

*PhD O. O. ПУДОВ, С. О. СОКОЛОВ, к. ф.-м. н. О. С. АБИЗОВ,
к. ф.-м. н. О. В. РИБКА, к. т. н. В. Є. КУТНІЙ*

Україна, Національний науковий центр “Харківський фізико-технічний інститут”

E-mail: pudov@kipt.kharkov.ua

ЦИФРОВА ОБРОБКА В ПЛІС ІМПУЛЬСІВ ГАЗОВОГО ДЕТЕКТОРА ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЛЯ ПРИДУШЕННЯ АКУСТИЧНИХ ЗАВАД

Для ксенонових пропорційних детекторів гамма-випромінювання розроблено вимірювальний тракт на основі ПЛІС та алгоритм цифрової обробки сигналів, що дозволяє відокремлювати низькочастотний шум у вихідному сигналі детектора, який виникає внаслідок зовнішнього звукового впливу, від корисного сигналу — іонізаційних імпульсів. Такий підхід завдяки придушенню завад дає можливість проводити спектральні вимірювання гамма-випромінювання в умовах суттєвого акустичного фону, коли детектори зі звичайним спектрометричним трактом не справляються із завданням.

Ключові слова: детектори гамма-випромінювання, ксенон, пропорційні детектори, ПЛІС, цифрова обробка сигналу, придушення завад.

Пропорційні спектрометричні детектори рентгенівського та γ -випромінювання знайшли застосування у галузі ядерної фізики, астрономії, матеріалознавства тощо. Ксенон і його суміші в ролі детектувального середовища особливо привабливі через великий атомний номер, завдяки чому детектори на його основі мають високу чутливість [1]. При цьому конструкція пропорційних газових лічильників обумовлює їхню високу чутливість до акустичних хвиль і вібрації, а звичайні “аналогові” електронні вимірювальні тракти часто не здатні подолати завади, що виникають.

Останніми роками широке застосування в галузі аналізу амплітудних розподілів сигналів різних детекторів, як твердотільних, так і газонаповнених, знайшли технологія програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС) та відповідні мікросхеми. Про отримання амплітудних розподілів сигналу (спектрів) за допомогою ПЛІС для твердотільних детекторів раніше повідомлялося в деяких дослідженнях, наприклад у [2, 3]. Такі детектори зазвичай мало чутливі до зовнішнього акустичного впливу, і відповідні алгоритми ПЛІС можуть бути простими. Наприклад, у роботі [2], де ПЛІС використовувалася для створення компактного спектрометра випромінювання на основі сцинтилятора CsI(Tl), для отримання спектрів автори застосували “простий алгоритм перевищення порогового значення з використанням трикутного фільтра з порогом, визначеним користувачем”.

В [4] був запропонований і реалізований в ПЛІС алгоритм для придушення акустичного шуму в γ -детекторі з високим тиском ксенону (НРХе). Цей алгоритм надає точки початку та кінця кожного

імпульсу, утвореного в процесі іонізації газу гамма-випромінюванням. Ці точки визначають базову лінію сигналу. Для детекторів на основі НРХе третій проміжний екранувальний електрод (сітка Фріша) є деталлю, яка призводить до значного підвищення віброакустичної чутливості [5], однак такі детектори менш чутливі до акустичного шуму у порівнянні з пропорційними лічильниками.

У [6] апаратне забезпечення National Instruments разом з програмою LabView використовувалося при роботі з детектором на основі НРХе для фільтрації наведеного акустичного шуму за допомогою швидкого перетворення Фур’є. При цьому в алгоритмі використовувався лінійний фільтр, який відокремлював заздалегідь встановлені звукові частоти, що не є універсальним рішенням. Хоча визначення частот шуму за допомогою швидкого перетворення Фур’є та його фільтрація здається правильним підходом, він досить складний у виконанні.

У цій роботі для цифрової обробки сигналу пропорційного лічильника, наповненого сумішшю ксенону і метану, у присутності акустичного та/або вібраційного впливу пропонується використовувати алгоритм “вікон часу”. ПЛІС, що працює за цим алгоритмом, не визначає точно “істинні” початок і кінець імпульсу, що є перевагою у випадку, коли імпульси мають досить довгі фронти, що спадають, і коли шумова частина сигналу є значною.

Методика проведення досліджень

Схему розробленого пропорційного лічильника представлено на **рис. 1**. Конструкція детектора та процедура заповнення газом аналогічні описаним у [7]. У нинішній конструкції використано одну трубку

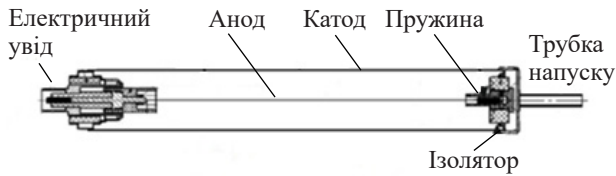


Рис. 1. Схема пропорційного лічильника

для напуску газу, що розташовується з торця детектора, замість двох, прикріплених до циліндричного корпусу детектора, у попередніх моделях. Крім того, в цій роботі анод детектора виготовлявся з CuBe-дроту діаметром 30 мкм на відміну від 60-мкм вольфрамового анода в [7] і був підпружинений з одного боку. Залишилися незмінними такі параметри, як діаметр катода (корпусу детектора) 25,5 мм та довжина детектора 250 мм. Детектор був заповнений сумішшю $\text{Xe}+2,1\%\text{CH}_4$ чистотою 99,9999% до тиску 1,25 бар.

Під час спектрометричних вимірювань детектор підключався або до “традиційного” (“аналогового”), або до “цифрового” (на основі ПЛІС) вимірювального тракту. Сигнал зчитувався з анода. “Аналоговий” тракт складався з підсилювача Ortec 142АН, підсилювача-формувавця Ortec 672, багатоканального аналізатора Amptek 8000D та персонального комп’ютера. У “цифровому” тракті замість багатоканального аналізатора використовувалася плата 14-розрядного аналого-цифрового перетворювача (АЦП) компанії Terrasic разом з налагоджувальною платою на базі ПЛІС Altera Cyclon IV. Максимальна частота оцифровування сигналу в АЦП — 200 МГц, у цій роботі оцифровування вихідного сигналу детектора проводилося на частоті 50 МГц — основній тактовій частоті ПЛІС. Мовою Verilog була написана програма “прошивки”, за допомогою якої конфігурувалася ПЛІС. В результаті в ПЛІС аналізувався оцифрований вхідний сигнал, визначалася амплітуда іонізаційних імпульсів і створювалися амплітудні розподіли. Рівень акустичного шуму вимірювався приладом Мезу М5.

Напруга зсуву подавалася на анод детектора за допомогою прецизійного джерела високої напруги Ortec 659 через RC-фільтр. Використовувалися стандартні лабораторні джерела γ -випромінювання, такі як ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{152}Eu та ^{133}Ba . Під час вимірювань γ -джерело розташовувалося по центру безпосередньо на поверхні пропорційного детектора.

Проведення досліджень та обговорення результатів

Вибір режиму роботи детектора. Після виготовлення детектора і наповнення його газовою сумішшю були проведені спектрометричні вимірювання з використанням “аналогового” вимірювального тракту та джерела ^{241}Am при варіюванні напруги анода в діапазоні від 600 до 1500 В. З отриманих амплітудних розподілів були визначені швидкість лічби іонізаційних імпульсів, коефіцієнт газового по-

силення (за методикою, описаною у [8]) та роздільна здатність енергії γ -квантів. Залежність швидкості лічби від напруги на аноді виходить на відносно плоске плато при ≈ 950 В. Коефіцієнт газового посилення зростає з підвищенням напруги, і з 1200 В починається його строго експоненційне зростання. У діапазоні напруги 1200—1400 В досягаються найкращі значення роздільної здатності: близько 6,5% для енергії 60 кеВ. Так було обрано значення анодної напруги 1200 В для подальших експериментів.

Процес цифрової обробки. На рис. 2 показано типові імпульси детектора, отримані за допомогою “цифрового” вимірювального тракту. У дослідженнях використовувалося γ -джерело ^{241}Am . Сигнал містить певну шумову пульсацію, яка значно менш присутня в “аналогових” імпульсах (в іншому вони схожі). Причиною може бути те, що у “цифровому” тракті використовувався стандартний АЦП, а не створений спеціально для спектрометрії γ -випромінювання. Наприклад, на відміну від аналізатора Amptek 8000D плати з ПЛІС та відповідним АЦП є повністю відкритими (без екранувальних корпусів).

ПЛІС, “прошита” для набору спектрів відповідно до створеного алгоритму, спочатку шукає додатні імпульси в сигналі АЦП під час безперервного збору даних. Це робиться шляхом пошуку моменту, коли сигнал змінюється зі зростаючого на спадаючий. Іонізаційними вважаються тільки імпульси з відносно крутим фронтом, амплітуда яких наростає зі швидкістю понад 3,5% на мікросекунду. Як тільки іонізаційний імпульс виявлено, для пошуку його початку та кінця ПЛІС ініціює часові вікна. Для імпульсів на рис. 2 їхній початок та кінець показано вертикальними пунктирними лініями зліва та справа від максимуму піка. Через дві отримані точки конкретного імпульсу проводиться його базова лінія (пунктирні похилі сірі лінії). Висота імпульсу визначається як максимальне пікове значення мінус відповідне значення базової лінії. Значення часу наростання та спаду імпульсу (вікна часу) вибираються шляхом попереднього аналізу імпульсів.

Важливо зазначити, що відносно велика швидкість наростання імпульсу, забезпечена великою швидкістю

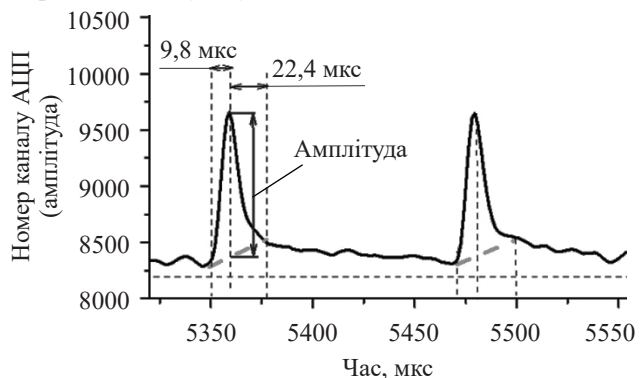


Рис. 2. Імпульси, виміряні за допомогою “цифрового” спектрометричного тракту

перенесення заряду в детекторі, дозволяє досить точно визначити час початку імпульсу, який фізично пов'язаний з моментом іонізації робочого середовища детектора γ -квантом. Час спадання імпульсу є відносно довгим і фізично визначається константою часу RC вимірювального тракту. У нашому випадку час закінчення імпульсу визначається зі значною похибкою, проте його точним значенням вважається момент повернення сигналу до базового значення, яке приймається постійним впродовж тривання імпульсу за відсутності шумів. Для вимірювань, описаних у цій статті, було експериментально вибрано час наростання 9,8 мкс та час спаду 22,4 мкс. Загалом, форма імпульсу та константи часу, необхідні для правильного оброблення імпульсів, залежать від геометрії детектора, детектувального середовища, часу інтегрування та диференціювання формувального підсилювача та напруги зміщення.

Оскільки кінець імпульсу визначається не зовсім коректно, висота імпульсу, отримувана за допомогою такої процедури обробки, буде менше фактичної. Проте це не є критичним, оскільки визначена висота імпульсу пропорційна фактичній. У цьому випадку при проведенні енергетичного калібрування амплітудного розподілу імпульсів, тобто при перетворенні номера каналу АЦП на енергію, буде враховано систематичне заниження висоти імпульсу.

На **рис. 3** показані амплітудні розподіли сигналу газового детектора для декількох стандартних джерел γ -випромінювання, виміряні з використанням "цифрового" вимірювального тракту на основі ПЛІС та описаної процедури. Було визначено положення відомих фотопіків у цих розподілах та проведено калібрування АЦП, показане на **рис. 4**. Апроксимація даних показує, що залежність є лінійною з параметром якості підгонки R -квадрат (коефіцієнт детермінації), який дорівнює 99,99995, що підтверджує наведений вище аргумент про те, що калібрування враховує заниження амплітуд імпульсів.

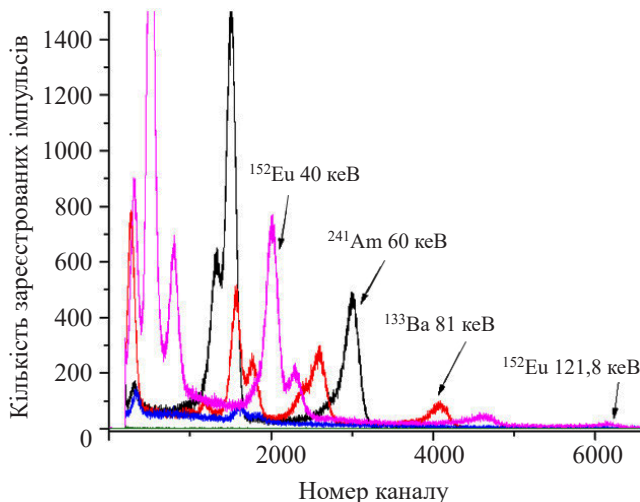


Рис. 3. Амплітудні розподіли різних γ -джерел, виміряні за допомогою ПЛІС

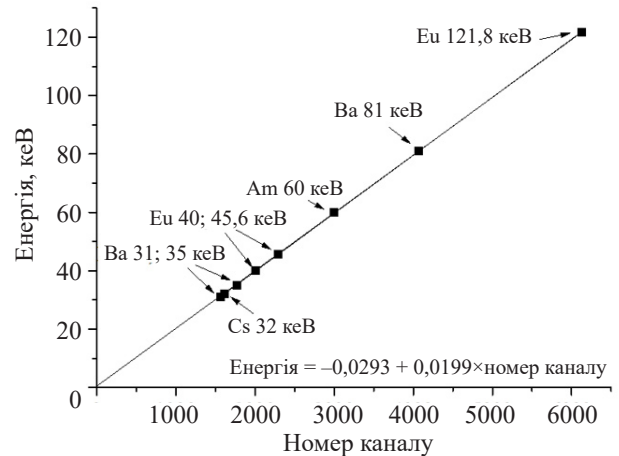


Рис. 4. Калібрування за енергією

Такий результат також вказує на те, що точний час закінчення імпульсу в цій процедурі не має великого значення, якщо початок імпульсу добре виражений та визначений. Для кожної пари вибраних значень часу (вікон часу) наростання та спаду імпульсу калібрування по енергії має бути своїм.

Описана процедура віднімання базової лінії в ПЛІС виконується за 2,5 мкс, і мертвий час детектора практично відсутній. З іншого боку, швидкість лічби імпульсів при використанні цього алгоритму в два-три рази менше, ніж в "аналоговому" вимірювальному тракту, що пов'язано з селекцією імпульсів за крутістю наростального фронту. Крім того, швидкість лічби імпульсів може стати ще меншою у тому випадку, коли детектор працює у присутності акустичних хвиль високої інтенсивності, оскільки деякі з іонізаційних імпульсів, накладених на шумові синусоїдальні хвилі, не розпізнаються.

Вимірювання за наявності акустичного шуму. Акустичні хвилі створювали генератором сигналів Tektronix AFG3102C. Синусоїдальні хвилі з різною частотою та амплітудою до 10 В передавались через акустичний динамік, який розміщувався на відстані 15 см від детектора фронтальною площиною паралельно осі детектора. Значення акустичної

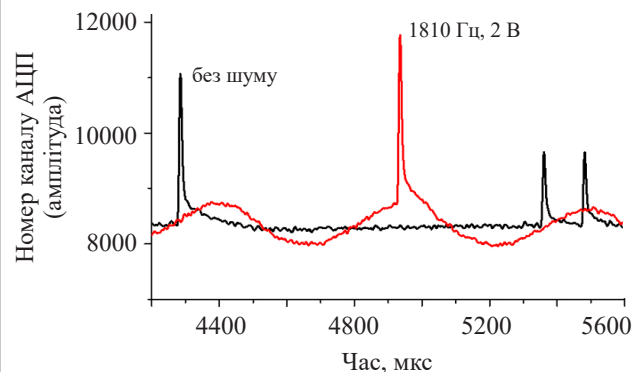


Рис. 5. Сигнал з анода, виміряний за допомогою ПЛІС без шуму та у присутності акустичної хвилі синусоїдальної форми з амплітудою 2 В частотою 1810 Гц

потужності в безпосередній близькості від детектора складало 85 дБ за амплітуди синусоїдального сигналу генератора 10 В. При вимкненому генераторі акустичний фон становив 42 дБ.

На рис. 5 показано сигнал детектора, вимірний за допомогою тракту на основі ПЛІС у присутності зовнішнього звукового впливу та без нього. З графіка видно, що частота синусоїди у сигналі детектора збігається із частотою генератора. Така завада має значно спотворювати спектри γ -випромінювання, виміряні детектором.

На рис. 6 показані амплітудні розподіли сигналу детектора від γ -джерела ^{241}Am , отримані за допомогою “аналогового” та “цифрового” вимірювальних трактів в умовах завад різної частоти та без завад. Як видно, на певних частотах у “аналогових” спектрах виникають спотворені фотопіки та низькочастотні паразитні піки.

Припускається, що основна деталь детектора, яка спотворює сигнал через зовнішній акустичний

шум, — це тонкий анодний провід разом з натяжною пружиною. Така конструкція аналогічна закріпленій на кінцях струні, в якій виникають коливання під зовнішнім впливом.

Вимірювання на основі ПЛІС дозволили отримати досить типові спектри без будь-яких артефактів. На рис. 6, б помітна лише трохи менша швидкість лічби імпульсів на частоті звуку 300 Гц (одна з частот, де “аналоговий” спектр сильно спотворювався). Крім того, у всіх “цифрових” вимірюваннях загальна кількість зареєстрованих імпульсів у два-три рази нижча у порівнянні з “аналоговими”. У загальному випадку така втрата імпульсів є цілком прийнятною, якщо вона компенсується хорошою енергетичною роздільною здатністю спектрометра.

В процесі дослідження впливу акустичного шуму більш високих частот було виявлено, що деякі з них викликають досить сильний резонанс і спотворення великої амплітуди в сигналі детектора, а обробка в ПЛІС призводить до значного спотворення спектрів.

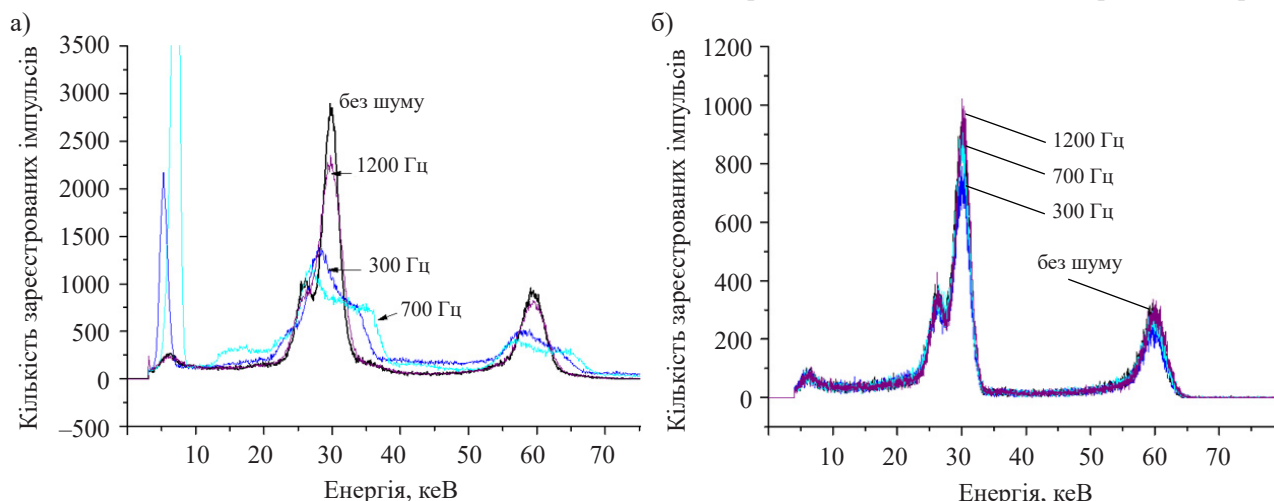


Рис. 6. Амплітудні розподіли сигналу детектора від γ -джерела ^{241}Am , виміряні за різних частот генератора “аналоговим” трактом (а) та трактом на основі ПЛІС (б) без шуму та в умовах завад амплітудою 10 В різної частоти

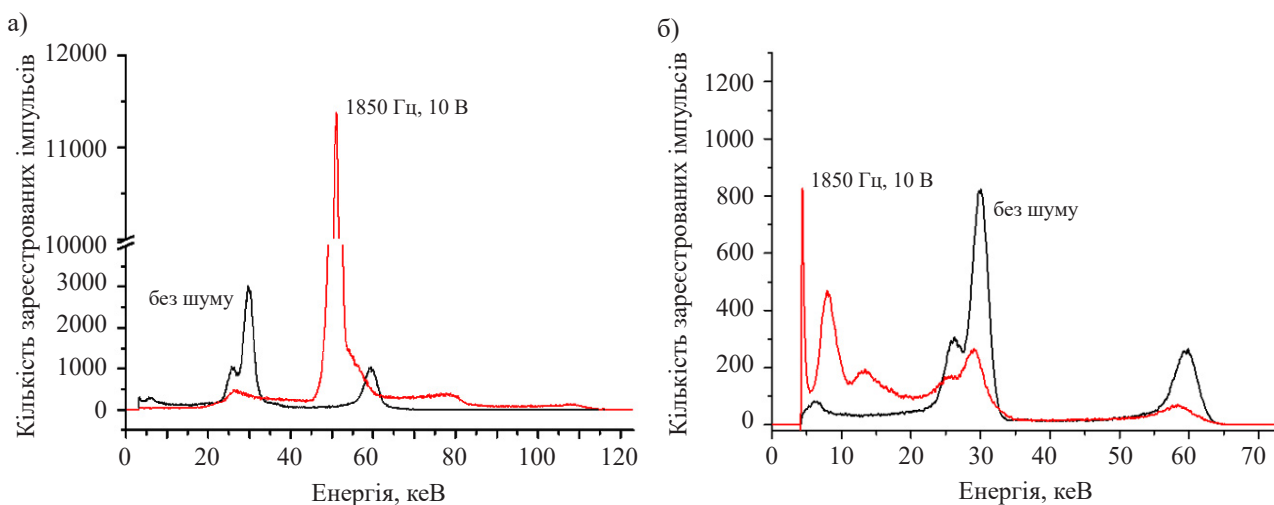


Рис. 7. Амплітудні розподіли сигналу детектора від γ -джерела ^{241}Am , виміряні за різних частот генератора “аналоговим” трактом (а) та трактом на основі ПЛІС (б) без шуму та в умовах завади частотою 1850 В амплітудою 10 В

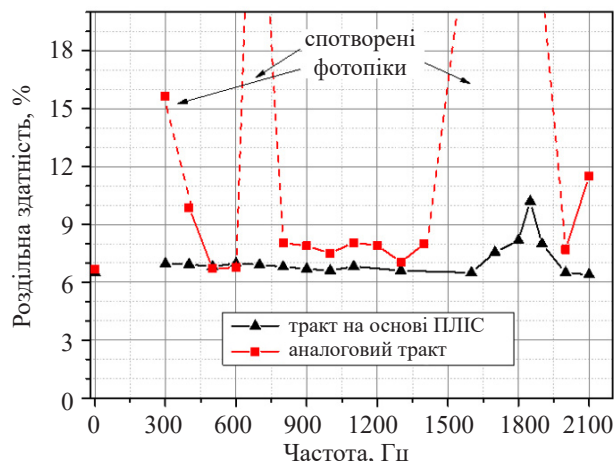


Рис. 8. Енергетична роздільна здатність по фотопіку з енергією 60 кеВ в спектрах ^{241}Am за різних частот генератора з амплітудою 10 В

На рис. 7 показано “аналогові” та “цифрові” спектри, отримані без шуму та у присутності синусоїдального звукового сигналу з амплітудою 10 В та частотою 1850 Гц, яка викликала значний резонанс у детекторі. Тут видно, що і “цифрові”, і “аналогові” спектри були спотворені, однак між ними існує помітна різниця. Спектр, виміряний “аналоговим” трактом, є абсолютно невпізнаним, а в отриманому за допомогою “цифрового” тракту лишилися присутніми як фотопік на 60 кеВ, так і піки біля 26 та 31 кеВ, хоча вони трохи зміщені й помітно розширені. Крім того, у каналах з низьким номером є кілька паразитних піків, виникнення яких також було зазначено в [5], де використовувалась смугова фільтрація шумів.

Неоптимальність роботи різних алгоритмів для низьких номерів каналів (енергій γ -квантів) пояснюється тим, що іонізаційні імпульси малої амплітуди гірше відокремлюються від високоамплітудних завад. Попри те, що “цифровий” тракт не повністю відфільтрував резонансний шум, він явно продемонстрував свої переваги для фільтрації шумів, що виникають через “мікрофонний” ефект.

На рис. 8 показано залежності енергетичної роздільної здатності газонаповненого детектора для енергії 60 кеВ від звукової частоти генератора. Як видно, на більшості частот роздільна здатність “аналогового” тракту значно гірше, ніж для тракту на основі ПЛІС, який ефективно відфільтровує завади, а його роздільна здатність залишається на рівні 6,5—7,0%, якщо частота не перевищує 1600 Гц. У діапазоні резонансних частот — від 1700 до 1900 Гц — вона погіршується (до 10% при 1850 Гц), але при підвищенні частоти вище 2000 Гц характеристики детектора знову повертаються до номінальних значень. Також було відмічено, що при зменшенні рівня звуку на резонансних частотах спектри, виміряні з ПЛІС, поліпшуються швидше, ніж “аналогові”.

Висновки

Таким чином, запропонований для детекторів іонізуючих випромінювань вимірювальний тракт на основі ПЛІС з використанням простого алгоритму “вікон часу” дозволяє отримувати γ -спектри за наявності акустичного та вібраційного шумів. Запропонована конфігурація ПЛІС досить добре усуває завади (шуми) малої та середньої амплітуди у вихідному сигналі детектора. І хоча за наявності звукових завад великої потужності з резонансними частотами такий метод обробки імпульсів придушує не всі шуми, отримані при цьому спектри залишаються придатними для ідентифікації радіонуклідів, тоді як “аналоговий” вимірювальний тракт за таких умов використовувати для спектрометричних вимірів неможливо.

Розроблений алгоритм цифрової обробки сигналу дозволяє використовувати пропорційні лічильники на транспорті (на борту поїздів, літаків, гвинтокрилів), на будівельній та іншій спеціальній техніці, а також поблизу працюючих турбін, двигунів і т. ін., що може бути корисним для застосування в ядерній енергетиці, геології, зберіганні відпрацьованого палива, контролю над нерозповсюдженням озброєння, наукових застосуваннях тощо.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Власик К.Ф., Грачев В.М., Дмитренко В.В. и др. Гамма-спектрометры на сжатом ксеноне. *Приборы и техника эксперимента*, 1999, № 5, с. 114–122.
2. Bolić M., Drndarević V. Digital gamma-ray spectroscopy based on FPGA technology. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2002, vol. 482, iss. 3, p. 761–766. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)01925-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)01925-8)
3. Becker E.M., Farsoni A.T. Wireless, low-cost, FPGA-based miniature gamma ray spectrometer. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2014, vol. 761, p. 99–104. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.05.096>
4. Novikov A. S., Ulin S. E., Dmitrenko V. V. et al. New modification of xenon gamma-ray detector with high energy resolution. *Optical Engineering*, 2014, vol. 53, no. 2, 021108. <https://doi.org/10.1117/1.OE.53.2.021108>
5. Dmetrenko V.V., Chemysheva I.V., Gratchev V.M. et al. Vibration stability of high pressure xenon gamma-ray detectors. *1999 IEEE Nuclear Science Symposium. Conference Record. 1999 Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (Cat. No.99CH37019)*, 1999, vol. 2, p. 665–669. <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.1999.845756>
6. Seifert A., Milbrath B., Pitts W. K., Smith E. Implementation of a noise mitigation strategy for a high-pressure xenon detector. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2005, p. 1262–1266. <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2005.1596549>
7. Sokolov S., Pudov A., Rybka A. et al. Gas-filled gamma-radiation detector based on high-purity xenon. *East European Journal of Physics*, 2020, no. 4, p. 28–34. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2020-4-04>
8. Manchanda R.K., Ye Z., Sood R.K. Ultra-high-pressure proportional counter. Part I: Argon. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1990, vol. 292, p. 373–385. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(90\)90394-L](https://doi.org/10.1016/0168-9002(90)90394-L)

Дата надходження рукопису до редакції 21.12 2021 р.

DOI: 10.15222/TKEA2022.1-3.44
UDC 539.1.074.23

A. O. PUDOV, S. A. SOKOLOV, A. S. ABYZOV,
A. V. RYBKA, V. E. KUTNY

Ukraine, Kharkov, National Science Center
"Kharkov Institute of Physics and Technology"
E-mail: pudov@kipt.kharkov.ua

DIGITAL FPGA-BASED PROCESSING OF PULSES OF GAS-FILLED GAMMA-RADIATION DETECTOR FOR ACOUSTIC NOISE SUPPRESSION

Gas-filled proportional detectors of ionizing radiation often contain such elements as thin anode wire, which make them sensitive to external acoustic or vibrational impact. This study investigates such sensitivity for the case of the proportional γ -radiation detectors filled with high-purity xenon gas.

The detector demonstrates a dependence of its signal noise on the external acoustic wave frequency, the character of which most likely depends on the design of the detector, i.e. on such parameters as diameter and tension strength of the anode wire, etc. To suppress the negative impact of acoustic noise on the characteristics of the detector, the detector digital signal is processed in a Field-Programmable Gate Array board.

The authors investigate the algorithm of «time windows», which allows separating (filtering) low-frequency noise in the output signal of a gas-filled detector, which arises due to the influence of external sound, from the useful signal, i.e. the ionization pulses. This approach allows performing spectral measurements of γ -radiation with a significant acoustic noise background, when detectors with a conventional analog spectrometric channel cannot handle the task.

Keywords: gamma-radiation detectors, xenon, proportional counters, FPGA, digital signal processing, noise suppression.

REFERENCES

1. Vlasik K. F., Grachev V. M., Dmitrenko V. V. et al. [Gamma spectrometers on compressed xenon.]. *Instruments and Experimental Techniques*, 1999, no. 5, pp. 114–122. (Rus)
2. Bolić M., Drndarević V. Digital gamma-ray spectroscopy based on FPGA technology. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2002, vol. 482, iss. 3, pp. 761–766. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)01925-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)01925-8)
3. Becker E.M., Farsoni A.T. Wireless, low-cost, FPGA-based miniature gamma ray spectrometer. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2014, vol. 761, pp. 99–104. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.05.096>
4. Novikov A. S., Ulin S. E., Dmitrenko V. V. et al. New modification of xenon gamma-ray detector with high energy resolution. *Optical Engineering*, 2014, vol. 53, no. 2, 021108. <https://doi.org/10.1117/1.OE.53.2.021108>
5. Dmetrenko V.V. et al. Vibrostability of high pressure xenon gamma-ray detectors. *1999 IEEE Nuclear Science Symposium. Conference Record. 1999 Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (Cat. No.99CH37019)*, 1999, vol. 2, pp. 665–669. <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.1999.845756>
6. Seifert A., Milbrath B., Pitts W. K., Smith E. Implementation of a noise mitigation strategy for a high-pressure xenon detector. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2005, pp. 1262–1266. <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2005.1596549>
7. Sokolov S., Pudov A., Rybka A. et al. Gas-filled gamma-radiation detector based on high-purity xenon. *East European Journal of Physics*, 2020, no. 4, pp. 28–34. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2020-4-04>
8. Manchanda R.K., Ye Z., Sood R.K. Ultra-high-pressure proportional counter. Part I: Argon. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1990, vol. 292, pp. 373–385. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(90\)90394-L](https://doi.org/10.1016/0168-9002(90)90394-L)

Опис статті для цитування:

Пудов О. О., Соколов С. О., Абызов О. С., Рыбка О. В., Кутній В. Є. Цифрова обробка в ПЛІС імпульсів газового детектора гамма-випромінювання для придушення акустичних завад. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2022, № 1–3, с. 44–49. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.1-3.44>

Cite the article as:

Pudov A. O., Sokolov S. A., Abyzov A. S., Rybka A. V., Kutny V. E. Digital FPGA-based processing of pulses of gas-filled gamma-radiation detector for acoustic noise suppression. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2022, no. 1–3, pp. 44–49. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.1-3.44>