMP search with large-mass low-radioactivity NaI(Tl) set-up at Gran Sasso // *Phys. Lett. B.* - 1996. - Vol. 389. - P. 757.
5. *Wu S.C., Yue Q., Lai V.P. et al.* Near threshold pulse shape discrimination techniques in scintillating CsI(Tl) crystals // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* - 2004. - Vol. 523. - P. 116.
6. *Gatti E., Geraci A., Riboldi S. et al.* Digital Penalized LMS Method for Filter Synthesis with Arbitrary Constraints and Noise // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* - 2004. - Vol. 523. - P. 167.
7. *Robinson M., Lightfoot P.K., Carson M.J. et al.* Reduction of Coincident Photomultiplier Noise Relevant to Astroparticle Physics Experiments // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* - 2005. - Vol. 545. - P. 225.
8. *Fazzini T., Bizetti P.G., Maurenzig P.R. et al.* Pulse-shape discrimination with CdWO_4 crystal scintillators // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* - 1998. - Vol. 410. - P. 213.
9. *Gatti E., De Martini F.* A new linear method of discrimination between elementary particles in scintillation counters // *Nuclear Electronics.* - 1962. - Vol. 2. - P. 265.
10. *Уоссермен Ф.* Нейрокомпьютерная техника. - М.: Мир, 1992.

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ДИСКРИМИНАЦИИ ПО ФОРМЕ
НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СЦИНТИЛЯЦИОННЫХ СИГНАЛОВ
ОТ ШУМОВ ФОТОУМНОЖИТЕЛЯ**

Ф. А. Даневич, С. С. Нагорный, С. С. Юрченко

Разработана методика анализа низкоэнергетических сцинтиляционных сигналов по форме для дискриминации их от шумов фотоумножителя. Предложен способ получения выборок таких сигналов без примесей шумов и их предварительной цифровой обработки, позволяющий определить начало сигнала и базовую линию. Проведен сравнительный анализ таких методов дискриминации по форме: определение “среднего времени”, оптимального цифрового фильтра, наименьших квадратов и искусственных нейронных сетей. Достигнута 100 %-ная дискриминация от шумов фотоумножителя для сигналов сцинтилятора CdWO_4 с энергиями ≥ 15 кэВ.

DEVELOPMENT OF PULSE-SHAPE ANALYSIS FOR DISCRIMINATION OF LOW ENERGY SCINTILLATION SIGNALS FROM PHOTOMULTIPLIER NOISES

F. A. Danevich, S. S. Nagorny, S. S. Yurchenko

Pulse shape analysis technique for discrimination of low-energy scintillation signals from the photomultiplier noises was developed. Samples of low-energy signals, free from photomultiplier noise admixture were measured in special calibration runs. The algorithm of preliminary signal processing to determine beginning and base line of the pulses was developed. Comparison of different pulse shape discrimination methods was done. Among them are the methods of "average time", optimal digital filter, least squares and artificial neural networks. The 100 % discrimination efficiency for CdWO_4 scintillation signals with energies of ≥ 15 keV from photomultiplier noises was achieved.

Надійшла до редакції 17.05.05,
після доопрацювання – 01.12.05.