

ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ АНАЛІЗУ ФОРМИ ІМПУЛЬСІВ У СЦИНТИЛЯТОРАХ CdWO_4 Ф. А. Даневич¹, Ю. Г. Здесенко¹, С. С. Нагорний¹, С. С. Юрченко^{1,2}¹Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ²Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

Для аналізу форми сцинтиляційних сигналів вольфрамату кадмію застосовано підхід штучних нейронних мереж та проведено його порівняння з методом оптимального цифрового фільтра. Уперше для цих сцинтиляторів отримано повне розділення сигналів від γ -квантів та α -частинок. Обговорюється перспективність спільного застосування методик штучних нейронних мереж та оптимального цифрового фільтра в експерименті з пошуку 2β -розпаду ^{116}Cd .

Вступ

Дослідження безнейтринної моди (0ν) 2β -розпаду є надзвичайно актуальним унаслідок повідомлення кількох міжнародних колаборацій про спостереження осциляцій нейтрино [1 – 3] – явища, можливого лише при наявності в цих частинок маси. Спостереження маси нейтрино однозначно свідчить про існування нових фізичних явищ за межами стандартної моделі елементарних частинок. Ці результати важливі також для астрофізики та космології, оскільки припускається, що масивні нейтрино майоранівської природи можуть давати внесок у релятивіську компоненту темної матерії всесвіту. Експерименти, в яких досліджуються осциляції нейтрино, чутливі лише до різниці квадратів масових станів, абсолютне значення маси в них неможливо виміряти. Для досягнення цієї мети та з'ясування природи нейтрино проводяться й готуються інші дослідження, зокрема вимірювання форми β -спектра тритію та пошуки $0\nu 2\beta$ -розпаду. Із досліджень β -розпаду тритію випливають обмеження на масу нейтрино будь-якого походження: $< 2 \div 3$ еВ. Підвищення чутливості до рівня $\sim 0,3$ еВ декларується у проєкті KATRIN, основанийому на цій методиці [4]. У той же час, у найкращих сучасних $0\nu 2\beta$ -дослідах обмеження на майоранівську масу нейтрино становлять $0,3 \div 3$ еВ [5]. А в найближчому майбутньому лише ці дослідження можуть претендувати на можливість покращання чутливості до $0,01 \div 0,05$ еВ та, взагалі, на з'ясування природи походження цієї маси [6 – 8].

Експеримент з пошуку 2β -розпаду ядра ^{116}Cd , в якому використовувались кристали вольфрамату кадмію ($^{116}\text{CdWO}_4$), збагачені цим ізотопом до 83 %, є одним із найчутливіших [9, 10]. Завдяки відмінності форм сцинтиляційних сигналів для різних типів іонізуючого випромінювання, метод оптимального цифрового фільтра (ОЦФ) [11] забезпечував розділення між γ -квантами (β -частинками) та α -частинками, а також різного характеру фоновими подіями (α -частинка + затримана β -частинка, подвійні сигнали тощо) [12]. Це дало змогу (у 10 – 15 разів) знизити залишковий фон, спричинений, головним чином, розпадами ^{212}Bi (дочірній радіонуклід з ряду ^{232}Th , який у невеликій кількості присутній у $^{116}\text{CdWO}_4$). Крім того, використання методики аналізу сигналів за формою дало змогу вперше спостерігати α -розпад природного ізотопу ^{180}W з періодом піврозпаду $T_{1/2} = 1,1 \cdot 10^{18}$ років [13].

Перспективним алгоритмом розпізнавання образів, що все частіше використовується в подібних експериментах [14 – 19], є відносно новий метод штучних нейронних мереж (ШНМ). Застосуванню цього методу та об'єднанню його з методом ОЦФ для дискримінації частинок за формою сцинтиляційних сигналів у CdWO_4 і присвячена дана робота.

Прецизійні вимірювання форм сцинтиляційних сигналів від γ -квантів та α -частинок

Для розробки та оцінки ефективностей методик ідентифікації частинок було проведено прецизійні вимірювання форм сцинтиляційних сигналів від CdWO_4 . Завданням цих вимірювань було отримання “чистих” (без домішок імпульсів іншого типу) виборок сигналів від γ -квантів та α -частинок. Наявність таких виборок є надзвичайно бажаною як для навчання нейронних мереж, так і для оцінки ефективностей різних підходів.

Оскільки забрудненість кристалів α -випромінювачами дуже низька [10], то отриманий набір форм від γ -квантів на сцинтиляторі із розмірами $\varnothing 14 \times 3,6$ мм був ідеально чистим. У випадку α -частинок маємо справу з постійно присутнім фоном від γ -квантів, повністю захиститись від якого досить важко. Тому вимірювання форм від α -частинок проводилось на тонкому кристалі ($3 \times 3 \times 0,2$ мм). У цьому детекторі γ -кванти просто не реєструвались через те, що практично не могли залишити енергію, яка б перевищувала поріг спрацювання системи збору даних. Як джерело α -частинок використовувався ^{241}Am з коліматором (енергія α -частинок, що попадали на детектор, становила 5,3 MeV). Оскільки α/β -піввідношення для сцинтиляторів CdWO_4 близьке до 0,2 [13], виборки сигналів від γ -квантів (з енергією ≈ 1 MeV) було набрано з джерелом ^{60}Co . Схему установки, що записувала форми, зображено на рис. 1.

Сигнали з анода фотопомножувача (ФЕП) після попереднього підсилювача розділялись на три канали: 1) сигнал, проходячи через спектрометричний підсилювач (постійна формування 6 мкс), подавався на диференційний дискримінатор, що забезпечував вибір енергетичного інтервалу імпульсів, призначених для оцифровки; 2) сигнал надходив на пороговий дискримінатор, в якому формувалися імпульси часової прив'язки; 3) сигнал подавався на вхід оцифровувача форм (12 біт, з частотою 20 МГц, розроблений на основі мікросхеми AD9022 Analog Devices). Запис форми (2048 каналів) на персональний комп'ютер дозволявся при збігу сигналів часової та енергетичної прив'язки.

Як буде показано нижче, отримані таким чином сигнали ідеально розділялись за формою й були використані при формуванні навчальної вибірки для нейронної мережі. Проте для порівняння ефективностей різних методів вони не підходили. Тому було проведено ще одну серію вимірювань із тими ж кристалами, але із штучно зменшеною кількістю фотонів. Зменшення статистики фотонів для сигналів від α -частинок здійснювалось простою геометричною колімацією світлового пучка, що потрапляв на ФЕП. У випадку γ -квантів, оскільки для них не спостерігається залежність форми від енергії, просто реєструвались частинки з нижчою енергією. В обох серіях вимірювань було набрано по п'ять тисяч сигналів кожного типу.

Метод ОЦФ

Форма сцинтиляційних сигналів вольфрамату кадмію може бути описана як сума експонент [13]

$$f(t) = \sum_i \frac{A_i}{(\tau_i - \tau_0)} (e^{-t/\tau_i} - e^{-t/\tau_0}), \quad (1)$$

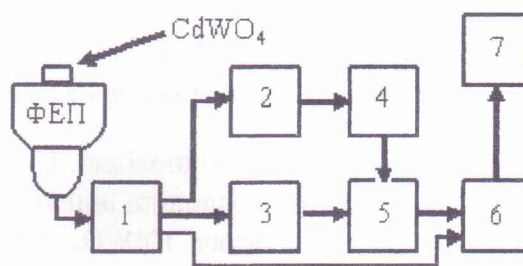


Рис. 1. Схема установки:

- 1 - попередній підсилювач;
- 2 - спектрометричний підсилювач;
- 3 - пороговий дискримінатор;
- 4 - диференційний дискримінатор;
- 5 - схема збігів;
- 6 - оцифровувач форм;
- 7 - персональний комп'ютер.

де A_i – амплітуди, %; τ_i – постійні розпаду для різних компонент сцинтиляційного спалаху; τ_0 – постійна інтегрування електронної схеми ($\approx 0,2$ мкс). Для аналітичного опису сигналів від α -частинок та γ -квантів усереднена форма великої кількості імпульсів апроксимується сумою трьох (для α -частинки) або двох (для γ -квантів) експонент (рис. 2).

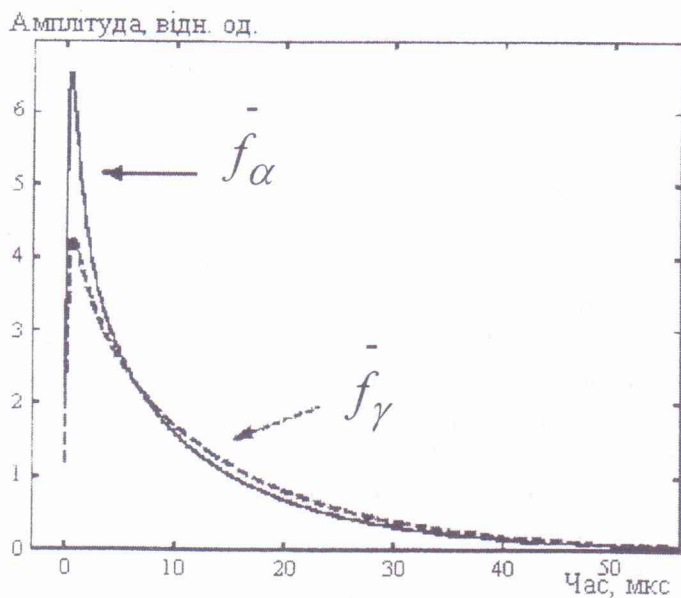


Рис. 2. Усереднені форми сигналів у сцинтиляторах $CdWO_4$ від α -частинок та γ -квантів.

У процесі обробки даних цифровий фільтр застосовувався до кожного експериментального сигналу $f(t)$ з метою отримання числової характеристики його форми – так званого індикатора форми (SI):

$$SI = \frac{\sum f(t_k) \times P(t_k)}{\sum f(t_k)} \quad (2)$$

Вагова функція $P(t)$ визначається як

$$P(t) = \frac{\bar{f}_\alpha(t) - \bar{f}_\gamma(t)}{\bar{f}_\alpha(t) + \bar{f}_\gamma(t)}, \quad (3)$$

де $f(t_k)$ – оцифрована амплітуда (у момент часу t_k) даного сигналу; $\bar{f}_\alpha(t)$ і $\bar{f}_\gamma(t)$ – усереднені форми імпульсів для α -частинок і γ -квантів відповідно.

Сумування проводиться по часових каналах від початку імпульсу до 75 мкс. Розподіли індикаторів форми для сцинтиляційних сигналів від γ -квантів та α -частинок у кристалі $CdWO_4$ добре описуються функціями Гаусса. Тому для оцінки ефективності дискримінації можна використовувати таку величину:

$$E = \frac{|SI_\alpha - SI_\gamma|}{\sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\gamma^2}}, \quad (4)$$

де SI_α , σ_α , SI_γ , σ_γ – значення центрів ваги та дисперсій розподілів індикаторів форм для α -частинок та γ -квантів відповідно.

Застосування методу ШНМ

Ідею побудови ШНМ, здатних імітувати роботу мозку, було висловлено понад півсторіччя тому, і з того часу було виконано величезний обсяг досліджень для її реалізації. На теперішній час найчастіше моделюється робота нейронів у складі ієрархічної мережі, де кожний нейрон більш високого рівня з'єднаний своїми входами з виходами нейронів нижчого рівня. На нейрони найнижчого рівня подаються значення вхідних параметрів, на основі яких треба приймати певні рішення, прогнозувати розвиток ситуації тощо. Ці значення розглядаються як сигнали, що передаються у вищий рівень, послаблюючись або посилюючись залежно від числових значень (вагових множників), які приписуються міжнейронним зв'язкам. У результаті цього на виході нейрона найвищого рівня виробляється деяке значення, яке розглядається як реакція всієї мережі на введені значення вхідних параметрів. Для того щоб мережу можна було застосовувати для розпізнавання образів, її потрібно спочатку навчити на отриманих раніше даних, для яких відомі як вхідні значення, так і правильні відповіді на них. Це тренування полягає в підборі вагових множників міжнейронних зв'язків, що забезпечать найбільшу близькість виходів мережі до відомих

правильних відповідей. Такий підхід виявився високоефективним для вирішення задач розпізнавання образів, до яких можна віднести ідентифікацію частинок за формою сцинтиляційних імпульсів.

Тому в даній роботі також спробували застосувати методику ШНМ для аналізу форми імпульсів у сцинтиляторах CdWO₄. Як робоча мережа використовувався тришаровий перцептрон, схему якого зображено на рис. 3. На кожен нейрон вхідного шару подавалась сума кількох сусідніх каналів оцифровувача. Чим більше каналів сумується, тим меншим є вплив статистичних флуктуацій. Крім того, мережі з меншою кількістю нейронів легше й ефективніше навчаються розпізнавати образи. Однак подальше зменшення кількості нейронів у мережі буде призводити до втрати інформації про форму сигналу і, як наслідок, до погіршення її роздільної здатності. Тому вибір оптимальної структури ШНМ є дуже важливим. З метою дослідження здатності мережі виділяти корисну інформацію із зашумлених сигналів у роботі досліджувались архітектури із різною кількістю вхідних нейронів і з різною кількістю каналів, що брались для підсумовування. Нижче представлено мережу, навчання якої відбувалось порівняно швидко (≈ 30 тис. ітерацій) і яка забезпечувала найкраще розділення сцинтиляційних сигналів від γ-квантів та α-частинок у кристалах CdWO₄.

Вхідний шар складався з семи нейронів, на кожен з яких подавалась сума такої послідовної кількості каналів, щоб забезпечувався приблизно однаковий рівень статистичних флуктуацій сумарного сигналу в кожному з нейронів. Для аналізу сигналів використовувалось 1000 часових каналів. Усереднення проводилось таким чином: на 1-й нейрон вхідного шару подавалась сума перших 30 каналів віднормованого сигналу; 2-й нейрон отримував суму з наступних 38 каналів, 3-й - 52, 4-й - 71, 5-й - 102, 6-й - 174, 7-й - 533. Три нейрони у прихованому шарі було взято згідно з евристичними правилами та практичними рекомендаціями [14]. Оскільки в даній роботі акцент ставився на розрізненні сцинтиляційних сигналів від двох типів іонізуючого випромінювання – α та γ(β), то вихідний шар складався з одного нейрона, який продукував значення в інтервалі від 0 до 1, на основі чого приймалось рішення про приналежність вхідного сигналу до певного класу. До нейронів вихідного та прихованого шарів прикладалось “нейронне зміщення” – додатковий нейрон із своїм набором вагових коефіцієнтів, на вхід якого подавалась 1. Це дає змогу зміщувати початок відліку логічної функції, що прискорює навчання мережі.

Таким чином, сигнали y_i , що надходили з нейронів прихованого та вихідного шарів, були результатами нелінійного перетворення за допомогою сигмоїдної функції:

$$y_i = F(net_i) = \frac{1}{1 + \exp(-net_i)}, \quad (5)$$

де дискримінантна функція net_i визначається як

$$net_i = b_i + \sum_{j=1}^N w_{ij} x_j. \quad (6)$$

У цій формулі w_{ij} – вагові коефіцієнти міжнейронних зв'язків; b_i – зміщення; N та x_j – кількість нейронів у попередньому шарі та сигнали на їх виходах відповідно.

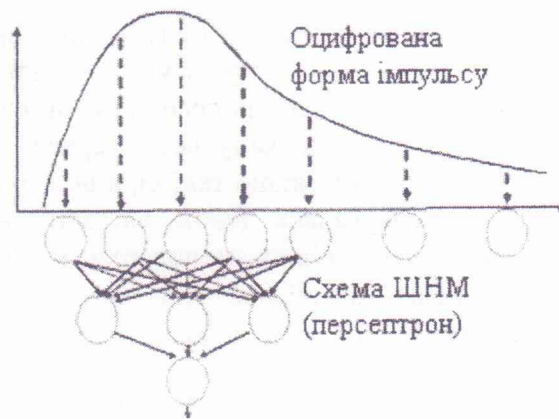


Рис. 3. Архітектура ШНМ, що використовувалась для розпізнавання форм.

Для навчання мережі застосовувався алгоритм зворотного поширення помилки з деякими, описаними нижче, модифікаціями. Після того, як черговий образ подавався на вхід мережі й обчислювався вихід, зв'язки між нейронами налаштовувались згідно з правилом

$$\Delta w_{ij}(t+1) = \eta \delta_j y_i + \rho \Delta w_{ij}(t), \quad (7)$$

де t – номер ітераційної процедури; η та ρ – коефіцієнти, що визначають швидкість навчання; δ_j – імпульс помилки, який при використанні сигмоїди в якості активаційної функції обчислюється як

$$\delta_0 = (d_0 - y_0) F'(net_0) = (d_0 - y_0) y_0 (1 - y_0) \quad (8)$$

для вихідного шару і як

$$\delta_h = y_h (1 - y_h) \delta_0 w_{h0} \quad (9)$$

для прихованого шару. Тут d_0 – очікуваний результат вихідного нейрона; y_0 і y_h – отримані значення вихідного нейрона та нейронів у прихованому шарі відповідно.

Другий доданок у формулі (7) для корекції вагових коефіцієнтів називається імпульсом і служить для покращання процесу пошуку мережею глобального мінімуму. Використовуючи метод імпульсу, мережа намагається рухатись по дну вузьких ярів гіперповерхні похибок (якщо такі є), а не стрибати від схилу до схилу [19]. Під час процесу навчання застосовувалась також автоматична корекція кроку навчання при досягненні мережею визначених рівнів на поверхні похибок. Після певного числа навчальних ітерацій мережа “навчалась” розпізнавати вхідні імпульси, даючи на виході число, близьке до 1 – для імпульсів від α -частинок, і число ≈ 0 – для γ -квантів.

Результати та обговорення

Застосування методики вимірювання сцинтиляційних сигналів у кристалах $CdWO_4$ від γ -квантів та α -частинок дало змогу вперше отримати їх повне (100 %) розділення за формою обома методами (рис. 4 і 5). Значення ефективності дискримінації методом ОЦФ ($E = 6,7$) також раніше не досягалось. Як уже повідомлялось, для порівняння різних методів було проведено серію вимірювань із штучно зменшеною кількістю фотонів. Розділення цих сигналів представлено на рис. 6. Для цих даних ефективність дискримінації становить $E = 3,8$.

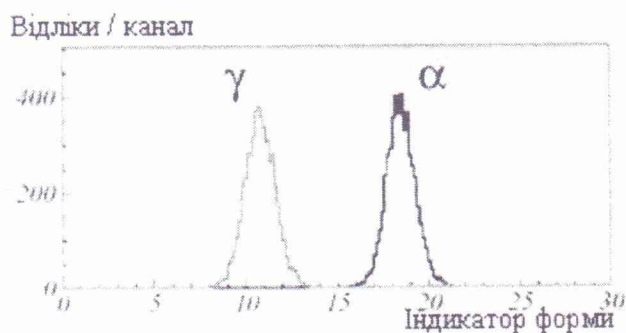


Рис. 4. Розподіли індикаторів форми для сцинтиляційних сигналів $CdWO_4$ від γ -квантів (1,2 MeV) та α -частинок (5,3 MeV).

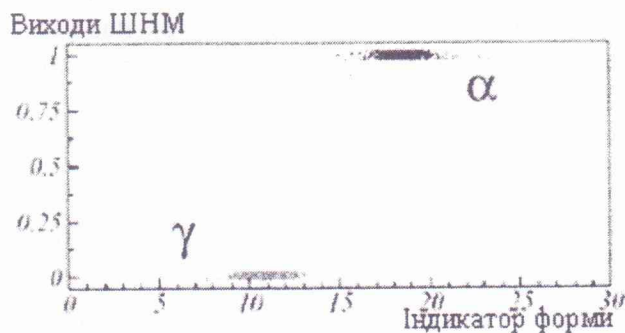


Рис. 5. Порівняння дискримінації частинок методами ШНМ (по вертикалі) та ОЦФ (по горизонталі).

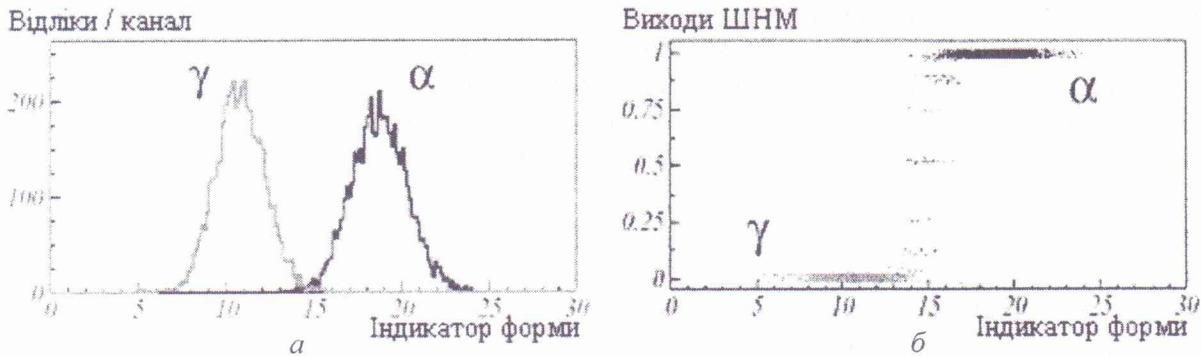


Рис. 6. Порівняння дискримінації методами ОЦФ (а) та ШНМ (б) для сигналів із зменшеною статистикою фотонів.

Щоб порівняти підходи ОЦФ та ШНМ, необхідно знайти спосіб однаково оцінювати ефективності обох методик. Перевагою методу оптимального фільтра є те, що розподіли індикаторів форми для сигналів від α -частинок та γ -квантів описуються функціями Гаусса. Це дає змогу оцінити ймовірність приналежності сигналу до певного класу залежно від значення індикатора форми. Тому вибором інтервалу значень цієї величини можна збільшувати кількість правильно ідентифікованих частинок одного типу, тим самим збільшуючи кількість неправильно розпізнаних подій іншого типу.

У випадку нейронної мережі, що використовувалась нами, такі варіації неможливі, оскільки маємо справу з логічною системою, що дає значення, близькі до 0 ($0 \div 0,05$), або до 1 ($0,95 \div 1$), вказуючи на приналежність сигналу до певного класу. Проміжні значення для аналізу не брались і розглядались як дефект мережі, спричинений неоптимальністю конфігурації та недостатнім результатом навчання. Недолік перед імовірнісними оцінками, такими як оптимальний фільтр, очевидний: немає можливості обчислення внеску неправильно розпізнаних форм іншого типу (тому необхідність наявності „чистих” виборок сигналів кожного типу стає зрозумілою).

Щоб усунути ці відмінності, було прийнято вважати розподіли індикаторів форми логічною системою. Для цього з міркувань симетрії вибиралось значення індикатора форми посередині між їхніми центрами ваги, забезпечуючи таким чином максимальну кількість правильно розпізнаних подій кожного типу. Результати такого аналізу наведено в таблиці.

Як видно з таблиці, мережа ШНМ-2 (навчання якої проводилось на сигналах зі зменшеною статистикою фотонів, що досягалось колімацією світлового потоку на ФЕП) при практично однаковій кількості правильно розпізнаних сигналів (у порівнянні з методом ОЦФ), забезпечила менше неправильно розпізнаних подій. Кращі показники ШНМ-2 в порівнянні з

Порівняння ефективності методів ОЦФ та ШНМ для сигналів зі зменшеною статистикою фотонів, %

Метод	Правильно розпізнані події	Неправильно розпізнані події	Події, не віднесені ні до одного з класів
ОЦФ	99,59	0,41	—
ШНМ-1	98,28	0,07	1,65
ШНМ-2	99,45	0,29	0,26
ШНМ-2 + ОЦФ	99,28	0,16	0,56

ШНМ-1 (навчання мережі проводилось на сигналах, що були виміряні без колімації) свідчать, по-перше, про те, що навчальна вибірка для випадку ШНМ-1 була недостатньою, а саме: ця мережа більше запам'ятовувала образи, що їй подавались при навчанні, ніж робила узагальнення для характеристик класу. По-друге, це може означати неоптимальність вибраної архітектури ШНМ (однакова в обох випадках) або її принципову нездатність до кращої класифікації. По-третє, це вказує на особливості майбутнього використання методики

в реальних експериментах: для ідентифікації частинок у широкому енергетичному діапазоні необхідно розпізнавати сигнали в окремих вузьких інтервалах як різні класи образів.

Як видно з таблиці, завдяки концептуальній відмінності цих підходів певне покращання точності ідентифікації відбувається при спільному застосуванні обох методів. Звісно, тут деякий програш спостерігається у частині правильно розпізнаних сигналів.*

Висновки

Для розпізнавання сигналів від γ -квантів та α -частинок у скінтіляторах CdWO_4 як альтернативу методу оптимального цифрового фільтра вперше застосовано алгоритм штучних нейронних мереж. Із цією метою було використано мережу типу перцептрон та реалізовано її навчання за допомогою градієнтного алгоритму зворотного поширення помилки.

Завдяки застосованим методикам прецизійних вимірювань скінтіляційних сигналів від кристалів CdWO_4 вперше було отримано повну (100 %) ідентифікацію α -частинок та γ -квантів (при використанні обох підходів аналізу за формою імпульсів).

Показано, що методи оптимального цифрового фільтра та штучних нейронних мереж дають практично порівнянні результати дискримінації, хоча й спостерігається незначна перевага нейропідходу за рахунок зменшення кількості неправильно розпізнаних подій. Таким чином, зроблено висновок про доцільність спільного застосування цих методів для покращання ефективності аналізу форми імпульсів в експерименті з пошуку 2β -розпаду ^{116}Cd .

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Fucuda Y., Hayakawa H., Ichihara E. et al.* Super Kamiokande Collaboration // *Phys. Rev. Lett.* – 1998. - Vol. 81. - P. 1562; 1999. - Vol. 82. - P. 1810; 1999. - Vol. 82. - P. 2430; 2001. - Vol. 86. - P. 5651.
2. *Ahmad Q.R., Allen R.C., Andersen T.C. et al.* SNO Collaboration // *Phys. Rev. Lett.* – 2001. - Vol. 87. - P. 071301; 2002. - Vol. 89. - P. 011301; 2002. - Vol. 89. - P. 011302.
3. *Eguchi K., Enomoto S., Furuno K. et al.* KamLAND Collaboration // *Phys. Rev. Lett.* – 2003. = Vol. 90. - P. 021802.
4. *Lobashev V.M.* // *Nucl. Phys. A.* – 2003. - Vol. 719. - P. 153.
5. *Tretyak V.I., Zdesenko Yu.G.* // *At. Data Nucl. Data Tables.* – 2002. - Vol. 80. - P. 83.
6. *Vergados J.D.* // *Phys. Rep.* – 2002. Vol. 361. - P. 1.
7. *Zdesenko Yu.G.* // *Rev. Mod. Phys.* – 2002. - Vol. 74. - P. 663.
8. *Elliott S.R., Vogel P.* // *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* – 2002. - Vol. 52. - P. 115.
9. *Danevich F.A. et al.* // *Phys. Rev. C.* – 2000. - Vol. 62. - P. 045501; *P.G. Bizetti et al.* // *Nucl. Phys. B.* - (Proc. Suppl.) – 2002. - Vol. 110. - P. 389.
10. *Danevich F.A., Georgadze A.Sh., Kobaychev V.V. et al.* // *Phys. Rev. C.* – 2003. - Vol. 68. - P. 035501.
11. *Gatti E., De Martini F.* // *Nuclear Electronics.* – 1962. - Vol. 2. - P. 265.
12. *Fazzini T., Bizzeti P.G., Maurenzig P.R. et al.* // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* – 1998. - Vol. 410. - P. 213.
13. *Danevich F.A., Georgadze A.Sh., Kobaychev V.V. et al.* // *Phys. Rev. C.* – 2003. - Vol. 67. - P. 014310.
14. *Кусель И.В. и др.* // *ЭЧАЯ.* – 1993. - Т. 24. - С. 1551.
15. *Majorovits B., Klapdor-Kleingrothaus H.V.* // *Eur. Phys. J. A.* – 1999. - Vol. 6. - P. 463.
16. *Wu S.C., Yue Q., Lai V.P. et al.* Near threshold pulse shape discrimination techniques in scintillating CsI(Tl) crystals // *Nucl. Instr. Meth. A.* - 2004 (in press).
17. *Swiatek W.* // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B.* – 1997. - Vol. 132. - P. 704.
18. *Sakai H. et al* // *Nucl. Sci. Tech.* – 2001. - Vol. 38. - P. 306.
19. *Уоссермен Ф.* *Нейрокомпьютерная техника.* – М.: Мир, 1992.

* Ми також спробували застосувати для ідентифікації імпульсів метод χ^2 . Результати були в межах похибки порівнянні з тими, що були отримані при застосуванні методу ОЦФ.

**ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ФОРМЫ
ИМПУЛЬСОВ В СЦИНТИЛЛЯТОРАХ CdWO₄****Ф. А. Даневич, Ю. Г. Здесенко, С. С. Нагорный, С. С. Юрченко**

Для анализа формы сигналов от сцинтилляторов вольфрамата кадмия применен подход искусственных нейронных сетей и проведено его сравнение с методом оптимального цифрового фильтра. Впервые для этих сцинтилляторов получено полное разделение сигналов от γ -квантов и α -частиц. Обсуждается перспективность совместного использования методик искусственных нейронных сетей и оптимального цифрового фильтра в эксперименте по поиску 2β -распада ^{116}Cd .

**APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS
FOR PULSE SHAPE ANALYSIS IN CdWO₄ SCINTILLATORS****F. A. Danevich, Yu. G. Zdesenko, S. S. Nagorny, S. S. Yurchenko**

Artificial neural networks was applied to pulse shape analysis in cadmium tungstate scintillators and comparing them with optimal digital filter method was done. For the first time the distinct ($\approx 100\%$) discrimination of α and γ events has been achieved. An improvement of pulse shape analysis in the ^{116}Cd 2β decay experiment by applying both methods together is discussed.

Надійшла до редакції 05.04.04,
після доопрацювання – 27.05.04.