

Крочак В.І.

Приватне підприємство «Галіт»

Яськів В.І.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ВИКОРИСТАННЯ ОБМЕЖЕНОГО ПРОПОРЦІЙНОГО РЕЖИМУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ РАДІОМЕТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ДАВАЧА ГЕЙГЕРА-МЮЛЛЕРА

Стаття направлена на підвищення інформативності радіометричних вимірювань. Проведено аналіз існуючих методів. Виявлено їхні недоліки. Встановлено, що радіометричні та дозиметричні вимірювання за допомогою давачів Гейгера-Мюллера потребують мінімальної кількості затрат, але є при цьому малоінформативними і не дозволяють визначати тип та енергію випромінювання прямими методами.

З метою підвищення інформативності радіометричних вимірювань при мінімальних затратах запропоновано використання давача Гейгера-Мюллера у обмеженому пропорційному режимі роботи, який на сьогодні не є типовим при його використанні, але в подальшому це дозволило використати методи спектрометрії для аналізу типу випромінювання.

Визначено, що для введення давача Гейгера-Мюллера у обмежений пропорційний режим, необхідне використання нижчої напруги живлення у порівнянні з номінальним значенням. Для забезпечення відтворюваності форми імпульсів у такому режимі необхідне живлення з високою стабільністю і лінійністю напруги.

При впливі на давач Гейгера-Мюллера іонізуючого випромінювання, що породжене різними джерелами, було зібрано ансамблі реалізацій окремих імпульсів на виході установки. Використано метод синхронного усереднення для збільшення інформативності та зменшення шумності імпульсів, породжених різними типами іонізуючого випромінювання.

Шляхом гармонічного аналізу усереднених імпульсів на виході давача Гейгера-Мюллера виявлено відмінність у спектральній густині потужності, яка потенційно може дозволити розрізняти імпульси, породжені β -випромінюванням або γ -випромінюванням у режимі реального часу.

Використовуючи цю відмінність в поєднанні зі швидким перетворенням Фур'є, яке може бути реалізоване апаратно або програмно, є ймовірність успішної реалізації розпізнавання імпульсів на виході давача Гейгера-Мюллера.

Ключові слова: іонізуюче випромінювання, радіометрія, дозиметрія, Гейгера-Мюллера, обмежений пропорційний режим, синхронне усереднення, гармонічний аналіз.

Постановка проблеми. Радіометричні та дозиметричні вимірювання є важливою складовою забезпечення радіаційної безпеки населення. Іонізуюче випромінювання здатне здійснювати деструктивний вплив на здоров'я людини, але при цьому не може бути виявлене без спеціальних вимірювальних інструментів.

Існує велика кількість методів детектування іонізуючого випромінювання, таких сцинтиляційний та іонізаційний, які отримали найбільше поширення у зв'язку їх високою ефективністю і придатністю до серійного виробництва. Сцинтиляційний метод дозволяє досягнути високої інформативності і розділової здатності вимірювань. Окрім можливості розрізняти тип випромінювання, сцинтиляційні пристрої здатні з високою точністю вимірювати енергію частинок, що

робить можливим створення різного роду спектрометрів. Але такі пристрої відрізняються великою ціною, габаритами і потребою в постійному обслуговуванні, що робить їх практично недоступними для побутових споживачів [3, с. 219-247].

Іонізаційний метод дозволяє робити дешеві, надійні та компактні пристрої для вимірювання радіації, але не може забезпечити такої розділової здатності і широкого діапазону, як попередній. Для вимірювання енергії випромінювання та спектрометрії використовуються іонізаційні пропорційні давачі, які також недоступні для побутового споживача і потребують точного калібрування та джерела живлення високої якості [4]. Дозиметричні вимірювання часто виконуються за допомогою давачів Гейгера-Мюллера, що призначені для рахунку кількості імпульсів іонізую-

чого випромінювання без визначення їх якісних параметрів. Давачі Гейгера-Мюллера стали одним з найбільш масових та дешевих рішень для дозиметричних та радіометричних вимірювань, але нездатність відрізнити типи іонізуючого випромінювання та/або його енергію робить такі пристрої неповноцінними та неточними [5, 6]. Щоби розрізнити тип випромінювання, який впливає на давач класично використовується метод екранування: випромінювання перекривається ізолюючим матеріалом або полем, що відсікає один або декілька типів випромінювання [2]. Надалі за допомогою математичних обчислень визначають параметри кожного з видів випромінювання. Цей метод є простим та ефективним, але оскільки таке вимірювання є непрямим, зростає методична похибка і частина інформації втрачається.

Створення методу, завдяки якому подібні вимірювання з використанням давача Гейгера-Мюллера могли надавати інформацію про тип та енергію випромінювання може вдосконалити радіометрію та дозиметрію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження в галузі радіометричних та дозиметричних вимірювань за допомогою іонізаційних методів головним чином спрямовані на виявлення залежності між напругою живлення давача і формою імпульсів на виході [7] або впливу мертвого часу на ефективність і якісні показники [8, 9, 10].

У роботі [7] розглянуто, яким чином зміна напруги живлення давача може впливати на форму вихідних імпульсів. Зазначається, що ширина імпульсів та тривалість гасіння знижується при зростанні напруги живлення, а амплітуда імпульсів монотонно зростає [7, с. 271]. Були розглянуті імпульси, спричинені фоновою радіацією, від ^{60}Co який є джерелом β -випромінювання, а також від ^{137}Cs , що є джерелом γ -випромінювання. Висвітлено, яким чином змінюються параметри вихідних імпульсів для різних джерел при різній напрузі живлення давача Гейгера-Мюллера моделі 133-2 «Ludlum measurements». Для дослідів використано давач, що має номінальну напругу живлення 550 В. У роботі [7] не поставлено на меті дослідження часових і спектральних представлень вихідних імпульсів для задачі підвищення інформативності вимірювань.

У роботі [9] розглядається зміна мертвого часу і швидкості рахунку давача Гейгера-Мюллера при впливі різних джерел з різною активністю зі зміною напруги живлення. Використано давач моделі 44-7 «Ludlum measurements» з напругою живлення 900 В. Описується, що вказаний давач

проявляє максимальне значення мертвого часу в діапазоні напруг живлення 700–750 В. Після цих значень мертвий час починає знижуватись по експоненті, поки не досягає найнижчого асимптотичного значення, яке зазначається у технічній документації [9, с. 13]. Параметри і форма самих вихідних імпульсів роботі [9] не розглядається.

Робота [10] розглядає використання пропорційного давача, що працює на гелієво-ізобутановій суміші газів в режимі давача Гейгера-Мюллера. До вказаного давача прикладається підвищена напруга, що теоретично має ввести його у режим Гейгера-Мюллера. Надані форми імпульсів на виході давача у різних режимах, але при цьому їх окремі параметри і сутність не розглядається як джерело інформації для вимірювань.

Формулювання цілей статті. Ідеєю статті є обґрунтування можливості використання давачів Гейгера-Мюллера у обмеженому пропорційному режимі роботи для підвищення інформативності радіометричних вимірювань. Такий режим роботи не є типовим для давачів Гейгера-Мюллера, тому що детектування відбувається при заниженій напрузі живлення. При цьому виникають початкові можливості для оцінювання енергії випромінювання [3, с. 160-161]. Можливе збільшення мертвого часу давача, як це описано у [9], але це головним чином може вплинути лише на граничну швидкість рахунку [5, с. 5].

Пропонується використовувати гармонічний аналіз вихідних імпульсів давача Гейгера-Мюллера для виявлення інформативних ознак, що вказують на тип та енергію випромінювання. Таким чином може виникнути можливість реалізації розпізнавання типу діючого випромінювання в режимі реального часу прямими вимірювальними методами. При цьому пропонується використання дешевого і широкодоступного давача Гейгера-Мюллера СБМ-20.

Виклад основного матеріалу. Радіометрична установка і режим роботи давача Гейгера-Мюллера (далі-ДГМ). Використано ДГМ моделі СБМ-20, який знаходиться у свинцевому екрані. Всередині екрану знаходиться пластикова ємність для утримування та завантажування активного зразка в зону детектування. На рис. 1 зображено структурну схему радіометричної установки:

На цій схемі: *Блок живлення та реєстрації* – живить ДГМ та знімає вихідний сигнал. За допомогою цього вузла режим роботи можна змінювати.

Атенюатор – схема узгодження напруг та опорів між блоком живлення та реєстрації і *пристроєм запису*.

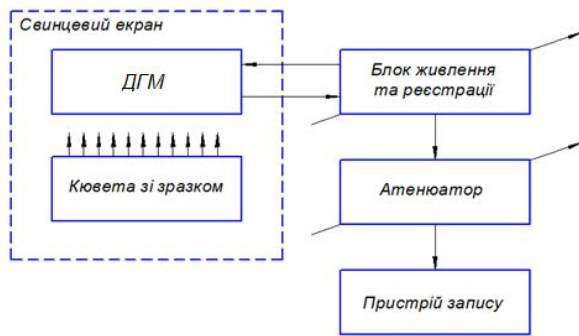


Рис. 1. Структурна схема радіметричної установки

Створюючи умови для розпізнавання сигналів, породжених різними видами випромінювання, не можна використовувати нпаруги живлення, що відповідають ділянці Гейгера-Мюллера, оскільки імпульси не будуть відрізнятися по формі, незалежно від того, який вид чи енергія випромінювання діє на давач [6].

Отже, прийнято рішення знизити напругу живлення ДГМ нижче номінальних значень задля введення його у обмежений пропорційний режим, що може викликати відмінності у формі імпульсів при впливі різних типів та енергій випромінювання.

Лічильна характеристика давача СБМ-20 наведена на рис. 2.

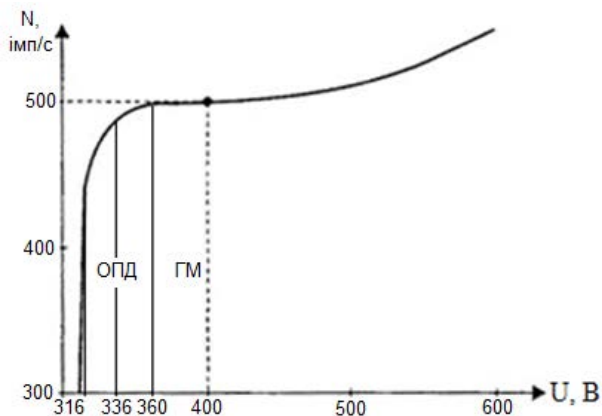


Рис. 2. Лічильна характеристика СБМ-20

З рисунку видно, що СБМ-20 починає ефективно реєструвати випромінювання починаючи з напруги близько 320 В. Номінальна напруга живлення становить 400 В. Обирається напруга 336 В для введення ДГМ у обмежений пропорційний режим. Для роботи у такому режимі ДГМ потребує високої точності напруги живлення, оскільки її коливання можуть призводити до значної зміни робочої точки на лічильній характеристиці. Прецизійні високоефективні керовані джерела електроживлення з високою якістю вихідної напруги,

з високим рівнем динамічних характеристик та низьким рівнем електромагнітних завад можуть бути реалізовані на основі високочастотних магнітних підсилювачів [12, 13, 14, 15, 16].

Пропорційний режим для цього ДГМ практично неможливий внаслідок великої крутизни цієї ділянки (див. рис. 2).

Теоретично ДГМ перебуває всередині обмеженої пропорційної ділянки, але це припущення потребує перевірки. Для цього ДГМ опромінюється β -випромінюванням від активного джерела ^{90}Sr - ^{90}Y . Це джерело має дві основні енергетичні лінії: 0,5459 MeV від ^{90}Sr і 2,28 MeV від ^{90}Y [11].

За амплітудою напруг вихідних імпульсів ДГМ і частотою їх виникнення формується гістограма, наведена на рис. 3.

На рис. 3 видно два піки частоти виникнень на 603 мВ і 769 мВ. Джерело випромінює приблизно однаковий потік цих енергетичних ліній, але оскільки обраний ДГМ є нечутливим до м'якого β -випромінювання, низько енергетична лінія 0,5459 MeV від ^{90}Sr зазнає затухання у 19 разів.

Розмістивши відомі енергії та амплітуди напруг імпульсів на координатній площині та виконавши екстраполяцію, можна отримати детектувальну характеристику радіметричної установки (рис. 4).

З рис. 4 видно, що експоненційна екстраполяція має високу достовірність апроксимації $R^2 = 1$, це дозволяє припустити, що детектувальна характеристика установки є експоненційною. Така характеристика відповідає обмеженому пропорційному режиму роботи ДГМ.

Вивчення імпульсів на виході ДГМ. При впливі на ДГМ лише фонового випромінювання, зібрано ансамбль реалізацій окремих імпульсів. Шляхом синхронного усереднення (СУ) отримано усереднений імпульс, який містить у собі інформацію 20 окремих реалізацій. Використовуючи такий метод також знижується рівень шумності окремих реалізацій.

На рис. 5 можна побачити усі етапи процесу реєстрації іонізуючого променя: а-б – первинна іонізація, яка викликає коливальний процес у ДГМ внаслідок наявності у останнього паразитних ємності та індуктивності, б-в – різке зростання струму через ДГМ внаслідок виникнення лавини Таунсенда, в-г – процес самогасіння ДГМ.

Відмінності у формі сигналу можуть бути виявлені на будь-яких ділянках у зв'язку з обраним режимом роботи ДГМ.

Застосовуючи цей самий набір методів, формуються усереднені імпульси для β -випромінювання від двох джерел: ^{90}Sr - ^{90}Y та ^{40}K . Знаючи форму

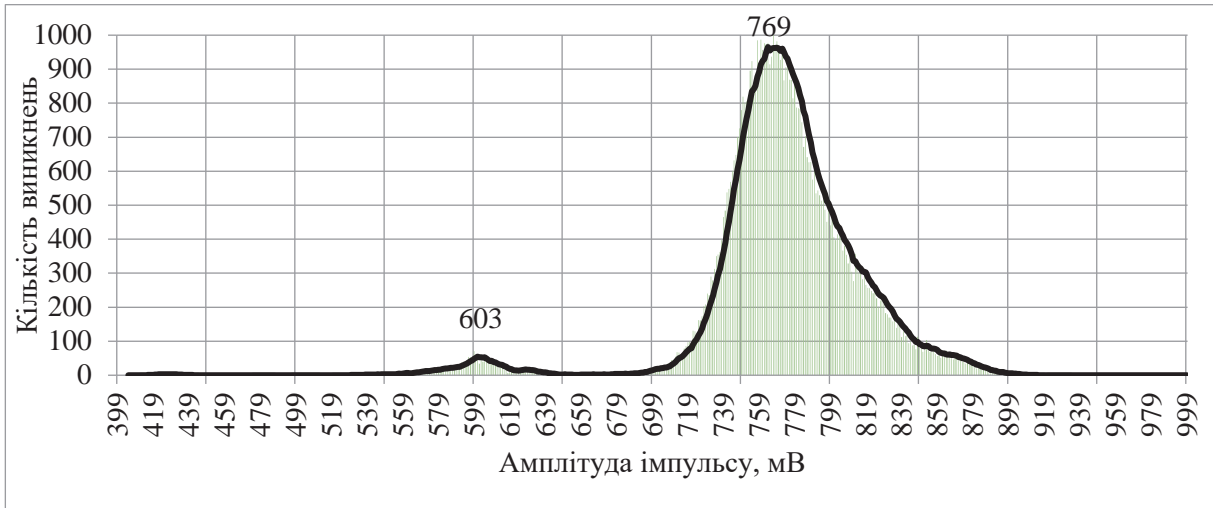


Рис. 3. Гістограма частоти виникнення амплітуд імпульсів при впливі зразка ^{90}Sr - ^{90}Y на ДГМ

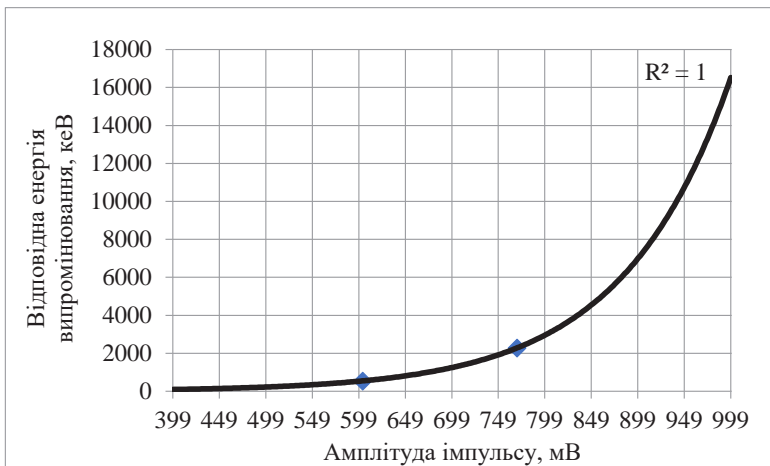


Рис. 4. Детектувальна характеристика радіометричної установки

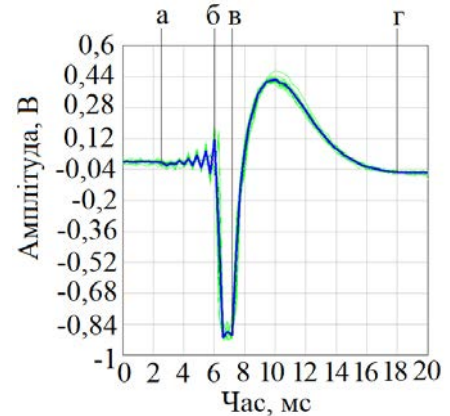


Рис. 5. Усереднений імпульс при впливі на ДГМ γ -випромінювання

імпульсів, що породжені фоновим випромінюванням, вони не входять до вибірки ансамблю і не впливають на дослідження. Окрім того, швидкість рахунку імпульсів від джерел набагато вища за фон.

Для усереднених імпульсів, породжених фоновим γ -випромінюванням і β -випромінюванням від двох джерел з різними енергетичними лініями виконується гармонічний аналіз задля вивчення не лише часового представлення імпульсів, але і спектрального. На рис. 6 приведено часове і спектральне представлення усереднених сигналів:

На рис. 6 можна побачити відмінності у формі і спектральному представленні імпульсів. Так, на малюнку (б) бачимо виразний провал спектральної густини потужності на частоті близько 2,19 кГц. Цей провал в межах дослідження був

типовим для випадків реєстрації γ -випромінювання. При реєстрації β -випромінювання від двох наявних джерел форма імпульсу мала відмінності не лише за амплітудою, але за формою імпульсів, що відобразилось на спектрі сигналу: на частоті 2,19 кГц провал не спостерігається (див. рис. 6, малюнки г, е).

Для більш наглядної демонстрації відмінностей у спектрі сигналів сформовано зведену періодограму усіх усереднених імпульсів (рис. 7).

Відмінність між амплітудами на частоті 2,19 кГц становить близько 9 дБ, чого достатньо для виявлення відмінності між імпульсами.

Відносна похибка в межах вибірок за рівнем амплітуди на частоті 2,19 кГц (при t-критерії 2,093) складала: для γ -випромінювання – 2,35%, для β -випромінювання 1,23%.

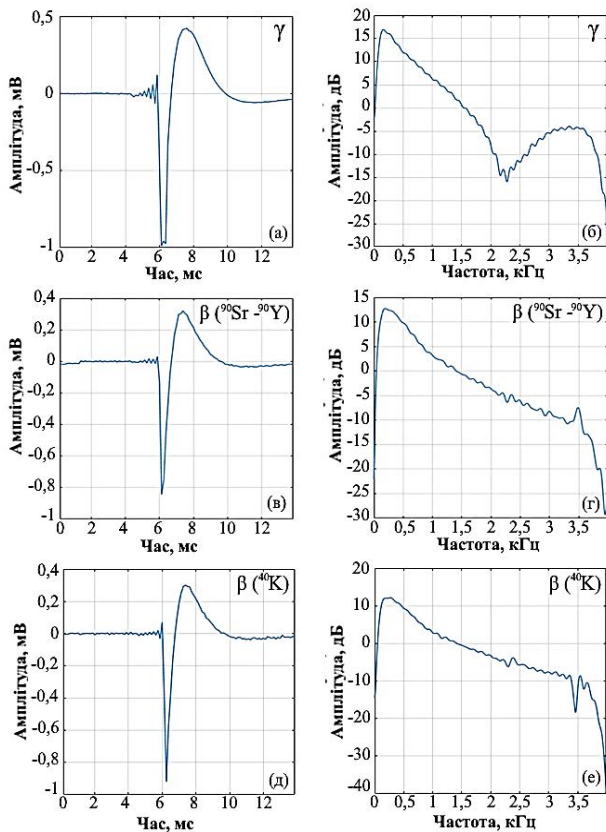


Рис. 6. Часове і спектральне представлення імпульсів, породжених різними типами іонізуючого випромінювання

За основну відмінність між імпульсами прийнято вважати таку відмінність у спектральній густині потужності, оскільки тривалість, амплітуда імпульсу може суттєво залежати від зовнішніх чинників.

Висновки. В результаті дослідження було обґрунтовано можливість застосування ДГМ у обмеженому пропорційному режимі для підвищення інформативності радіометричних вимірювань. Було використано ДГМ моделі СБМ-20.

Шляхом заниження напруги живлення (336 В замість номінальних 400 В) пристрій було введено у обмежений пропорційний режим, що було

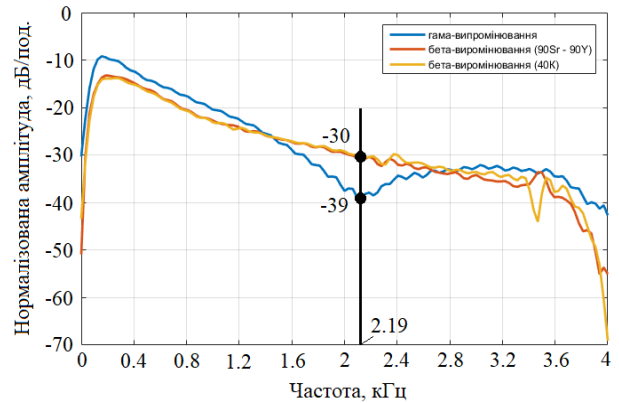


Рис. 7. Зведена періодограма усереднених імпульсів

підтверджено шляхом експериментального визначення детектувальної характеристики, опромінюючи ДГМ джерелом $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$.

Складено ансамблі реалізацій окремих імпульсів на виході ДГМ для різних типів та енергій випромінювання: γ -випромінювання представлене фоною радіацією, β -випромінювання – двома активними джерелами: $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ та ^{40}K , які мають різні енергії. Шляхом синхронного усереднення складено усереднені імпульси, які містять у собі інформацію усієї вибірки, а також мають знижену шумність. Був проведений гармонічний аналіз усереднених сигналів, за допомогою якого виявлено можливу відмінність між імпульсами, породженими різними типами випромінювання: на частоті сигналу 2,19 кГц для γ -випромінювання виявлено провал спектральної густини потужності, який не спостерігається для β -випромінювання.

Виявлені результати потребують подальшої апробації та спроби практичної реалізації розпізнавання типу випромінювання в режимі реального часу використовуючи швидкі методи спектрального аналізу. Є потреба у проведенні випробувань з більшою кількістю активних джерел іонізуючого випромінювання та з іншими моделями ДГМ для підтвердження системності і відтворюваності отриманих результатів.

Список літератури:

1. Крочак В. І. Метод розпізнавання імпульсів іонізуючого випромінювання для підвищення інформативності радіометричних вимірювань : кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю „172 — телекомунікації та радіотехніка“ / В. І. Крочак. – Тернопіль : ТНТУ, 2020. – 78 с. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/33246> (дата звернення: 12.05.2023).
2. RADIATION DETECTION OF ALFA, BETA, AND GAMMA RAYS WITH GEIGER MULLER DETECTOR. International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET) : матеріали Міжнар. наук. конф., 9 листоп. 2018 р. 2018. С. 21–27. URL: http://eprints.unmus.ac.id/247/1/IJMET_09_11_003.pdf (дата звернення: 12.05.2023).
3. Glenn F. Knoll. Radiation Detection and Measurement. 4-те вид. Ann Arbor, Michigan : University of Michigan, 2010. 830 с. URL: <https://indico-tdli.sjtu.edu.cn/event/171/contributions/2123/attachments/982/1592/Knoll4thEdition.pdf> (дата звернення: 12.05.2023).

4. Pfeffermann E. Proportional Counters. *The Universe in X-Rays. Berlin, Heidelberg, 2008.* С. 5–14. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-540-34412-4_2 (дата звернення: 14.05.2023).
5. Leon F. Curtiss. The Geiger - Müller a Counter. Phoenix : *National Bureau of Standards*, 1950. 27 с.
6. GERALD J. HINE, GORDON L. BROWNELL. RADIATION DOSIMETRY. 5-те вид. New York : *Academic Press Inc.*, 1956. 253 с.
7. Pulse Shape Dependence on Applied Voltage of Geiger-Mueller Detector / В. Almutairi та ін. *Sensors and Electronic Instrumentation Advances* : матеріали Міжнар. наук. конф., м. Adaje, 25–27 верес. 2019 р. С. 270–275.
8. Lee J. H., Kim I. J., Choi H. D. On the dead time problem of a GM counter. *Applied Radiation and Isotopes*. 2009. Т. 67, № 6. С. 1094–1098. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.01.074> (дата звернення: 12.05.2023).
9. Experimental evaluation of the deadtime phenomenon for GM detector: deadtime dependence on operating voltages / В. Almutairi та ін. *Scientific Reports*. 2020. Т. 10, № 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75310-3> (дата звернення: 14.05.2023).
10. Golovatyuk V., Grancagnolo F. Observation of transition between proportional and Geiger–Müller modes in helium–isobutane gas mixtures. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 1999. Т. 428, № 2-3. С. 367–371. URL: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(99\)00046-7](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(99)00046-7) (дата звернення: 14.05.2023).
11. Wapstra A. H., Audi G., Thibault C. The Ame2003 atomic mass evaluation. *Nuclear Physics A*. 2003. Т. 729, № 1. С. 129–336. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2003.11.002> (дата звернення: 17.05.2023).
12. Yaskiv V. Using of high-frequency magnetic amplifier in switch mode DC power supplies. *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, м. Aachen, Germany. URL: <https://doi.org/10.1109/pesc.2004.1355675> (дата звернення: 15.05.2023).
13. Yaskiv V. MagAmp power converters with low level EMI / Volodymyr Yaskiv, Alexander Abramovitz, Keyue Smedley // XIIIth International Conference. *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM 2013)*. — Lviv, Polyana, Ukraine, 2013. — P. 388–395.
14. Yaskiv V. Modular High-Frequency MagAmp DC-DC Power Converter / Volodymyr Yaskiv, Anatoliy Martseniuk, Anna Yaskiv, Oleg Yurchenko, Bohdan Yavorsky // *2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. — Ceske Budejovice, Czech Republic, 2019. — P. 213–216.
15. Synchronous Rectifier in High-Frequency 24V/15A MagAmp Power Converter / V. Yaskiv та ін. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, м. Istanbul, Turkey, 7–11 верес. 2020 р. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/ieps51250.2020.9263190> (дата звернення: 17.05.2023).
16. Yaskiv V., Anna Yaskiv, Oleg Yurchenko. Synchronous rectification in High-Frequency MagAmp Power Converters. *Advanced Computer Information Technologies Proceedings of the International Conference Advanced Computer Information Technologies* : матеріали Міжнар. наук. конф., Ceske Budejovice, 1–3 June 2018. Ceske Budejovice, 2018. С. 128–131. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2300/> (дата звернення: 17.05.2023).

Krochak V.I., Yaskiv V.I. USING THE LIMITED PROPORTIONAL MODE TO INCREASE THE INFORMATIVENESS OF RADIOMETRIC MEASUREMENTS WITH THE GEIGER-MÜLLER DETECTOR

The article is aimed at increasing the informativeness of radiometric measurements. An analysis of existing methods was carried out. Their shortcomings are revealed. It has been established that radiometric and dosimetric measurements using Geiger-Müller detectors require a minimum amount of costs, but are at the same time uninformative and do not allow determining the type of energy and radiation by direct methods.

In order to increase the informativeness of radiometric measurements at minimal costs, the use of a Geiger-Müller sensor in a limited proportional mode of operation is proposed, which is not typical for its use today, but in the future, it allowed to use of spectrometry methods to analyze the type of radiation.

It was determined that in order to enter the Geiger-Muller sensor into the limited proportional mode, it is necessary to use a lower supply voltage compared to the nominal value. To ensure the reproducibility of the pulse shape in this mode, a power supply with high voltage stability and linearity is required.

When the Geiger-Müller detector was exposed to ionizing radiation generated by various sources, ensembles of realizations of individual pulses at the output of the installation were collected. The method of synchronous averaging was used to increase informativeness and reduce the noise of pulses generated by various types of ionizing radiation.

Harmonic analysis of the averaged pulses at the output of a Geiger-Muller detector revealed a difference in power spectral density that could potentially allow discrimination of pulses generated by β -radiation or γ -radiation in real-time.

Using this difference in combination with a fast Fourier transform, which can be implemented in hardware or software, there is a possibility of successfully implementing pulse recognition at the output of a Geiger-Müller sensor.

Key words: ionizing radiation, radiometry, dosimetry, Geiger-Müller, limited proportional mode, synchronous averaging, harmonic analysis.