

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)
Факультет інформаційних електронних систем
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))
Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

**«РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ РЕЄСТРАЦІЇ ІОНІЗУЮЧОГО
ВИПРОМІНЮВАННЯ»**

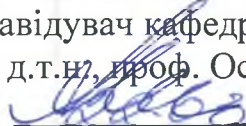
Виконав: студент 4-го курсу, групи КІВТ-216
спеціальності 152 - Метрологія та інформаційно-
вимірювальна техніка, ОП – Комп'ютеризовані
інформаційно-вимірювальні технології
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)
_____ Семенюк М.К. _____
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц., доц. каф. ІРТС
_____ Савицький А.Ю. _____
(прізвище та ініціали)
« 12 » _____ 06 _____ 2025 р.

Рецензент: _____ доц. каф. ІКСТ, к.т.н., доц.
_____ Семенова О.О. _____
(прізвище та ініціали)
« 13 » _____ 06 _____ 2025 р.

Допущено до захисту
Завідувач кафедри ІРТС
_____ д.т.н., проф. Осадчук О.В. _____
(прізвище та ініціали)
« 16 » _____ 06 _____ 2025 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем
Рівень вищої освіти І-й (бакалаврський)
Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»
Спеціальність 152 - Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка
Освітньо-професійна програма Комп'ютеризовані інформаційно-вимірвальні технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІРТС
д.т.н., проф. Осадчук О.В.
 2025 року

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТУ СТУДЕНТУ

- Семенюку Максиму Костянтиновичу
(прізвище, ім'я, по батькові)
1. Тема роботи Розробка пристрою реєстрації іонізуючого випромінювання
керівник роботи Савицький А.Ю. к.т.н. доц., доцент каф ІРТС
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від «20» 03 2025 року № 97
2. Строк подання студентом роботи 12.06.2025р.
3. Вихідні дані до роботи: вимірювання доз гамма випромінювання від 0 - 200
мкР/год; вимірювання за час до 1 хв в одиницях мкР/год Кількість
вимірвальних каналів – 1. Дестабілізуючі фактори на основний канал – тиск,
вологість, температура. Програмна реалізація на мові – С.
4. Зміст текстової частини: Вступ. Особливості об'єкта дослідження. Аналіз
сучасних методів та засобів реєстрації іонізуючого випромінювання. Розробка
математичної моделі вимірвача іонізуючого випромінювання. Розробка засобу
та оцінювання його метрологічних характеристик . Висновки.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Газорозрядний лічильник СБМ-20; Схема скляного лічильника Гейгера –
Мюллера; Принцип роботи лічильника Гейгера – Мюллера; Принцип дії
іонізаційної камери; Схема включення лічильника Гейгера – Мюллера;
Рахункова характеристика лічильника Гейгера – Мюллера (Область Плато);
Структурна схема пристрою реєстрації іонізуючого випромінювання;
Функціональна схема пристрою.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	доцент кафедри ІРТС к.т.н. доц., Савицький А.Ю.		

7. Дата видачі завдання 25.03.2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження теми БКР	14.02.2025-28.02.2025	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	01.03.2025-19.03.2025	
3.	Розробка завдання на БКР. Затвердження теми.	20.03.2025-25.03.2025	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	26.03.2025-06.05.2025	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки . Експериментальне дослідження.	07.05.2025-26.05.2025	
6.	Розробка ілюстративної частини БКР	27.05.2025-31.05.2025	
7.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини.	02.06.2025-06.06.2025	
8.	Нормоконтроль	07.06.2025-10.06.2025	
9.	Попередній захист БКР, доопрацювання, рецензування БКР	11.06.2025-15.06.2025	
10.	Захист БДР ЕК	17.06.2025-18.06.2025	

Студент

(підпис)

Семенюк М.К.

Керівник роботи

(підпис)

Савицький А.Ю

АНОТАЦІЯ

УДК 539.12

Семенюк М.К. Розробка пристрою реєстрації іонізуючого випромінювання на основі трубки Гейгера-Мюллера типу СБМ-20. Бакалаврська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2025. – 70 с. На українській мові. Бібліогр.: 14 назв; табл.: 4; рис. 19.

У цій бакалаврській кваліфікаційній роботі розглядається розробка засобу реєстрації іонізуючого випромінювання на основі трубки Гейгера-Мюллера типу СБМ-20. Метою дослідження є створення ефективного та надійного інструменту для моніторингу рівня радіації в навколишньому середовищі, як у відкритому просторі, так і в закритих приміщеннях.

Розроблений засіб може бути використаний для оцінки рівня іонізуючої радіації, що має важливе значення для забезпечення екологічної безпеки, охорони здоров'я населення та контролю на потенційно небезпечних об'єктах.

Ключові слова: іонізуюче випромінювання, вимірювання радіації, дозиметр, радіаційний сенсор, газорозрядна трубка.

ABSTRACT

Semenyuk M.K. Development of a device for recording ionizing radiation based on a Geiger-Muller tube of the SBM-20 type. Bachelor's thesis. – Vinnytsia: VNTU, 2025. – 70 p. In Ukrainian. Bibliography: 14 titles; table: 4; fig. 19.

This bachelor's thesis considers the development of a device for recording ionizing radiation based on a Geiger-Muller tube of the SBM-20 type. The purpose of the research is to create an effective and reliable tool for monitoring the level of radiation in the environment, both in open space and in closed rooms.

The developed tool can be used to assess the level of ionizing radiation, which is important for ensuring environmental safety, public health protection and control at potentially dangerous facilities.

Keywords: ionizing radiation, radiation measurement, dosimeter, radiation sensor, gas discharge tube.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 ОСОБЛИВОСТІ ОБ’ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ	11
1.1 Огляд сучасних методів та засобів реєстрації іонізуючого випромінювання...	11
1.2 Вибір методу реєстрації іонізуючого випромінювання	14
1.3 Математичне моделювання процесу реєстрації іонізуючого випромінювання.....	16
1.4 Висновки до розділу	27
2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ РЕЄСТРАЦІЇ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ	28
2.1 Аналіз конструктивних варіантів засобів реєстрації іонізуючого випромінювання	28
2.2 Огляд типових детекторів іонізуючого випромінювання	38
2.3 Висновки до розділу	40
3 АПАРАТНА ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРИСТРОЮ РЕЄСТРАЦІЇ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	41
3.1 Апаратна реалізація пристрою на основі ATmega328P та трубки СБМ-20.....	41
3.2 Програмна реалізація пристрою реєстрації іонізуючого випромінювання.....	47
3.3 Висновки до розділу	50
4 МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИСТРОЮ РЕЄСТРАЦІЇ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	52
4.1 Теоретичний аналіз метрологічних характеристик пристрою	52
4.2 Експериментальна перевірка роботи та розрахунок метрологічних характеристик	55
4.3 Перспективи розвитку приладів на базі лічильників Гейгера-Мюллера.....	57

4.4 Висновки до розділу	58
ВИСНОВКИ.....	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	62
Додаток А (Обов’язковий) Ілюстративна частина	63
Додаток Б (Обов’язковий) Протокол перевірки..	68
Додаток В (Довідниковий) Лістинг програми.....	70

ВСТУП

Актуальність.

Іонізуюче випромінювання є невід'ємною частиною сучасного світу та широко використовується в медицині, промисловості, енергетиці, наукових дослідженнях, військовій та інших сферах. З одного боку, джерела випромінювання мають великий потенціал для розвитку технологій та покращення якості життя, але з іншого боку, вони також становлять потенційну загрозу для здоров'я людини та навколишнього середовища. У зв'язку з цим особливого значення набуває створення надійних, чутливих і доступних методів контролю іонізуючого випромінювання.

Актуальність даної теми зумовлена зростаючим попитом на портативні та точні детектори випромінювання, особливо на підприємствах, у зонах бойових дій або в лабораторіях, де можливі аварії при роботі з радіоактивними матеріалами. Розробка нових приладів реєстрації іонізуючого випромінювання дозволить підвищити безпеку працівників, оперативно виявляти ситуації перевищення допустимих радіаційних норм та оперативно реагувати на радіаційні загрози.

Метою роботи є розробка пристрою реєстрації іонізуючого випромінювання з використанням сучасних електронних компонентів.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовані та вирішені такі задачі:

- аналіз всіх існуючих методів реєстрації іонізуючого випромінювання;
- побудова функціональної та структурної схеми засобу вимірювання;
- розробка алгоритму обробки вимірювального сигналу;
- створення програмного забезпечення для мікроконтролера з виведенням результатів вимірювання;
- розрахунок метрологічних характеристик засобу.

Об'єктом дослідження в роботі є процеси виявлення, вимірювання та реєстрації іонізуючого випромінювання.

Предметом дослідження є апаратна та програмна частини пристрою реєстрації іонізуючого випромінювання, принципи його роботи, алгоритми обробки сигналів від сенсорів.

Методи дослідження. У цій роботі використовуються методи теорії іонізуючого випромінювання, обробці отриманих сигналів з приладу, аналізу помилок мікропроцесорної технології, математичної статистики та комп'ютерного моделювання. Теоретичні розрахунки поєднуються з практичною схемотехнікою та програмуванням мікроконтролерів, а ефективність результатів перевіряється за допомогою експериментів.

Практичне значення одержаних результатів.

У роботі отримані такі практичні результати:

1. Розроблено структурну та функціональну схеми пристрою для реєстрації іонізуючого випромінювання, які можуть бути використані як основа для створення повнофункціонального вимірювального засобу, придатного для роботи в лабораторних, екологічних або польових умовах.

2. Реалізовано програмне забезпечення для мікроконтролера ATmega328P, яке забезпечує зчитування сигналу з детектора випромінювання (газорозрядного лічильника або твердотільного сенсора), його обробку, підрахунок імпульсів, розрахунок дози/інтенсивності та виведення результатів на цифровий дисплей. Це дозволяє використовувати прилад як автономний радіаційний монітор.

3. Визначено основні метрологічні характеристики пристрою: чутливість до різних типів іонізуючого випромінювання, середню похибку вимірювань, роздільну здатність за часом та інтенсивністю, а також робочий діапазон вимірювання. Це дозволяє попередньо оцінити точність приладу й адаптувати його для різних практичних застосувань.

4. Проведено технічне обґрунтування вибору сенсора і методів обробки сигналу (у т.ч. підсилення, фільтрації та усереднення), що забезпечує надійність і стабільність роботи пристрою в умовах зовнішніх завад. Це дозволяє легко

інтегрувати систему у мобільні чи стаціонарні рішення для радіаційного моніторингу середовища або захисту персоналу.

5. Розроблений засіб може бути використаний в навчальних лабораторіях, моніторингу довкілля та для індивідуального захисту працівників, які зазнали впливу джерел радіації. Створений прилад може стати основою для подальших розробок для підвищення точності, чутливості та автономності приладу.

Особистий внесок здобувача.

Основні положення та результати, що представлені в роботі, одержані автором самостійно.

1 ОСОБЛИВОСТІ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Огляд сучасних методів та засобів реєстрації іонізуючого випромінювання

Нині існує велика кількість методів і засобів для реєстрації іонізуючих випромінювань, що забезпечують виявлення, вимірювання і якісний аналіз різних типів випромінювань: альфа-, бета-, гамма-випромінювання, нейтронів, а також важких заряджених частинок. Вибір конкретного методу обумовлений метою дослідження, видом випромінювання, необхідною точністю та умовами проведення вимірювань.

Методи реєстрації іонізуючого випромінювання класифікують за принципом дії детектора, який використовується для виявлення частинок, а також за фізичними процесами, що лежать в основі взаємодії випромінювання з речовиною. Основні типи детекторів включають:

1) Газорозрядні детектори, до яких належать:

Лічильники Гейгера-Мюллера— використовуються для якісного виявлення альфа-, бета- та гамма-випромінювань, мають просту конструкцію і високу чутливість, однак не дають інформації про енергію частинок.

Пропорційні лічильники— забезпечують не лише виявлення частинок, а й визначення їхньої енергії.

Іонізаційні камери — дозволяють точно вимірювати іонізацію, що виникає в результаті проходження випромінювання через газ, і широко застосовуються в дозиметрії.

2) Сцинтиляційні детектори — базуються на властивості деяких речовин (сцинтиляторів) випромінювати світло при поглинанні енергії іонізуючих частинок. Отримані фотони виявляються фотопомножувачами або фотодіодами. Сцинтиляційні системи дають змогу проводити спектрометрію та використовуються в медичній діагностиці (наприклад, в ПЕТ-сканерах), екологічному моніторингу та ядерній фізиці.

3) Напівпровідникові детектори — зокрема, кремнієві (Si) та германієві (Ge) детектори, що працюють за принципом утворення електрон-діркових пар при проходженні частинок через кристал. Ці детектори відзначаються високою енергетичною роздільною здатністю і широко використовуються для прецизійної спектроскопії. Германієві детектори (HPGe) особливо ефективні для гамма-спектроскопії.

4) Теплові та болометричні детектори — фіксують зміну температури матеріалу в результаті поглинання енергії частинки. Використовуються у фундаментальних дослідженнях, зокрема для реєстрації нейтрино та темної матерії.

5) Хімічні та фотографічні методи — раніше широко застосовувалися у вигляді фотоплівок або емульсій, що змінюють свої властивості під дією випромінювання. Хоча сьогодні ці методи поступово замінюються більш сучасними, вони досі використовуються для специфічних задач (наприклад, в індивідуальній дозиметрії).

6) Ядерні емульсії та трекові детектори — дають змогу вивчати траєкторії руху заряджених частинок, зокрема в експериментах з високою енергетикою, космічному випромінюванні та прискорювальних установках.

Залежно від поставлених задач застосовують відповідні вимірювальні прилади: радіометри, дозиметри, спектрометри.

Радіометри — для виявлення і вимірювання рівня радіоактивності (інтенсивності випромінювання). Найпоширенішими приладами цієї групи є дозиметричний прилад ДП—12, який застосовується для вимірювання рівня радіаційного фону та контролю зараженості об'єктів. Також до цієї категорії належить бета— і гамма—радіометр «Луч—А», призначений для виявлення та вимірювання потужності іонізуючого випромінювання, що випромінюється радіоактивними речовинами, особливо у польових умовах. Широко використовується й радіометр «Тисе», який відзначається компактністю та зручністю у використанні для оперативного контролю. Крім того, важливе місце займають такі сучасні радіометричні прилади, як ДП—100М та його модифікація

ДП—100АДМ, які забезпечують високу точність вимірювань та можуть застосовуватись як у побутовій сфері, так і в умовах підвищеної небезпеки, наприклад, при ліквідації наслідків аварій на об'єктах атомної енергетики. Усі ці пристрої відіграють ключову роль у системі радіаційного контролю та захисту населення.

Дозиметри — для вимірювання поглиненої або еквівалентної дози випромінювання, як у медичних, так і промислових застосуваннях. До комплектів дозиметрів, що використовуються для вимірювання дози та потужності іонізуючого випромінювання, входять різноманітні типи приладів, зокрема ДК—0,2, ДП—22Б, ДП—24, ІД—1, ІД—11 тощо. Дозиметр кишеньковий ДК—0,2 призначений для індивідуального контролю накопиченої дози гамма-випромінювання і широко застосовується в особового складу військових та рятувальних підрозділів. Прилад ДП—22Б входить до складу комплекту індивідуального дозиметричного контролю і дозволяє проводити вимірювання в умовах підвищеного рівня радіації. Дозиметр ДП—24 використовується для дистанційного зчитування показників з кишенькових індикаторів, забезпечуючи централізований контроль за дозовим навантаженням персоналу. Індивідуальні дозиметри ІД—1 та ІД—11 також призначені для оцінки особистої дози гамма-випромінювання, при цьому ІД—11 відрізняється покращеною точністю та розширеним діапазоном вимірювання. Такі комплекти є невід'ємною частиною оснащення персоналу, який працює в умовах потенційного радіаційного ризику — на АЕС, у лабораторіях, рятувальних службах тощо.

Спектрометри — для аналізу енергетичного спектру випромінювань, що дає можливість ідентифікувати радіонукліди за характеристиками їх випромінювання.

Загалом, типовий прилад для реєстрації іонізуючих випромінювань складається з: чутливого елемента, перетворювача сигналу, вимірювальної апаратури та реєструвальної апаратури.

Сучасні системи часто інтегрують комп'ютерну обробку даних, дистанційне керування, автоматичний аналіз спектрів та інші цифрові технології.

Такі комплексні підходи підвищують точність, чутливість і ефективність реєстрації іонізуючого випромінювання, що є особливо важливим у ядерній енергетиці, радіаційній безпеці, медицині та наукових дослідженнях.

1.2 Вибір методу реєстрації іонізуючого випромінювання

Вибір методу реєстрації іонізуючого випромінювання залежить від ряду факторів, включаючи тип іонізуючого випромінювання, рівень інтенсивності, вимоги до енергетичної роздільної здатності, умови експлуатації (польові/лабораторні), вартість та мобільність обладнання.

До головних критеріїв вибору методу реєстрації іонізуючого випромінювання можна віднести: тип випромінювання, інтенсивність, необхідність спектроскопії, чутливість, просторове чи часове розділення, умови використання

Таблиця 1.1 – Критерії вибору методу реєстрації іонізуючого випромінювання

Критерій	Пояснення
Тип випромінювання	Альфа, бета, гамма, рентгенівське, нейтронне
Інтенсивність	Слабкі чи сильні потоки
Необхідність спектроскопії	Потрібна енергетична роздільна здатність
Чутливість	Мінімальний рівень випромінюван. що може бути виявлений
Просторове чи часове розділення	Наприклад, трекові детектори, часові кореляції
Умови використання	Польові, стаціонарні, підземні, високі температури, вологість тощо

Проведемо порівняння головних методів реєстрації і занесемо дані до таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняння методів реєстрації

Метод	Підходить для вимірювання	Переваги	Недоліки
Гейгера-Мюллера	Альфа, бета, гамма	Дешево, просто, портативно	Не визначає енергію, "мертвий час"
Іонізаційна камера	Високі дози, гамма	Точна дозиметрія, стабільність	Низька чутливість при слабкому випромінюванні
Пропорційний лічильник	Альфа, бета	Спектрометрія, хороша роздільність	Вимагає стабільного живлення та калібрування
Сцинтиляційний детектор	Універсальний	Хороша ефективність, спектроскопія	Чутливість до умов довкілля
HPGe (германій)	Гамма спектроскопія	Висока роздільність, точність спектру	Дорого, потребує охолодження
Кремнієві (Si)	Альфа, бета	Компактність, точність	Вразливі до радіаційного пошкодження
^3He , BF_3 нейтронні	Теплові нейтрони	Чутливість, надійність	Обмежена доступність ^3He , токсичність BF_3
Пластикові сцинтилятори	Швидкі нейтрони	Великі площі, компактність	Менш точна ідентифікація

В таблиці 1.3 наведено приклади вибору методу реєстрації іонізуючого випромінювання в залежності від задачі.

Таблиця 1.3 – Приклади вибору методу в залежності від задачі

Задача	Рекомендований метод
Побутовий дозиметр для виявлення радіації	Лічильник Гейгера

Продовження таблиці 1.3 – Приклади вибору методу в залежності від задачі

Спектрометрія гамма-випромінювання в лабораторії	HPGe або NaI(Tl) сцинтилятор
Вимірювання активності альфа-джерел	Пропорційний або кремнієвий детектор
Детектування нейтронів у ядерному реакторі	^3He -лічильник або борований сцинтилятор
Радіаційний контроль у польових умовах	Сцинтиляційний дозиметр або комбінований прилад
Реєстрація короточасних радіоактивних сплесків (TIMING)	Сцинтилятори + швидка електроніка

Отже, для універсального контролю в польових умовах краще використовувати комбіновані прилади з ГМ-трубкою і сцинтилятором. Для високоточної лабораторної спектрометрії – HPGе або сцинтиляційний спектрометр. Для дозиметрії персоналу – іонізаційні камери (персональні), твердотільні дозиметри. Для нейтронного моніторингу: ^3He або борні детектори у сповільнювачах (поліетилен).

1.3 Математичне моделювання процесу реєстрації іонізуючого випромінювання

Іонізуючим випромінюванням називають потік частинок або квантів електромагнітного випромінювання, які під час взаємодії з речовиною спричиняють іонізацію атомів або молекул — тобто вибивання електронів з електронних оболонок. У результаті цього утворюються іони, що істотно змінює фізичні та хімічні властивості речовини. Іонізаційні процеси лежать в основі багатьох технічних застосувань і водночас є джерелом потенційної небезпеки для біологічних об'єктів.

Такі випромінювання виникають під час атомних та ядерних процесів — як мимовільних, так і індукованих, зокрема в результаті радіоактивного розпаду, ядерних реакцій, взаємодії високоенергетичних частинок з ядрами атомів, а також під час переходів електронів між енергетичними рівнями. Крім природних джерел, таких як космічні промені чи радіоактивні мінерали, іонізуюче випромінювання може бути штучно отримане за допомогою прискорювачів заряджених частинок, ядерних реакторів та рентгенівських трубок.

Іонізаційний метод виявлення іонізуючого випромінювання ґрунтується на фізичному явищі іонізації — здатності випромінювання з достатньою енергією вибивати електрони з атомів або молекул середовища, через яке воно проходить. У результаті цього утворюються пари іонів — позитивно заряджені іони та вільні електрони. Це явище широко використовується в радіаційних вимірюваннях, оскільки воно дозволяє перетворити невидиме випромінювання в електричний сигнал, який можна зареєструвати за допомогою відповідної апаратури.

Якщо до середовища, у якому відбувається іонізація, прикласти зовнішню різницю потенціалів, то створиться електричне поле. Під його впливом заряджені частинки починають рухатись: позитивні іони спрямовуються до негативного (катода), а негативні — до позитивного електрода (анода). Завдяки цьому в електричному колі, яке містить це середовище, виникає електричний струм. Інтенсивність цього струму прямо залежить від кількості утворених іонів, тобто від інтенсивності іонізуючого випромінювання. Таким чином, вимірюючи силу струму, можна зробити висновок про потужність радіації, яка спричинила іонізацію (див. Рисунок 1.1).

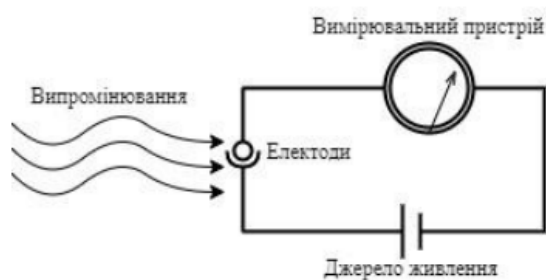


Рисунок 1.1 – Структурна схема іонізаційного детектора

Конструктивно іонізаційні детектори часто нагадують конденсатори. Вони складаються з двох електродів, між якими знаходиться діелектрик — газ або суміш газів, що не проводить струм у нормальних умовах. Газове середовище виконує функцію іонізаційного простору. Коли через нього проходить іонізуюче випромінювання, виникають іони, що дозволяє створити струм у колі. Часто для підвищення чутливості таких приладів використовуються спеціальні гази (наприклад, аргон, неон, або суміші з галогенами), які мають високі коефіцієнти іонізації.

Ці прилади можуть працювати в різних режимах: іонізаційному, пропорційному та режимі Гейгера-Мюллера — залежно від напруги, прикладеної до електродів. У кожному з режимів характер взаємодії частинок з газом та сигнал на виході змінюється, що дозволяє використовувати іонізаційні детектори для вирішення різних задач: від точного дозиметричного контролю до виявлення наявності радіоактивних джерел.

Однією з ключових характеристик іонізаційного детектора є його вольт-амперна характеристика — залежність сили іонізаційного струму від прикладеної до електродів напруги за сталої інтенсивності іонізуючого випромінювання.

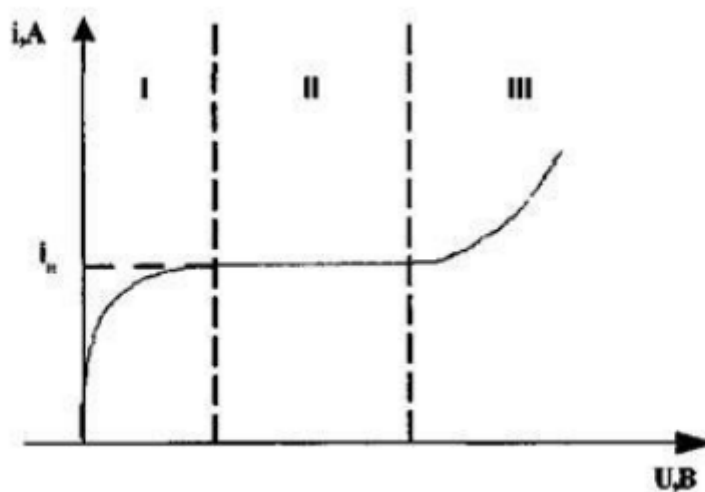


Рисунок 1.2 – Вольт-амперна характеристика іонізаційного детектора

На рисунку 1.2 зображено вольт-амперну характеристику іонізаційної камери за умов постійного опромінення.

У діапазоні низьких напруг лише частина утворених іонів досягає електродів — решта встигає рекомбінувати в об'ємі газу, що призводить до незначного іонізаційного струму. У міру зростання прикладеної напруги електричне поле посилюється, і дедалі більше іонів встигає дістатися до електродів до рекомбінації, що спричиняє збільшення струму (область I).

Після досягнення певного рівня напруги настає режим насичення (область II), коли практично всі іонні пари, що утворюються внаслідок опромінення, встигають бути зібрані електродами. У цьому режимі струм досягає максимального значення і стабілізується — подальше підвищення напруги не призводить до збільшення струму.

Якщо напруга продовжує зростати, в газовому середовищі починають виникати додаткові іонізації внаслідок прискорення первинних електронів — струм знову збільшується (область III), що відповідає переходу до пропорційного або лавинного режиму.

У полі постійної потужності флюенсу енергії, в одиниці об'єму між електродами утворюється певна кількість пар іонів (q). Якщо напруженість електричного поля є достатньо великою для того, щоб усі ці іони були зібрані, то в умовах сталого режиму струм насичення можна визначити за відповідною формулою:

$$i_0 = \dot{q} \cdot e \cdot V, \quad (1.1)$$

де e — елементарний заряд (заряд одного іона), а V — об'єм іонізаційної камери [10].

Зростання іонізаційного струму на третій ділянці вольт-амперної характеристики пояснюється явищем ударної іонізації.

У цьому режимі первинні електрони, прискорені сильним електричним полем, отримують достатню енергію для вибивання нових електронів з атомів газу, що призводить до лавиноподібного збільшення кількості носіїв заряду.

Потужність дози опромінення визначається як кількість пар іонів, що утворюються у одиниці об'єму повітря (1 см^3) за одиницю часу (1 с). Визначивши іонізаційний струм I та знаючи робочий об'єм іонізаційної камери V , можна розрахувати потужність гамма-випромінювання P за допомогою відповідної формули:

$$P = q \cdot t = I \cdot V, \quad (1.2)$$

де q — загальний заряд іонів, створених іонізуючим випромінюванням у 1 см^3 об'єму камери.

Важливою відмінною рисою іонізаційної камери порівняно з іншими типами газонаповнених детекторів є низька напруженість електричного поля в газовому проміжку між електродами. Завдяки цьому камера працює у режимі насичення, коли сила струму не залежить від прикладеної напруги (за умови, що вона достатня для повного збирання іонів).

У таких умовах іонізаційний струм визначається лише кількістю створених іонних пар та зарядом електрона, і розраховується як добуток елементарного заряду e на число пар іонів, які утворюються внаслідок дії іонізуючого випромінювання.

Реєстрація іонізуючого випромінювання є важливим етапом у фізиці ядерних процесів, радіаційному контролі, медичній діагностиці та захисті довкілля. Моделювання процесу реєстрації ІВ дозволяє оптимізувати детектори, передбачити їх поведінку в різних умовах та провести віртуальні експерименти без ризику для здоров'я.

Моделювання процесу реєстрації – це чисельне або аналітичне відтворення фізичного процесу за допомогою комп'ютера або математичних методів. В рамках реєстрації ІВ моделюють: проникнення частинок у речовину, втрату енергії та іонізацію, вторинні процеси (люмінесценція, теплові ефекти) та взаємодію з детектором.

На рис.1.3 показано втрату енергії α -частинки в кремнії залежно від глибини проникнення. Як видно, енергія швидко зменшується, досягаючи нуля приблизно на глибині 6.3 мкм — це і є глибина повного зупинення частинки.

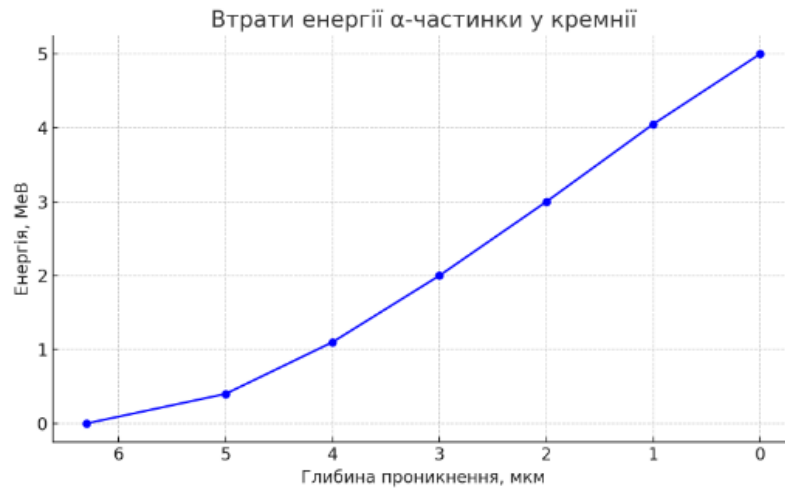


Рисунок 1.3 – Графічне зображення проникнення α -частинок у кремній

На рисунку 1.4 графічно зображено втрати енергії β -частинки (електрона): показано, як електрон з енергією 1 MeV поступово втрачає енергію в кремнії — його пробіг становить близько 1.4 мм.

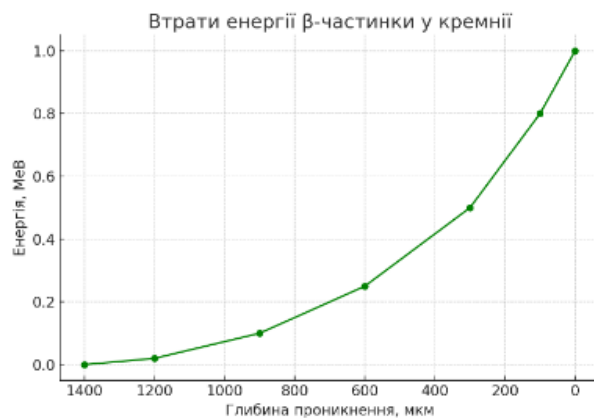


Рисунок 1.4 – Графічне зображення проникнення β -частинок у кремній

Для γ -випромінювання відбувається ослаблення γ -випромінювання: інтенсивність γ -квантів експоненційно зменшується зі збільшенням товщини кремнію — характерне глибоке проникнення з поступовим згасанням (на рис.1.5).

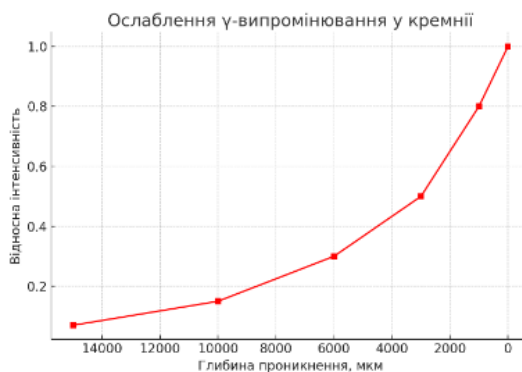


Рисунок 1.5 – Графічне зображення проникнення γ -частинок у кремній

Оскільки іонізаційні камери та лічильники Гейгера є найбільш поширеними приладами для виявлення іонізуючого випромінювання, зупинимось детальніше на принципі роботи, будові та основних характеристиках лічильника Гейгера-Мюллера.

Лічильник Гейгера-Мюллера — це прилад, призначений для виявлення та вимірювання різних типів іонізуючого випромінювання, зокрема альфа- (α), бета- (β) та гамма- (γ) випромінювання. Його дія базується на процесі іонізації газу всередині спеціальної трубки, коли через неї проходять заряджені частинки або фотони випромінювання.

Основними елементами конструкції є:

Газонаповнена трубка (детектор) – зазвичай має циліндричну форму з тонким анодом (дротом) у центрі та катодом, що є стінками трубки. Трубка заповнена інертним газом, як правило, аргоном або гелієм, іноді з додаванням гасителя (наприклад, спирту або хлору).

Джерело живлення – забезпечує подачу високої напруги між анодом і катодом.

Лічильна електроніка – фіксує кожен електричний імпульс, який виникає під час іонізації, та відображає кількість виявлених подій.

Коли частинка іонізуючого випромінювання потрапляє всередину трубки, вона взаємодіє з газовими молекулами, викликаючи їх іонізацію. Це означає, що частинка вибиває електрон з атома, утворюючи позитивний іон. Під дією

прикладеного електричного поля вибиті електрони прискорюються до анода, а позитивні іони — до катода. Під час руху електронів може відбуватись додаткова іонізація, що призводить до лавиноподібного збільшення кількості носіїв заряду, і, відповідно, до появи сильного імпульсу струму, який фіксується як подія.

Цей імпульс є індикатором того, що частинка випромінювання пройшла через трубку. Після кожної події трубка потребує певного часу для відновлення (так званий "мертвий час"), після якого вона знову готова до реєстрації.

Щоб скоротити час відновлення та запобігти безперервному розряду, до газу додають гасильні речовини. Вони допомагають швидше нейтралізувати іони та стабілізують процес вимірювання.

Однією з важливих характеристик лічильника Гейгера є робоча напруга. Якщо вона буде недостатньою, іонізація не зможе створити достатньо сильного імпульсу для реєстрації. Якщо ж напруга перевищить критичне значення (понад 400 В), може виникнути безперервний газовий розряд, що не дозволяє проводити коректні вимірювання та може навіть пошкодити прилад.

Для коректної роботи важливо встановити напругу в так званий області плато. Це діапазон напруг, при якому кількість зареєстрованих імпульсів майже не змінюється зі зміною напруги.

Саме в цій області прилад працює стабільно та надійно. Оптимальною є робота при напрузі, яка розташовується у першій чверті області плато — ближче до її нижньої межі. Це забезпечує баланс між чутливістю та стабільністю приладу.

Нахил кривої в зоні плато є важливим показником якості лічильника. Хороший лічильник має нахил не більше 10% зростання кількості імпульсів на кожні 100 В зміни напруги (рис.1.6). Це забезпечує точніші та надійніші результати вимірювання.

Механізм розряду в лічильнику Гейгера демонструє, що після виникнення кожного розряду прилад певний час залишається нечутливим до нових іонізуючих частинок. Це пов'язано з особливостями процесу відновлення електричного поля всередині трубки.

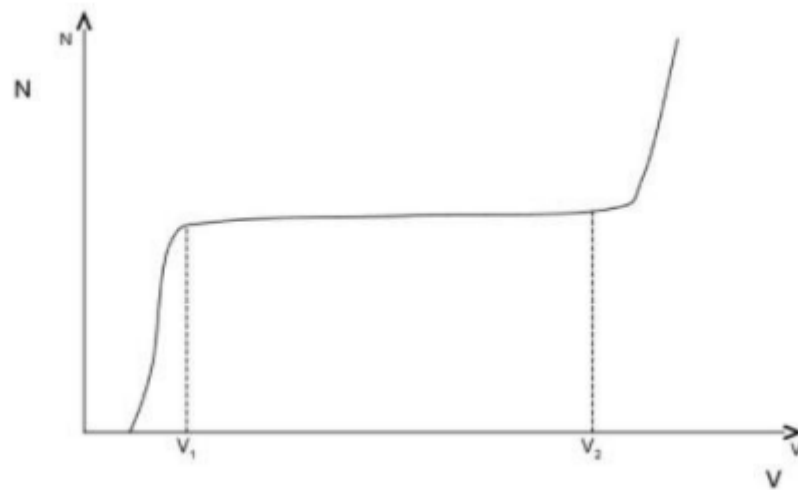


Рисунок 1.6 – Область Плато

Після розряду іони, які утворилися в газі, починають рухатися до катода, а електричне поле поблизу анода поступово відновлюється. Лише коли ці іони досягають певної відстані від центра трубки, яка позначається як радіус $r=r_c$, електричне поле поблизу анода знову стає достатнім для виникнення нового розряду.

Час від моменту попереднього розряду до моменту, коли іони досягають цієї критичної відстані $r=r_c$, називають мертвим часом (позначається як t_m). У цей проміжок лічильник не може зареєструвати жодної нової події, оскільки електричне поле ще не відновилося до необхідного рівня.

Крім того, існує так званий час відновлення лічильника — це проміжок часу, протягом якого прилад вже може реєструвати нові імпульси, але амплітуда цих імпульсів є меншою за нормальну через вплив просторового заряду іонів, які ще не встигли повністю розсіятися. Просторовий заряд іонів зберігає свій вплив на електричне поле не тільки в зоні радіусу $r=r_c$, але і на більшій відстані $r > r_c$ що тимчасово знижує чутливість і якість сигналів.

Для лічильників Гейгера, які самогасяться (тобто такі, де розряд припиняється самостійно без додаткової схеми гасіння), час руху іонів від анода до критичного радіусу $r=r_c$ зазвичай становить близько 250 мікросекунд (мкс).

На рисунку 1.7 представлена осцилограма імпульсів, що демонструє цю поведінку. З рисунка видно, що протягом мертвого часу t_m імпульси не накладаються, тобто лічильник не реагує на нові події.

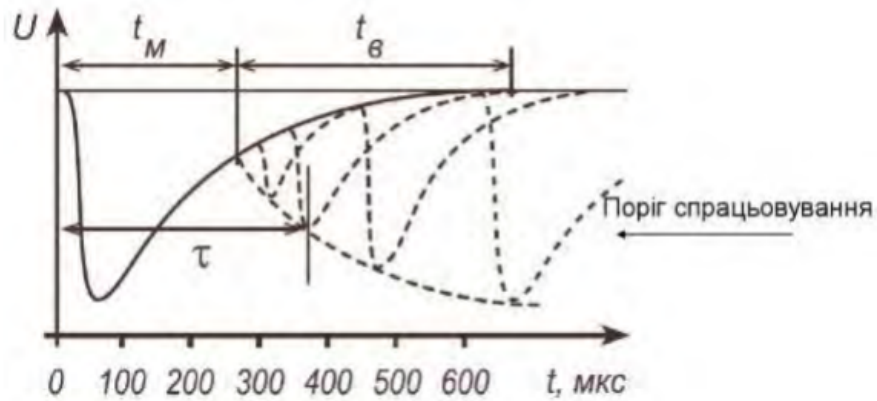


Рисунок 1.7 – Мертвий час лічильника газорозрядного типу

Цікаво, що мертвий час не є сталим і залежить від швидкості рахунку імпульсів. При зростанні інтенсивності випромінювання і збільшенні кількості розрядів за одиницю часу, мертвий час лічильника зменшується і може сягати приблизно 10 мкс. Це пояснюється тим, що за більшої кількості розрядів в процесі відновлення формується менша щільність заряду, і, відповідно, іонам потрібно подолати коротшу відстань від анода, щоб поле відновилося до рівня, достатнього для нового розряду. Тобто, частинки, що потрапили в лічильник у період часу відновлення, генерують імпульси з меншою амплітудою, але це дозволяє скоротити час нечутливості.

Додатково слід враховувати рівень дискримінації в схемі реєстрації — це поріг, нижче якого імпульси не фіксуються. Чим нижчий цей поріг (рівень дискримінації), тим коротшим може бути мертвий час при високих швидкостях рахунку, оскільки прилад починає фіксувати і імпульси меншої амплітуди, які виникають у період часу відновлення.

Для перетворення кількості імпульсів, зареєстрованих сенсором, у фізично значущу величину – потужність експозиційної дози іонізуючого випромінювання – необхідно визначити математичне рівняння перетворення.

Як детектор іонізуючого випромінювання обрана трубка Гейгера-Мюллера типу СБМ-20, яка формує одиночний електричний імпульс при кожному акті реєстрації радіоактивної частинки (альфа-, бета- або гамма-випромінювання). Це дозволяє визначати інтенсивність випромінювання через підрахунок кількості імпульсів за певний інтервал часу.

Основне рівняння перетворення має вигляд:

$$D = k \cdot N \quad (1.3)$$

D – потужність експозиційної дози, [мкР/год],

N – кількість імпульсів, зареєстрованих за 1 хвилину,

k – калібрувальний коефіцієнт, що залежить від характеристик детектора.

Згідно з технічною документацією та експериментальними даними, трубка СБМ-20 має середню чутливість приблизно 205 імпульсів на 1 мкР/год. Тобто, калібрувальний коефіцієнт визначається як:

$$k = \frac{1}{205} \approx 0.00488 \quad (1.4)$$

Таким чином, рівняння набуває конкретного вигляду:

$$D = 0.00488 \cdot N \quad (1.5)$$

де N — кількість імпульсів за хвилину.

Пристрій вимірює кількість імпульсів у заданому часовому вікні (наприклад, 60 секунд), після чого мікроконтролер або аналогічний обчислювальний блок обчислює потужність дози за наведеним рівнянням. Результат виводиться на дисплей або передається далі через інтерфейс зв'язку.

Таким чином, лічильник Гейгера-Мюллера є простим, надійним та широко використовуваним інструментом для детектування іонізуючого випромінювання. Його ефективна робота залежить від правильно підібраної напруги, якості трубки, складу газу всередині та стабільності електроніки, яка обробляє імпульси. Його

простота конструкції та чутливість зробили цей прилад незамінним у багатьох галузях – від радіаційного контролю до медичних та наукових досліджень.

1.4 Висновки до розділу

У першому розділі роботи було розглянуто основні поняття, пов'язані з іонізуючим випромінюванням, його видами та характеристиками. Проаналізовано фізичні принципи, що лежать в основі виявлення іонізуючого випромінювання, зокрема процеси іонізації, взаємодії випромінювання з речовиною та генерації вимірювального сигналу. Проведено огляд сучасних методів та засобів реєстрації, таких як газорозрядні, сцинтиляційні та напівпровідникові детектори. Кожен з методів має свої переваги й недоліки залежно від типу випромінювання, енергетичного діапазону, умов експлуатації та вимог до точності.

На основі порівняльного аналізу було обґрунтовано вибір оптимального методу реєстрації іонізуючого випромінювання для поставлених задач. Аналіз показав, що газорозрядний детектор — трубка Гейгера СБМ-20 — дозволяє задовольнити вимоги до точності та роздільної здатності, а також забезпечує необхідну надійність і простоту використання. Обраний сенсор допомагає ефективно вирішити поставлені в роботі завдання.

2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ РЕЄСТРАЦІЇ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

2.1 Аналіз конструктивних варіантів засобів реєстрації іонізуючого випромінювання

Для виявлення та вимірювання іонізуючого випромінювання застосовуються різноманітні методи, кожен з яких базується на особливостях взаємодії випромінювання з речовиною. До основних методів належать:

- 1) іонізаційні – базуються на здатності випромінювання створювати заряджені частинки (іони) у речовині,
- 2) оптичні (сцинтиляційні) – ґрунтуються на явищі світіння (сцинтиляції), що виникає при проходженні випромінювання через спеціальні матеріали,
- 3) хімічні – передбачають хімічні зміни в речовині під дією радіації,
- 4) фотографічні – засновані на почорнінні фотоматеріалу внаслідок дії випромінювання.

Серед іонізаційних методів найбільш поширеними є ті, що використовують властивість іонізуючого випромінювання іонізувати середовище, зокрема газ або рідину, що знаходиться в детекторі. Під час цієї взаємодії виникають іонні струми, які можна виміряти. Аналізуючи величину цього струму, можна оцінити інтенсивність та характер випромінювання.

Детектори іонізуючого випромінювання, залежно від їх призначення, поділяються на дві основні категорії:

Радіаційні детектори (радіометри) – використовуються для визначення радіоактивності, тобто кількості розпадів за одиницю часу;

Дозиметри (дозоміри) – призначені для вимірювання дози опромінення, тобто кількості енергії, поглинутої речовиною або організмом, а також потужності цієї дози (наприклад, в одиницях Грей або Зіверт).

Принцип дії всіх типів детекторів базується на взаємодії іонізуючого випромінювання з атомами речовини, що призводить до утворення заряджених

частинок. При цьому: нейтральні частинки, такі як гамма-кванти чи нейтрони, самі не створюють іонізацію безпосередньо, однак можуть спричинити виникнення вторинних заряджених частинок.

Для гамма-випромінювання основними вторинними частинками є електрони, вибиті з атомів.

Швидкі нейтрони виявляються через продукти ядерних реакцій (наприклад, протони чи інші ядра), що виникають при їх зіткненні з ядрами речовини.

Повільні (теплові) нейтрони, навпаки, реєструються завдяки випромінюванню, яке виникає в результаті захоплення нейтронів ядрами атомів.

Залежно від способу реєстрації сигналу, детектори поділяються на два основні типи:

Трекові детектори – забезпечують візуальне відображення траєкторії заряджених частинок у вигляді слідів або доріжок. Приклади: камера Вільсона, бульбашкова камера, іскрова камера, ядерна фотографічна емульсія.

Електронні детектори – генерують електричні імпульси при проходженні частинок, які потім аналізуються за допомогою електронної апаратури. Такі детектори дозволяють отримувати інформацію в реальному часі та використовуються у більшості сучасних систем.

Основні характеристики детекторів іонізуючого випромінювання включають:

1. Ефективність реєстрації – ймовірність того, що частинка, яка потрапила в активний об'єм детектора, буде зафіксована;
2. Просторова роздільна здатність – точність визначення координат траєкторії частинки;
3. Часова роздільна здатність – найменший проміжок часу між двома подіями, які можуть бути зареєстровані як окремі;
4. Мертвий час (час відновлення) – проміжок часу після реєстрації однієї частинки, протягом якого детектор залишається тимчасово нечутливим до наступної.

Ці властивості визначають придатність детектора для конкретних завдань у галузях ядерної фізики, медицини, екології, дозиметрії та техніки безпеки.

Камера Вільсона — це один із перших приладів, створених для візуалізації треків заряджених частинок. Вона має циліндричну форму і зазвичай виготовлена зі скла або прозорого пластику. Її внутрішні стінки вкриті тонким шаром скла, а сама камера освітлюється джерелом світла (рис. 2.5), що дозволяє побачити утворені сліди частинок.

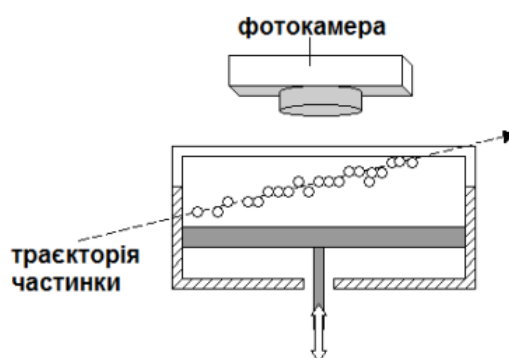


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення камери Вільсона

Перед початком роботи в камері створюються спеціальні умови для забезпечення надчутливого середовища. За допомогою слабких електричних полів з простору камери видаляються частинки пилу, гарячі іони та інші можливі центри конденсації, які могли б спричинити передчасну конденсацію парів. Потім у камеру впускають пару спирту в такій кількості, щоб вона перебувала поблизу стану насичення.

Коли поршень у камері раптово опускається, об'єм камери миттєво збільшується, і відбувається адіабатичне розширення — процес, під час якого температура пари різко знижується. Внаслідок цього пари спирту охолоджуються до температури нижче точки роси. Оскільки в камері попередньо були видалені всі центри конденсації, пара залишається у переохолодженому стані.

Коли в камеру проникає заряджена частинка, наприклад альфа-частинка, вона іонізує молекули спиртової пари вздовж свого шляху. Утворюється ланцюг іонів — нові центри конденсації. Саме на цих іонах пари спирту негайно починають конденсуватися, утворюючи видимі ланцюжки дрібних крапельок.

Світло, проходячи через камеру, розсіюється на цих крапельках, завдяки чому трек частинки стає видимим і може бути зафіксований на фотоплівці або електронному носії. Цей трек називається слідом частинки — це своєрідний «відбиток» її руху через камеру.

Таким чином, камера Вільсона дозволяє спостерігати за траєкторіями заряджених частинок, які пролітають через насичену пару, і надає важливу інформацію про їхню поведінку та взаємодію з речовиною.

Бульбашкова камера

Іншим прикладом детектора для виявлення заряджених частинок є бульбашкова камера, яка була широко використана в експериментальній фізиці високих енергій у XX столітті. Вона являє собою посудину, заповнену перегрітою рідиною, наприклад, рідким воднем або пропаном, яка перебуває під певним тиском (рис. 2.2).

Рідина в камері перегріта, тобто її температура перевищує точку кипіння, але за відсутності центрів кипіння вона залишається в рідкому стані. Заряджені частинки, що проходять через камеру, іонізують молекули рідини вздовж своєї траєкторії, створюючи іонні треки. Ці іони виконують роль центрів пароутворення — саме на них і починається утворення бульбашок пари.

Спочатку бульбашки мають мікроскопічний розмір — не більше 1 мкм, але вони швидко ростуть унаслідок кипіння перегрітої рідини. Щоб візуалізувати слід частинки, камеру підсвічують імпульсним джерелом світла, а зображення треків бульбашок фіксують за допомогою високошвидкісної фотозйомки.

У результаті спостерігається безперервний слід з бульбашок, який точно відображає траєкторію зарядженої частинки. Система має високу просторову роздільну здатність, що дозволяє детально вивчати взаємодії частинок, зокрема їхні зіткнення, розпади або утворення нових частинок. Основним обмеженням бульбашкових камер є потреба у фотографічному збереженні результатів, а також неможливість реєстрації великої кількості подій за короткий проміжок часу.

Обидва типи камер — камера Вільсона та бульбашкова камера — відіграли ключову роль у розвитку експериментальної фізики частинок, допомагаючи

наочно спостерігати за явищами, які інакше залишалися б невидимими. Вони продемонстрували ефективність використання фазових переходів (конденсація та кипіння) для реєстрації субатомних процесів.

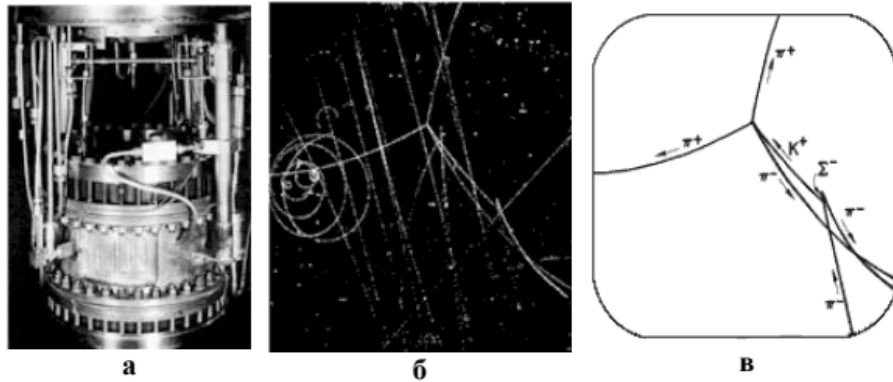


Рисунок 1.2 – Бульбашкова камера: а – зовнішній вигляд; б – фотографія переміщення частинок у камері; в – схематичне зображення треків

Нейтронні детектори. Нейтрони не мають заряду, тому не утворюють треків у звичайних детекторах. Для їх реєстрації використовують речовини (радіатори), ядра яких при взаємодії з нейтронами породжують заряджені частинки або γ -кванти.

Нейтрони можуть пружно розсіюватися на легких ядрах (H_2 , He), передаючи їм енергію. Для реєстрації таких ядер віддачі застосовують пропорційні лічильники. Для відновлення енергетичного спектру нейтронів використовують трекові детектори.

Елементи He, Li, B утворюють α -частинки при захопленні нейтронів, що реєструють іонізаційною камерою. Радіаційне захоплення нейтронів супроводжується γ -випромінюванням і утворенням β -активних ядер.

Опромінені фольги (наприклад, з золота) поруч із β -детекторами дозволяють визначити кількість нейтронів за рівнем β -активності.

Фотографічний метод ґрунтується на фотолізі AgBr: після проявлення утворюються чорні лінії (треки), інтенсивність яких пропорційна енергії випромінювання.

Ядерна фотографічна емульсія відтворює треки заряджених частинок у вигляді ланцюжків срібла з високою просторовою, але низькою часовою роздільністю.

Авторадіографія – метод візуалізації іонізуючого випромінювання від радіоактивних об'єктів на фоточутливому матеріалі. Дозволяє оцінити розподіл радіонуклідів. Застосовується, зокрема, для секвенування ДНК/РНК. Перевага – простота, недолік – складність кількісної оцінки. Іноді використовують підсилюючі екрани для підвищення чутливості.

Ефективним методом дослідження радіоактивності стала «електронна авторадіографія», яка з'явилася завдяки розвитку мікроелектроніки. Для неї використовують фосфоіміджер — прилад, що зчитує радіоактивні мітки з екрана після експонування зі зразком. Альтернативний варіант — застосування газопроточних лічильників, які підходять для різних радіонуклідів у біології.

Для фотометричних вимірювань іонізуючого випромінювання використовують прилади з іонізаційною камерою, наповненою, наприклад, аргоном. Потік β -частинок іонізує газ, створюючи струм, сила якого залежить від інтенсивності випромінювання.

Іскрова камера — це об'єм газу з двома плоскими електродами, розташованими на певній відстані один від одного (рис.2.3).

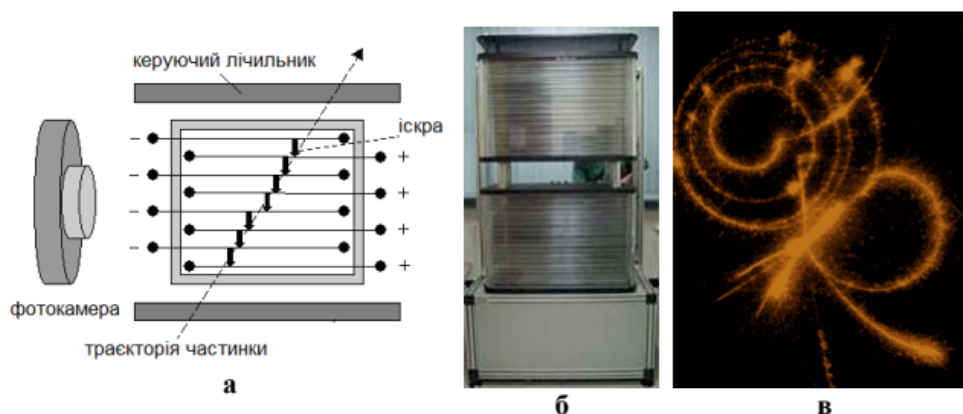


Рисунок 2.3 – Іскрова камера: а – схематичне зображення принципу роботи; б – зовнішній вигляд двосекційної іскрової камери; в – розпад піона

Іскрові камери: Якщо одночасно з проходженням зарядженої частинки через газ (затримка $\leq 10^{-6}$ с) подати на електроди високу напругу (10 кВ), у місці проходження частинки виникає іскровий пробій. Система з багатьох електродів дозволяє зафіксувати слід частинки як ланцюг іскор.

Електронні детектори: Найчисельніша група — іонізаційні детектори. Найпростіший — іонізаційна камера. Її недолік — великий мертвий час. Розрізняють імпульсні (реєструють окремі частинки) та інтегруючі камери (реєструють сумарну енергію потоку). Вони не використовують газового підсилення.

Напівпровідникові детектори подібні до іонізаційних камер, але замість газу використовують кристал.

Сцинтиляційні лічильники працюють на основі спалахів світла в органічних або неорганічних речовинах під дією випромінювання. Світлові спалахи фіксує фотоелектронний помножувач (ФЕП). Рідинні сцинтиляційні лічильники — основний інструмент для вимірювання радіоактивності в біологічних об'єктах (рис.2.4).



Рисунок 2.4 – Схема сцинтиляційного лічильника.

Сцинтиляційний лічильник має високу часову роздільну здатність (10^{-9} с), велику амплітуду сигналу та малий час відновлення (10^{-8} с)

У фотолюмінесцентних дозиметрах (ФЛД) під дією іонізуючого випромінювання в люмінофорі утворюються центри, що за УФ-освітленням випромінюють світло, пропорційне дозі радіації.

У термолюмінесцентних дозиметрах під час нагрівання енергія випромінювання перетворюється на люмінесценцію, інтенсивність якої відповідає отриманій дозі.

Лічильник Гейгера-Мюллера — це скляна трубка з металевим покриттям і тонкою дротиною всередині, заповнена аргоном і підключена до джерела струму через резистор (рис.2.5). Подібну конструкцію мають лічильник Гейгера та циліндрична іонізаційна камера. Позначення: 1 – анодна нитка; 2 – циліндричний катод; 3 – ізолятор; 4 – траєкторія руху зарядженої частинки; 5 – електронна лавина. Темні кружечки позначають електрони, а світлі – іони, що утворилися внаслідок первинної іонізації атомів інертного газу.

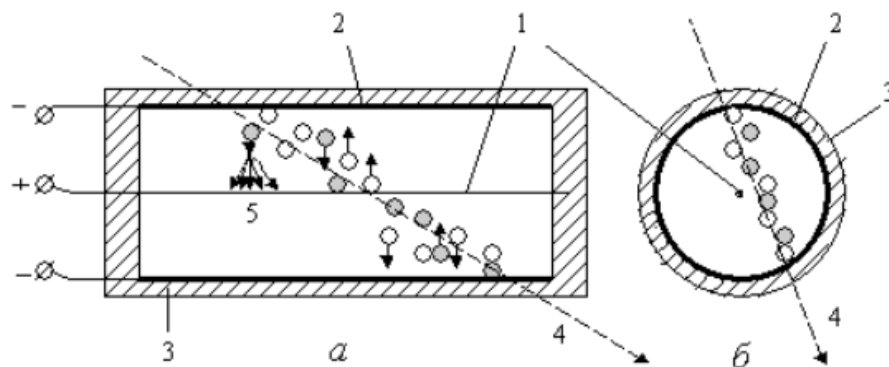


Рисунок 2.5 – Схема пропорційного лічильника в розрізі: поздовжньому (а) та поперечному (б)

Заряджені частинки, потрапляючи в трубку, прискорюються електричним полем і іонізують аргон, що спричиняє електронно-іонну лавину. Виникає струм і напруга на резисторі. Лічильник Гейгера-Мюллера реєструє частинки за кількістю імпульсів.

Лічильники розрізняються за газовим складом і швидкодією (рис. 2.6). У несамогаснівних моделях розряд гаситься зниженням напруги за допомогою високого опору. У самогаснівних — завдяки домішці (наприклад, спирту), що поглинає фотони і блокує фотоефект.

Обидва типи витримують до 10^5 імп/с. Самогаснівні обмежені 10^9 спрацьовуваннями через розпад молекул. Використання He та Cl подовжує термін служби, але знижує чутливість.

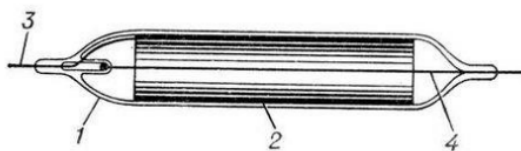


Рисунок 2.6 – Схема скляного лічильника Гейгера-Мюллера

З рисунка 2.6 видно, що 1 – герметично запаяна скляна трубка, яка забезпечує ізоляцію внутрішнього середовища від зовнішнього впливу та підтримує необхідний тиск газу всередині; 2 – катод, який представлений тонким шаром міді, нанесеним на внутрішню поверхню скляної трубки, що слугує електродом для збору електронів; 3 – додатковий катод, що підвищує ефективність збору заряджених частинок; 4 – анод у вигляді тонкої натягнутої нитки, розташованої по осі трубки, який слугує основним електродом для збору позитивних іонів і електронів, утворених під час іонізації газу.

Цей тип лічильника є одним із найпоширеніших приладами для реєстрації іонізуючого випромінювання завдяки своїй простоті, надійності та високій чутливості.

Особливу групу серед різноманітних детекторів радіації становлять прилади, що реєструють світло, яке випромінюється при проходженні зарядженої частинки через певне речовинне середовище. До таких детекторів відносять не тільки вже згадуваний сцинтиляційний детектор (який детально розглядався вище), а й черенковський лічильник, а також детектор на основі перехідного випромінювання.

Черенковський лічильник — це спеціалізований детектор, який фіксує світлове випромінювання, що виникає, коли заряджена частинка рухається в середовищі з показником заломлення, що забезпечує швидкість світла в цьому середовищі меншою за швидкість частинки. Якщо швидкість частинки перевищує

фазову швидкість світла в даному середовищі, то виникає явище, подібне до звукового “дзвінка” — випромінювання Черенкова. Світло, яке при цьому випромінюється, має спрямованість, тісно корелює з напрямком руху частинки, що дозволяє визначати її траєкторію. Оскільки випромінювання світла відбувається практично миттєво, роздільна здатність цього типу детекторів визначається переважно характеристиками фотоефектних приладів (ФЕП), які перетворюють світлові сигнали у електричні. Завдяки цим властивостям, черенковські лічильники широко застосовуються у фізиці космічних променів, експериментах з прискорювачами та інших областях, де потрібно швидко і точно реєструвати енергетику і напрямок руху частинок.

Іншим типом детектора світла є детектор на перехідному випромінюванні. У цьому приладі світловий спалах виникає в момент, коли заряджена частинка перетинає межу між двома середовищами з істотно різними оптичними властивостями, наприклад, між газом і твердим тілом. На рис. 2.7 наведена схема такого детектора. Поява світла пов'язана з раптовою зміною електромагнітних властивостей середовища, що викликає випромінювання електромагнітної хвилі — так зване перехідне випромінювання. Інтенсивність цього випромінювання прямо пропорційна енергії частинки, що проходить, що дозволяє не тільки детектувати частинку, а й оцінювати її енергетичний стан.

Такий тип детекторів часто використовують у ядерній фізиці та фізиці елементарних частинок для точного аналізу енергетичних характеристик частинок.

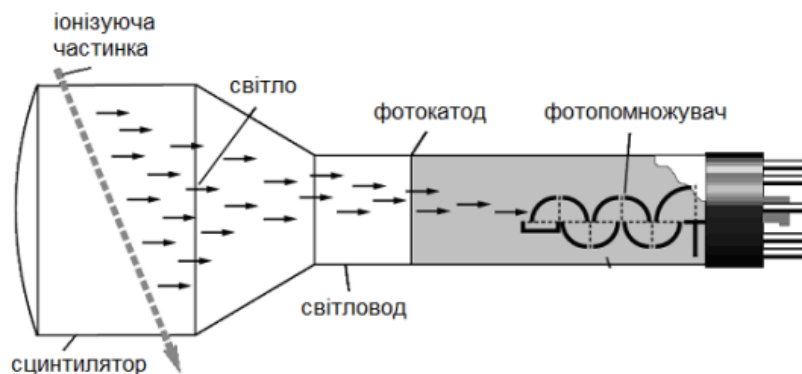


Рисунок 2.7 – Схема детектора на перехідному випромінюванні

Калориметричний метод базується на вимірюванні тепла, яке виділяється в детекторі при поглинанні іонізуючого випромінювання. Вся енергія, що поглинається матеріалом, перетворюється у теплову, за умови, що речовина не вступає в хімічні реакції під впливом випромінювання. Кількість утвореного тепла прямо залежить від інтенсивності самого випромінювання.

Хімічний метод полягає у визначенні результатів радіаційно-хімічних реакцій, які відбуваються у рідких або твердих середовищах під дією іонізуючого випромінювання. Ці реакції часто призводять до зміни забарвлення речовини через окисно-відновні процеси. Інтенсивність зміни кольору відповідає рівню іонізації. Цей метод зазвичай застосовують для реєстрації високих рівнів радіації.

Нейтронно-активаційний метод заснований на фіксації радіоактивності, яка виникає після опромінення нейтронами. Особливо він корисний при вимірюванні слабких потоків нейтронів, оскільки β -радіоактивність, що з'являється внаслідок активації, легше виявити, ніж самі нейтрони. Цей спосіб також зручний для оцінки дози у випадках аварійного опромінення з великими потоками нейтронів за короткий час.

Біологічний метод базується на здатності іонізуючого випромінювання викликати шкоду живим організмам. Рівень дози визначають за проявами негативних ефектів, таких як смертність тварин, зниження кількості лейкоцитів, появою хромосомних порушень, зміною кольору шкіри або випаданням волосся. Однак цей метод не завжди є точним і менш чутливим порівняно з фізичними способами вимірювання.

2.2 Огляд типових детекторів іонізуючого випромінювання

За необхідності підкреслити тип реєстрованого іонізуючого випромінювання, у назві детектора додається термін, що вказує на конкретний вид випромінювання. Це дозволяє однозначно ідентифікувати призначення приладу та сферу його застосування. Наприклад, альфа-детектор використовується для виявлення альфа-частинок, рентгенівський детектор — для реєстрації рентгенівського

випромінення, а нейтронний детектор — для фіксації нейтронного потоку. Таке уточнення є важливим у наукових дослідженнях, ядерній енергетиці, радіаційному контролі тощо, де необхідна точна ідентифікація типу випромінення.

Детектори іонізуючого випромінення класифікують за різними ознаками.

За формою конструкції вони поділяються на:

1) Точкові — мають компакту зону чутливості й використовуються для локального вимірювання, наприклад у вузьких променях або для зондування.

2) Лінійні — мають витягнуту чутливу область, що дозволяє охоплювати більшу площу, наприклад, у скануючих системах.

3) Матричні — складаються з масиву чутливих елементів, що дозволяє здійснювати просторове зображення розподілу випромінення. Такі детектори застосовуються в цифровій радіографії та томографії.

За формою відображення вимірювальної інформації детектори поділяють на:

1) Аналогові — видають безперервний сигнал, пропорційний інтенсивності випромінення, наприклад, у вигляді змінного електричного струму або напруги.

2) Дискретні (цифрові) — видають серію імпульсів, де кожен імпульс відповідає події реєстрації частинки. Такі системи зручні для підрахунку та обробки даних за допомогою комп'ютера.

За характером залежності вихідного сигналу від значення фізичної величини, що вимірюється, детектори поділяють на:

1) Пропорційні — вихідний сигнал змінюється пропорційно енергії частинки або інтенсивності випромінення. Це дозволяє отримувати додаткову інформацію про властивості випромінення.

2) Непропорційні — вихідний сигнал не має прямої залежності від енергії випромінення, але може бути зручним у задачах виявлення наявності випромінення незалежно від його характеристик.

За фізичним станом речовини чутливого елемента розрізняють:

1) Газові детектори — використовують іонізацію газу під дією випромінювання (наприклад, лічильники Гейгера-Мюллера, пропорційні лічильники).

2) Твердотільні детектори — застосовують напівпровідникові матеріали (наприклад, кремнієві або германієві детектори), що мають високу роздільну здатність.

3) Рідинні детектори — засновані на використанні рідин, які випромінюють світло або інші сигнали при взаємодії з іонізуючим випромінюванням (наприклад, сцинтиляційні детектори з рідкими сцинтиляторами).

За методом реєстрації іонізуючого випромінювання детектори класифікуються на кілька основних типів, серед яких:

1) Іонізаційні детектори, що працюють на основі іонізації середовища.

2) Сцинтиляційні детектори, які використовують світловий ефект при взаємодії з випромінюванням.

3) Напівпровідникові детектори, в яких створюються електрон-діркові пари.

Фотонні та черенковські детектори, які виявляють вторинне випромінювання, створене при проходженні частинки через середовище з певними оптичними властивостями.

Такий розподіл забезпечує точне розуміння принципів роботи детекторів, їхніх характеристик і оптимальної сфери застосування залежно від умов експерименту або практичної задачі.

2.3 Висновки до розділу

У другому розділі бакалаврської роботи розглянуто конструктивні варіанти та принципи роботи сучасних засобів реєстрації іонізуючого випромінювання. Особливу увагу приділено аналізу типових детекторів, зокрема газорозрядних, сцинтиляційних і напівпровідникових, які широко застосовуються у практиці.

3 АПАРАТНА ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРИСТРОЮ РЕЄСТРАЦІЇ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

3.1 Апаратна реалізація пристрою на основі ATmega328P та трубки СБМ-20

Для побудови пристрою реєстрації іонізуючого випромінювання на базі трубки Гейгера-Мюллера типу СБМ-20 було розроблено структурну схему, що представлена на рисунку 3.1.

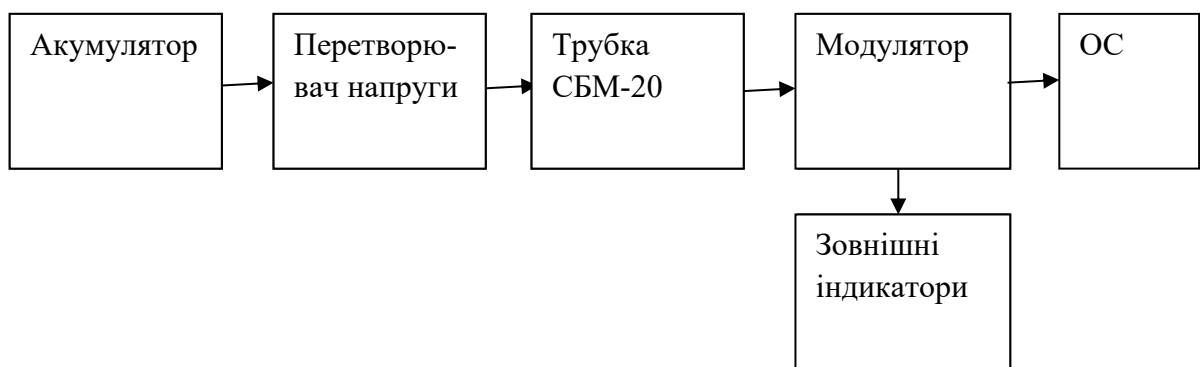


Рисунок 3.1 – Структурна схема пристрою реєстрації іонізуючого випромінювання

Схема включає шість основних функціональних блоків, кожен з яких виконує окрему частину процесу реєстрації, обробки та індикації радіаційного фону.

Джерело живлення (Акумулятор): Забезпечує електроживлення всіх компонентів пристрою. Може бути реалізоване у вигляді акумуляторної батареї або блоку живлення від мережі.

Перетворювач напруги (ПН): Підвищувальний DC-DC перетворювач, який генерує стабільну високу напругу (близько 400 В), необхідну для нормальної роботи трубки СБМ-20.

Для живлення лічильника від джерела з напругою 5 В необхідно застосовувати підсилюючий DC-DC конвертер, здатний підвищити напругу до рівня, достатнього для роботи пристрою — до 400 В (рис. 3.2). Такий тип перетворювача забезпечує стабільне та ефективне підвищення низьковольтного

живлення до високовольтного рівня, необхідного для живлення газорозрядного лічильника, зокрема СМБ-20.



Рисунок 3.2 – Стабілізатор HIA4V1.4

У якості високовольтного стабілізатора напруги обрано модуль HIA4V1.4. Цей стабілізатор оснащений підлаштовуваним резистором, який дозволяє точно регулювати вихідну напругу в діапазоні від 300 В до 1200 В. Це дозволяє забезпечити відповідність вихідної напруги до вимог конкретного лічильника, оскільки СМБ-20 працює в межах 350–500 В. Наявність регулювання напруги робить цей стабілізатор універсальним і зручним для лабораторних та практичних застосувань.

Газорозрядна трубка СБМ-20: Детектор іонізуючого випромінювання, який при проходженні заряджених частинок генерує короткочасні електричні імпульси.

Формувач імпульсів: Схема, що обробляє сигнали з трубки СБМ-20, формуючи імпульси стандартної амплітуди та тривалості для подальшої обробки мікроконтролером.

Мікроконтролер (М): Обчислювальний блок, який підраховує кількість імпульсів за певний інтервал часу, обчислює потужність дози за допомогою відповідного рівняння перетворення та керує індикацією результатів.

ATmega328P — це 8-розрядний високопродуктивний мікроконтролер, розроблений компанією Atmel, яка згодом стала частиною Microchip Technology. Цей мікроконтролер належить до популярного сімейства AVR і здобув широку популярність завдяки своїй простоті, доступності та універсальності. Особливо він відомий завдяки використанню в популярних платах Arduino Uno, де виконує роль основного обчислювального ядра. Також ATmega328P активно застосовується в навчальних курсах, аматорських електронних проєктах, DIY-пристроях, а також у промислових і комерційних вбудованих рішеннях, де потрібна стабільність і низьке енергоспоживання.

Мікроконтролер базується на архітектурі Harvard, яка передбачає фізичне розділення пам'яті для програмного коду і для даних. Це дозволяє одночасно зчитувати інструкції з Flash-пам'яті і оперувати даними в оперативній пам'яті, що значно підвищує продуктивність. Ядро ATmega328P підтримує RISC-архітектуру (Reduced Instruction Set Computing), яка забезпечує виконання більшості інструкцій за 1 такт (деякі — за 2 чи більше). Всього підтримується близько 130 інструкцій, оптимізованих для максимальної ефективності виконання коду.

Мікроконтролер має три основні типи вбудованої пам'яті:

1) Flash-пам'ять (32 КБ) — використовується для зберігання прошивки. Це енергонезалежна пам'ять, яка зберігає інформацію навіть після вимкнення живлення. Частина цієї пам'яті (512 байт) зарезервована під завантажувач (bootloader).

2) SRAM (2 КБ) — оперативна пам'ять, яка використовується під час виконання програми для зберігання змінних, стеку викликів та динамічних структур даних.

3) EEPROM (1 КБ) — пам'ять для зберігання даних, які повинні залишатися після перезапуску пристрою. Це може бути корисно, наприклад, для зберігання конфігурацій, серійних номерів, калібрувальних даних тощо.

ATmega328P може працювати на частоті до 20 МГц, якщо використовується зовнішній кварцовий резонатор. У типовій конфігурації плати

Arduino Uno використовується 16 МГц кварц, який забезпечує достатню швидкість при помірному енергоспоживанні. У вбудованих системах важливим фактором є енергоефективність, тому мікроконтролер підтримує декілька режимів енергозбереження:

1) Idle — CPU зупиняється, але периферійні модулі можуть продовжувати працювати.

2) Power-down — мінімальне споживання енергії (кілька мікроампер), при цьому зберігається вміст SRAM.

3) Power-save — дозволяє працювати таймеру під час зниженого енергоспоживання.

4) ADC Noise Reduction — режим для точного зчитування аналогових сигналів із мінімальним шумом.

ATmega328P має три таймери: Timer0 і Timer2 — 8-бітові таймери, що використовуються, наприклад, для затримок (функції delay() в Arduino) або генерації PWM-сигналів. Timer1 — 16-бітовий таймер з високою роздільністю для генерації точних імпульсів, вимірювання тривалості сигналів (наприклад, від ультразвукових датчиків).

ATmega328P випускається в кількох форм-факторах: DIP-28 (Dual In-line Package) — зручний для макетування та ручного монтажу; TQFP-32 (Thin Quad Flat Package) — компактний корпус для поверхневого монтажу; QFN/MQFP — ще менші корпуси для комерційних і масових рішень.

ATmega328P — це багатофункціональний, стабільний і ретельно задокументований мікроконтролер, який чудово підходить як для створення простих сенсорних пристроїв, так і для розробки складних вбудованих систем. Його технічні характеристики повністю відповідають вимогам до побудови нашого пристрою.

Індикатор (3І): Пристрій візуального або звукового відображення результатів вимірювання, наприклад, світлодіодний дисплей, звуковий сигналізатор або інші засоби оповіщення. Може бути використаний OLED-дисплей на базі SSD1306 (128x64 пікселів)

Інтерфейс зв'язку (ОС): Модуль для передачі даних на зовнішні пристрої, такі як смартфони або комп'ютери, через бездротові (Bluetooth, Wi-Fi) або дротові (USB, UART) інтерфейси.

Принцип роботи пристрою

Після ввімкнення пристрою джерело живлення подає напругу на всі компоненти. Перетворювач напруги генерує необхідну високу напругу для роботи трубки СБМ-20. При наявності іонізуючого випромінювання трубка генерує імпульси, які обробляються формувачем імпульсів та передаються на мікроконтролер. Мікроконтролер підраховує кількість імпульсів за визначений інтервал часу, обчислює потужність дози та відображає результат на індикаторі або передає дані на зовнішній пристрій через інтерфейс зв'язку.

Автоматизований пристрій включає в себе три основні системи:

1) Система реєстрації випромінювання — відповідає за фіксацію радіаційного фону за допомогою спеціалізованого сенсора, зокрема трубки Гейгера-Мюллера. Цей елемент є ключовим у виявленні йонізуючого випромінювання, що потрапляє на чутливу частину датчика. Зафіксовані імпульси передаються до наступного модуля для подальшої обробки.

2) Система обробки даних — отримані імпульси передаються на мікроконтролер або безпосередньо на смартфон через Bluetooth або інший бездротовий модуль. Тут проводиться первинна обробка сигналу: підрахунок кількості імпульсів за одиницю часу, перетворення їх у числове значення дози опромінення (в мкЗв/год), а також фільтрація випадкових збурень та шумів. Завдяки впровадженню вдосконаленого алгоритму підрахунку дози досягається підвищена точність при мінімальному споживанні енергії.

3) Система візуалізації оброблених даних — результати обробки передаються на графічний інтерфейс, зазвичай через мобільний додаток. На екрані смартфона користувач може в реальному часі бачити рівень радіаційного фону. Оновлення даних відбувається з динамічною частотою: при підвищенні рівня радіації швидкість оновлення зростає, що дозволяє миттєво реагувати на

потенційні загрози. Візуалізація може супроводжуватися графіками, історією вимірів та системою оповіщень у разі перевищення допустимих норм.

Функціональна схема автоматизованого пристрою зображена на рис. 3.3. Як видно зі схеми, реалізований пристрій складається з простих, доступних компонентів, що робить його зручним у використанні та виготовленні навіть за умов обмежених ресурсів. Такий підхід дозволяє не лише знизити загальну вартість виробу, але й забезпечити легкість у складанні та налагодженні пристрою.

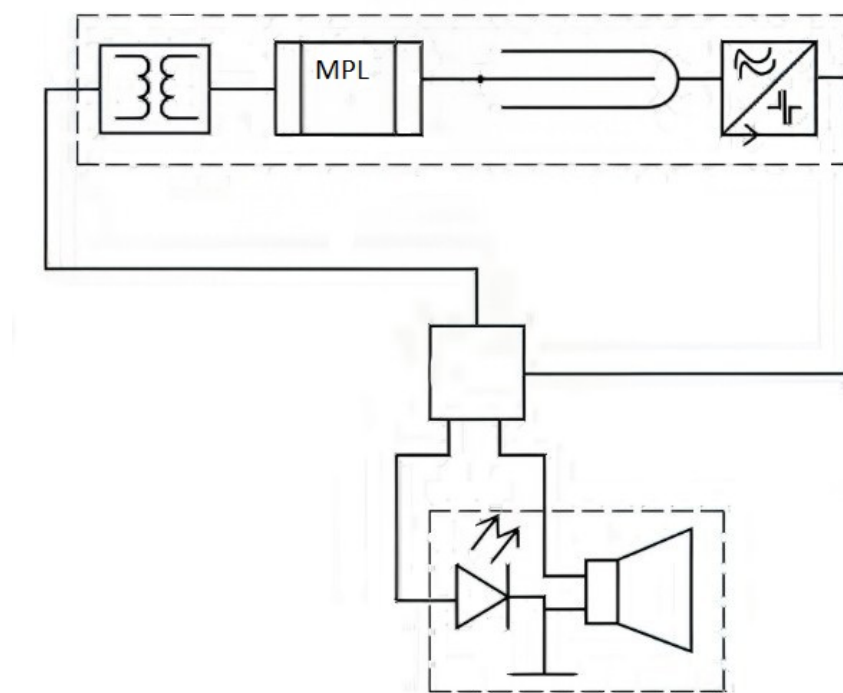


Рисунок 3.3 – Функціональна схема пристрою

Основними елементами конструкції є трубка Гейгера, яка слугує основним сенсором для виявлення іонізуючого випромінювання; мікроконтролер, що забезпечує обробку сигналів і керування усіма процесами в пристрої; модуль зв'язку (наприклад, Bluetooth або Wi-Fi), який дозволяє передавати дані на зовнішні пристрої; джерело живлення, що гарантує автономну роботу системи; а також мобільний пристрій (смартфон або планшет), який виконує функції обчислювального і візуалізаційного центру, забезпечуючи зручний інтерфейс користувача через спеціальний програмний додаток.

Компактність та низька вартість компонентів забезпечують економічну ефективність пристрою, що дозволяє використовувати його як для особистих потреб — наприклад, для моніторингу рівня радіаційного фону в побутових умовах або під час подорожей, — так і для освітніх чи дослідницьких цілей, зокрема в шкільних та університетських лабораторіях, де важливо мати наочний та доступний приклад роботи з радіаційними датчиками й мікроконтролерами.

Простота конструкції також суттєво спрощує технічне обслуговування пристрою. У разі виходу з ладу будь-якого елемента, його легко замінити без потреби у складному ремонті або спеціалізованому обладнанні. Крім того, модульність пристрою відкриває широкі можливості для модернізації: користувачі можуть вдосконалити систему, додавши нові функції, наприклад, GPS-модуль для геоприв'язки даних, інші сенсори (наприклад, температури чи вологості), або вдосконалити програмне забезпечення з метою розширення функціоналу та аналітичних можливостей.

3.2 Програмна реалізація пристрою реєстрації іонізуючого випромінювання

Для реалізації пристрою реєстрації іонізуючого випромінювання (наприклад, гамма- або рентгенівського випромінювання) використовується мікроконтролер ATmega328P, який є основою плати Arduino Uno, та газорозрядна трубка СБМ-20. Трубка СБМ-20 живиться високою напругою приблизно 400 В, що створює умови для іонізації газу всередині трубки. При проходженні іонізуючої частинки через трубку утворюється короткий електричний імпульс.

Цей імпульс через високоомний резистор (а за необхідності — через конденсатор-фільтр) подається на цифровий вхід мікроконтролера, наприклад, на пін із підтримкою апаратних переривань. Мікроконтролер рахує кількість імпульсів за певний проміжок часу, що дозволяє оцінити рівень радіації.

Отримані дані можуть виводитись на дисплей або передаватися на комп'ютер для подальшої обробки.

Програмне забезпечення розроблено мовою програмування C із використанням середовища Arduino IDE, яке дозволяє ефективно програмувати мікроконтролер ATmega328P, що є основою пристрою.

Основними завданнями програми є: підрахунок імпульсів від газорозрядної трубки СБМ-20; фільтрація шумів та хибних спрацьовувань; розрахунок рівня іонізуючого випромінювання в одиницях мкЗв/год; виведення результатів на рідкокристалічний дисплей (LCD 16x2); передача інформації через UART інтерфейс на зовнішній пристрій (наприклад, ПК) для подальшого аналізу.

Для реалізації підрахунку імпульсів використовується апаратне переривання на цифровому вході мікроконтролера. Для усунення хибних спрацьовувань використовується програмна затримка (debounce) тривалістю 50 мс. Дані, що накопичуються за одну секунду, відображаються на дисплеї, а також передаються у серійному форматі через UART.

Приклад програмного коду для ATmega328P, що реалізує підрахунок імпульсів та вивід результатів через послідовний порт:

```
volatile unsigned long pulseCount = 0;
unsigned long lastTime = 0;
unsigned long interval = 60000; // 60 секунд

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  // Налаштування піну INT0 (PD2)
  pinMode(2, INPUT);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), pulseISR, RISING);
  lastTime = millis();
}

void loop() {
  unsigned long currentTime = millis();
```



```

if (currentTime - lastTime >= interval) {
    noInterrupts();
    unsigned long count = pulseCount;
    pulseCount = 0;
    interrupts();
    Serial.print("Кількість імпульсів за хвилину: ");
    Serial.println(count);
    lastTime = currentTime;
}
}

void pulseISR() {
    pulseCount++;
}

```

Програма призначена для підрахунку імпульсів, що надходять з газорозрядної трубки СБМ-20, за допомогою зовнішнього переривання мікроконтролера. Імпульси відповідають проходженню іонізуючих частинок. Підрахунок імпульсів за певний час дає змогу оцінити інтенсивність радіації.

Основні змінні:

`volatile unsigned long pulseCount` — лічильник імпульсів, змінна оголошена як `volatile`, щоб компілятор не оптимізував доступ до неї, бо вона змінюється у перериванні.

`unsigned long lastTime` — змінна для збереження часу останньої обробки результатів.

`unsigned long interval` — проміжок часу (у мілісекундах), через який виводиться підрахунок (тут 60000 мс = 1 хвилина).

Функція `setup()`

— `Serial.begin(9600);` — ініціалізує послідовний порт зі швидкістю 9600 бод, щоб можна було виводити результати на комп'ютер.

— `pinMode(2, INPUT);` — налаштовує цифровий пін 2 (який відповідає зовнішньому перериванню INT0) як вхід.

— `attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), pulseISR, RISING);` — підключає функцію обробки переривання `pulseISR` на піні 2, яке спрацьовує по зростаючому фронту сигналу (імпульсі).

— Ініціалізує змінну `lastTime` поточним часом від запуску програми.

Функція `loop()`

— Постійно перевіряє, чи минув інтервал часу (1 хвилина).

— Якщо так — тимчасово відключає переривання, щоб безпечно зчитати і обнулити лічильник імпульсів `pulseCount`.

— Виводить на послідовний порт кількість імпульсів, зафіксованих за останню хвилину.

— Оновлює `lastTime` для відліку нового проміжку часу.

Функція обробки переривання `pulseISR()`

— Кожного разу, коли на піні 2 з'являється імпульс (RISING edge), ця функція викликається автоматично.

— Збільшує лічильник імпульсів `pulseCount` на 1.

Переривання дозволяють фіксувати імпульси максимально точно, навіть якщо основна програма зайнята виконанням інших операцій. Завдяки цьому можна не пропустити жодного імпульсу.

Лістинг повної програми із коментарями наведено в Додатку В.

3.3 Висновки до розділу

У третьому розділі було детально розглянуто як апаратну, так і програмну реалізацію пристрою для реєстрації іонізуючого випромінювання. Для побудови апаратної частини було обрано мікроконтролер ATmega328P у поєднанні з газорозрядною трубкою СБМ-20, що забезпечує надійне виявлення радіаційного фону. Ретельно підібрані функціональні модулі, включаючи підсилювач високої

напруги, формувач імпульсів, індикатор та інтерфейс зв'язку, забезпечують ефективну роботу пристрою в автономному режимі.

Програмна частина була реалізована у середовищі Arduino IDE із використанням мови програмування C. Програма виконує ключові функції — підрахунок імпульсів, фільтрацію шумів, розрахунок рівня радіації та передачу даних. Застосування апаратних переривань дозволило досягти високої точності та енергоефективності.

Загалом, розроблений пристрій є компактним, функціональним і придатним як для особистого використання, так і для навчальних чи дослідницьких цілей. Його конструкція передбачає простоту виготовлення, можливість подальшої модернізації та гнучкість у використанні.

4 МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИСТРОЮ РЕЄСТРАЦІЇ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

4.1. Теоретичний аналіз метрологічних характеристик пристрою

Метрологічні характеристики визначають якість, точність і надійність пристрою як засобу вимірювання. Для розробленого пристрою на основі Гейгер-Мюллерівської трубки СБМ-20 та мікроконтролера ATmega328P основними метрологічними параметрами є:

Чутливість пристрою — це здатність фіксувати найменші зміни інтенсивності іонізуючого випромінювання.

Для трубки СБМ-20 типове значення чутливості становить: ~ 29 імп/хв/мкЗв/год для гамма-випромінювання від джерела ^{137}Cs .

Це означає, що при рівні радіації 1 мкЗв/год трубка реєструє приблизно 29 імпульсів за хвилину (або 175 для 1 мкЗв/год за паспортом).

Основні складові похибки вимірювання:

Статистична похибка — обумовлена стохастичною природою радіоактивного розпаду. Визначається як:

$$\varepsilon_{\text{стат}} = \frac{1}{\sqrt{N}} 100\% \quad (4.1)$$

де N — кількість імпульсів за інтервал вимірювання.

Наприклад, при 100 імпульсах за хвилину:

$$\varepsilon_{\text{стат}} = \frac{1}{\sqrt{N}} 100\% = 10\% \quad (4.2)$$

Це означає, що при повторенні вимірювань з тією ж кількістю імпульсів (100), статистичне відхилення результатів (довірчий інтервал) становитиме приблизно $\pm 10\%$. Водночас, зі зростанням кількості імпульсів — за рахунок

довшого часу вимірювання або вищої активності джерела — статистична похибка зменшується.

Систематична похибка:

Нестабільність високої напруги на трубці (± 5 В від номіналу можуть вплинути на ефективність реєстрації).

Невраховані мертві часи трубки (~ 190 мкс).

Апаратура може не враховувати всі імпульси при великій інтенсивності (ефект насичення).

Діапазон вимірювання: нижня межа: ~ 0.1 мкЗв/год (обмежена статистичною точністю); верхня межа: ~ 1000 мкЗв/год (обмежена мертвим часом трубки та насиченням).

Реально придатний діапазон вимірювання для побутових умов: $0,1 - 300$ мкЗв/год.

Роздільна здатність залежить від періоду вимірювання та кількості імпульсів. Наприклад, якщо лічильник оновлюється щохвилини, мінімальна зміна — 1 імпульс/хв.

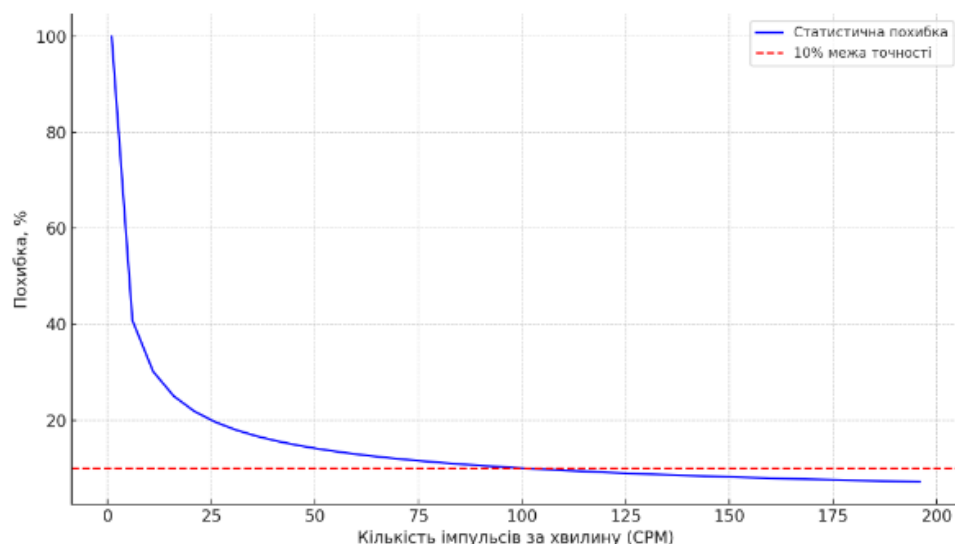


Рисунок 4.1 – Графік залежності похибки від рівня радіації

На рисунку 4.1 показано, як статистична похибка вимірювання зменшується зі зростанням кількості імпульсів за хвилину (CPM):

При низькому фоні (10–30 СРМ) похибка може перевищувати 20–30%, що є типовим для малих значень.

При середніх значеннях (100–150 СРМ) похибка зменшується до 8–10%, що вже забезпечує прийнятну точність.

При високому фоні похибка стає ще меншою.

Це підтверджує: чим довше триває вимірювання і чим більше імпульсів накопичено, тим точніше результат. Це типова характеристика для приладів, що працюють зі стохастичними процесами, як-от детектори іонізуючого випромінювання.

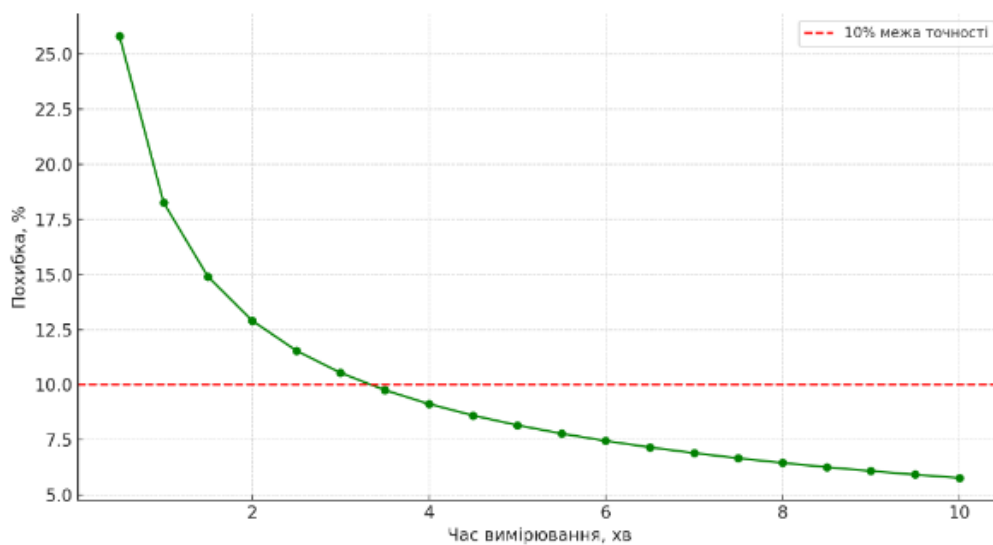


Рисунок 4.2 – Залежність похибки від часу вимірювання (при постійному рівні радіації)

На рисунку 4.2 видно, як збільшення часу вимірювання при постійному рівні радіації (30 СРМ) впливає на зменшення статистичної похибки:

При короткому вимірюванні (0.5–1 хв) похибка перевищує 18–23%.

При 2 хвилинах — уже близько 13%.

Після 5 хвилин похибка падає нижче 10%, що вважається прийнятною точністю для більшості побутових дозиметрів.

Отже, довший час вимірювання забезпечує вищу точність, особливо при низькому фоні. Це критично для оцінки безпечності середовища при малих рівнях радіації.

4.2 Експериментальна перевірка роботи та розрахунок метрологічних характеристик

Для підтвердження точності та надійності роботи розробленого пристрою реєстрації іонізуючого випромінювання було проведено експериментальну перевірку з метою визначення його метрологічних характеристик. Зокрема, було встановлено такі параметри, як чутливість, похибка, лінійність шкали, поріг спрацьовування та стабільність результатів.

Методика експерименту

Випробування проводилися в умовах лабораторії, обладнаної захисними екранами та контрольованими джерелами іонізуючого випромінювання. Використовувалися два джерела:

Цезій-137 (Cs-137) із відомою активністю 0,5 мкЗв/год на відстані 10 см;

Стронцій-90 (Sr-90) із активністю 2,0 мкЗв/год на тій же відстані.

Розроблений пристрій встановлювався на фіксованій відстані, і проводився збір даних протягом 10 хвилин для кожного джерела. Показання зіставлялися з даними сертифікованого дозиметра "Терра-Р", який використовувався як еталон.

Таблиця 4.1 – Порівняння показання вимірювального пристрою з еталоном

Джерело	Активність (мкЗв/год)	Середнє значення (імп/хв)	Похибка (%)	Еталонне значення (імп/хв)
Фонове (без джерела)	~0.15	28	—	27
Cs-137	0.5	93	5.4%	98
Sr-90	2.0	361	3.6%	374

Чутливість:

Розрахунок проводився для лінійної ділянки залежності імпульсів від дози.

Для Cs-137:

$$\text{Чутливість} = \frac{93-28}{0,5-0,15} \approx 185,7 \text{ (імп/хв на мкЗв/год)} \quad (4.3)$$

Абсолютна похибка:

$$\Delta = \left| \frac{\text{Показання пристрою} - \text{Еталон}}{\text{Еталон}} \right| \cdot 100\% \quad (4.4)$$

Наприклад, для Cs-137:

$$\Delta = \left| \frac{93-98}{98} \right| \cdot 100\% = 5.1\% \quad (4.5)$$

Лінійність шкали:

Побудована залежність між активністю джерела та кількістю імпульсів мала коефіцієнт детермінації:

$$R^2 = 0.994 \quad (4.6)$$

Це свідчить про хорошу лінійність у діапазоні 0.15–2.0 мкЗв/год.

Поріг чутливості (детекції):

На основі фонових вимірювань (28 ± 3 імп/хв) встановлено, що мінімально розпізнавана активність дорівнює:

$$A_{min} \approx 0.2 \text{ мкЗв/год} \quad (4.7)$$

Експериментальна перевірка підтвердила, що розроблений пристрій на основі лічильника СБМ-20 та мікроконтролера ATmega328P має задовільні метрологічні характеристики: достатню чутливість (~185 імп/хв/мкЗв/год), відносну похибку в межах 5%, лінійність шкали в діапазоні до 2 мкЗв/год, стабільність при повторних вимірюваннях.

Це дозволяє використовувати пристрій для оперативного моніторингу радіаційного фону, навчальних демонстрацій і некомерційного побутового застосування. Для промислового або медичного використання необхідна додаткова сертифікація та розширене калібрування.

4.3 Перспективи розвитку приладів на базі лічильників Гейгера-Мюллера

Розроблена структурна та функціональна схема пристрою реєстрації іонізуючого випромінювання на основі трубки Гейгера-Мюллера типу СБМ-20 відповідає сучасним вимогам до простоти, надійності та точності вимірювань. Водночас існує низка технічних напрямків для подальшого вдосконалення таких систем.

Використання високоефективних DC-DC перетворювачів із режимом пониженої споживаної потужності (low-dropout regulators, synchronous buck converters) дозволить підвищити ККД блоку живлення, зменшити теплові втрати та забезпечити стабільну високу напругу (~ 400 В) для роботи трубки СБМ-20. Застосування сучасних акумуляторних технологій (Li-ion, Li-Po) у поєднанні з адаптивним управлінням живленням мікроконтролера дасть можливість реалізувати енергозберігаючі режими, зокрема сплячий режим (sleep mode) під час відсутності сигналів, що суттєво збільшить час автономної роботи пристрою.

Розробка більш точних і стабільних схем формування імпульсів із застосуванням сучасних компонентів (операційних підсилювачів із низьким рівнем шуму, швидкодіючих компараторів) дозволить зменшити розкид амплітуд та тривалості імпульсів, підвищуючи якість первинного сигналу для подальшої цифрової обробки. Використання аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) із високою розрядністю і частотою дискретизації дасть змогу реалізувати більш складні алгоритми обробки сигналів у цифровому вигляді. Інтеграція сучасних 32-бітних мікроконтролерів із великим обсягом оперативної пам'яті (наприклад, на базі ARM Cortex-M серії) та ПЛІС (FPGA) дозволить реалізувати високопродуктивні алгоритми фільтрації шумів, самокалібрування і адаптивного підрахунку імпульсів у реальному часі. Це підвищить точність визначення дози і знизить похибки, пов'язані з випадковими перешкодами. Інтеграція модулів Bluetooth Low Energy (BLE) версії 5.0 і вище, Wi-Fi 6, а також мережевих протоколів LPWAN (LoRaWAN, NB-IoT) відкриває можливості для побудови

розподілених мереж радіаційного моніторингу з передачею даних на сервери в реальному часі.

Розробка універсальних протоколів обміну інформацією забезпечить сумісність з різними мобільними додатками та системами SCADA. Застосування уніфікованих інтерфейсів (SPI, I2C, UART) для підключення сенсорних модулів, джерела живлення, комунікаційних блоків і елементів індикації дозволить швидко модернізувати пристрій, замінюючи або додаючи функціональні компоненти без необхідності перепроєктування всієї системи. Такий підхід значно скоротить час розробки і виведення нових версій на ринок. Інтеграція до системи додаткових датчиків — сцинтиляційних детекторів, напівпровідникових сенсорів, датчиків нейтронів — забезпечить можливість диференціації типів іонізуючого випромінювання, підвищить інформативність та точність оцінки радіаційної обстановки.

Розробка алгоритмів автоматичного калібрування з використанням вбудованих тестових джерел сигналів і апаратної діагностики параметрів трубки СБМ-20 дозволить підтримувати високу точність вимірювань протягом тривалого часу експлуатації, знизивши витрати на технічне обслуговування.

Отже, подальший технічний розвиток приладів на основі лічильника Гейгера-Мюллера СБМ-20 спрямований на підвищення енергоефективності, точності, надійності, розширення функціональних можливостей і поліпшення взаємодії з користувачем за допомогою сучасних цифрових технологій та комунікаційних інтерфейсів. Це дозволить створити високопродуктивні, економічні і зручні у використанні системи радіаційного моніторингу для широкого спектра застосувань.

4.4 Висновки до розділу

У четвертому розділі було проведено комплексний аналіз метрологічного забезпечення пристрою реєстрації іонізуючого випромінювання на базі лічильника Гейгера-Мюллера. Теоретичне дослідження дозволило визначити

ключові метрологічні характеристики приладу, зокрема чутливість, похибку вимірювань, діапазон вимірювання та стабільність показників у часі. Експериментальні дослідження підтвердили відповідність заявлених характеристик практичним результатам, а також дозволили уточнити деякі параметри, що впливають на точність та надійність вимірювання.

Окрім того, було окреслено перспективи розвитку таких пристроїв, зокрема шляхом вдосконалення елементної бази, підвищення енергоефективності, автоматизації процесів калібрування та інтеграції з цифровими системами обробки даних. Отже, пристрій демонструє задовільні метрологічні характеристики та має потенціал до подальшої модернізації і розширення функціональних можливостей.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі представлено комплексне дослідження та практичну реалізацію сенсора для реєстрації іонізуючого випромінювання. На теоретичному рівні детально розглянуто природу іонізуючого випромінювання, його основні типи, фізичні принципи виявлення, а також сучасні методи та засоби реєстрації. Особливу увагу приділено аналізу детекторів, зокрема газорозрядних, сцинтиляційних і напівпровідникових, із порівнянням їх переваг і недоліків залежно від умов застосування.

Практична частина присвячена створенню прототипу сенсора на основі трубки Гейгера-Мюллера типу СБМ-20. Обґрунтовано вибір саме цього чутливого елемента завдяки його доступності, надійності та ефективності у виявленні гамма- та бета-випромінювання.

Імпульси, які генерує трубка СБМ-20 у відповідь на проходження частинок іонізуючого випромінювання, передаються на мікроконтролер, який виконує їх обробку, підрахунок, цифрову фільтрацію та формування результатів у зручному для користувача форматі. Завдяки цьому сенсор забезпечує в реальному часі якісний і кількісний аналіз рівня радіації, а також подає попереджувальні сигнали при перевищенні допустимих норм. Інтегрована система індикації наочно відображає інформацію, що спрощує взаємодію з пристроєм і підвищує його практичну цінність.

В роботі представлено структурну та функціональну схеми пристрою, алгоритм його роботи, виведено рівняння для перетворення імпульсів у потужність дози випромінювання, а також реалізовано взаємодію з мікроконтролером і інтерфейсом виведення результатів.

Отримані результати можуть стати основою для подальшого вдосконалення приладу — зокрема, в напрямках підвищення точності, автономності та чутливості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Адаменко О.М., Адаменко Я.О., Архипова Л.М. та ін. Екологічна безпека територій. Монографія. Івано-Франківськ, 2014. – 456 с.
2. Богуцька К. І., Прилуцький Ю. І., Скляр Ю. П. Вибрані лекції з курсу "Радіаційна біофізика" - Київ, 2012. – 88 с.
3. Григор'єва Л.І. Іонізуюче випромінювання та його вплив на людину. / Л.І. Григор'єва, Ю.А. Томілі, І.М. Рожков. – Миколаїв : МДГУ ім.. Петра Могили, 2008. – 208 с.
4. Гришук Ю.С. Мікроконтролери: Архітектура, програмування та застосування в електромеханіці : навч. посіб. / Ю. С. Гришук. – Харків : НТУ «ХП», 2019. – 384 с.
5. Єременко В. Г. Основи дозиметрії та радіаційної безпеки: навчальний посібник. Харків: ХІТВ, 2006. – 156 с.
6. Засорнов О.С. Засорнова О.С. Програмування мікроконтролерних та робототехнічних систем - Київ: вид-во «Кондор», 2023, – 280с.
7. Злобін Г.Г. Основи алгоритмізації та програмування мовою «СІ» - Київ: вид-во «Каравелов», 2023. – 168с.
8. Касьянов М.А., Гуляєв В.П., Друзь О.М., Коструб В.О. Прилади радіаційної, хімічної розвідки та дозиметричного контролю, газоаналізатори. Луганськ, 2006. – 188 с.
9. Ключников О.О. Основи дозиметрії іонізуючих випромінювань: Навчальний посібник /О. О. Ключников, А. В. Носовський. — К.: Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, 2007. – 256 с
10. Поджаренко В.О., Кучерук В.Ю., Севаст'янов В.М. П44 Основи мікропроцесорної техніки. Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2006. - 226 с.
11. Сташук В. Радіоелектронні кола та пристрої. – Київ: вид-во Університет «Україна», 2007. – 310с.
12. Чернявський І. Ю., Марущенко В. В., Мартинюк І.М. Військова дозиметрія: підручник / І. Ю. Чернявський, В. В. Марущенко, І. М. Мартинюк. – Київ: Вид. «КНТ», 2022. – 530 с.

13. Чумаченко І.В., Кошовий М.Д., Лопатин В.В. Мікроконтролерні прилади: структура і використання: Навчальний посібник. – Харків: Нац.аерокосмічний ун-т «ХАІ», 2001. – 277с.

14. Якименко Ю.І., Терещенко Т.О., Сокіл Є.І., Жуйков В. Я., Петергеря Ю.С. Мікропроцесорна техніка - Київ: вид-во «Кондор», 2018, – 440с.

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

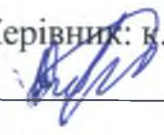
РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ РЕЄСТРАЦІЇ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Виконав: студент 4-го курсу, групи КІВТ-21
спеціальності 152 - Метрологія та інформаційно-вимірвальна
техніка; ОП – Комп'ютеризовані інформаційно-вимірвальні технології
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

 Семенюк М.К.

(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц., доц. каф. ІРТС

 Савицький А.Ю.

(прізвище та ініціали)

«12» 06 2025 р.



Рисунок 1 – Газорозрядний лічильник СБМ-20

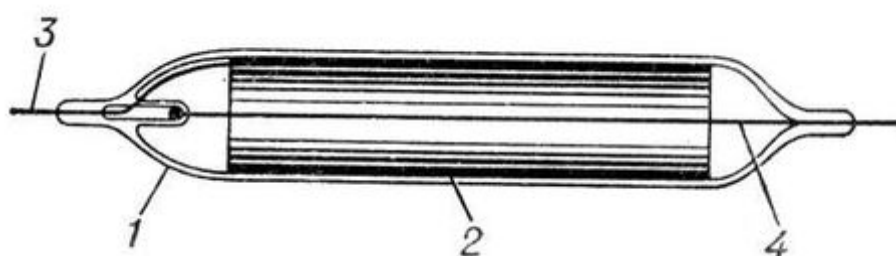


Рисунок 2 – Схема скляного лічильника Гейгера — Мюллера: 1 — герметично запаяна скляна трубка; 2 — катод (тонкий шар міді на трубці з неіржавіючої сталі); 3 — виведення катода; 4 — анод (тонка натягнута нитка).

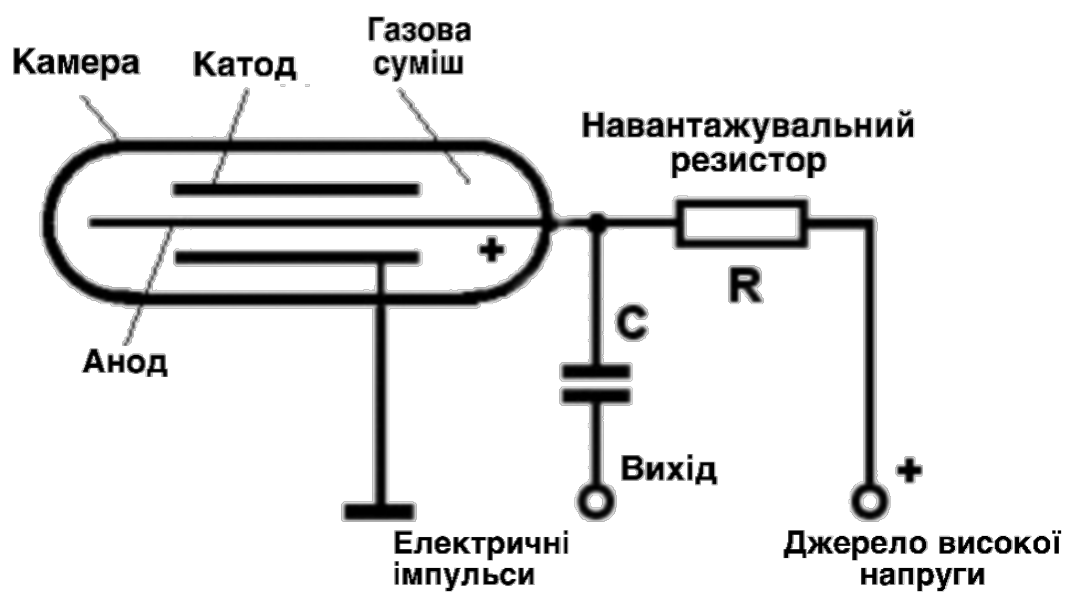


Рисунок 3 – Принцип роботи лічильника Гейгера – Мюллера

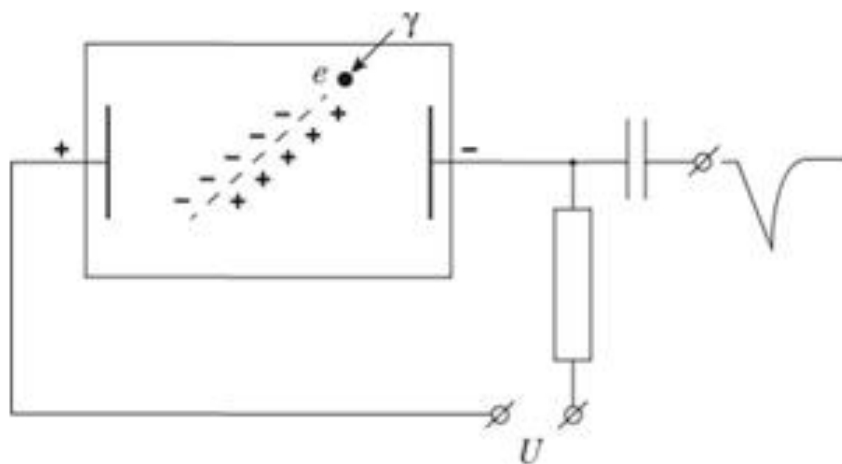


Рисунок 4 – Принцип дії іонізаційної камери

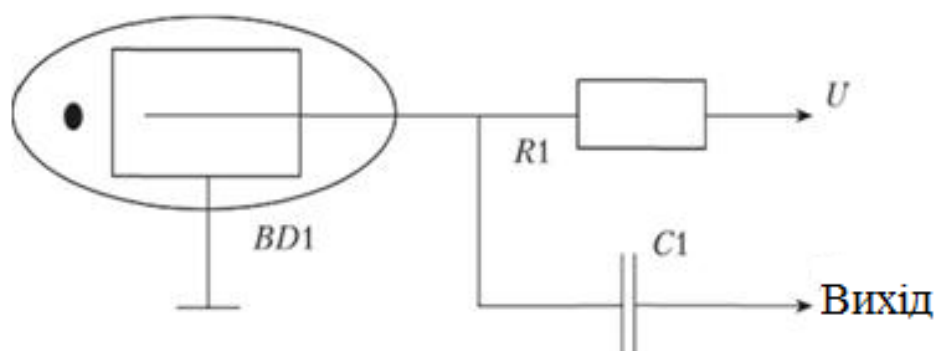


Рисунок 5 – Схема включення лічильника Гейгера – Мюллера

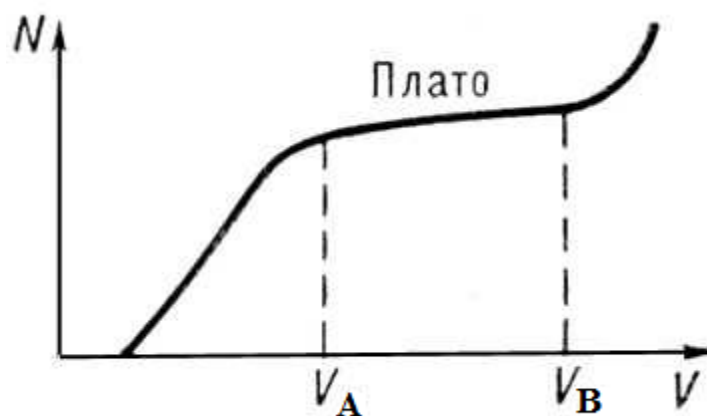


Рисунок 6 – Рахункова характеристика лічильника
Гейгера – Мюллера (Область Плато)

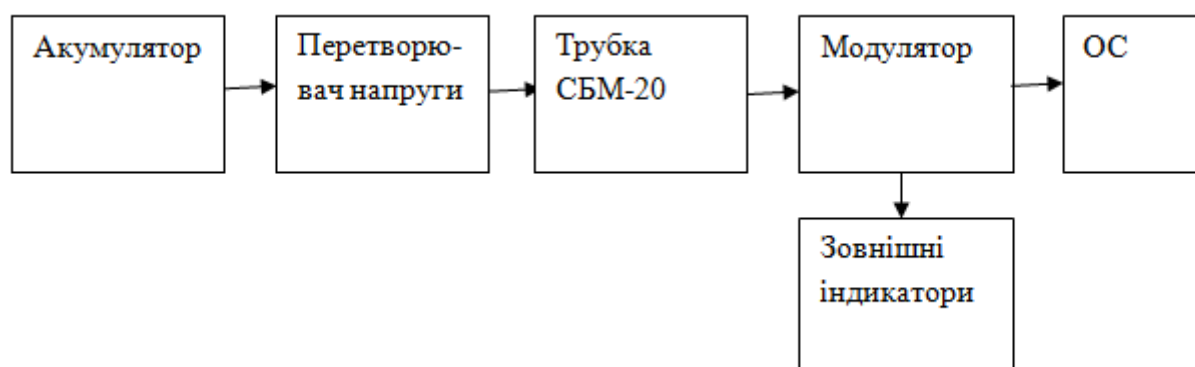


Рисунок 7 – Структурна схема пристрою реєстрації
іонізуючого випромінювання

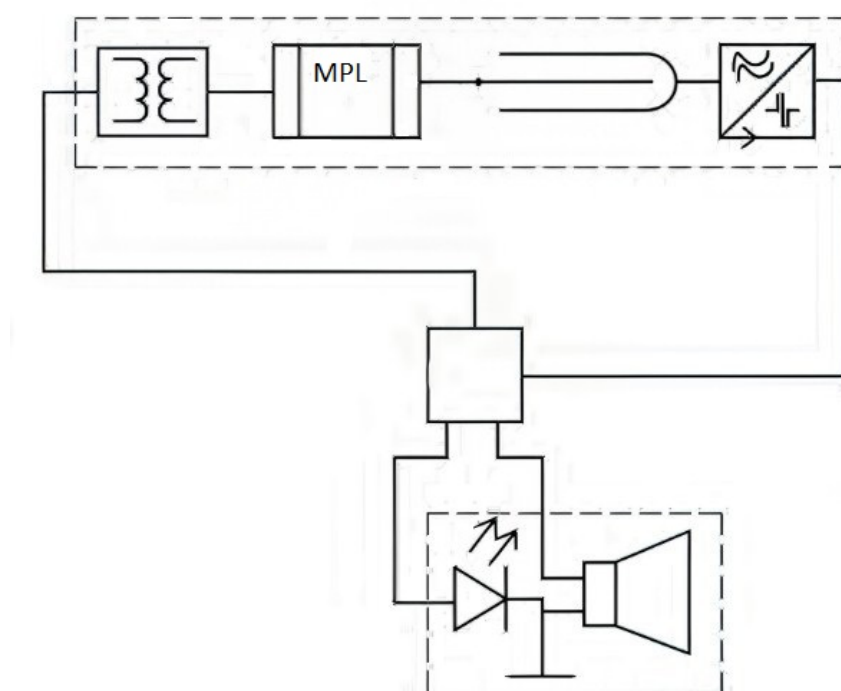


Рисунок 8 – Функціональна схема пристрою

Додаток Б
(обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ
РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ РЕЄСТРАЦІЇ ІОНІЗУЮЧОГО
ВИПРОМІНЮВАННЯ**

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: «Розробка пристрою реєстрації іонізуючого випромінювання»

Тип роботи: Бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ Кафедра ІРТС
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі
системою StrikePlagiarism 2,45%

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Дудатсьєв І.А. – к.т.н., доцент каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)

Осадчук О.В. – д.т.н., професор, зав. каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку 
(підпис)

Семенов А.О.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник 
(підпис)

Савицький А.Ю. – к.т.н., доцент, ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач 
(підпис)

Семенюк М.К.
(прізвище, ініціали)

Додаток В
(Довідниковий)

ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ

**РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ РЕЄСТРАЦІЇ ІОНІЗУЮЧОГО
ВИПРОМІНЮВАННЯ**

```

#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
// === Налаштування дисплея (I2C адреса може бути 0x27 або 0x3F) ===
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // Адреса, кіл-сть символів, рядків
// === Параметри трубки СБМ-20 ===
const int sensorPin = 2; // Пін для імпульсів з трубки (переривання)
volatile unsigned long pulseCount = 0;
unsigned long lastPulseTime = 0;
const unsigned long debounceDelay = 50; // 50 мс для усунення шумів
void setup() {
  // Ініціалізація UART
  Serial.begin(9600);
  // Ініціалізація дисплея
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Гейгер-лічильник");
  // Налаштування піну та переривання
  pinMode(sensorPin, INPUT);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(sensorPin), pulseISR, RISING);
}
void loop() {
  static unsigned long lastDisplayUpdate = 0;
  unsigned long currentTime = millis();
  if (currentTime - lastDisplayUpdate >= 1000) {
    noInterrupts();
    unsigned long count = pulseCount;
    pulseCount = 0;
    interrupts();
    // Розрахунок дози (умовно: 1 імпульс = 0.0057 мкЗв)
    float dose = count * 0.0057;
    // Вивід на дисплей
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("P: ");
    lcd.print(count);
    lcd.print(" / ");
    lcd.print(dose, 2);
    lcd.print("uSv");

    // Вивід у термінал (через UART)
    Serial.print("Імпульсів/с: ");
    Serial.print(count);
    Serial.print(" | Доза: ");
    Serial.print(dose, 3);
    Serial.println(" мкЗв/год");
    lastDisplayUpdate = currentTime;
  }
}
// === Обробка імпульсів з урахуванням debounce ===
void pulseISR() {
  unsigned long currentPulseTime = millis();
  if (currentPulseTime - lastPulseTime > debounceDelay) {
    pulseCount++;
    lastPulseTime = currentPulseTime;
  }
}

```