

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВНУТРІШНІХ СПРАВ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ УПРАВЛІННЯ, ПСИХОЛОГІЇ
ТА БЕЗПЕКИ**

Кафедра інформаційних технологій

**РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ РАДІАЦІЙНОГО
ФОНУ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ КОНТРАБАНДИ РАДІОАКТИВНИХ
МАТЕРІАЛІВ**

Кваліфікаційна робота
здобувача вищої освіти
4 курсу денної форми навчання
Назарій КАЛІТОВСЬКИЙ

Науковий керівник:
доцент, кандидат технічних наук
Андрій ГОЛОВАТИЙ

Рецензент:

вчене звання, науковий ступінь

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ рецензента)

Кваліфікаційна робота допущена до захисту
« ____ » _____ 2026 р., протокол № ____

Завідувач кафедри інформаційних технологій

(підпис) **Олег ЗАЧЕК**

Львів
2026

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

МК (мікроконтролер) — компактна мікросхема, призначена для керування електронними пристроями.

ЕК — принципова електрична схема системи.

АЗ та ПЗ — апаратна частина (залізо) та програмне наповнення (софт) відповідно.

СМРФ — система, що здійснює моніторинг радіаційного фону.

Вбудована система (ВС) — спеціалізована система керування, інтегрована безпосередньо в об'єкт контролю.

ЦП — цифровий пристрій для обробки дискретних сигналів.

САПР — комплекс програмних засобів для автоматизації процесів проектування.

Arduino Uno — обчислювальна платформа, що базується на 8-бітному мікроконтролері ATmega328.

Arduino IDE — спеціалізоване програмне середовище для розробки, компіляції та завантаження коду в контролери Arduino.

AVR — архітектура 8-розрядних МК, розроблена компанією Atmel.

FLASH-пам'ять — тип енергонезалежної пам'яті, що підтримує багаторазове електричне перепрограмування.

EEPROM — блок пам'яті для зберігання даних, які можна видаляти та записувати за допомогою електричних сигналів.

ПЗП (ROM) — пам'ять для постійного зберігання інформації, вміст якої залишається незмінним після вимкнення живлення.

ОЗП (RAM) — пам'ять із довільним доступом, що використовується для тимчасового зберігання даних під час роботи процесора.

АЦП (ADC) — пристрій, що трансформує вхідний аналоговий сигнал у цифровий код.

РКД (LCD) — екран на основі рідких кристалів для візуалізації текстової або графічної інформації.

АНОТАЦІЯ

Калітовський Н., Головатий А. (керівник). Розроблення системи моніторингу радіаційного фону для виявлення контрабанди радіоактивних матеріалів. Бакалаврська кваліфікаційна робота. – Львівський державний університет внутрішніх справ, Львів, 2026.

У кваліфікаційній роботі на підставі виконаного аналітичного огляду систематизовано існуючі методи та технічні засоби реєстрації радіоактивного фону. Для фіксації фактів нелегального переміщення радіоактивних матеріалів розроблено спеціалізовану систему радіаційного моніторингу (СМРФ). Пристрій реалізовано на базі поширених та доступних обчислювальних модулів сімейства Arduino, що виступають центральним вузлом збору й обробки даних.

Функціонал системи охоплює моніторинг потужності еквівалентної дози радіації та реєстрацію сумарної поглинутої дози за період спостереження. Інформаційне сполучення з ПК реалізовано за допомогою послідовного порту, куди систематично надходять результати вимірювань. Для оперативного реагування на радіаційну небезпеку інтегровано вузол сигналізації, який спрацьовує при перевищенні критичного рівня потужності дози.

Для оперативного моніторингу результати вимірювань дублюються на рідкокристалічному дисплеї пристрою. Ключова особливість СМРФ полягає в оптимальному співвідношенні економічної доступності та багатозадачності. Універсальність живлення дозволяє приладу функціонувати як стаціонарно, так і в польових умовах від акумулятора. Високий рівень надійності забезпечується підсистемою самодіагностики, яка безперервно контролює рівень заряду батареї та миттєво реагує на перевищення лімітів радіаційного випромінювання.

Ключові слова: система, реєстрація радіоактивного фону, сенсор Гейгера-Мюллера, обчислювальний модуль Arduino UNO, МК ATmega328P, пакет комп'ютерного проектування Proteus Design Suite, мова програмування C/C++, вбудоване ПЗ, середовище програмування МК Arduino IDE.

ABSTRACT

Kalitovskyy N., Holovatyy A. (supervisor). Development of a radiation background monitoring system to detect smuggling of radioactive materials. Bachelor's thesis. – Lviv State University of Internal Affairs, Lviv, 2026.

In the qualification work, based on the analytical review, existing methods and technical means of registering radioactive background were systematized. A specialized radiation monitoring system was developed to record the facts of illegal movement of radioactive materials.

The device is implemented based on common and affordable computing modules of the Arduino family, which act as a central node for data collection and processing.

The system functionality includes monitoring the equivalent dose rate of radiation and recording the total absorbed dose for the observation period. Information communication with the PC is implemented using a serial port, where measurement results are systematically received. For prompt response to radiation hazards, an alarm unit is integrated, which is triggered when the critical dose rate level is exceeded.

For operational monitoring, the measurement results are duplicated on the device's liquid crystal display. The key feature of the radiation monitoring system is the optimal ratio of economic availability and multitasking. The versatility of the power supply allows the device to function both stationary and in field conditions from the battery. A high level of reliability is provided by the self-diagnostics subsystem, which continuously monitors the battery charge level and instantly responds to exceeding the radiation emission limits.

Keywords: system, radioactive background registration, Geiger-Muller sensor, Arduino UNO computing module, ATmega328P microcontroller, Proteus Design Suite computer design package, C/C++ programming language, embedded software, Arduino IDE programming environment.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМНОЇ ОБЛАСТІ.....	9
1.1. Вимірювання радіоактивного випромінювання.....	9
1.2. Огляд концепцій щодо розробки систем радіаційного контролю.....	28
РОЗДІЛ 2. ЗАСОБИ РОЗРОБКИ АПАРАТНОГО ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ РАДІАЦІЙНОГО ФОНУ.....	40
2.1. Система автоматизованого проектування і моделювання програмованих пристроїв Proteus VSM.....	40
2.2. Програмний інструментарій Arduino IDE для проектування та налагодження пристроїв на базі мікроконтролерів сімейства Arduino.....	42
РОЗДІЛ 3. АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ РАДІАЦІЙНОГО ФОНУ.....	49
3.1. Формування елементної бази системи виявлення радіоактивної контрабанди та моніторингу фонових випромінювань.....	49
3.2. Проектування системи моніторингу радіаційного фону для виявлення контрабанди радіоактивних матеріалів.....	64
РОЗДІЛ 4. ПРОГРАМНО-АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ РАДІАЦІЙНОГО ФОНУ.....	72
4.1. Алгоритмічне забезпечення системи моніторингу радіаційного фону.....	72
4.2. Розробка програмного модуля керування високовольтним живленням лічильника Гейгера.....	74
4.3. Програмне втілення керуючої логіки системи моніторингу радіаційного фону.....	75
ВИСНОВКИ.....	81
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	83
ДОДАТКИ.....	85

ВСТУП

Сучасний розвиток мікроконтролерної техніки та цифрових сенсорів відкриває широкі можливості для розробки бюджетних автоматизованих комплексів вимірювання та управління. Одним із перспективних напрямків застосування таких технологій є створення системи для контролю радіаційної обстановки, що дозволяють ефективно фіксувати нелегальне переміщення радіоактивних речовин.

Мета роботи полягає у розробці апаратного комплексу та відповідного мікропрограмного забезпечення для інформаційно-вимірювальної системи контролю радіаційного стану. Пристрій призначений для реєстрації рівнів випромінювання, інтелектуального аналізу отриманих даних та автоматичного керування виконавчими механізмами оповіщення згідно із заданим алгоритмом. Візуалізація результатів вимірювань та службової інформації реалізована за допомогою символьного рідкокристалічного індикатора.

Система радіаційного контролю, призначена для детектування незаконного переміщення радіоактивних речовин, характеризується універсальністю експлуатації. Її конструктивні особливості дозволяють проводити моніторинг як на стаціонарних об'єктах (пункти пропуску, склади), так і в мобільному режимі під час виїзних перевірок.

В основу апаратної частини системи моніторингу радіаційної безпеки покладено мікроконтролер архітектури AVR від компанії Atmel. Вибір платформи Arduino зумовлений її гнучкістю та наявністю необхідних інструментів для реалізації алгоритмів детектування незаконного переміщення радіоактивних компонентів.

Сучасне приладобудування базується на використанні мікроконтролерів (МК) як центральних керуючих елементів. З позиції розробника, ключова перевага МК полягає в оптимізації процесу реалізації складних алгоритмів, що значно знижує собівартість кінцевого виробу. Завдяки високому рівню

інтеграції периферійних модулів безпосередньо на кристалі, МК забезпечують ефективну взаємодію з зовнішніми пристроями та виконання обчислень при мінімальній кількості додаткових компонентів. Такий підхід сприяє мініатюризації пристроїв та підвищенню їхньої енергоефективності.

Метою роботи є підвищення ефективності контролю за переміщенням радіоактивних матеріалів шляхом розроблення мікроконтролерної системи моніторингу радіаційного фону на платформі Arduino з використанням датчика СБМ-20, створення її схемотехнічної моделі у САПР Proteus VSM та програмування алгоритмів виявлення аномальних стрибків випромінювання.

Для реалізації поставленої мети визначено такі **завдання**:

- спроектувати в Proteus ISIS A3 системи моніторингу радіаційного фону на базі платформи Arduino Uno, газорозрядного лічильника СБМ-20 та символьного дисплея WH1602B.
- розробити алгоритм функціонування системи для оперативного виявлення перевищення допустимого рівня радіації:
- створити драйвери і програмні модулі для підрахунку імпульсів з детектора Гейгера-Мюллера та виведення даних на рідкокристалічний екран (LCD 16x2).
- написати та відлагодити прошивку МК в Arduino IDE згідно з розробленим алгоритмом.
- провести комплексну симуляцію роботи системи моніторингу радіаційного фону в Proteus для перевірки коректності її роботи.

Об'єкт дослідження – процес моніторингу радіаційного фону та виявлення несанкціонованого переміщення (контрабанди) радіоактивних матеріалів.

Предмет дослідження – методи, алгоритми та програмно-апаратні засоби побудови системи моніторингу радіаційного фону для оперативного виявлення джерел іонізуючого випромінювання.

Методи досліджень. Для досягнення поставленої мети використано комплекс наукових та інженерних методів: аналіз науково-технічної

літератури та технічної документації компонентів (СБМ-20, АТmega328P, WH1602B); методи математичної статистики для обробки випадкових сигналів детектора; методи алгоритмізації для побудови логіки виявлення радіоактивних матеріалів; методи обробки апаратних переривань мікроконтролера в середовищі Arduino IDE для точної реєстрації іонізуючих частинок; а також методи схемотехнічного та імітаційного моделювання у САПР Proteus VSM для віртуальної верифікації роботи програмно-апаратного комплексу та аналізу отриманих результатів.

Структура роботи. Кваліфікаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Обсяг основного тексту роботи складає 81 сторінка, 36 рисунків, 13 таблиць, 1 додаток і 22 бібліографічних джерела. Загальний обсяг роботи – 88 сторінок.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПРОБЛЕМНОЇ ОБЛАСТІ

1.1. Вимірювання радіоактивного випромінювання

На сьогодні питання забезпечення радіаційної безпеки та запобігання незаконному обігу небезпечних речовин є критично важливим для національної безпеки. Створення ефективних засобів моніторингу дозволяє оперативно детектувати спроби контрабанди радіоактивних матеріалів, що є пріоритетним завданням для прикордонних та митних служб у контексті протидії ядерному тероризму.

Вільний доступ до побутових та професійних засобів дозиметричного контролю дозволив значно підвищити рівень індивідуальної радіаційної безпеки населення. Наявність сучасних радіометрів на споживчому ринку сприяє кращій обізнаності громадян щодо стану навколишнього середовища.

Вплив іонізуючого випромінювання на організм людини часто має латентний характер, а його деструктивні наслідки можуть виявитися через тривалий час. Віддалені ефекти опромінення нерідко проявляються через десятиліття або навіть у наступних поколіннях у формі злоякісних новоутворень та генетичних аномалій. Підтвердженням цього є історичні дані про довготривалий вплив ядерних вибухів на населення японських міст.

Критичне підвищення рівня радіаційного опромінення спричиняє в організмі людини незворотні патологічні зміни, що можуть призвести до летального результату протягом кількох годин або діб. У разі фіксації небезпечних показників випромінювання критично важливим є невідкладне встановлення локалізації джерела іонізуючих частинок. Для вирішення цього завдання необхідне використання радіометричних та дозиметричних приладів контролю.

Іонізуюче випромінювання являє собою потік часток або електромагнітних хвиль, взаємодія яких із речовиною призводить до її іонізації. До основних складових цього явища належить космічне

випромінювання, тоді як земними джерелами природного походження є радіоактивні ізотопи, рівномірно розподілені в різних шарах геосфери.

До техногенно-підсилених джерел іонізуючого випромінювання, згідно з положеннями НРБУ-97 та ОСПУ-2005, відносять ядерні енергетичні установки, штучно синтезовані ізотопи, а також медичне та промислове рентгенівське устаткування. Окрему категорію становлять наслідки випробувань ядерної зброї, що зумовлюють появу додаткового радіаційного навантаження на довкілля.

Іонізуючим вважається будь-який вид випромінювання, енергія якого при взаємодії з речовиною спричиняє появу різноіменних електричних зарядів. Основними джерелами такого впливу є радіонукліди, що випускають альфа- та бета-частинки, гамма-кванти або нейтронне випромінювання. Крім того, до цієї категорії належать технічні пристрої та спецобладнання (зокрема, рентгенівські установки або електронно-променеві прилади), принцип роботи яких пов'язаний із генеруванням іонізуючих потоків.

Області застосування джерел іонізуючого випромінювання охоплюють широкий спектр напрямків людської діяльності. Зокрема, у промисловості їх використовують для проведення неруйнівного контролю (дефектоскопії) металевих конструкцій, перевірки цілісності зварних швів, а також для автоматизації складних технологічних процесів. Окрім цього, радіаційні методи є ефективними при вимірюванні рівнів агресивних речовин та нейтралізації статичного заряду в промислових умовах.

Радіоактивністю називають природний процес спонтанного розпаду нестабільних ядер певних хімічних ізотопів (наприклад, каліфорнію, радію, урану чи торію). Ця трансформація неминуче веде до перебудови структури ядра, що відображається у зміні його порядкового номера в періодичній системі та загальної маси. Хімічні елементи, яким притаманні такі властивості, класифікуються як радіоактивні.

Кожна радіоактивна речовина має фіксовану швидкість деінтеграції, основним показником якої є період напіврозпаду. Цей термін позначає

проміжок часу, необхідний для того, щоб кількість активних ядер зменшилася вдвічі від початкового рівня. Важливою особливістю радіоактивного розпаду є його абсолютна автономність: жодні зовнішні чинники чи фізичні впливи не здатні сповільнити або активізувати цей процес.

Під час експерименту з радієм, розміщеним у свинцевому контейнері з вузьким отвором, було встановлено, що вихідний потік частинок під впливом магнітного поля розщеплюється на три складові. Потік, що відхиляється в напрямку північного магнітного полюса, ідентифікується як α – випромінювання, тоді як відхилення до південного полюса властиве β – випромінюванню. Траєкторія γ – випромінювання залишається незмінною через відсутність у нього електричного заряду.

α -випромінювання являє собою потік позитивно заряджених ядер гелію, швидкість руху яких становить приблизно 20,000 км/с. На відміну від них, β -випромінювання складається з негативно заряджених електронів, що переміщуються зі швидкостями, близькими до світлової. Найвищу енергію має γ -випромінювання – короткохвильовий електромагнітний потік, який за своїми характеристиками подібний до рентгенівського, проте значно переважає його за інтенсивністю та енергетичним потенціалом, поширюючись зі швидкістю світла.

Серед комплексу характеристик іонізуючих випромінювань ключове значення мають дві: висока проникна здатність крізь речовини різної щільності, а також деструктивний вплив на повітряне середовище та біологічні структури шляхом їх іонізації. Саме ці властивості визначають специфіку взаємодії випромінювання з матерією та потребують детального вивчення.

Під час проходження крізь матеріальне середовище іонізуюче випромінювання вступає у взаємодію з атомно-молекулярною структурою речовини. Цей процес супроводжується передачею енергії, що спричиняє збудження атомів або призводить до відриву електронів від їхніх оболонок, перетворюючи нейтральні атоми на заряджені іони.

Внаслідок втрати одного або кількох електронів нейтральний атом трансформується у позитивно заряджений іон, що класифікується як первинна іонізація. Електрони, вивільнені під час цього акту взаємодії, володіють певним запасом кінетичної енергії. Це дозволяє їм повторно взаємодіяти з іншими атомами середовища, ініціюючи утворення додаткових іонів – процес, відомий як вторинна іонізація.

Частинки, які внаслідок чисельних актів взаємодії вичерпали свій енергетичний потенціал, переходять у вільний стан або захоплюються нейтральними атомами середовища (зокрема в газових сумішах), що призводить до формування негативних іонів. Отже, основна частка енергії випромінювання під час експансії крізь матерію поглинається саме через процеси іонізації речовини.

Кількість іонних пар, що виникають під дією іонізуючого випромінювання на одиниці довжини його вільного пробігу в середовищі, визначається як питома іонізація. Водночас показник енергії, яку в середньому витрачає випромінювання для генерації однієї такої пари, називають середньою роботою іонізації.

Під час руху в речовині заряджена частинка поступово розсіює власну кінетичну енергію. На певній ділянці траєкторії її швидкість сповільнюється до рівня теплових коливань навколишніх атомів та молекул. Повний шлях, який долає частинка від моменту виникнення до точки повної втрати надлишкової енергії, визначається як довжина пробігу.

Під природною радіоактивністю розуміють процес спонтанної трансформації нестабільних атомних ядер у ядра інших елементів. Цей розпад супроводжується генеруванням іонізуючого випромінювання у формі α -частинок, β -частинок, а також високоенергетичного γ -випромінювання.

Процес α -розпаду полягає у трансформації материнського ядра, внаслідок якої його масове число A зменшується на чотири одиниці. Ця ядерна реакція супроводжується емісією α -частинок, котрі за своєю фізичною природою є ядрами гелію (${}^4_2\text{He}$).

Процес β -радіоактивності зумовлює зміну зарядового числа ядра Z на одну одиницю (у бік збільшення $Z+1$ або зменшення $Z-1$). Таке перетворення супроводжується емісією електронів чи позитронних частинок (β -випромінюванням), або ж відбувається шляхом електронного захвату (E -захват), коли ядро поглинає електрон із внутрішньої оболонки атома.

Процеси β -дезінтеграції нерідко супроводжуються емісією γ -випромінювання. Воно являє собою потік високоенергетичних фотонів (жорстке електромагнітне випромінювання), довжина хвилі яких перебуває в діапазоні від 10^{-9} до 10^{-11} см.

Доза випромінювання. Характер, інтенсивність та клінічна форма радіаційних уражень біологічних систем внаслідок дії іонізуючого випромінювання визначаються передусім обсягом поглиненої енергії. Саме цей енергетичний показник є вирішальним фактором у розвитку патологічних змін на організмовому рівні.

Для кількісної оцінки цього процесу впроваджено термін «поглинена доза», що визначає кількість енергії, поглиненої одиницею маси опромінюваного матеріалу. Згідно з міжнародною системою одиниць, за еталон поглиненої дози прийнято Грей (Гр). Один Грей відповідає передачі 1 Джоуля енергії будь-якого виду іонізуючого випромінювання масі речовини в 1 кілограм ($1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$).

У галузях радіобіології та радіаційної гігієни поряд із системними одиницями часто використовується позасистемна одиниця поглиненої дози – рад. Під цією величиною розуміють таку кількість поглиненої енергії, що становить 100 ерг на 1 г будь-якого опромінюваного матеріалу, незалежно від характеристик випромінювання. Для зручності розрахунків застосовуються також часткові одиниці: мілірад (10^{-3}) та мікрорад (10^{-6} рад).

Відповідно до міжнародної системи СІ, основною одиницею поглиненої дози є Грей (Гр). Фізично 1 Гр визначається як поглинання енергії в 1 Дж масою речовини у 1 кг. Співвідношення між системною та позасистемною одиницями описується рівністю $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг} = 100 \text{ рад}$ (Табл. 1.1).

Таблиця 1.1. Співвідношення системних та позасистемних одиниць
дозиметричних величин

Співвідношення між одиницями вимірювання					
Величина	Назва, позначення і визначення				Співвідношення між одиницями
	Одиниця СІ		Позасистемна одиниця		
Активність	Бк	Бекерель, дорівнює одному розпаду в секунду (розп./с)	Ки	Кюрі, дорівнює $3,7 \cdot 10^{10}$ розпадів у секунду	$1\text{Бк}=1\text{ розп./с}=2,703 \cdot 10^{11}\text{ Ки.}$ $1\text{Ки}=3,7 \cdot 10^{10}\text{ розп./с}=3,7 \cdot 10^{10}\text{ Бк}$

Величина	Назва, позначення і визначення				Співвідношення між одиницями
	Одиниця СІ		Позасистемна одиниця		
Поглинена доза	Гр	Грей - поглинена доза ви промін., що відповідає енергії 1 Дж іонізуючого випромінювання будь-якого виду, переданого опроміненій речовині масою 1 кг	рад	Рад відповідає поглиненій енергії 100 ерг на 1 г речовини	$1\text{Гр}=1\text{Дж/кг}=10^7\text{ ерг/г}=100\text{рад}$ $1\text{рад}=100\text{ ерг/г}=1 \cdot 10^{-2}\text{ Дж/кг}=1 \cdot 10^{-2}\text{ Гр}$ $=1 \cdot 10^{-2}\text{ Гр}=1\text{ сГр}$
Експозиційна доза	Кл/кг	Кулон на кілограм - експозиційна доза фотонного ви промін., при якій корпускулярна емісія в сухому атмосферному повітрі масою 1 кг виробляє іони, що несуть заряд кожного знака, рівний 1 Кл	Р	Рентген - доза фотонного випромінювання, при якій корпускулярна емісія, що виникла в 1 см ³ повітря, створює іони, що несуть 1 СГСЕ кількості електрики кожного знака	$1\text{ Кл/кг}=3,88 \cdot 10^3\text{ Р}$ $1\text{ Р}=2,58 \cdot 10^{-4}\text{ Кл/кг}$
Еквівалентна доза	Зв	Зиверт - еквівалентна доза будь-якого виду випромінювання, поглинена в 1 кг біологічної тканині, що створює такий же біологічний ефект, як і поглинена доза в 1 Гр фотонного випромінювання	бер	Бер - енергія будь-якого виду випромінювання, поглинена в 1 г тканині, при якій спостерігається той же біологічний ефект, що і при поглиненій дозі в 1 рад фотонного випромінювання	$1\text{Зв}=1\text{Гр/К}=(\text{Дж/кг})/\text{К}=100\text{ рад/К}=100\text{ бер}$ $1\text{ бер}=1\text{ рад/К}=(1 \cdot 10^{-2}\text{ Дж/кг})/\text{К}=(1 \cdot 10^{-2}\text{ Гр})/\text{К}=1 \cdot 10^{-2}\text{ Зв}=1\text{ сЗв}$

Величина	Назва, позначення і визначення				Співвідношення між одиницями
	Одиниця СІ		Позасистемна одиниця		
Керма	Гр	Грей дорівнює кермі, при якій сумарна кінетична енергія заряджених часток, звільнених у 1 кг речовини в поле побічно іонізуючого випромінювання, дорівнює 1 Дж	рад	Керма - кінетична енергія в радах, передана зарядженим часткам, утвореним іонізуючим випромінюванням в одиниці маси середовища, що опромінюється	$1\text{Гр}=1\text{Дж/кг}=10^8\text{ерг/г}=100\text{ рад}$ $1\text{ рад}=100\text{ ерг/г}=1\cdot 10^{-2}\text{Дж/кг}=1\cdot 10^{-2}\text{Гр}=1\text{ сГр}$
Потужність поглиненої дози	Гр/с	Грей у секунду, дорівнює одному джоулю на кілограм у секунду	рад/с	Рад у секунду	$1\text{гр/с}=1\text{Дж/(кг}\cdot\text{с)}=1\cdot 10^2\text{рад/с}$ $1\text{рад/с}=1\cdot 10^{-2}\text{Дж/(кг}\cdot\text{с)}=1\cdot 10^{-2}\text{Гр/с}=1\text{ сГр/с}$
Потужність експозиційної дози	Кл/(кг·с)	Кулон на кілограм на секунду	Р/с	Рентген у секунду	$1\text{ Кл/(кг}\cdot\text{с)}=3,88\cdot 10^{-3}\text{ Р/с}$ $1\text{Р/с}=2,58\cdot 10^{-4}\text{Кл/(кг}\cdot\text{с)}$
Потужність еквівалентної дози	Зв/с	Зиверт у секунду	бер/с	Бер у секунду	$1\text{Зв/с}=100\text{ бер/с}$; $1\text{ бер/с}=1\cdot 10^{-2}\text{ Зв/с}=1\text{ сЗв/с}$
Гама постійна	$\text{аКл}\cdot\text{м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с}\cdot\text{Бк})$	Гама - постійна G_a радіонукліда - потужність експозиційної дози в повітрі, створеної радіонуклідом активністю 1 Бк на відстані 1 м без початкової фільтрації	$\text{Р}\cdot\text{см}^2/(\text{год}\cdot\text{мКі})$	Гама - постійна G радіонукліда - потужність експозиційної дози, Р/год, створюваної радіонуклідом активністю 1 мКі на відстані 1 см без початкової фільтрації	$G_a, \text{аКл}\cdot\text{м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с}\cdot\text{Бк})=0,1939$ $G, \text{Р}\cdot\text{см}^2/(\text{год}\cdot\text{мКі})$; $G, \text{Р}\cdot\text{см}^2/(\text{год}\cdot\text{мКі})=5,1573 G_a$ $\text{аКл}\cdot\text{м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с}\cdot\text{Бк})$

Потужність поглиненої дози (P) визначає інтенсивність випромінювання та характеризує приріст дози за певний часовий інтервал. Цей параметр відображає динаміку накопичення радіаційного впливу, яка може варіюватися в часі залежно від активності джерела. Якщо за інтервал часу t сумарна поглинена доза становить D , то її середній показник розраховується як відношення: $P = \frac{D}{t}$.

Для оцінки іонізаційного ефекту, що виникає в повітряному середовищі під впливом рентгенівського або γ -випромінювання, застосовують поняття експозиційної дози. Цей показник є кількісною мірою іонізуючої здатності випромінювання і визначається як сумарний електричний заряд одноіменних іонів, що утворюються в одиниці об'єму повітря за умови електронної рівноваги. У системі СІ одиницею вимірювання експозиційної дози є кулон на кілограм (Кл/кг).

Кулон на кілограм (Кл/кг) визначає такий рівень експозиційної дози фотонного випромінювання (рентгенівського або γ), при якому супутня

корпускулярна емісія в одному кілограмі сухого повітря генерує іони із сумарним електричним зарядом в один Кулон для кожної полярності.

Поряд із системними одиницями, у дозиметрії часто використовують позасистемну одиницю експозиційної дози фотонного випромінювання – Рентген (Р). Вона історично застосовується для оцінки іонізаційної здатності гамма- та рентгенівських променів у повітрі.

За одиницю Рентген (Р) приймають таку експозиційну дозу фотонного випромінювання, під дією якої в 0,001293 г сухого повітря формуються іони обох знаків із сумарним зарядом в одну електростатичну одиницю (в системі СГС). Ця величина відповідає повному завершенню всіх іонізаційних актів, зумовлених проходженням випромінювання крізь зазначену масу середовища.

Слід зазначити, що величина 0,001293 г відповідає масі 1 см³ сухого атмосферного повітря за нормальних умов (температура 0°C, тиск 1013 гПа або 760 мм рт. ст.). Саме в такому об'ємі протікають первинні акти взаємодії фотонного випромінювання з газовим середовищем. Згідно з визначенням, одиниці 1 Р відповідає сумарний заряд 1 СГСЕ = $n \cdot q$, де n – кількість утворених іонів, а q – елементарний заряд ($q = 4,8 \cdot 10^{-10}$ СГСЕ).

Таким чином, для формування сумарного заряду в одну електростатичну одиницю (1 СГСЕ) необхідно, щоб у заданому об'ємі повітря виникло:

$$n = \frac{1}{4,8 \cdot 10^{-10}} \approx 2,08 \cdot 10^9 \text{ пар іонів/см}^2 \quad (1.1)$$

Це число відображає інтенсивність іонізаційних процесів, що відповідають експозиційній дозі в 1 Рентген.

Беручи до уваги, що середня енергія утворення однієї пари іонів у повітрі становить 34 еВ (1 еВ = $1,6 \cdot 10^{-12}$ ерг), експозиційній дозі в 1 Р відповідатиме поглинена енергія: $E = 2,08 \cdot 10^9 \text{ пар іонів} \cdot 34 \text{ еВ} \cdot 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ ерг/еВ} \approx 0,114 \text{ ерг/см}^3$. У перерахунку на одиницю маси повітря (0,001293 г) це становить приблизно 87,3 ерг/г (або 0,873 рад), що відображає енергетичний еквівалент рентгена в сухому повітрі.

Отже, для досягнення експозиційної дози величиною 1 Р необхідно, щоб енергія, витрачена на процеси іонізації в еталонному об'ємі повітря, становила: 0,114 ерг – у розрахунку на 1 см³ сухого повітря; 87,3 ерг — у розрахунку на 1 г сухого повітря. Дані показники визначають енергетичний еквівалент рентгена і є базовими для перерахунку іонізаційного ефекту в одиниці поглиненої енергії.

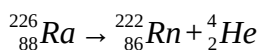
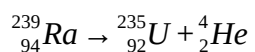
Показники 0,114 ерг/см³ та 87,7 ерг/г визначають так звані енергетичні еквіваленти рентгена. Для повітряного середовища взаємозв'язок між поглиненою дозою ($D_{\text{погл}}$), вираженою в радах, та експозиційною дозою ($D_{\text{експ}}$) у рентгенах описується наступною залежністю:

$$D_{\text{погл}} = 0,877 \cdot D_{\text{експ}} \quad (1.2)$$

Кількісні характеристики поглиненої та експозиційної доз, що розраховані на одиницю часу, визначають відповідну потужність дози.

Взаємодія α -частинок з речовиною. Аналіз механізмів взаємодії іонізуючого випромінювання з речовиною є фундаментом для освоєння принципів функціонування сучасних дозиметричних приладів. Крім того, розуміння цих процесів є критично важливим для розрахунку параметрів фізичного захисту та розробки радіометричної апаратури.

На сьогоднішній день ідентифіковано близько 40 природних та понад 200 штучно отриманих α -активних нуклідів. Явище альфа-розпаду є характерним для важких хімічних елементів, таких як уран, торій, полоній та плутоній. Під час цього процесу вихідне (“материнське”) ядро з атомним номером Z та масовим числом A трансформується у “дочірнє” ядро, параметри якого складають $Z - 2$ та $A - 4$ відповідно. Типовим прикладом такої ядерної реакції є розпад радію-226:



α -частинки являють собою позитивно заряджені структури, ідентичні ядрам атомів гелію. Характерною особливістю цього виду випромінювання є

надзвичайно висока щільність іонізації середовища, що водночас зумовлює їхню низьку проникну здатність крізь перешкоди.

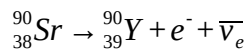
Динаміка іонізації середовища залежить від кінетичної енергії α -частинки. На початкових етапах руху, коли швидкість частинки є максимальною, показник питомої іонізації залишається відносно невисоким. Проте в міру втрати енергії та сповільнення частинка починає активніше взаємодіяти з електронними оболонками навколишніх атомів. Як наслідок, пік іонізуючої здатності припадає на завершальну фазу траєкторії, зазвичай охоплюючи останню третину всього шляху пробігу.

Довжина вільного пробігу α -випромінювання суттєво залежить від густини речовини, крізь яку воно проходить. У повітряному просторі цей показник для більшості радіонуклідів становить близько 11 см, проте у щільніших матеріалах він різко скорочується. Наприклад, у біологічних тканинах людини дистанція проникнення α -частинок обмежується лише мікрометрами.

Під час проходження крізь речовину α -випромінювання зазнає енергетичних втрат через механізми пружного розсіювання на атомних ядрах та електронах, а також внаслідок непружних зіткнень. В останньому випадку кулонівське поле α -частинки впливає на орбітальні електрони, надаючи їм додаткового прискорення. Цей процес дозволяє подолати сили зв'язку електронів із ядрами, що зумовлює іонізацію, збудження атомних структур або руйнування хімічних зв'язків у молекулах (дисоціацію).

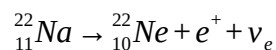
Взаємодія β -часток з речовиною. Корпускулярне β -випромінювання являє собою потік електронів або позитронів, що генеруються внаслідок β -трансформації радіоактивних нуклідів. Окрім безпосереднього випромінювання часток, до цього типу перетворень залічують електронне захоплення — процес поглинання ядром електрона з однієї із внутрішніх оболонок атома. Характерною особливістю всіх видів β -розпаду є незмінність масового числа ізотопу при зміні його атомного номера.

Електронний β -розпад є характерним для нуклідів із надлишком нейтронів у ядрі. У ході цього процесу один із нейтронів трансформується в протон, що призводить до зміщення елемента в таблиці Менделєєва на одну позицію вправо (заряд ядра зростає на одиницю). Типовим прикладом такої реакції є розпад ізотопу Стронцію-90 ($^{90}_{38}\text{Sr}$), який перетворюється на Ітрій ($^{90}_{39}\text{Y}$):



У процесі позитронного β -розпаду один із протонів ядра трансформується в нейтрон, що спричиняє генерацію та подальше випускання позитрона за межі нуклона. Наслідком такої ядерної реакції є зменшення атомного номера елемента та його сумарного заряду на одиницю. Масове число при цьому залишається незмінним.

Позитронний β -розпад притаманний нестабільним нуклідам, у структурі яких спостерігається надлишок протонів. Характерним прикладом такої радіоактивної трансформації є розпад ізотопу Натрію-22 ($^{22}_{11}\text{Na}$), що описується наступним рівнянням:



Явище електронного захоплення полягає у трансформації одного з протонів ядра в нейтрон, що призводить до зниження порядкового номера елемента на одиницю. Стосовно іонізаційної здатності, β -випромінювання характеризується значно меншою щільністю іонізації порівняно з α -випромінюванням; зокрема, кількість утворених пар іонів на одиницю шляху в повітрі у β -часток у кількасот разів нижча.

Енергетичний спектр β -часток, що генеруються під час радіоактивного розпаду, є неперервним, що обумовлює різну довжину їхнього пробігу в матеріальному середовищі. Внаслідок цього інтенсивність β -потoku зменшується в речовині поступово. Повне поглинання всього ансамблю часток конкретного радіонукліда забезпечується шаром матеріалу, товщина якого відповідає максимальному пробігу найбільш енергійних електронів даного спектра.

На відміну від α -випромінювання, траєкторія руху β -частинок у речовині має виражений ламаний характер через постійне відхилення від початкового вектору при взаємодії з атомами. Проходячи крізь середовище, електрони часто наближаються до позитивно заряджених ядер. Кулонівське поле ядра спричиняє різке уповільнення негативно зарядженої β -частинки, що супроводжується втратою значної частки її кінетичної енергії.

Енергетичні втрати β -частинок під час гальмування трансформуються в електромагнітне випромінювання рентгенівського діапазону. Інтенсивність цього процесу безпосередньо залежить від кінетичної енергії часток та ефективного атомного номера речовини поглинача. Найбільш проникні β -електрони здатні долати шар алюмінію товщиною до 5 мм, хоча їхня здатність до іонізації середовища є суттєво нижчою порівняно з α -випромінюванням.

Взаємодія γ -випромінювання з речовиною. Гамма-випромінювання являє собою потік високоенергетичних електромагнітних квантів, що генеруються атомними ядрами під час радіоактивних перетворень. Енергетичний діапазон цього випромінювання зазвичай охоплює інтервал від декількох кеВ до мегаелектрон-вольт (MeV). Аналогічно до рентгенівських променів, γ -кванти поширюються у повітряному середовищі зі швидкістю світла, проте характеризуються значно нижчою питомою іонізаційною здатністю порівняно з корпускулярним випромінюванням α - та β -частинками).

Характер взаємодії квантів випромінювання з матерією обумовлений як фізичними параметрами самого середовища, так і енергетичними характеристиками випромінювання. Своєю чергою, енергія фотона безпосередньо корелює з його частотою та довжиною хвилі. У міру зростання енергії (і, відповідно, скорочення довжини хвилі) відбуваються якісні зміни в механізмах впливу квантів на атомарно-молекулярну структуру речовини. Варто підкреслити, що γ -випромінювання характеризується надзвичайно високою проникною здатністю, показники якої можуть варіюватися у широкому діапазоні значень.

Процеси адсорбції та розсіювання квантів у середовищі обумовлені як характеристиками самої речовини, так і енергетичним станом фотонів. З огляду на те, що енергія фотона є похідною від його частоти та довжини хвилі, коливання цих показників зумовлюють перехід від одного домінуючого механізму взаємодії до іншого на мікроскопічному рівні. Для γ -випромінювання характерна висока проникна здатність, діапазон якої безпосередньо залежить від енергетичних показників частинок.

Техногенні джерела випромінювання становлять загрозу для людського організму навіть за умови мінімального рівня експозиції. Критичну небезпеку становлять високоенергетичні мікрооб'єкти, відомі як "гарячі" частинки (зокрема фрагменти ядерного палива). Їхнє потрапляння у біосферу зазвичай зумовлене порушеннями у технологічних циклах, аварійним виходом із ладу обладнання або іншими виробничими чинниками.

Зокрема, надзвичайна небезпека плутонію полягає в тому, що навіть поодинокі його атоми становлять загрозу для життя. При потраплянні в органи дихання ця речовина здатна спровокувати розвиток важких патологій. Ситуація ускладнюється тривалим періодом напіврозпаду плутонію, який сягає 24 000 років. Саме тому ядерна індустрія вважається одним із найбільш ризикованих видів діяльності для безпеки всього людства.

Внаслідок катастрофи на четвертому енергоблоці Чорнобильської АЕС у довкілля потрапило понад половину палива із загального обсягу у 190 тонн. Сумарна радіоактивність викиду сягнула колосальних 1 млрд Кі. Відповідно до фізичних закономірностей, процес природного зниження такої активності на порядок (у десять разів) триває близько століття.

Протягом цього періоду радіоактивні ізотопи проникають у водоносні горизонти, що створює довгострокову загрозу. Протягом наступних тисячоліть населення України споживатиме ці речовини разом із харчовими продуктами, що зумовлює ризик внутрішнього (вторинного) опромінення організму.

Для оцінки інтенсивності впливу іонізуючого випромінювання використовують експозиційну дозу. Ця величина визначається як сумарний електричний заряд іонів одного знака, що виникають під час іонізації 1 кг сухого повітря, і вимірюється в Кл/кг. У практичних розрахунках також часто застосовують позасистемну одиницю – рентген (Р).

$$1\text{Р} = 0,285 \text{ Кл/кг}$$

Величина, що визначає експозиційну дозу, отриману за одиницю часу, називається потужністю експозиційної дози (ПЕД). У повсякденній практиці та за нормальних радіаційних умов цей показник частіше іменують γ -фоном. Для його вимірювання зазвичай використовують позасистемну одиницю – мкР/год (мікрорентген на годину).

Енергія випромінювання, що передається матеріалу під час іонізації, описується поглиненою дозою (D). Її значення вимірюється в греях (Гр), де $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$. У деяких випадках використовується одиниця рад, яка становить одну соту частину грея (0,01 Гр).

Показником, що відображає ступінь біологічного ризику для людини при дії радіації, є еквівалентна доза (H). Вона виражається в зівертах (Зв). Також у технічній літературі часто зустрічається позасистемна одиниця бер, яка є еквівалентом поглиненої дози в один рад з урахуванням біологічної ефективності.

$$1 \text{ бер} = 0,01 \text{ Зв.}$$

Методи реєстрації іонізуючих випромінювань (зокрема альфа-, бета-частинок, гамма-квантів та нейтронів) і виявлення радіоактивних джерел ґрунтуються на їхній властивості спричиняти іонізацію атомів і молекул середовища, крізь яке вони проходять.

Процес іонізації супроводжується низкою фізико-хімічних перетворень у структурі речовини. Зокрема, це проявляється через зміну оптичних властивостей (прозорості, забарвлення або експозиції фотоматеріалів), а також через варіації електрофізичних параметрів, таких як електропровідність та опір у газах, рідинах та твердих тілах.

Функціонування дозиметричної апаратури ґрунтується на явищі іонізації газового середовища. За звичайних умов гази не є провідниками електрики, проте під дією іонізуючого випромінювання вони набувають здатності проводити струм. Саме ця фізична властивість покладена в основу роботи детектувальних елементів — іонізаційних камер та газорозрядних лічильників, що є ключовими компонентами приладів радіаційного контролю.

Експлуатація джерел іонізуючого випромінювання має здійснюватися суворо відповідно до чинних нормативно-правових актів України. Ключовими документами, що регламентують радіаційну безпеку, є “Норми радіаційної безпеки України” (НРБУ–97) від 14.07.1997 р. та “Основні санітарні правила протирадіаційного захисту населення України”, введені в дію рішенням Головного державного санітарного лікаря від 28.12.2000 р.

Дозиметром називають вимірювальний пристрій, призначений для встановлення величини сумарної (накопиченої) дози іонізуючого випромінювання, отриманої за певний проміжок часу.

Радіометр є спеціалізованим технічним засобом, призначеним для реєстрації інтенсивності (потужності) іонізуючого випромінювання безпосередньо в точці вимірювання у поточному часовому інтервалі. Варто зауважити, що значна частина пристроїв, які в побуті іменують дозиметрами, за своїм функціональним призначенням фактично є радіометрами. При цьому більшість сучасних універсальних приладів поєднують у собі можливості обох типів вимірювачів.

У разі перевищення встановленого порогу радіаційного фону, пристрій автоматично активує систему оповіщення. Повідомлення про небезпеку реалізується за допомогою акустичних сигналів або світлової індикації, що дозволяє оперативно реагувати на зміну радіаційної обстановки.

Ціновий діапазон якісних пристроїв оповіщення зазвичай варіюється в межах 150–300 доларів. Досить часто такі сигналізатори поєднують у собі базові можливості індикаторів та спрощених вимірювальних заладів. Головне

призначення подібних пристроїв – оперативне інформування користувача про виходження в зону з підвищеним рівнем радіаційної небезпеки.

Вимірювальні пристрої даної категорії розроблені для прецизійного визначення параметрів радіаційного фону як у навколишньому просторі, так і на поверхні окремих предметів. Характерною особливістю таких засобів є високий рівень чутливості та достовірність отриманих даних, хоча процес вимірювання вимагає певної експозиції (часових витрат). За потреби ці прилади можуть успішно виконувати роль індикаторів.

Дана категорія приладів є оптимальною для проведення радіологічного контролю будівельної сировини, різноманітних споживчих товарів, дорогоцінних виробів, а також харчової продукції.

У конструкціях сучасних дозиметричних та радіометричних приладів ключовим елементом детектування є газорозрядний лічильник Гейгера–Мюллера. Головною технічною перевагою таких сенсорів є їхня надзвичайна чутливість: пристрій здатний зафіксувати практично кожну іонізуючу частинку, що потрапляє в робочий об'єм, за умови формування хоча б однієї пари іонів, необхідної для ініціації розряду. При цьому вихідний сигнал характеризується амплітудою імпульсу на рівні 1 В.

Газорозрядний лічильник являє собою камеру, внутрішній простір якої характеризується вираженою неоднорідністю електричного поля. Найбільш розповсюдженою конфігурацією є коаксіальна система електродів: роль катода виконує зовнішня циліндрична оболонка, тоді як анодом слугує тонка металева нитка (діаметром близько 0,1 мм), що натягнута строго вздовж центральної осі циліндра.

Фіксація анода всередині корпусу здійснюється за допомогою діелектричних ізоляторів, при цьому як матеріал для центральної нитки найчастіше обирають тугоплавкий вольфрам. Функцію катода зазвичай виконує сама оболонка пристрою. У випадках, коли корпус виготовлений зі скла, на його внутрішню стінку наноситься тонкий електропровідний шар

(наприклад, з міді, вольфраму або ніхром), що забезпечує необхідний розподіл потенціалу.

Електродна система міститься всередині герметичного корпусу, заповненого інертним газом (наприклад, аргоном або гелієм). Робочий тиск газової суміші в резервуарі підтримується на рівні кількох сантиметрів ртутного стовпчика, що є оптимальним для виникнення іонізаційних процесів.

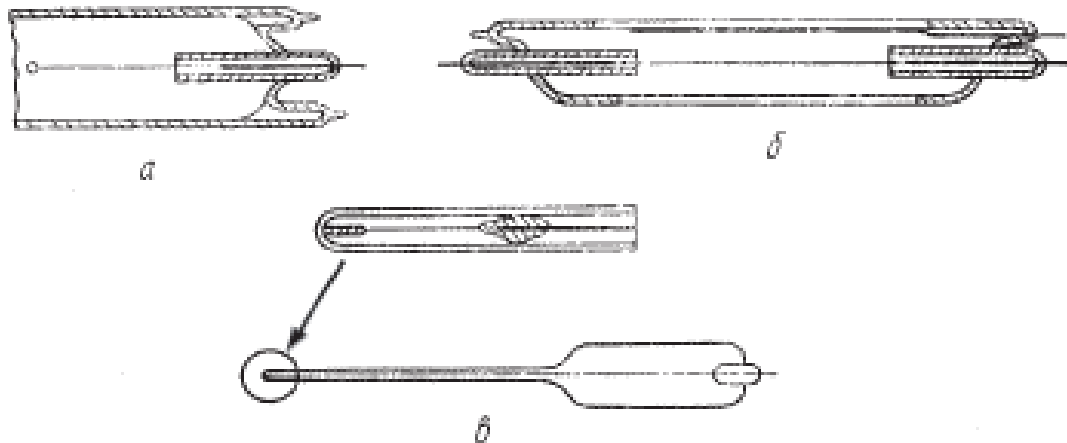


Рис. 1.1. Основні конструктивні виконання лічильників Гейгера-Мюллера:

а) торцевого типу; б) циліндричної форми; в) голчастої конфігурації

Лічильна характеристика відображає функціональну залежність частоти реєстрації імпульсів від величини прикладеної до електродів напруги. Цей параметр визначається за умови стабільної інтенсивності потоку іонізуючого випромінювання, що падає на робочий об'єм датчика.

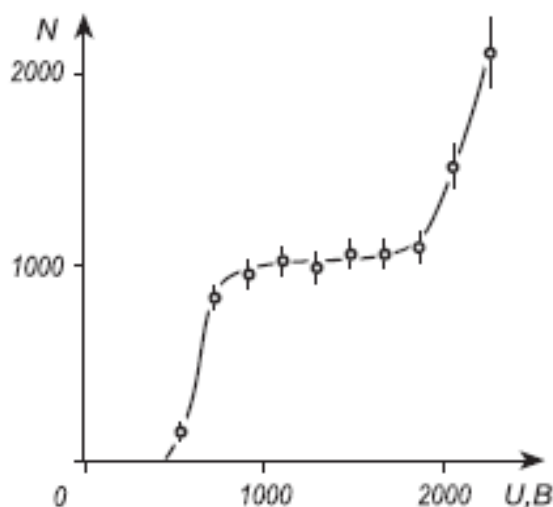


Рис. 1.2. Графік лічильної характеристики детектора Гейгера-Мюллера

Для забезпечення стабільної роботи детектора робочу напругу обирають у межах горизонтального сегмента характеристики, відомого як “плато”. Дана область зазвичай охоплює діапазон від 100 до 200 В і характеризується незначним градієнтом нахилу, що становить лише кілька відсотків на кожні 100 вольт зміни потенціалу.

При досягненні певного рівня потенціалу, що відповідає початку “плато”, спостерігається стабілізація швидкості лічби, яка надалі майже не реагує на зміну напруги живлення. Коректне детектування випромінювання забезпечується лише тими пристроями, які мають виражену горизонтальну ділянку характеристики. Аналіз лічильної характеристики є ключовим для визначення оптимальної робочої напруги, а також оцінки довжини та градієнта нахилу плато.

Експлуатаційні параметри приладу, такі як робоча напруга, а також геометричні та градієнтні характеристики “плато”, обумовлені фізико-хімічним складом газового наповнення, його внутрішнім тиском та особливостями конструкції (зокрема, співвідношенням діаметрів катода та анода). Зі зростанням тиску газової суміші спостерігається тенденція до підвищення робочої напруги. Прикладом є галогенні лічильники, що працюють у діапазоні 300–400 В, тоді як пристрої без галогенних домішок потребують значно вищого потенціалу – від 800 В і більше.

Галогенні детектори належать до категорії самогасячих газорозрядних пристроїв. У лічильниках Гейгера–Мюллера такого типу до основного об’єму інертного газу підмішують незначну концентрацію галогенних елементів, як-от хлор або бром. Найбільш поширеною практикою є додавання приблизно 0,1% хлору, що забезпечує стабільне гасіння розряду.

У газорозрядних камерах позитивно заряджені іони переміщуються до катода, де при взаємодії з його поверхнею відбувається їхня нейтралізація. Цей процес супроводжується вибиванням вторинних електронів із металу електрода. Без застосування спеціальних методів гасіння такі електрони здатні

спровокувати повторний електричний пробій, що призведе до хибної реєстрації імпульсів.

Для припинення іонізаційного процесу в коло лічильника може вмикатися високоомний резистор з номіналом $R=10^9$ Ом. Проте несамогасячі пристрої на сьогодні практично вийшли з ужитку через свою низьку ефективність. Сучасним стандартом є додавання до основного робочого середовища специфічних газових домішок, що мають властивість оперативно пригнічувати розряд. Такі детектори класифікуються як самогасячі.

Ефективність реєстрації визначається як відношення кількості зафіксованих імпульсів до сумарного потоку частинок, що перетнули робочий об'єм детектора. Важливо зазначити, що показник ефективності лічильників Гейгера–Мюллера зазвичай є меншим за 100%. Це пояснюється ймовірністю проходження частинки крізь газове середовище без ініціації первинної іонізації. Проте при детектуванні електронів цей коефіцієнт може бути надзвичайно високим, досягаючи значень 99,0–99,9%. У випадку гамма-випромінювання ефективність суттєво залежить від атомного номера матеріалу катода та енергетичного спектра квантів.

Мертвий час детектора визначає період, протягом якого частинки, що потрапили в робочий об'єм на початковому етапі формування розряду, залишаються непоміченими (не реєструються). Одразу після завершення цього інтервалу настає час відновлення – тривалість, необхідна для того, щоб амплітуда вихідного імпульсу повернулася до свого номінального значення, забезпечуючи готовність приладу до наступного циклу реєстрації.

Роздільна здатність вимірювальної системи описує мінімальний часовий інтервал між реєстраціями двох послідовних іонізуючих частинок, за якого прилад здатний ідентифікувати їх як окремі події. Для стандартних газорозрядних детекторів цей показник зазвичай перебуває в межах 10^{-4} с.

Таблиця 1.2. Технічні характеристики популярних моделей лічильників

	1	2	3	4	5	6	7
СБМ19	400	100	2	310*	50	19x195	1
СБМ20	400	100	1	78*	50	11x108	1

СБТ9	380	80	0,17	40*	40	12x74	2
СБТ10А	390	80	2,2	333*	5	(83x67x37)	2
СБТ11	390	80	0,7	50*	10	(55x29x23,5)	3
СИ8Б	390	80	2	350-500	20	82x31	2
СИ14Б	400	200	2	300	30	84x26	2
СИ22Г	390	100	1,3	540*	50	19x220	4
СИ23БГ	400	100	2	200-400*	-	19x195	1

Умовні позначення характеристик: 1. номінальна робоча напруга, В; 2. протяжність плато — діапазон напруг із мінімальною залежністю частоти реєстрації від живлення, В; 3. рівень власного фону приладу, імп/с (максимальне значення); 4. чутливість до іонізуючого випромінювання, імп/мкР (*- за ізотопом ^{60}Co); 5. мінімальна амплітуда сигналу на виході, В; 6. геометричні розміри, мм (діаметр×довжина або габаритні параметри); 7. тип випромінювання, що реєструється: 7.1 – жорстке β - та γ -випромінювання; 7.2 – м'яке β -випромінювання; 7.3 – сукупність α -, жорсткого β - та γ -випромінювання; 7.4 – виключно γ -випромінювання.

1.2. Огляд концепцій щодо розробки систем радіаційного контролю

У результаті ґрунтовного аналізу фахової літератури та сучасних інтернет-ресурсів було систематизовано значний обсяг даних стосовно розробок різнопланових систем моніторингу радіаційної обстановки [6].

На сучасному етапі розвитку техніки представлено широкий спектр концепцій щодо розробки цифрових комплексів радіаційного контролю, в основі яких лежить використання сучасних мікроконтролерних засобів [7–13].

Подібні комплекси зазвичай оснащені вбудованими таймерами, що дозволяє здійснювати моніторинг інтегральної (накопиченої) дози за певний часовий проміжок. Крім того, вони забезпечують оперативне вимірювання потужності еквівалентної дози як для навколишнього середовища, так і для специфічних об'єктів чи матеріалів.

Моніторинг радіаційної обстановки передбачає комплексний аналіз інтенсивності випромінювання та розрахунок гранично допустимого часу роботи підрозділів цивільного захисту в зоні ліквідації наслідків надзвичайної

ситуації. Даний процес включає встановлення масштабів і рівнів радіоактивного зараження персоналу, повітряного середовища, територій, а також інфраструктурних об'єктів, технічних засобів і ресурсів життєзабезпечення [14–20]. Реалізація цих завдань потребує оперативного вимірювання потужності експозиційної дози, ідентифікації радіоактивних аерозолів (пилу) та виявлення локалізованих вогнищ випромінювання.

Технічні засоби радіаційної розвідки застосовуються для кількісного визначення потужності іонізуючих випромінювань та оцінки рівня радіоактивного забруднення довкілля і матеріальних об'єктів. Цю категорію пристроїв формують індикатори-сигналізатори, спеціалізовані радіометри та рентгенметри (Табл.1.3).

Таблиця 1.3. Порівняння типів приладів радіаційної розвідки

Категорія	Призначення	Приклади моделей
Військові/Промислові	Розвідка та високі рівні потужності	ДП-5В, ДП-3В, ІМД-21
Пошукові/Геологічні	Виявлення аномалій, пошук джерел	СРП-68, МКС-07 “Пошук”
Побутові/Професійні	Контроль середовища, харчових продуктів	Терра (МКС-05), Прип’ять, Стора-Т

Засоби контролю індивідуального опромінення застосовуються для кількісної оцінки доз іонізуючого випромінювання, отриманих персоналом або населенням під час перебування на територіях із підвищеним радіаційним фоном або при безпосередній роботі з радіоактивними ізотопами. До цієї категорії належать персональні дозиметри, серед яких широко відомі комплекти ДП-22В, ДП-24, ІД-1 та ІД-11. Окрім спеціалізованих військових та промислових зразків, сучасний ринок пропонує багатофункціональні мікропроцесорні пристрої, адаптовані для побутового використання, такі як “Стора-Т” (РКС-01), “Терра” (МКС-05) та “Селвіс” (ДКС-01М).

За функціональними особливостями та сферою застосування пристрої для дозиметричного контролю класифікують на чотири основні категорії: радіометри, індикатори, дозиметри та рентгенметри.

Основною функцією приладів-індикаторів є детектування радіоактивного фону на відкритій місцевості та поверхнях об'єктів. Окремі модифікації цих пристроїв мають розширений функціонал, що дозволяє проводити кількісну оцінку рівнів випромінювання. Чутливим елементом (детектором) у таких системах виступають газорозрядні лічильники. Типовими представниками даної групи технічних засобів є моделі ДП-64, а також серії ДП-63 та ДП-63А.

Рентгенметри – це спеціалізовані пристрої, розроблені для визначення потужності експозиційної дози випромінювання на територіях, що зазнали радіоактивного впливу. Принцип їхньої роботи базується на використанні іонізаційних камер або газорозрядних детекторів як основних реєстраційних вузлів. Класичними прикладами такої апаратури є загальновійськові моделі серії ДП-3 (зокрема модифікація Б), ДП-5 (варіанти А, Б, В), а також стаціонарні установки типу “Кактус” та ранні зразки, як-от ДП-2.

Для визначення рівня радіоактивного забруднення поверхонь різноманітних об'єктів застосовують радіометри. Конструктивно ці пристрої базуються на використанні сцинтиляційних або газорозрядних детекторів. До найбільш вживаних засобів цієї категорії належать вимірювачі серії ДП-12, універсальні прилади типу “Луч-А” (для бета- та гама-випромінювання), а також спеціалізовані установки, такі як “Тиса”, ДП-100М та ДП-100АДМ.

Дозиметричні пристрої слугують для реєстрації поглинених доз іонізуючого випромінювання, що накопичуються організмом людини (як цивільних осіб, так і представників підрозділів цивільного захисту). Основна класифікація таких приладів базується на типі детектованого потоку: γ -квантів, β -частинок або нейтронів. У конструктивній схемі індивідуальних засобів контролю як чутливі елементи найчастіше виступають іонізаційні камери, а також газорозрядні, сцинтиляційні або фотоелектронні лічильники.

Рентгенометр-радіометр ДП-5ВБ (а також його попередні модифікації ДП-5А, ДП-5Б, ДП-5В) застосовується для моніторингу потужності експозиційної дози та оцінки ступеня радіоактивного забруднення поверхонь

різних об'єктів. На сучасних промислових підприємствах найбільш розповсюдженими є моделі ДП-5ВБ та ДП-5В. Разом з тим, на окремих об'єктах продовжують експлуатувати прилади серій "А" та "Б", ресурс роботи яких ще дозволяє виконувати вимірювання в межах встановлених норм.

Рентгенометр-радіометр моделі ДП-5ВБ застосовується для визначення інтенсивності (потужності дози) γ -випромінювання, а також для проведення якісного аналізу об'єктів на наявність β -активних нуклідів.

Інтенсивність експозиційної дози γ -випромінювання розраховується та відображається у таких одиницях виміру, як мілірентгени за годину (мР/год) або рентгени за годину (Р/год).

Робочий діапазон реєстрації γ -випромінювання для даного пристрою охоплює значення від 0,05 мР/год до 200 Р/год. При цьому коректне детектування забезпечується для квантів з енергіями в межах 0,084–1,25 МеВ.

Наявність β -випромінювання констатується у випадку, коли при незмінному положенні перемикача піддіапазонів поточні показання пристрою перевищують результати попереднього вимірювання лише γ -фону.

Стаціонарний прилад ДП-64 виконує функцію моніторингу та оповіщення про рівні γ -випромінювання за межами пунктів управління та об'єктів цивільного захисту. Пристрій функціонує у безперервному режимі чергування, активуючи світлові та звукові сигнали тривоги, якщо рівень потужності дози на місцевості сягає 0,2 Р/год. Висока швидкість реакції системи забезпечує спрацьовування сигналізації протягом не більше ніж 3 секунд.

Бортовий рентгенметр ДП-3 (ДП-3Б) застосовується для визначення інтенсивності випромінювання на місцевості під час проведення радіаційної розвідки. Даний пристрій розрахований на монтаж на рухомих транспортних засобах, зокрема на автомобілях, танках, БТР та гелікоптерах. Його технічні можливості дозволяють реєструвати потужність дози в інтервалі від 0,1 до 500 Р/год.

Методика проведення радіаційного моніторингу безпосередньо залежить від схеми монтажу виносного блоку детектування. У разі його встановлення всередині транспортного засобу, для отримання об'єктивних даних про рівень радіації на місцевості, показання приладу необхідно помножити на відповідний коефіцієнт ослаблення матеріалів корпусу. Зокрема, для автомобільного транспорту цей показник становить 2, для БТР — 4, а для танків сягає 10. При зовнішньому розміщенні датчика необхідність у застосуванні поправочних коефіцієнтів відпадає.

У структурі цивільного захисту пристрій ГБР-3 застосовується для моніторингу радіаційної обстановки. Його технічні можливості дозволяють здійснювати вимірювання в значному діапазоні інтенсивності γ -випромінювання, верхня межа якого сягає 100 Р/год.

Конструктивна схема пристрою базується на використанні двох детекторів: СБТ-11 (з ефективною площею вікна 4,5 см²) та СІ-13Г. Така двоканальна система реєстрації дозволяє диференціювати види випромінювання. Перший лічильник фіксує сумарний потік β - та γ -частинок, тоді як другий реагує виключно на γ -кванти. Це технічне рішення забезпечує автоматичне віднімання (компенсацію) гамма-фону, що значно підвищує точність при визначенні чистої бета-активності.

Під час реєстрації β -випромінювання на фоні значних гамма-полів задіюються обидва детектори одночасно. Вимірювальна система приладу обробляє різницю між струмами обох лічильників, що дозволяє виділити корисний сигнал, який відповідає виключно інтенсивності бета-частинок, нівелюючи вплив зовнішнього γ -фону.

Для визначення характеристик γ -випромінювання задіюється детектор, конструкція якого передбачає спеціальне екранування від β -частинок. Отримані дані в такому режимі прямо відображають рівень потужності дози гамма-квантів. Для зручності маніпуляцій блок детектування (датчик) підключений до основного вимірювального пульта за допомогою гнучкого кабелю довжиною 1,5 м.

Побутовий дозиметричний пристрій “БЕЛЛА” застосовується для детектування γ -випромінювання та оцінки його інтенсивності за допомогою акустичних сигналів. Крім того, прилад дозволяє визначати потужність еквівалентної дози (ПЕД) із виведенням результатів на цифровий дисплей. Дана модель орієнтована на індивідуальне використання громадянами для швидкого моніторингу навколишнього середовища, проте отримані дані мають інформативний характер і не можуть бути підставою для офіційних експертних звітів. Технічні можливості приладу “БЕЛЛА” дозволяють реєструвати фотонне випромінювання в енергетичному інтервалі від 0,05 до 1,25 МеВ. Робочі діапазони вимірювання залежать від обраних одиниць: для потужності еквівалентної дози вони становлять 0,20–99,99 мкЗв/год, а для потужності експозиційної дози – від 20 до 9999 мкР/год.

Дозиметричні прилади використовуються для визначення потужності дози – величини, що характеризує інтенсивність опромінення за певний проміжок часу. Проте при оцінці біологічних ризиків ключовим показником є не миттєва потужність, а інтегральна (сумарна) доза. Вона розраховується як добуток потужності іонізуючого випромінювання на тривалість перебування людини в зоні впливу.

Для ілюстрації: за умови постійної потужності зовнішнього фону на рівні 0,11 мкЗв/год, сумарне річне навантаження (за 8800 годин) досягне 1000 мкЗв, що еквівалентно 1 мЗв. Варто зауважити, що середньостатистичне значення природного радіаційного фону становить приблизно 0,15 мкЗв/год, проте цей показник може варіюватися в межах 100% залежно від специфічних геолого-географічних особливостей місцевості.

Окремі види гірських порід, зокрема граніт, характеризуються природною слабкою радіоактивністю, що зумовлює локальне підвищення іонізуючого фону. Наприклад, безпосередньо біля гранітних конструкцій чи стін інтенсивність випромінювання може зростати на 0,15 мкЗв/год відносно середніх показників місцевості.

Відповідно до регламентів Національної комісії з радіаційного захисту населення України (НКРЗУ), для мешканців зон спостереження навколо АЕС та інших радіаційно небезпечних об'єктів встановлено граничну річну дозу на рівні 5 мЗв. Цей ліміт відповідає безперервній потужності дози на відкритому просторі у 0,6 мкЗв/год. Проте, враховуючи екранувальну здатність житлових будівель, яка знижує інтенсивність опромінення щонайменше вдвічі, допустимий рівень фону на місцевості може досягати 1,2 мкЗв/год.

У разі фіксації рівнів випромінювання понад 1,2 мкЗв/год, доцільно обмежити перебування в даній зоні терміном до шести місяців на рік або повністю змінити локацію. При подальшому зростанні потужності дози до 2,5 мкЗв/год безпечний період скорочується до одного кварталу, а при досягненні 7 мкЗв/год — до одного місяця протягом року. При виявленні будь-яких аномальних значень радіаційного фону необхідно негайно поінформувати органи санітарно-епідеміологічного нагляду для отримання фахової оцінки ситуації та відповідних інструкцій щодо подальших дій.

Використання побутового дозиметра дозволяє проводити непряму оцінку радіоактивного забруднення харчових продуктів шляхом фіксації інтенсивності їхнього зовнішнього γ -випромінювання. Згідно з нормативами НКРЗУ, пороговий рівень питомої активності, що потребує додаткової уваги та контролю, становить 4 кБк/кг (л). У позасистемних одиницях цей показник відповідає значенню близько $1 \cdot 10^{-7}$ Кі/кг (л).

На сучасному етапі основний внесок у внутрішнє опромінення населення вносить техногенний радіонуклід цезій-137 (^{137}Cs). Його критичне накопичення спостерігається у продуктах тваринного походження, зокрема в молочній сировині та м'ясопродуктах, що потребує посиленого радіологічного контролю цих категорій товарів.

Процедура оцінки радіоактивного забруднення рідких та твердих продуктів (об'ємом 1 л або масою 1 кг) передбачає розміщення дозиметра впритул лівою панеллю до досліджуваного зразка. Для забезпечення чистоти приладу та запобігання його прямому контакту з продуктом допускається

використання тонкого розділового шару, наприклад, поліетиленової плівки або паперу.

Критерієм досягнення питомою активністю продукту межі у 4 кБк/кг (л) є перевищення потужності дози на 0,15 мкЗв/год відносно попередньо виміряного природного фону. У разі реєстрації такої інтенсивності випромінювання фахівці рекомендують виключити дані продукти з раціону або, як мінімум, скоротити обсяг їх споживання в два рази порівняно зі стандартними нормами харчування.

У разі фіксації приросту потужності дози від продовольчої сировини на рівні 0,3 мкЗв/год понад природний фон, частку таких продуктів у щоденному споживанні слід обмежити до 25% (однієї чверті) від стандартного обсягу. Якщо ж інтенсивність випромінювання сягає 1 мкЗв/год над фоновими показниками, безпечна частка продукту в раціоні не повинна перевищувати 10% (однієї десятої). Подальше зростання активності вимагає ще жорсткішого обмеження або повної відмови від вживання. В Україні налагоджено серійне виробництво сучасних дозиметрів-радіометрів лінійки “ТЕРРА”. Ці прилади є одними з найбільш розповсюджених засобів індивідуального радіаційного контролю вітчизняної розробки, що відповідають міжнародним стандартам якості.



Рис. 1.3. Зовнішній вигляд універсальних дозиметрів-радіометрів серії “ТЕРРА” (МКС-05)

Основне призначення дозиметрів “ТЕРРА” – індивідуальна сигналізація про радіаційну небезпеку. Їхня метрологічна ефективність як вимірювачів

обмежена невисокою квантовою ефективністю газорозрядного лічильника. Для наукових досліджень, де критичною є чутливість до слабких потоків випромінювання, використання даної серії може бути недостатнім.



Дозиметр-радиометр
бытовой МКС-05
"ТЕРРА-П+"
5,100.00 грн

Дозиметр-радиометр
МКС-05 "ТЕРРА" с
Bluetooth
9,100.00 грн

Дозиметр-радиометр
МКС-05 "ТЕРРА"
7,100.00 грн

Рис. 1.4. Порівняльний аналіз ринкової вартості дозиметрів-радіометрів серії
“ТЕРРА”

Вартість сучасних дозиметрів-радіометрів залишається досить високою, що обмежує їх масову доступність для населення та бюджетних установ. Висока ціна часто зумовлена не дорожнечою комплектуючих (як-от лічильник СБМ-20), а витратами на державну сертифікацію, метрологічну перевірку та монопольним становищем окремих виробників на вітчизняному ринку.

Дозиметр РКС-01 СТОРА-ТУ с блютуз



★★★★★ (Отзывов: 0)

Производство: Украина

Средство измерительной техники!

Мощность амбиентного эквивалента дозы
гамма- и рентгеновского излучений (137Cs)
(мкЗв/ч): 0,1...999,9; ±15%

Плотность потока бета-частиц (1/(см²·мин)): 10...100
000; ±20%

Есть в наличии

Ваша цена:

16848 грн.

купить

подробнее →



Рис. 1.3. Багатоканальний радіометр-дозиметр гамма-бета випромінювання
РКС-01 “СТОРА-ТУ”

Прилад призначений для оперативного вимірювання потужності еквівалентної дози та поверхневої щільності потоку бета-частинок. Завдяки використанню кількох детекторів, пристрій забезпечує вищу точність та швидкість отримання результатів у порівнянні з одноканальними аналогами.

Використання детектуючого вузла на базі чотирьох газорозрядних лічильників Гейгера-Мюллера дозволило підвищити чутливість приладу вчетверо відносно базової моделі “СТОРА”. Така архітектура забезпечує оперативність моніторингу, скорочуючи час експозиції при вимірюванні рівнів, близьких до природного фону, до 10 секунд. При ідентичних метрологічних параметрах чутливості до γ -випромінювання, радіометр РКС-01-СТОРА-У є економічно вигіднішою альтернативою відомому дозиметру ДРГ-01Т. Основні характеристики РКС-01-СТОРА-У:

- Діапазон ПЕД: 0,01....100,0 мР/год.
- Похибка (^{137}Cs): пошук (10 с) – $\pm(25+0,2/p)\%$; точний (100 с) – $\pm(10+0,2/p)\%$.
- Енергетичний спектр: 0,05...3,0 МеВ.
- Хід жорсткості: $\pm 25\%$ (до 0,66 МеВ) та $+40\%\dots -25\%$ (понад 0,66 МеВ).
- Часові інтервали: 1, 10, 100 с.

Функціонал пристрою базується на п'яти автономних каналах вимірювання, дані з яких послідовно відображаються на спільному РК-екрані. Конструкція передбачає використання інтегрованого лічильника Гейгера-Мюллера (чутливого до γ - та β -випромінювання), а також систему автоматичного вибору діапазонів і часових інтервалів. Додатково реалізовано дворівневу звукову індикацію для сповіщення про порушення встановлених лімітів та систему контролю стану батареї.

Таблиця 1.4. Експлуатаційні та технічні параметри вимірювача “СТОРА-Т”

Основні технічні характеристики приладу „СТОРА-Т”

Вимірювання	Одиниці вимірювання	Діапазон вимірювань	Похибка ±
Потужності еквівалентної дози гама- та рентгенівського випромінювань (^{137}Cs)	мкЗв/год	0,1 – 9999	20%
Еквівалентної дози гама- та рентгенівського випромінювань (^{137}Cs)	мЗв	0,001 – 9999	20%
Щільності потоку бета-частинок ($^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$)	$1/(\text{см}^2 \cdot \text{хв})$	10 – 100000	20%
Енергетичний діапазон гама- та рентгенівського випромінювань, що реєструється	МеВ	0,05 – 3	25%
Діапазон вимірювань часу накопичення еквівалентної дози		1хв – 24год	0,1 с за 24 год

Система оповіщення реалізована за допомогою акустичних сигналів двох типів, які активуються у разі виходу вимірюваних значень за межі встановлених лімітів.



Рис. 1.4. Гамма-дозиметр пошукового типу серії “Ритм-5”

Розроблений в Україні пошуковий прилад “РИТМ-5” (вартістю 600\$) здатний конкурувати на рівних із відомим детектором Exploranium GR-100, що робить його привабливим рішенням у своєму сегменті.



Рис. 1.4. Зовнішній вигляд пошукового дозиметра-радіометра моделі Exploranium GR-100

Висококласний закордонний радіометр Exploranium GR-100 (ціна від 250\$) часто порівнюють із перевіреними часом моделями серії ДП. Зокрема, ДП-5ВБ хоч і не укомплектований контрольним джерелом випромінювання, проте за рахунок великого вікна фільтра бета-частинок перевершує інші моделі за чутливістю у чотири рази. Для задач, що потребують максимальної реакції детектора, використовують ДП-5М, який працює на базі чутливого слюдяного лічильника торцевого типу.



Рис. 1.5. Модифікований радіометричний пристрій ДП-5М із вбудованим слюдяним детектором

Дані пристрої демонструють високу ефективність у детектуванні навіть слабких поверхневих забруднень радіонуклідами та дозволяють ідентифікувати окремі випромінюючі об'єкти. Водночас їх суттєвим недоліком є значна інерційність процесу вимірювання.

РОЗДІЛ 2

ЗАСОБИ РОЗРОБКИ АПАРАТНОГО ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ РАДІАЦІЙНОГО ФОНУ

2.1. Система автоматизованого проектування і моделювання програмованих пристроїв Proteus VSM

Розробка британської компанії Labcenter Electronics під назвою Proteus VSM є спеціалізованим інструментарієм для автоматизації проектування електроніки. Пакет програм орієнтований на роботу з різноманітними типами мікроконтролерів, дозволяючи створювати та тестувати складні цифрові та аналогові схеми у віртуальному середовищі [21].

Програмний пакет Proteus – це потужний інструмент для віртуального моделювання електронних схем. Його головна відмінність полягає у здатності відтворювати роботу широкого спектру обчислювальних пристроїв: від базових контролерів до складних DSP-процесорів, забезпечуючи точну імітацію їхньої поведінки в реальному часі. Завдяки Proteus розробник отримує універсальне середовище для формування схемотехнічних рішень та їхньої верифікації без необхідності створення фізичного прототипу. Можливості пакета включають відпрацювання алгоритмів вбудованого програмного забезпечення та перехід до етапу конструювання друкованих плат. Наявність системи тривимірного відображення дозволяє детально проаналізувати компонування елементів на платі ще до її виготовлення.

Програма забезпечує моделювання роботи широкого переліку процесорів: від класичних 8051 та PIC до потужних ARM7/LPC2000 і Motorola. Бібліотека Proteus налічує понад 6000 активних моделей компонентів, що дозволяє відтворювати поведінку складних змішаних схем. Наявність вбудованої довідкової бази та підтримка популярних архітектур (зокрема AVR та Basic Stamp) робить цей пакет універсальним рішенням для налагодження мікропроцесорних систем. Однією з ключових переваг Proteus

VSM є його повна сумісність із більшістю сучасних асемблерів та компіляторів. Програмне середовище забезпечує високу точність симуляції та ефективне налагодження складних електронних систем. Особливістю архітектури пакета є можливість одночасного моделювання декількох мікроконтролерів, навіть якщо вони належать до різних сімейств, у межах одного спільного проєкту.

Варто усвідомлювати, що будь-яке комп'ютерне моделювання є лише наближеною імітацією, яка не здатна абсолютно ідентично відтворити фізичні процеси в реальному пристрої. Проте для верифікації логіки роботи та загального налагодження алгоритмів керування мікроконтролером (МК) точності середовища Proteus цілком достатньо. Окрім великої вбудованої бібліотеки, Proteus дозволяє додавати власні компоненти, зокрема через імпорт SPICE-моделей. Це вирішує проблему відсутності специфічних деталей у стандартному наборі: достатньо знайти файл моделі на офіційному ресурсі виробника та адаптувати його під відповідний корпус у середовищі проєктування. Функціонал системи розподілений між двома основними підсистемами: ISIS, що відповідає за графічне створення та імітацію роботи схем, та ARES, яка спеціалізується на конструюванні друкованих плат. ARES підтримує сучасні алгоритми автоматичного трасування (ELECTRA) та автоматизоване компонування вузлів, що в поєднанні з потужним менеджером бібліотек робить перехід від схеми до готової плати максимально швидким.

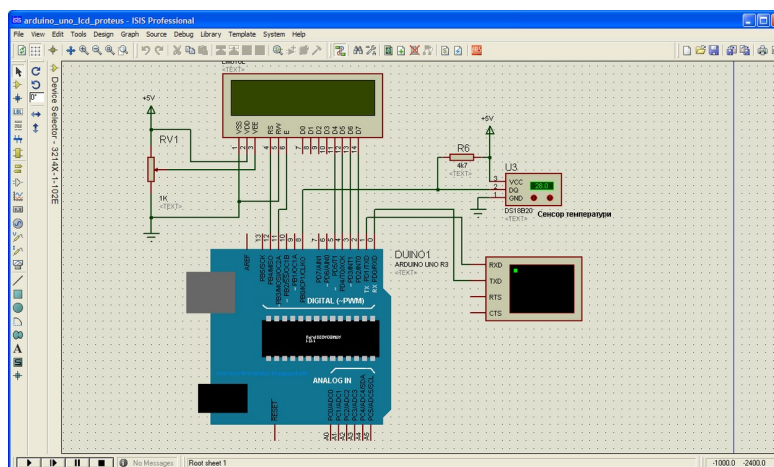


Рис. 2.1. Вікно моделювання принципів електронних схем у модулі ISIS

Особливої уваги заслуговують засоби зв'язку Proteus з апаратними ресурсами комп'ютера. Компонент COMPIM реалізує міст між симуляцією та реальним COM-портом, а модуль USBCONN – з USB-інтерфейсом. Це дозволяє проводити комплексне налагодження вбудованих систем, інтегруючи віртуальну схему в реальну інформаційну інфраструктуру.

Впровадження Proteus VSM у процес проектування дає змогу верифікувати алгоритми керування ще до виготовлення дослідного зразка. Програмний комплекс підтримує безшовну інтеграцію з популярними компіляторами та середовищами програмування. Для розробки на базі Arduino передбачена можливість дозавантаження зовнішніх бібліотек, тоді як для класичних мікроконтролерів підтримуються такі інструменти, як CodeVisionAVR, WinAVR, ICC (AVR, msp430, ARM7) та HiTECH (8051, PIC).

2.2. Програмний інструментарій Arduino IDE для проектування та налагодження пристроїв на базі мікроконтролерів сімейства Arduino

Arduino — це відкрита платформа для розробки електроніки, що поєднує в собі апаратну базу та зручне програмне середовище. Популярність системи пояснюється доступністю мови програмування та прозорістю архітектурних рішень. Відсутність потреби у додаткових апаратних програматорах та підтримка прошивки через USB роблять Arduino оптимальним вибором для швидкої реалізації технічних проєктів. Системи на базі контролерів Arduino підтримують отримання вхідних сигналів від навколишнього простору через систему сенсорів і подальше керування виконавчими вузлами (актуаторами).

Апаратно-програмні рішення на платформі Arduino здатні здійснювати моніторинг зовнішнього середовища за допомогою широкого спектра сенсорних модулів, а також реалізовувати алгоритми керування різноманітними виконавчими механізмами.

Для розробки програмного забезпечення пристроїв Arduino застосовуються мови C/C++, що робить процес взаємодії з мікроконтролерами максимально зручним. Програмна оболонка проєктувалася як інструмент із

відкритим кодом, що передбачає можливість його адаптації під специфічні завдання користувача [22]. Окрім використання стандартних об'єктно-орієнтованих можливостей C++, розробник має змогу інтегрувати низькорівневі інструкції з середовища AVR-C, що значно розширює потенціал керування апаратною частиною [23-25].

Програмна оболонка Arduino IDE інтегрує в собі низку ключових компонентів для розробки: спеціалізований текстовий редактор, секцію системних повідомлень, термінал (консоль) для виведення даних, а також функціональну панель зі швидким доступом до основних інструментів. Для прошивки розробленого алгоритму в пам'ять мікроконтролера середовище встановлює пряме з'єднання з апаратною платформою Arduino.

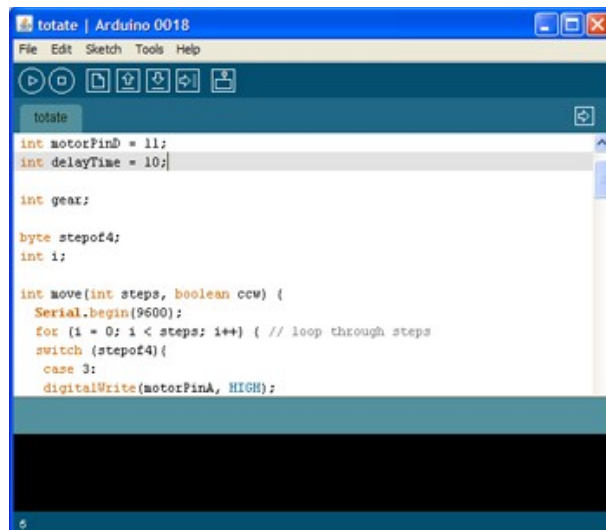


Рис. 2.2. Інтерфейс інтегрованого середовища розробки (IDE) Arduino

Користувачка програма в середовищі Arduino має назву скетч. Редагування коду відбувається за допомогою інструментів пошуку, заміни та форматування тексту. Стан поточних процесів (збереження, компіляція) візуалізується в області повідомлень, де фіксуються виниклі помилки. Розширені діагностичні звіти та технічна інформація щодо роботи середовища передаються у вікно виводу тексту (консоль).

У Табл.3.1 описано функціональне призначення елементів керування Arduino IDE.

Таблиця 3.1. Функціональне призначення елементів керування Arduino IDE

Назва кнопки	Функціональне призначення
Verify	Верифікація синтаксису та компіляція програмного коду.
Upload	Трансляція коду в машинний вигляд та його передача на плату Arduino.
New/Open/Save	Базові операції файлової системи: створення, відкриття та збереження проєктів.
Serial Monitor	Інструмент для діагностики та візуалізації даних, що передаються шиною UART.

Меню Edit містить специфічні команди для роботи з кодом поза межами середовища розробки:

- Copy for Discourse: автоматично форматує виділений код для публікації на веб-форумах, додаючи необхідні теги для підсвічування ключових слів мови C++.
- Copy as HTML: формує HTML-еквівалент програмного коду, що дозволяє розробнику швидко публікувати скетчі на персональних сайтах чи в онлайн-документації без втрати читабельності синтаксису.

Основні команди меню Sketch:

1. Verify/Compile – діагностика помилок у коді та компіляція.
2. Import Library – підключення бібліотек через автоматичне додавання інструкції #include.
3. Show Sketch Folder – перегляд кореневої папки активного проєкту.
4. Add File... – додавання зовнішніх файлів до скетчу з відображенням у окремих вкладках інтерфейсу.

Основний інструментарій меню Tools:

1. Auto Format – інтелектуальне вирівнювання тексту програми.
2. Board – встановлення типу використовуваної плати Arduino.
3. Serial Port – вибір порту для передачі даних (список оновлюється автоматично).
4. Burn Bootloader – інсталяція завантажувача в мікроконтролер (актуально для чистих чипів серії ATmega). Вимагає попередньої перевірки типу плати та налаштувань програматора.

Для систематизації та зберігання програмних кодів середовище Arduino використовує функцію Sketchbook. Це стандартна папка, де за замовчуванням

накопичуються всі створені скетчі. Вперше ця папка генерується автоматично, щойно користувач ініціює роботу з IDE. Взаємодія з архівом проектів здійснюється безпосередньо через інтерфейс програми (меню **File** або кнопка **Open**). Якщо виникає потреба перенести робочі матеріали на інший диск або в іншу папку, це легко реалізувати в меню налаштувань (**Preferences**).

Організація багатофайлових проектів та структура коду. Інструментарій середовища дозволяє розподіляти програмний код між кількома вкладками, що спрощує роботу зі складними скетчами. Окрім внутрішніх форматів Arduino, система коректно опрацьовує файли мовами C (*.c) та C++ (*.cpp), а також підтримує підключення заголовних файлів із розширенням .h. Це забезпечує модульність архітектури та зручність під час компіляції.

Підготовка до завантаження ПЗ. Для успішної передачі скетчу слід попередньо обрати тип плати та активний порт у меню інструментів IDE. В системі Windows робочий порт (наприклад, COM7) визначається за допомогою системного монітора (Диспетчера пристроїв) у вкладці послідовних шин. Користувачам Linux слід орієнтуватися на системні шляхи /dev/ttyUSBx. Правильний вибір цих параметрів є критичним для коректної роботи завантажувача (bootloader).

Коли з портом і типом плати визначено, час відправляти код у «залізо». Використовуємо кнопку завантаження або у меню **File > Upload to I/O Board**. Якщо сучасна плата Arduino, вона “прокинеться” сама, а от на ретро-моделях потрібно натиснути **Reset** власноруч. Під час передачі скетчу можна побачити активну роботу світлодіодів RX та TX. Фінальний звіт про успіх або збої з’явиться внизу робочого вікна програми.

Для завантаження програмного забезпечення в Arduino використовується вбудований завантажувач (Bootloader). Він усуває потребу у зовнішніх апаратних засобах для запису коду. Програма активується на кілька секунд під

час кожного старту платформи або примусового завантаження скетчу. Статус роботи Bootloader відображається через миготіння світлодіода (L), що відповідає 13-му порту введення-виведення, зокрема під час скидання (reset) плати.

Бібліотеки. Функціонал скетчів розширюється за допомогою бібліотек, які підключаються через меню Sketch > Include Library. Це додає директиву `#include` у код, а під час складання програми відповідні файли компілюються разом із основним проєктом. Оскільки бібліотеки споживають пам'ять мікроконтролера, зайві модулі необхідно видаляти. Сторонні бібліотеки встановлюються вручну: архів розпаковується в папку `libraries`, розташовану в директорії зі скетчами користувача. Актуальний перелік доступних інструментів представлений на сайті Arduino.cc та безпосередньо в менеджері бібліотек середовища IDE.

Моніторинг послідовної шини – це вбудований у IDE інструмент для налагодження та взаємодії з Arduino. Передача даних: введення тексту в поле та відправка через “Send”/Enter. Налаштування: обов'язкове узгодження швидкості (Baud rate) із командою `Serial.begin` у коді. Сумісність: підтримка обміну даними не лише з IDE, а й із зовнішніми прикладними програмами (Processing, Flash, MaxMSP тощо).

Налаштування IDE. Для зміни параметрів роботи IDE потрібно скористатися вікном Preferences (меню “File” або “Arduino” залежно від ОС). Якщо потрібне налаштування відсутнє в графічному меню, його можна знайти у файлі конфігурації. Посилання на папку з цим файлом розміщене внизу вкладки Preferences.

Технічна еволюція мікроконтролерних платформ Arduino. Лінійка апаратних платформ Arduino представлена широким спектром моделей, що базуються на різних 8-бітних мікроконтролерах архітектури AVR. Сучасна версія Leonardo використовує чип ATmega32u4, який має вбудовану підтримку USB-з'єднання. Найпопулярніша модель Uno, як і її попередниця Duemilanove, побудована на базі мікроконтролера Atmel ATmega328. У

старіших ревізій, таких як Diecimila та перші серії Duemilanove, застосовувався чип ATmega168, а в найбільш ранніх прототипах — ATmega8. Для складних проєктів, що потребують великої кількості портів введення-виведення та значного обсягу пам'яті, розроблена платформа Arduino Mega2560 на основі однойменного мікроконтролера ATmega2560.

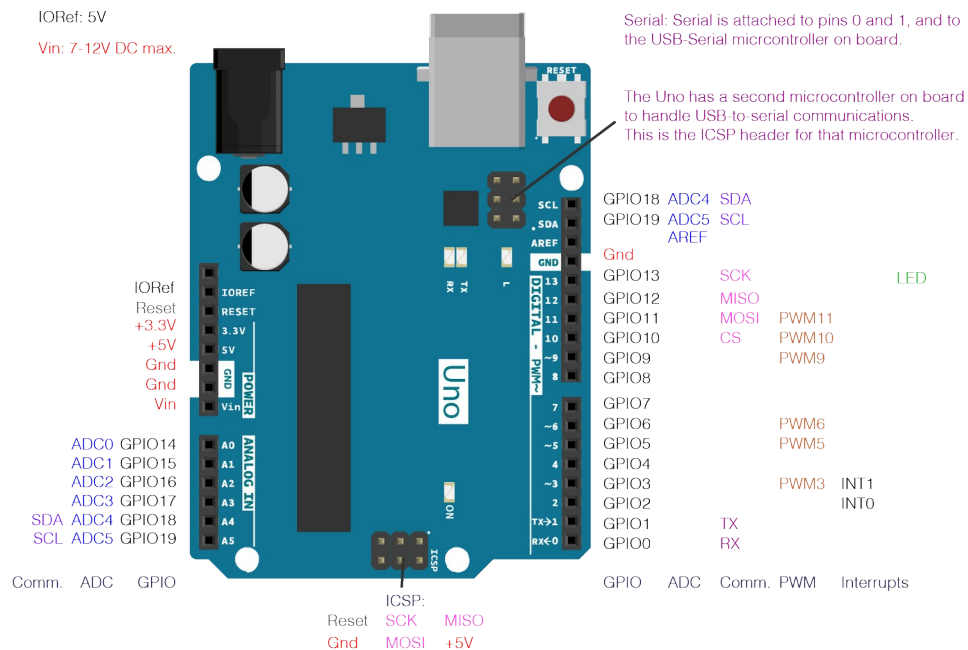


Рис. 2.3. Архітектура та компонування елементів плати Arduino UNO на базі ATmega328P

Вплив апаратної конфігурації на процес розробки. Вибір конкретної моделі платформи визначає критичні параметри функціонування системи, зокрема тактову частоту центрального процесора (ЦП) та швидкість обміну даними. Ці показники є визначальними під час компіляції вихідного коду та подальшої прошивки скетчів. Крім того, від обраного типу плати залежать специфічні налаштування для запису системного завантажувача (Bootloader) у пам'ять мікроконтролера.

Специфікації мікроконтролерних платформ на базі ATmega328. Модифікації плат Arduino Duemilanove та Nano, що функціонують на базі мікроконтролера ATmega328, характеризуються тактовою частотою 16 МГц. Важливою функціональною особливістю цих пристроїв є підтримка механізму програмного автоскидання (auto-reset). Аналогічна апаратна конфігурація та

частотні характеристики (16 МГц при напрузі живлення 5 В) застосовуються і для компактних версій контролерів, таких як Arduino Pro та Pro Mini.

Модифікації Arduino Diecimila, Duemilanove та Nano, що використовують чіп ATmega168, функціонують на тактовій частоті 16 МГц і підтримують механізм автоматичного скидання. Процеси компіляції та прошивки для цих пристроїв ідентичні параметрам Arduino NG або раннім версіям платформ із аналогічним контролером. Головною відмінністю є оновлений завантажувач (Bootloader) зі скороченим часом очікування (таймаутом), візуальним підтвердженням чого є поодинокі блимання світлодіода на 13-му піні під час перезапуску. Дана конфігурація також є стандартом для 5-вольтових версій Arduino Pro та Pro Mini з частотою тактування 16 МГц.

Для реалізації складних обчислювальних завдань використовується Arduino Mega, серцем якої є чіп ATmega1280. Пристрій працює на частоті 16 МГц і оснащений механізмом автоматичного перезапуску перед ініціалізацією сесії прошивки, що забезпечує безперебійну взаємодію з IDE.

Платформа Arduino Mini з чіпом ATmega168 (16 МГц) за логікою взаємодії з IDE подібна до застарілих версій контролерів Arduino. Ключовою відмінністю даної модифікації є відсутність механізму автоматичного рестарту, що характерно для ранніх розробок лінійки NG. Через це синхронізація завантаження коду потребує механічного натискання кнопки скидання користувачем у відповідний момент циклу запису.

Модельний ряд LilyPad Arduino включає версії на базі мікроконтролерів ATmega328 та ATmega168. Обидві модифікації працюють на тактовій частоті 8 МГц (3.3 В). Варіант з ATmega328 підтримує автоматичне скидання та програмно сумісний з платами Arduino Pro/Pro Mini.

РОЗДІЛ 3

АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ РАДІАЦІЙНОГО ФОНУ

3.1. Формування елементної бази системи виявлення радіоактивної контрабанди та моніторингу фонового випромінювання

Для реалізації системи моніторингу радіаційного стану та виявлення незаконного обігу радіоактивних речовин обрано наступний перелік компонентів:

- Мікроконтролерна база: обчислювальний модуль Arduino Uno, побудований на архітектурі AVR (Atmel ATmega328).
- Засоби візуалізації: рідкокристалічний символічний дисплей моделі WH1602B-YGK-CTK (формат 16x2, жовто-зелена підсвітка).
- Сенсорна частина: газорозрядні детектори іонізуючого випромінювання типу СБМ-20 (лічильники Гейгера-Мюллера).

Обґрунтування використання платформи Arduino Uno на базі мікроконтролера ATmega328. Сучасний ринок пропонує широку номенклатуру мікроконтролерів від численних світових виробників. Втім, аналіз співвідношення обчислювальної потужності, енергетичної ефективності та вартості дозволив визначити платформу Arduino Uno як оптимальну основу для даного проекту. Використання мікроконтролера Atmel AVR ATmega328P [26] забезпечує необхідну продуктивність для обробки даних у реальному часі, поєднуючи технічну надійність із простотою інтеграції периферійних модулів.

Сімейство 8-бітних мікроконтролерів AVR, розроблене компанією Atmel, базується на прогресивній RISC-архітектурі, що дозволяє ефективно реалізовувати алгоритми для складних вбудованих систем. Ключовою перевагою цих чипів є висока обчислювальна потужність у поєднанні з універсальністю застосування. Технологія внутрішньосхемного програмування спрощує процес налагодження, а ресурс флеш-пам'яті

дозволяє здійснювати до 10 000 циклів перезапису без демонтажу контролера з друкованої плати.

Сімейство AVR поділяється на підродини Tiny (компактні та дешеві), Classic (стандартні рішення з продуктивністю до 16 MIPS) та Mega (потужні МК з обсягом Flash до 128 Кб та вбудованим АЦП). Характерною особливістю архітектури є повна програмна сумісність при перенесенні коду на продуктивніші модифікації контролерів, що значно спрощує модернізацію апаратних засобів.

На Рис.3.1 наведено зображення модуля Arduino Uno із зазначенням доступних користувачу сигналів та відповідності пінів контролера ATmega328 зовнішнім портам.

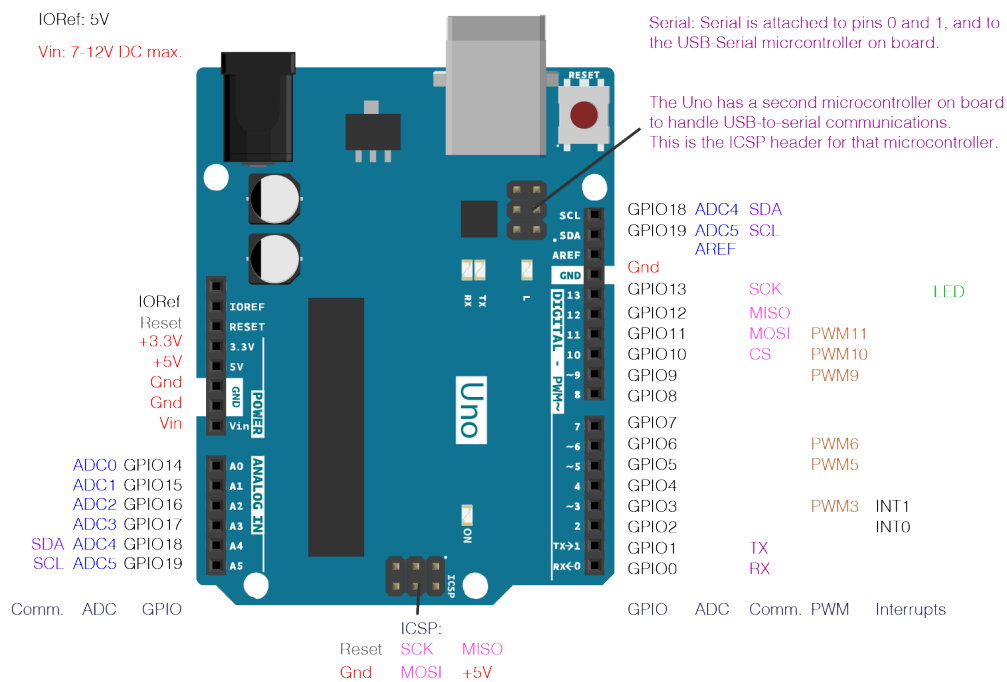


Рис.3.1. Загальний вигляд та архітектура платформи Arduino Uno

ATmega328P – це високопродуктивний 8-бітний мікроконтролер від Atmel, що має 32 КБ Flash-пам’яті з можливістю перепрограмування в системі. Завдяки вдосконаленій RISC-архітектурі пристрій забезпечує швидку обробку даних при збереженні високої енергоефективності. У Табл.3.1 наведено технічні характеристики МК ATmega328P.

Таблиця 3.1. Технічні характеристики мікроконтролера ATmega328P

Параметр	Значення/Характеристика
----------	-------------------------

Ядро	8-бітне AVR RISC (131 команда)
Продуктивність	до 1 MIPS на 1 МГц (макс. 20 MIPS)
Пам'ять (Flash/RAM/EEPROM)	32 КБ/2 КБ/1 КБ
Аналогові входи	8 каналів, 10-бітний АЦП
Таймери	2×8-біт, 1×16-біт
Кількість ШІМ-каналів	6
Комунікації	USART, SPI, I2C (TWI)
Напруга живлення	2,7 – 5,5 В
Корпусне виконання	28-pin PDIP або 32-pin TQFP/MLF

МК ATmega328P доступний у 28-вивідному корпусі PDIP або 32-вивідному TQFP. Напруга живлення: стабільна робота в діапазоні від 2,7 В до 5,5 В. Діапазон частот: від 0 до 20 МГц.

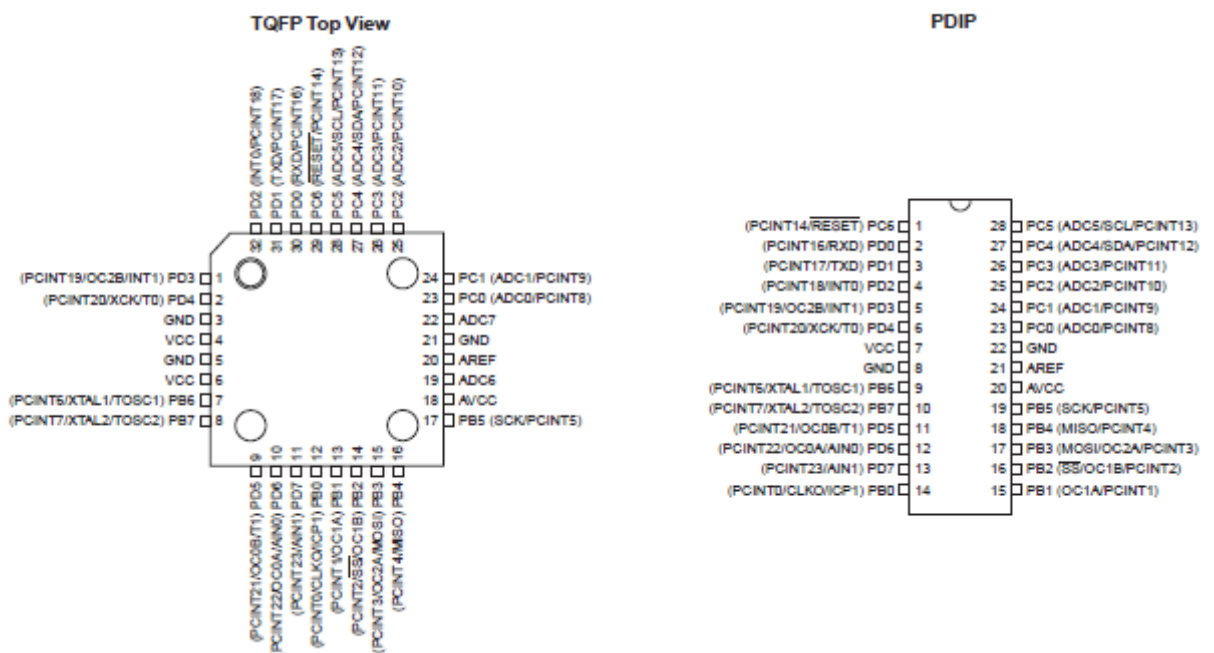


Рис. 3.2. Функціональна відповідність пінів мікроконтролера ATmega328P у корпусному виконанні PDIP і TQFP

Архітектура AVR базується на поєднанні розгалуженої системи команд із 32-ма регістрами загального призначення. Прямий зв'язок усіх регістрів з арифметично-логічним пристроєм (АЛП) дозволяє опрацьовувати два операнди за один такт. Таке рішення забезпечує десятикратну перевагу у продуктивності порівняно з традиційними CISC-мікроконтролерами.

Основними характеристиками вибраного контролера є пам'ять: 32 Кбайт FLASH, 1 Кбайт EEPROM та 2 Кбайт SRAM; периферія: 8-канальний 10-бітний АЦП, три таймери з модулями порівняння, Watchdog-таймер;

комунікації: інтерфейси USART, SPI, двопровідний послідовний порт; енергоефективність: підтримка 6 режимів очікування, що дозволяють вимикати ЦПУ (режим Idle) для економії ресурсу живлення.

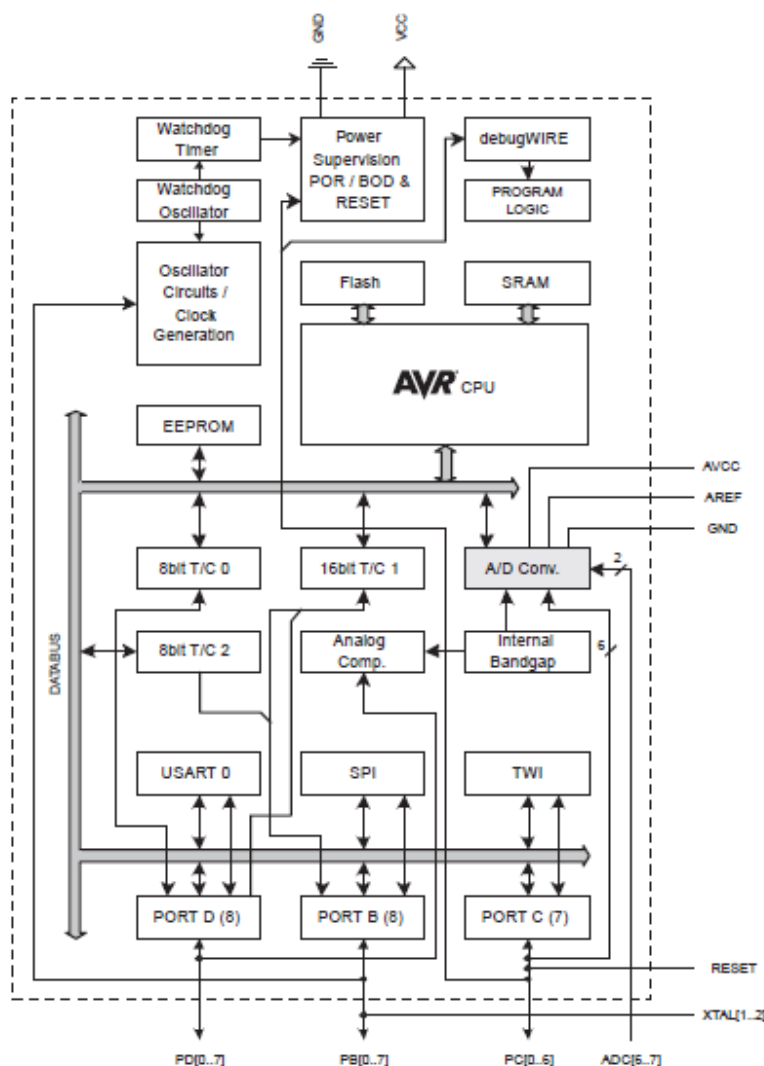


Рис. 3.3. Організація основних блоків та інтерфейсів МК ATmega328P

При зупинці ядра МК зберігається працездатність таких блоків, як послідовні порти (SPI, USART), шина I2C, оперативна пам'ять та система лічильників. Спеціалізований режим “ADC Noise Reduction” в ATmega328P вимикає більшість джерел високочастотних шумів, залишаючи активними тільки АЦП та асинхронний лічильник, що критично важливо для отримання прецизійних даних.

У стані повного вимкнення (Power-down) мікроконтролер призупиняє роботу внутрішнього тактового генератора та всіх функціональних блоків, проте забезпечує збереження поточного стану регістрів. Відновлення

активності системи можливе лише за умови надходження зовнішнього переривання або ініціації апаратного скидання (Reset).

Особливістю режиму очікування (Standby) є те, що активним залишається лише один генератор тактових імпульсів. Це дозволяє контролеру максимально швидко виходити зі стану зниженого енергоспоживання у робочий режим за командою зовнішнього переривання або іншої керуючої події.

Мікроконтролер ATmega328P демонструє високу адаптивність до зовнішніх чинників експлуатації та характеризується низьким рівнем енерговитрат. При активації режиму розширеного очікування (Extended Standby) пристрій підтримує функціонування як основного, так і асинхронного генераторів.

Конструктивною особливістю даного мікроконтролера є підтримка технології внутрішньосистемного програмування. Це дозволяє здійснювати перезапис Flash-пам'яті двома способами: через зовнішній SPI-інтерфейс за допомогою апаратного програматора або програмно, використовуючи самостійну завантажувальну секцію в структурі пам'яті самого AVR-ядра.

Завдяки поєднанню архітектури RISC (8 біт) та FLASH-технологій, контролер ATmega328P є оптимальним рішенням з точки зору функціональних можливостей та економічних витрат.

Аналого-цифровий перетворювач МК ATmega328. Взаємодія мікроконтролера із зовнішніми пристроями відбувається через цифрові порти, що сприймають лише два логічні стани. При 5-вольтовому живленні ATmega328P розрізняє логічний нуль (до $\approx 1,5\text{В}$) та логічну одиницю (від $\approx 1,9\text{В}$ до напруги живлення).

У практичних завданнях нерідко постає задача реєстрації вхідних напруг, що неперервно змінюються в межах від 0 до напруги живлення (V_{CC}). Для перетворення таких сигналів у цифровий код мікроконтролери сімейства AVR оснащені інтегрованим аналого-цифровим перетворювачем (АЦП).

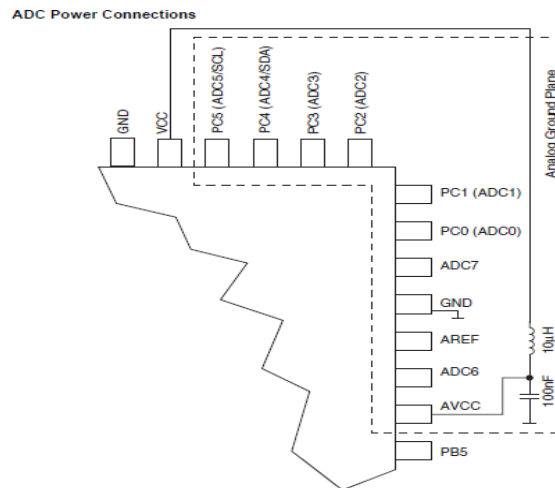


Рис. 3.4. Конфігурація аналогових входів модуля АЦП в АТmega328Р

Для мікроконтролера серії АТmega32 характерно, що всі виводи порту С можуть функціонувати як канали вбудованого модуля АЦП.

Взаємодія з блоком АЦП здійснюється через програмний доступ до його внутрішніх регістрів. Зокрема, регістр ADCSRA слугує для ініціалізації модуля, тоді як ADMUX дозволяє гнучко перемикатися між вхідними датчиками. Спеціальні налаштування переривань та режимів автозапуску доступні в регістрі SFIOR. Отримані цифрові дані після завершення циклу перетворення автоматично записуються в регістрову пару ADCH:ADCL, що забезпечує 10-бітну роздільну здатність вимірювання.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
(0x7C)	REFS1	REFS0	ADLAR	–	MUX3	MUX2	MUX1	MUX0	ADMUX
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Вибір еталонної напруги для процесу квантування в мікроконтролері АТmega328Р здійснюється шляхом маніпуляції бітами REFS1 та REFS0 регістру ADMUX. Архітектура дозволяє використовувати три основні стратегії: зовнішнє джерело через термінал AREF, напругу живлення AVCC (що є найбільш поширеним для систем на базі Arduino) або внутрішній прецизійний стабілізатор з номіналом 1.1В. Останній режим є особливо ефективним при вимірюванні малих сигналів, оскільки підвищує чутливість АЦП без використання зовнішніх підсилювачів.

Параметр U_{REF} визначає максимальний рівень аналогового сигналу, який може бути коректно оцифрований модулем АЦП. Будь-яка вхідна напруга, що перевищує цей еталон, буде інтерпретована системою як граничне значення, тобто як шістнадцяткове число 0x3FF.

Джерелами опорної напруги можуть бути: напруга AV_{CC} (через пасивний ключ), внутрішній стабілізований рівень 1,1 В (з використанням буферного підсилювача) або зовнішній сигнал на вході AREF.

Пряме з'єднання виводу AREF з АЦП дозволяє мінімізувати завади опорної напруги шляхом встановлення зовнішнього конденсатора між цим виводом та шиною заземлення. Крім того, наявний рівень U_{ref} можна проконтролювати за допомогою вольтметра з високим вхідним опором.

Результат аналого-цифрового перетворення має 10-бітну розрядність і фіксується у парі регістрів – ADCH та ADCL. Стандартно дані записуються у молодші біти 16-бітного поля, що відповідає правосторонньому вирівнюванню. Проте, за необхідності, користувач може активувати лівостороннє вирівнювання (розміщення даних у старших бітах), встановивши прапорець ADLAR у конфігураційному регістрі ADMUX.

Процес зчитування ADCL активує механізм блокування оновлення регістрів даних з боку АЦП. Це гарантує, що якщо нове перетворення завершиться до моменту зчитування ADCH, вміст обох регістрів залишиться незмінним, а новий результат буде ігноровано. Повний доступ АЦП до регістрів ADCH та ADCL відновлюється лише після завершення операції читання старшого байта (ADCH).

Вибір конкретного аналогового каналу або каскаду диференційного підсилювача здійснюється за допомогою конфігурування бітів групи MUX у регістрі ADMUX. Система дозволяє призначити один із восьми доступних входів (ADC0...ADC7) як джерело однополярного сигналу для аналого-цифрового перетворення.

У режимі диференційного сигналу підсилювач опрацьовує різницю рівнів напруги між парою вибраних входів. Користувач має можливість

самостійно визначити інвертуючий та неінвертуючий канали, а також встановити необхідний рівень підсилення сигналу.

Сформований підсилювачем сигнал подається безпосередньо на вхід АЦП для подальшого перетворення. У випадку активації однополярного режиму вимірювання, тракт диференційного підсилення виключається з ланцюга обробки сигналу.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	ADEN	ADSC	ADATE	ADIF	ADIE	ADPS2	ADPS1	ADPS0	ADCSRA
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Таблиця 3.4. Параметри преддільника (Prescaler) модуля АЦП

Біт ADPS2	Біт ADPS1	Біт ADPS0	Prescaler
0	0	0	2
0	0	1	2
0	1	0	4
0	1	1	8
1	0	0	16
1	0	1	32
1	1	0	64
1	1	1	128

Для адаптації тактової частоти АЦП до частоти ядра мікроконтролера використовується преддільник (Prescaler). Його коефіцієнт задається трійкою бітів ADPS[2:0] (Табл.3.4). Мінімальне значення дільника складає 2 (при комбінаціях 000 та 001), а максимальне – 128 (при встановленні всіх трьох бітів в одиницю, 111). Проміжні значення кратні ступеню двійки: 4, 8, 16, 32 та 64, що відповідає послідовному перебору бінарних значень від 010 до 110.

$$f_{ADC} = \frac{f_{CPU}}{Prescaler}$$

Робота преддільника ініціюється одночасно з активацією АЦП (встановлення біта ADEN). Весь час, поки модуль увімкнений (ADEN=1), дільник залишається активним, а при вимкненні модуля (ADEN=0) – автоматично скидається.

Для забезпечення граничної точності вимірювань (10-бітна роздільна здатність) тактування схеми послідовного наближення має здійснюватися в межах 50–200 кГц. У випадках, коли пріоритетом є швидкість оцифрування, а

не максимальна розрядність, допускається підвищення вхідної частоти АЦП понад поріг у 200 кГц, що призведе до пропорційного зниження точності результату. Стандартний цикл оцифрування сигналу триває 13 тактів АЦП. Проте початкове перетворення після активації модуля (бітом ADEN) займає 25 тактів, що зумовлено часом на підготовку аналогових каскадів. Після завершення операції дані записуються в регістри результату, а статусний прапор ADIF переходить у логічну одиницю.

При роботі в режимі одиночного перетворення біт ADSC автоматично скидається після завершення операції. Для повторного запуску необхідно знову програмно встановити цей біт, після чого оцифрування розпочнеться з першим позитивним фронтом тактового сигналу. Якщо активовано режим автоматичного перезапуску (Free Running mode), нові цикли перетворення стартують безперервно один за одним, а біт ADSC постійно перебуває в стані логічної одиниці. Для ініціації одиничного циклу АЦП у біт ADSC записується логічна одиниця. Цей біт зберігає високий рівень протягом усього періоду конвертації та автоматично скидається після її завершення. При зміні вхідного каналу під час роботи система спочатку завершує поточний цикл, а вже потім перемикає мультиплексор. Режим безперервного оцифрування активується через біт ADFR у регістрі ADCSRA. У такому разі повторні перетворення виконуються автоматично, незалежно від стану прапорця переривання ADIF.

Активація біта ADATE (Auto Trigger Enable) переводить АЦП у режим автоматичного запуску. У такому стані кожне нове перетворення ініціюється по висхідному фронту сигналу від вибраного джерела. Конкретне джерело тригера визначається комбінацією бітів ADTS, що розташовані в регістрі SFIOR.

Прапорець ADIF підтверджує готовність даних у регістрах ADCH:ADCL. При дозволених перериваннях (ADIE та I) встановлення біта викликає перехід до відповідного вектора, де він скидається автоматично. Програмне очищення здійснюється записом одиниці. Слід уникати інструкцій

SBI та CBI при роботі з ADCSRA, щоб не втратити запит на обслуговування переривання.

Біт ADIE (ADC Interrupt Enable) слугує для активації переривань АЦП. Якщо цей біт та загальний прапорець переривань I у регістрі SREG знаходяться в стані логічної одиниці, система дозволяє генерацію переривання одразу після завершення циклу вимірювання. Результат оцифрування зберігається у парі регістрів ADCH та ADCL. Підрахунок вихідного цифрового значення для одиночного перетворення здійснюється за формулою:

$$ADC = \frac{V_{IN} \cdot 1024}{V_{REF}}$$

Де: V_{IN} – фактична напруга на вході пристрою; V_{REF} – встановлений рівень опорної напруги.

Опис лічильників Гейгера-Мюлера СБМ-20. На сьогоднішній день номенклатура детекторів іонізуючого випромінювання типу Гейгера-Мюллера представлена великою кількістю моделей. Ключовими критеріями, що визначають вибір конкретного компонента, є його радіометрична чутливість, номінальна робоча напруга та конструктивні розміри пристрою.

Серед сучасних засобів реєстрації іонізуючих частинок домінуючу позицію займають газорозрядні трубки серії СБМ. Їхня функціональна специфікація передбачає високу ефективність детектування гамма-квантів та часткову реєстрацію жорсткого бета-випромінювання. Водночас конструктивні особливості цих датчиків унеможливають фіксацію альфа-частинок та м'якого бета-спектру. Найбільш затребуваною моделлю в цій лінійці є СБМ-20, який широко застосовується в системах радіаційного моніторингу [27].

Окрім базових моделей, існують малогабаритні модифікації, такі як СБМ-10 та СБМ-21. Завдяки компактному виконанню вони є оптимальними для інтеграції в портативні пристрої, проте їхня чутливість суттєво нижча порівняно з СБМ-20. Для підвищення швидкодії системи доцільно

використовувати паралельне ввімкнення двох лічильників СБМ-20, що забезпечує швидшу реєстрацію імпульсів. Також варто відзначити детектори зі слюдяним вікном (наприклад, СБТ-9 або СБТ-11), які характеризуються високою чутливістю до різних видів випромінювання.

Незважаючи на тривалу історію розробки, детектори типу СБМ-20 та їхні функціональні аналоги СТС-5 залишаються затребуваними в сучасній інженерії. Вони є базовими компонентами в архітектурі новітніх систем дозиметричного моніторингу та радіаційного контролю.



Рис. 3.5. Зовнішній вигляд газорозрядних детекторів СТС-5 та СБМ-20

Таблиця 3.5. Основні характеристики газорозрядного лічильника СБМ-20

Параметр	Значення
Чутливість (^{137}Cs , 4 мкР/с)	70 імп/мкР (280 імп/с)
Власний радіаційний фон	≈ 1 імп/с
Енергія гамма-випромінювання	0,05...3,0 МеВ
Поріг реєстрації бета-випромінювання	від 0,3 МеВ
Гранична частота імпульсів	5263 Гц
Максимальна потужність дози	242,9 мР/год (2,43 мЗв/год)
Робоча напруга ($U_{\text{жив}}$)	360...440 В
Габаритні розміри ($\varnothing \times L$)	11×108 мм

Конфігурація підключення лічильників Гейгера-Мюллера представлена на Рис.3.6.

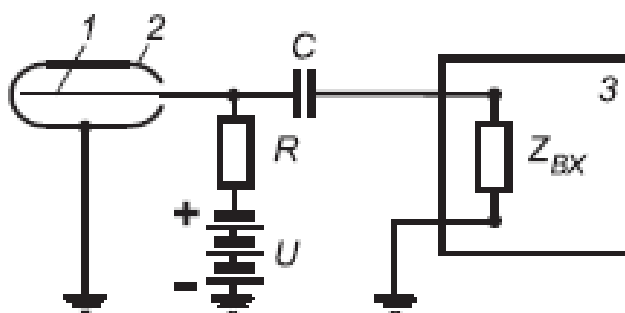


Рис. 3.6. Принципова схема під'єднання детекторів Гейгера-Мюллера: 1 – анодний електрод; 2 – катодна оболонка; 3 – блок реєстрації імпульсів

Живлення електродів детектора здійснюється від джерела високої напруги. Для гальванічної розв'язки між високовольтним колом лічильника та

вхідними каскадами електронного модуля використовується роздільний конденсатор C . Послідовно підключений резистор R забезпечує зниження потенціалу на анодній нитці під час виникнення розряду. Номінал цього опору ($10^8 \dots 10^9$ Ом) розраховується таким чином, щоб утримувати напругу на аноді заниженою до моменту повної нейтралізації позитивних іонів на катоді. У разі детектування іонізуючого випромінювання на виході формується короткочасний імпульс (Рис. 3.7), який через одновібратор передається на вхід мікроконтролера для подальшого аналізу.

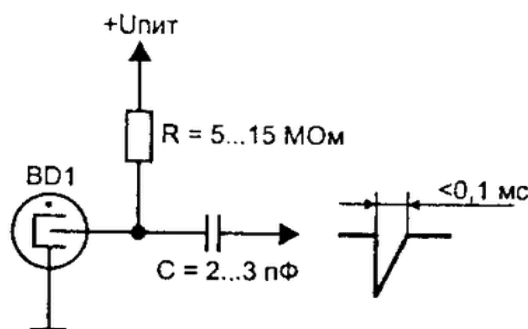


Рис. 3.7. Часові та амплітудні характеристики вихідного сигналу при реєстрації іонізуючого випромінювання

Процедура калібрування вимірювальних систем на базі датчиків СБМ-20 та СТС-5 є достатньо лінійною: прийнято вважати, що сумарна кількість зареєстрованих імпульсів протягом 40 секунд чисельно відповідає потужності експозиційної дози у мкР/год.

Опис та вивід значень на РК-дисплей (LCD). РКІ-модулі являють собою ефективний інтерфейс виводу інформації, що поєднує в собі інформативність та низьку споживану потужність. Конструктивне виконання таких дисплеїв дозволяє використовувати їх у складі мобільних та польових систем завдяки стійкості до температурних коливань (у межах $-20^{\circ}\text{C} \dots +70^{\circ}\text{C}$). Вбудована система підсвічування розширює функціональні можливості пристрою, забезпечуючи зчитування даних при будь-якому рівні зовнішнього освітлення, що робить їх оптимальними для автономних засобів вимірювання.

Архітектура РК-модуля включає панель відображення та інтегрований контролер управління. Для забезпечення видимості в різних умовах передбачена LED-підсвітка. Основні параметри дисплея (Рис. 3.8):

- формат виводу: 2 рядки по 16 знакомісць;
- структура символу: матриця точок 5×8;
- поділ знаків: інтервал шириною в 1 піксель між сусідніми символами.



Рис. 3.8. Дворядковий РК-екран (по 16 символів у рядку), оснащений підсвіткою жовто-зеленого кольору

Модель WH1602B-YGK-СТК являє собою знакосинтезуючий рідкокристалічний індикатор формату 16х2. Особливістю даного модуля є виведення символів чорного кольору на контрастному жовто-зеленому фоні, що забезпечує чітке зчитування інформації.

Модуль постачається разом із необхідною обв'язкою: гребінкою для зручного макетування, потенціометром (10 кОм) для підбору оптимального контрасту та резистором (10 Ом) для живлення підсвітки. Дворядковий дисплей (16 символів у рядку) має жовто-зелене забарвлення фону та працює під управлінням HD44780-сумісного контролера.

Принцип роботи РК-модуля базується на відповідності кожного відображуваного символу конкретному коду, що зберігається в оперативній пам'яті (ОЗП) пристрою. Внутрішня архітектура модуля включає два типи пам'яті: область збереження кодів символів та енергонезалежну пам'ять знакогенератора користувача. Окрім масивів даних, інтегрована логіка модуля забезпечує безпосереднє керування рідкокристалічною панеллю.

Функціональні можливості РК-модуля:

- Підтримка символних наборів: наявність інтегрованого знакогенератора з двома програмно-керованими сторінками, що забезпечують виведення кирилических та латинських символів.
- Гнучкість інтерфейсу: можливість обміну даними через 4-бітну або 8-бітну паралельну шину (конфігурується на етапі ініціалізації пристрою).
- Повнодуплексна взаємодія: підтримка операцій запису та зчитування даних/команд через шину, а також можливість моніторингу прапорця зайнятості (Busy Flag) для контролю стану модуля.
- Користувальницька графіка: наявність області пам'яті (CGRAM) для створення та зберігання до 8 унікальних знакомісць, визначених розробником.
- Система індикації: програмне керування курсором (вибір форми та режиму мерехтіння), а також апаратне або програмне налаштування контрастності та інтенсивності підсвічування.

Для візуалізації даних у сучасних розробках доцільно застосовувати символні РК-модулі, оскільки вони є малобюджетними та зручними в експлуатації. Такі пристрої гарантують високу інформативність виводу та характеризуються низьким рівнем енергоспоживання, що важливо для автономної апаратури.

РК-індикатори адаптовані для використання в несприятливих умовах: вони оснащені підсвіткою для роботи в темряві та мають широкий діапазон робочих температур ($-20^{\circ}\text{C} \dots +70^{\circ}\text{C}$). Це дозволяє надійно використовувати їх у польовій апаратурі, переносних вимірювальних приладах та бортових системах керування.

Програмне забезпечення та інтерфейс управління. Розгляд принципів функціонування РК-дисплея варто розпочати з аналізу будови керуючого драйвера HD44780. Детальний розбір його архітектури допоможе розкрити механізми обробки команд та виведення символної інформації, що лежать в основі більшості сучасних символних індикаторів.

Керуюча програма взаємодіє лише з частиною внутрішніх ресурсів контролера, зокрема з регістрами IR та DR. Інші функціональні вузли – такі як знакогенератор, драйвери та блоки регенерації зображення – працюють в автоматичному режимі й недоступні для прямого маніпулювання. Зв'язок із мікроконтролером забезпечується через стандартний інтерфейс управління.

Для вибору між регістром інструкцій (IR) та регістром даних (DR) використовується вхід RS (відповідно стани “0” та “1”). Регістр DR виступає буфером для обміну даними з пам'яттю DDRAM чи CGRAM за адресою, яку вказує лічильник AC. Натомість інформація в регістрі IR розглядається системою як команди керування дисплеєм і підлягає подальшій інтерпретації блоком керування.

Відеопам'ять модуля (80 байтів) зберігає коди символів і логічно розділена на два рядки по 40 байтів. Ця структура адресації є стандартною для всіх типів РК-модулів на базі даного контролера (від 80x1 до 20x4). Таким чином, програмне звернення до комірок пам'яті завжди базується на дворядковій організації, незалежно від фактичної кількості видимих рядків на екрані.

Контролер реалізує алгоритм динамічного сканування для постійного оновлення вмісту екрана. Рідкокристалічна панель представлена у вигляді сегментної матриці, архітектура якої визначається програмними налаштуваннями (8, 11 або 16 рядків розгортки). При максимальній довжині рядка у 40 знаків, кожна горизонтальна лінія об'єднує 200 сегментів, що дозволяє формувати символи з матрицею точок 5x7 або 5x10.

Базовий контролер HD44780 має 40 сегментних виходів, чого достатньо для обслуговування лише 8-символьних РКІ. Для реалізації модулів більшої розмірності (наприклад, 16x2 або 20x4) до схеми додаються зовнішні драйвери розширення типу HD44100, кожен з яких керує додатковими 40 сегментами. Усі поточні режими функціонування контролера задаються через систему внутрішніх регістрових прапорців.

Взаємодія з LCD-модулями (контролер Hitachi HD44780 та аналоги) у середовищі розробки здійснюється через бібліотеку `LiquidCrystal.h`. Вона підтримує більшість стандартних символьних форматів (1x16, 2x16, 4x20 тощо). Приклад підключення індикатора до плати Arduino Uno наведено на Рис. 3.9.

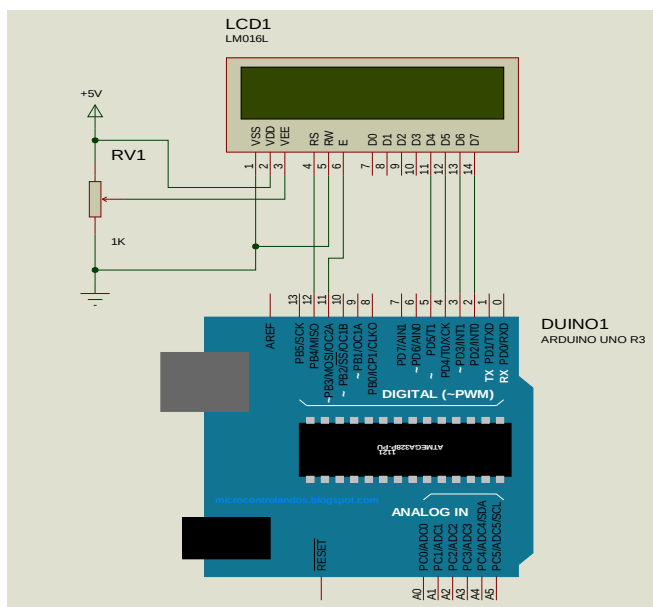


Рис. 3.9. Схема інтерфейсного підключення символьного РК-дисплея до керуючої плати Arduino Uno

3.2. Проектування системи моніторингу радіаційного фону для виявлення контрабанди радіоактивних матеріалів

Проектована система моніторингу радіаційного фону, призначена для детектування контрабанди радіоактивних речовин, має забезпечувати безперервне вимірювання рівня випромінювання та аналіз отриманих показників. Функціонал пристрою передбачає передачу даних на ПК через послідовний інтерфейс, а також активацію сигналізації у разі перевищення встановлених порогових значень [28-31]. Структурна схема запропонованої системи моніторингу представлена на Рис. 3.15.

Апаратне забезпечення системи моніторингу радіаційного фону складається з таких компонентів:

1. Сенсорний блок: детектор СБМ-20 із допоміжним модулем генерації анодної напруги (400 В).
2. Система живлення та перетворення: блоки узгодження рівнів напруги (6 В – 12 В) та пристрій заряджання автономного джерела живлення.
3. Логічний вузол: плата Arduino Uno, що взаємодіє з сенсором через схему одновібратора для коректної реєстрації імпульсів випромінювання.
4. Вихідні пристрої: блок РК-індикації, елементи тривожної сигналізації та перемикач робочих алгоритмів мікроконтролера.

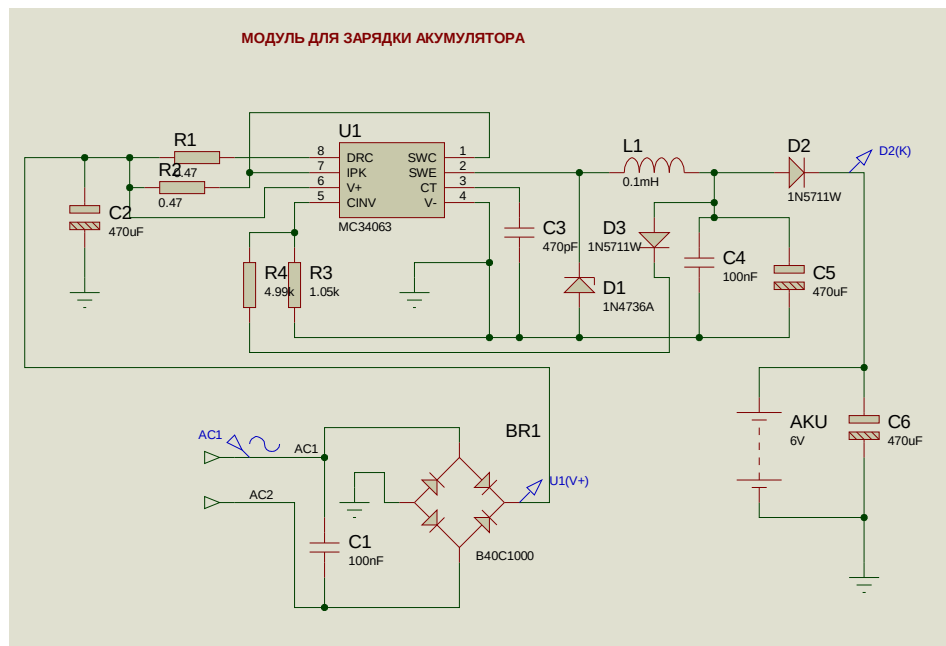


Рис. 3.10. Модуль контролю та керування процесом заряджання акумуляторної батареї

Енергозабезпечення дозиметра-радіометра здійснюється від акумуляторної батареї з номінальною напругою 6 В та ємністю 1,2 А·год. Процес відновлення заряду реалізовано за допомогою модуля, зображеного на Рис.3.10. Схема працює наступним чином: на вхідні клеми AC1-AC2 надходить змінна напруга діапазоном 10...18 В, яка випрямляється діодним мостом BR1. Подальша стабілізація та зниження напруги до рівня 6,8 В, необхідного для коректного заряджання акумулятора, забезпечується імпульсним DC-DC перетворювачем на базі мікросхеми U1.

Підвищувальний DC-DC перетворювач реалізований на базі спеціалізованої мікросхеми MC34063, що функціонує в режимі Step-Up конвертора. Для розширення навантажувальної здатності пристрою до 3 А у схему інтегровано зовнішній силовий транзистор Q1. Можливість точного налаштування вихідної напруги забезпечується за допомогою підлаштовного резистора (потенціометра) RV1.

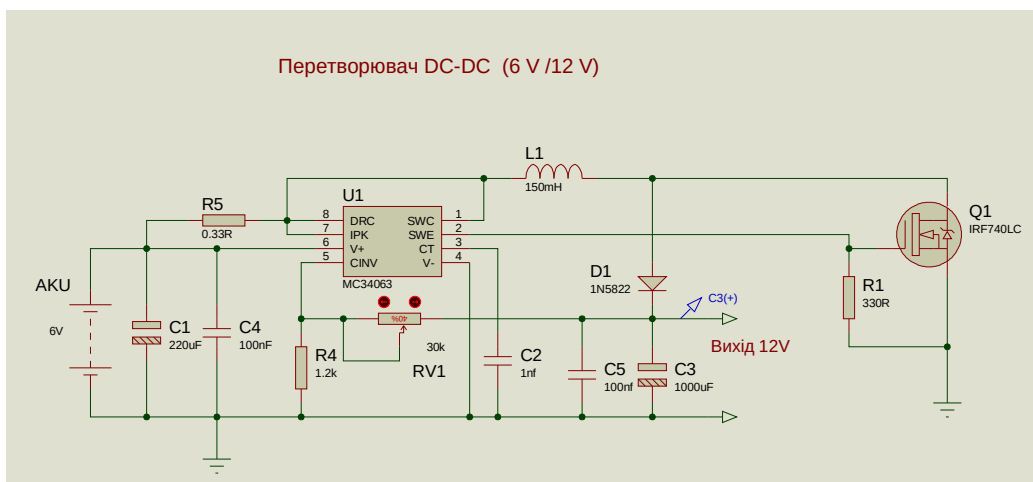


Рис. 3.11. Принципова схема підвищувального DC-DC перетворювача
напруги 6 В/12 В

Функціонування газорозрядних лічильників Гейгера-Мюллера потребує наявності джерела високої напруги. Зазвичай такі вузли проєктуються як автономні блоки живлення. На Рис.3.12 представлено одну з класичних схем підвищувального перетворювача напруги 12 В у 400 В.

Високовольтний каскад реалізовано на базі інтегрального таймера серії 555, що функціонує в режимі ШІМ-генератора. Налаштування робочої частоти здійснюється за допомогою потенціометра RV1, а регулювання коефіцієнта заповнення (шпаруватості) – через RV2. Сформовані імпульси надходять на затвор силового транзистора Q1, що забезпечує індуктивне підвищення

напруги на котушці L1 до рівня 400 В. Точне юстування вихідного потенціалу виконується потенціометром RV2. Згладжена напруга з накопичувального конденсатора C4 подається на аноди лічильників Гейгера–Мюллера. Робочий діапазон частот генератора становить 4...14 кГц.

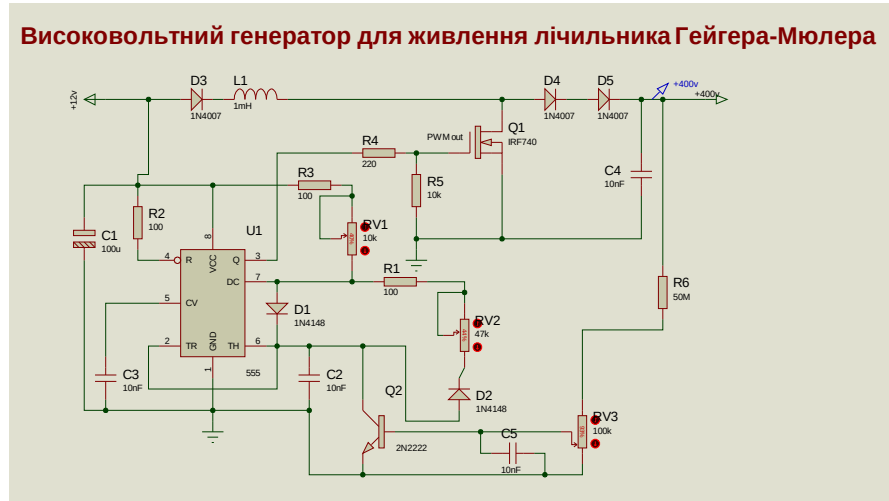


Рис. 3.12. Принципова схема високовольтного генератора для живлення лічильника Гейгера-Мюллера

Альтернативним рішенням є програмна реалізація ШІМ безпосередньо на мікроконтролері, що дозволяє суттєво спростити апаратну частину (Рис. 3.13).

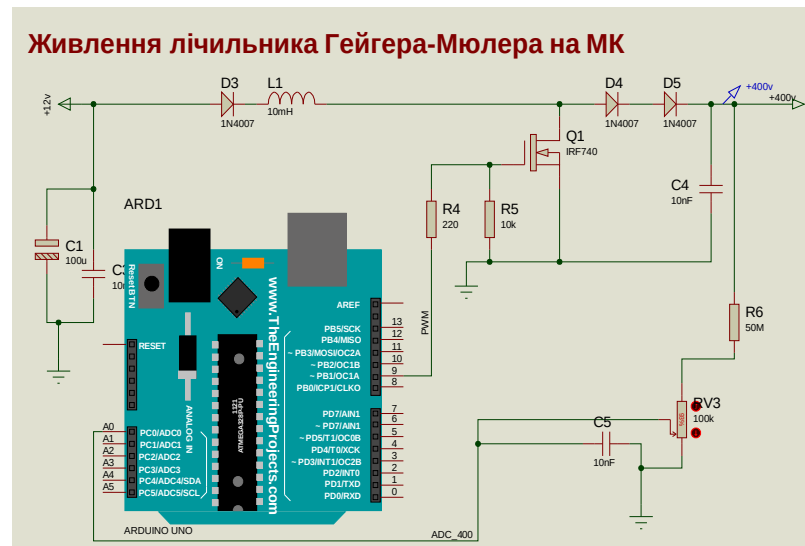


Рис. 3.13. Схема високовольтного вузла живлення лічильника Гейгера–Мюллера на базі контролера Arduino Uno

Для формування високої напруги номіналом 400 В з виходу мікроконтролера PE3 (OC3A) на затвор транзистора Q1 надходить ШІМ-

послідовність. Стабілізація та підтримка вихідної напруги у заданих межах реалізована за принципом зворотного зв'язку: через резистивний подільник R6–RV3 сигнал подається на вхід аналого-цифрового перетворювача ADC0. Залежно від отриманого значення, мікроконтролер динамічно корегує параметри ШІМ-сигналу на виході PE3 (OC3A) для підтримання стабільного рівня 400 В.

На Рис.3.14 представлено схему одновібратора, призначеного для нормалізації вихідних сигналів лічильника Гейгера-Мюллера. Пристрій перетворює короткі імпульси з пологими фронтами, що надходять від детектора, у прямокутні імпульси фіксованої тривалості. Така попередня обробка є необхідною для коректної реєстрації подій входом переривання мікроконтролера.

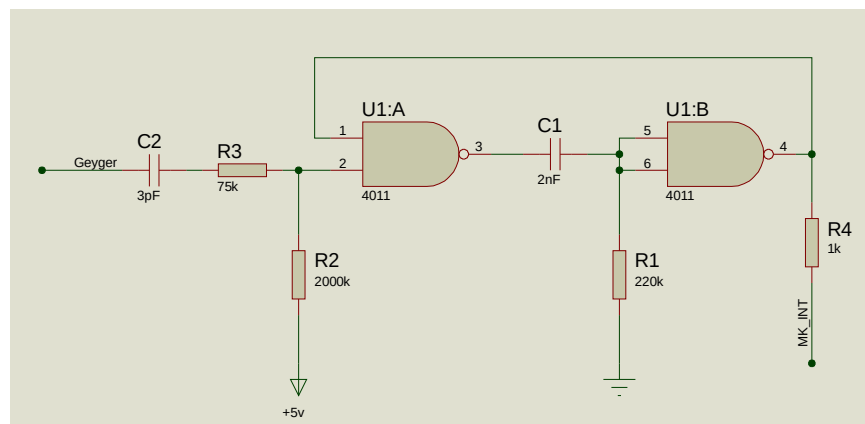


Рис. 3.14. Принципова схема одновібратора для нормалізації імпульсів лічильника Гейгера-Мюллера

Центральним вузлом обробки даних у системі є платформа Arduino Uno на базі мікроконтролера ATmega328 (архітектура AVR). Вона забезпечує виконання ключових функцій: реєстрацію та обробку сигналів від лічильника Гейгера–Мюллера, виведення розрахованих показників на рідкокристалічний дисплей (LCD), а також трансляцію результатів вимірювань на персональний комп'ютер через послідовний інтерфейс (UART).

**Структурна схема системи
моніторингу радіаційного фону
для виявлення контрабанди радіоактивних матеріалів**

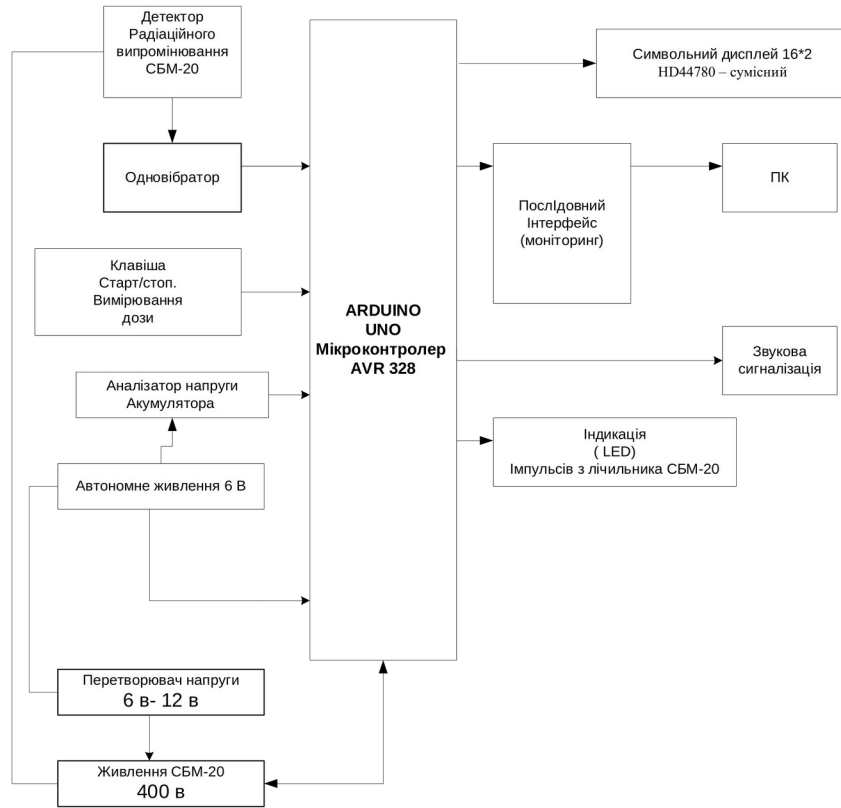


Рис. 3.15. Структурна схема системи моніторингу радіаційного фону

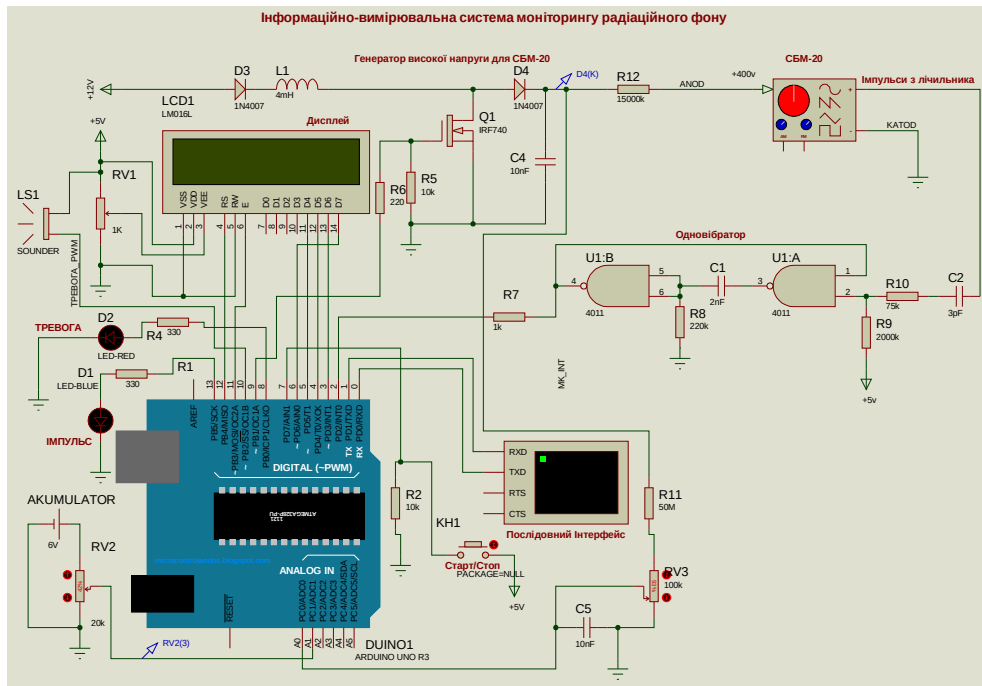


Рис. 3.16. Модель апаратного забезпечення системи радіаційного моніторингу на базі Arduino Uno у середовищі проектування Proteus ISIS

На Рис.3.16 представлена принципова схема інформаційно-виміральної системи моніторингу радіаційного фону. Функціонування пристрою базується на безперервному контролі потужності випромінювання з подальшою візуалізацією отриманих даних на рідкокристалічному дисплеї та їх трансляцією на персональний комп'ютер через послідовний інтерфейс.

При перевищенні встановленого порогу потужності випромінювання (понад 0,3 мкЗв/год) система активує засоби оповіщення. Алгоритм передбачає ввімкнення звукової сигналізації за допомогою п'єзоелектричного випромінювача LS1 та візуальну індикацію у вигляді мерехтіння червоного світлодіода "Тривога".

Візуалізація інтенсивності надходження радіаційних імпульсів реалізована за допомогою світлодіодного індикатора синього кольору (LED1). На рідкокристалічний дисплей у режимі реального часу виводяться розраховані значення потужності еквівалентної дози випромінювання (у мкЗв/год), а також показник інтенсивності потоку часток СРМ (кількість імпульсів за хвилину).

Натискання кнопки КН1 "Старт-Стоп" активує програмний таймер, після чого на дисплеї починає відображатися накопичена за період вимірювання еквівалентна доза радіації (у мкЗв). Це дозволяє користувачеві відстежувати сумарний рівень опромінення протягом визначеного інтервалу часу.

Для забезпечення стабільної роботи системи здійснюється моніторинг стану заряду акумуляторної батареї та контроль напруги живлення лічильника СБМ-20. Дані вимірювання реалізовані через аналогові входи А1 та А0 мікроконтролера Arduino Uno відповідно. Висока напруга для детектора формується методом ШІМ-модуляції з цифрового виходу D9, а стабілізація вихідного рівня виконується за допомогою зворотного зв'язку через вхід А0. До складу високовольтного генератора входять: індуктивність L1, силовий ключ Q1, випрямний діод D4, а також резистивний подільник на базі R6, R5, R11 та підлаштовного резистора RV3.

Короткі імпульси, що генеруються лічильником СБМ-20 у результаті детектування часток, надходять на вхід зовнішнього переривання INT0 плати Arduino Uno. Попередня обробка сигналу здійснюється за допомогою одновібратора, реалізованого на мікросхемі U1 та пасивних елементах C1, C2, R10, R9, R8, R7, що забезпечує нормалізацію імпульсів для їхнього подальшого програмного аналізу.

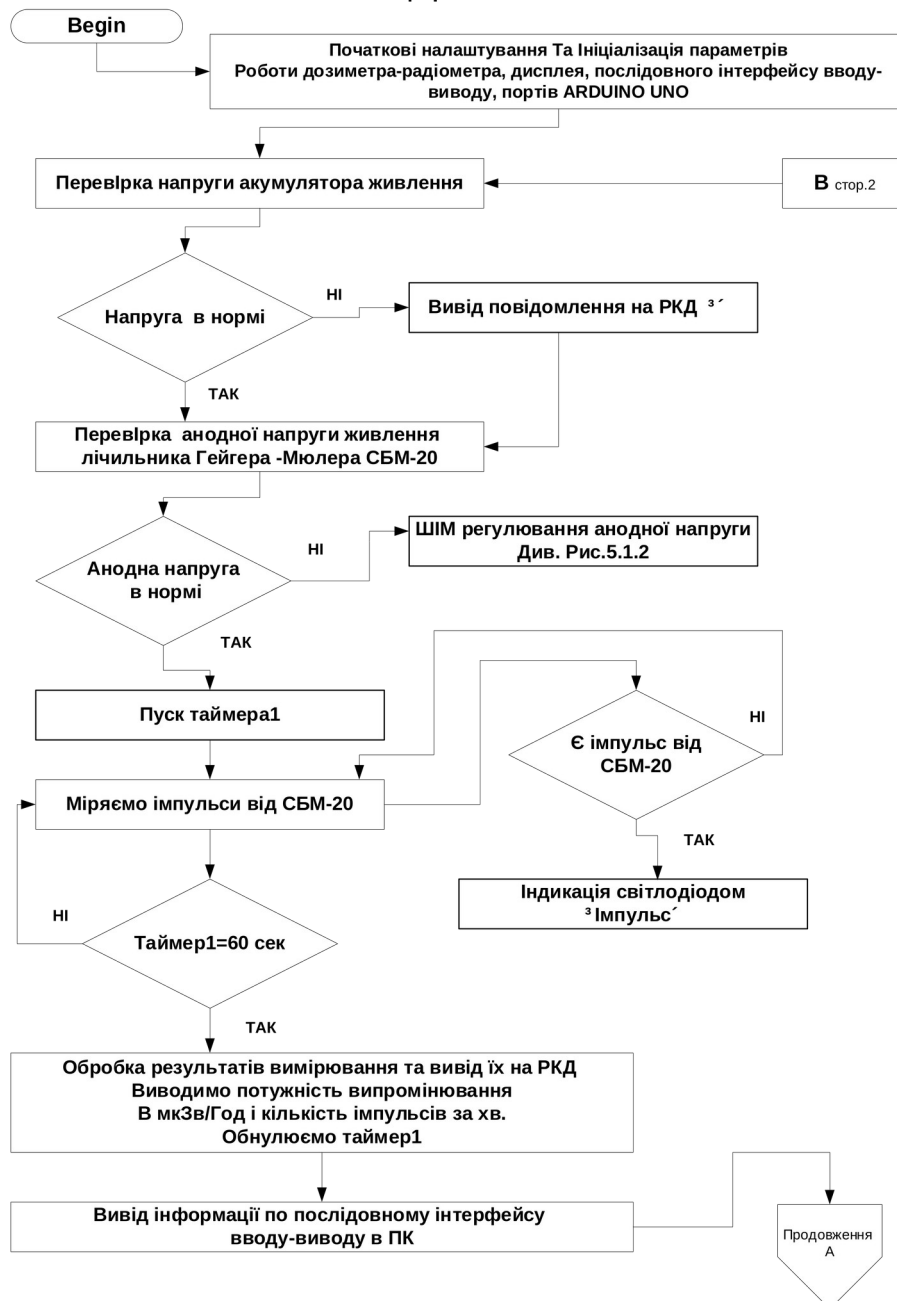
Програмне забезпечення розроблено у середовищі Arduino IDE із застосуванням стандартних бібліотек та інструментарію платформи для компіляції та прошивки мікроконтролера. Верифікація алгоритмів та налагодження взаємодії апаратних модулів здійснювалися шляхом симуляції компільованого коду в САПР Proteus ISIS [32–34].

РОЗДІЛ 4

ПРОГРАМНО-АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ РАДІАЦІЙНОГО ФОНУ

4.1. Алгоритмічне забезпечення системи моніторингу радіаційного фону

Алгоритм інформаційної системи моніторингу радіаційного фону на
платформі ARDUINO



**Алгоритм інформаційної системи моніторингу радіаційного фону на
платформі ARDUINO
(продовження)**

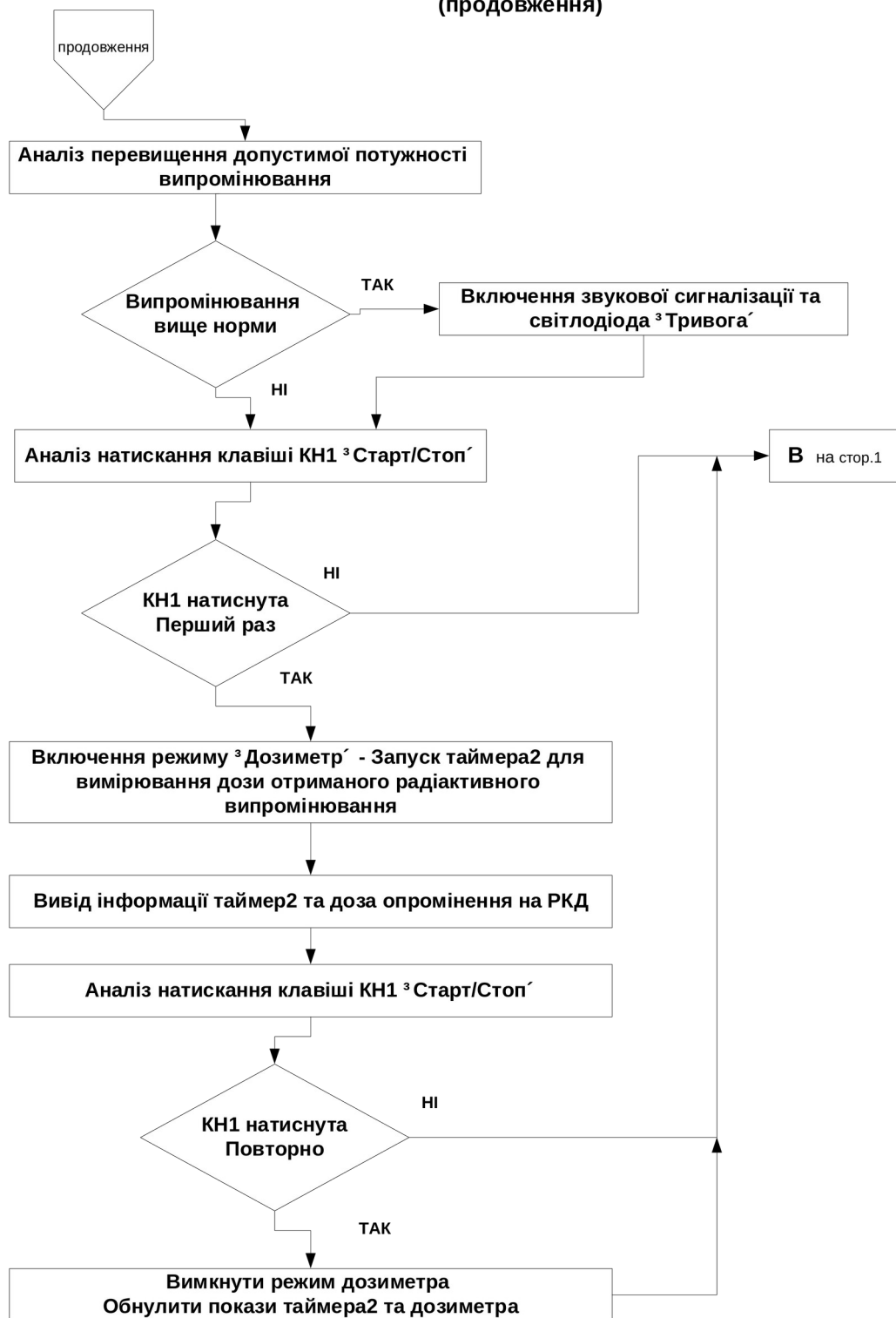


Рис. 4.1. Алгоритм функціонування системи моніторингу радіаційного фону

Алгоритм, що демонструє процес корекції анодної напруги для детектора Гейгера, представлено на Рис. 4.2.



Рис. 4.2. Алгоритм керування високовольтним живленням детектора Гейгера

4.2. Розробка програмного модуля керування високовольтним живленням лічильника Гейгера

Нижче наведено програмний код, що реалізує алгоритм керування анодною напругою детектора Гейгера-Мюллера відповідно до логіки, представленої на Рис. 4.2.

/* Функція керування високовольтним живленням анода.

```

* Здійснює моніторинг поточної напруги та коригує коефіцієнт заповнення ШІМ для
стабілізації. */
void handleHV() {
    int sensorValue = analogRead(PIN_ANALOG_HV);
    float voltage = (sensorValue * 5.0 * 100.0) / 1024.0; // Спрощена формула
    if (voltage < TARGET_UHV && pwmDuty < 250) pwmDuty += 2;
    else if (voltage > TARGET_UHV && pwmDuty > 5) pwmDuty -= 2;

    analogWrite(PIN_PWM_HV, pwmDuty);
}

```

4.3. Програмне втілення керуючої логіки системи моніторингу радіаційного фону

Програмне забезпечення розроблене згідно зі структурною логікою, представленою на Рис. 4.1, і забезпечує повне функціонування інформаційної системи радіаційного контролю. Детальний лістинг вихідного коду міститься у додатку до роботи.

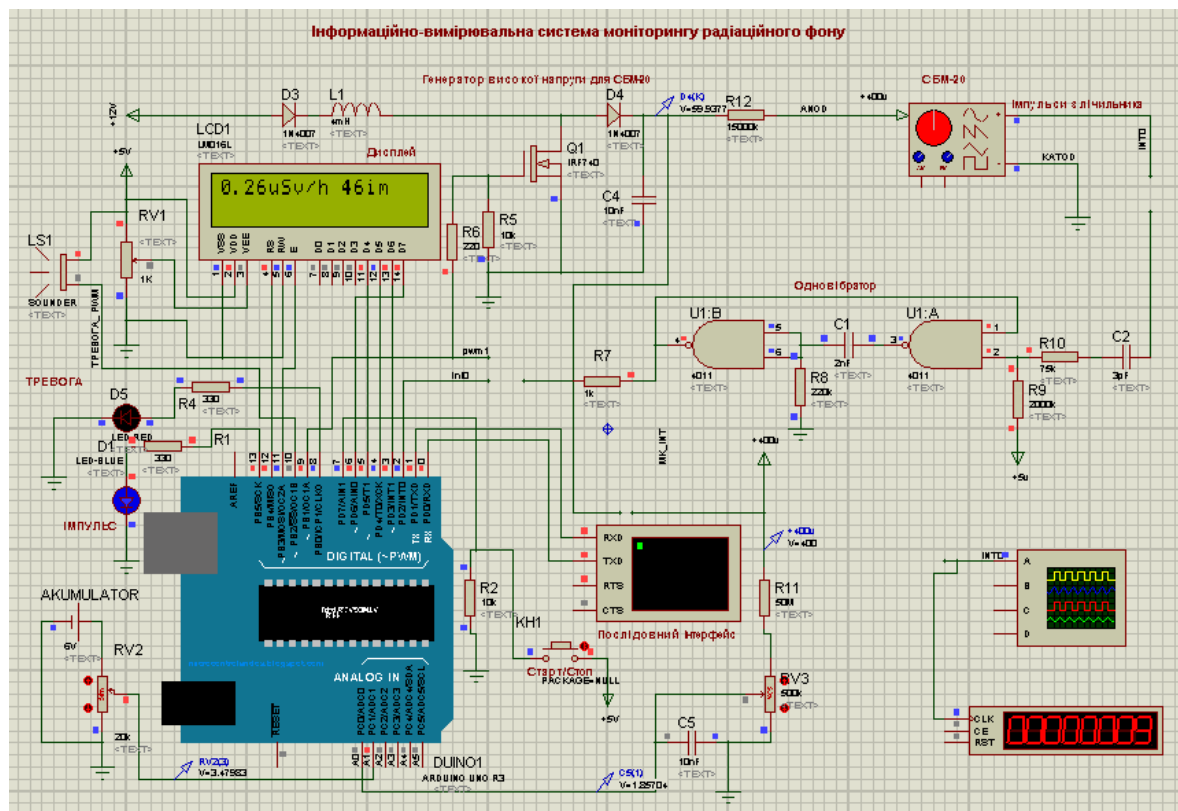
4.4. Віртуальна апробація системи моніторингу радіаційного контролю у середовищі Proteus ISIS

Процес підготовки програмного забезпечення для платформи Arduino Uno на базі мікроконтролера ATmega328 завершується генерацією виконуваного файлу з розширенням .hex у середовищі Arduino IDE. Даний файл є образом прошивки, що завантажується в пам'ять МК. Для верифікації схемотехнічних рішень та програмної логіки спроектованого пристрою використовується симуляційне середовище Proteus ISIS.

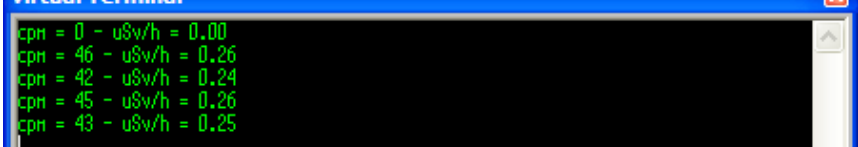
Середовище Proteus VSM представляє собою високоефективний інструментарій для симуляції та відлагодження складних мікропроцесорних систем. Функціонал програми дозволяє моделювати пристрої, що базуються на кількох контролерах одночасно, зокрема й різних архітектур, у межах одного проекту. Результати віртуального тестування розробленого цифрового вузла наведено на наступних ілюстраціях.

Proteus VSM – це багатифункціональне середовище автоматизованого проектування (САПР), розроблене британською компанією Labcenter

Архітектура програмного комплексу Proteus базується на взаємодії двох ключових модулів: ISIS, призначеного для проектування та інтерактивного моделювання електронних ланцюгів, та ARES, що слугує інструментом для професійного трасування та розробки топології друкованих плат.



У режимі функціонування радіометра (Рис. 4.3) на рідкокристалічний індикатор виводиться потужність еквівалентної дози (мкЗв/год) та інтенсивність потоку частинок (імп/хв). Реєстрація кожної іонізуючої частинки супроводжується світловою індикацією за допомогою синього



The screenshot shows a 'Virtual Terminal' window with a blue title bar. The terminal output displays five lines of green text, each representing a CPU entry with its ID and a calculated value:

- cpn = 0 - u\$w/h = 0.00
- cpn = 46 - u\$w/h = 0.26
- cpn = 42 - u\$w/h = 0.24
- cpn = 45 - u\$w/h = 0.26
- cpn = 43 - u\$w/h = 0.25

The terminal has a black background and a vertical scrollbar on the right side.



77

критичної дози зафіксовано на позначці 0,3 мкЗв/год. У разі фіксації вищих значень автоматично активуються світлова індикація (червоний світлодіод “Тривога”) та акустичне оповіщення за допомогою п’єзовипромінювача LS1. Якщо поточні показники не виходять за межі встановленої норми, зазначена сигналізація залишається деактивованою.

На Рис.4.6 представлено результати моделювання процесу розряду акумуляторної батареї. Симуляція падіння напруги джерела живлення реалізована за допомогою регулювального потенціометра RV2. У випадку критичного зниження рівня заряду акумулятора на рідкокристалічному дисплеї (РКД) у нижньому рядку генерується попереджувальний символ “+”.

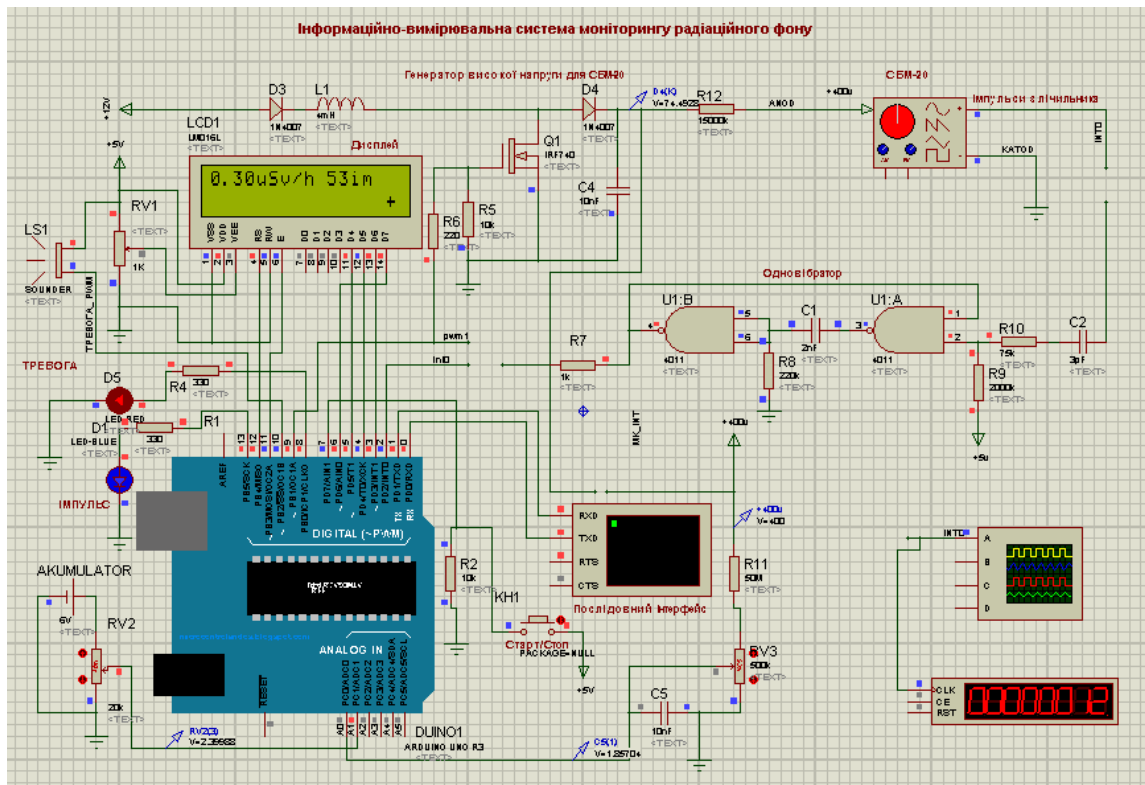


Рис. 4.6. Моделювання пониження напруги акумулятора живлення

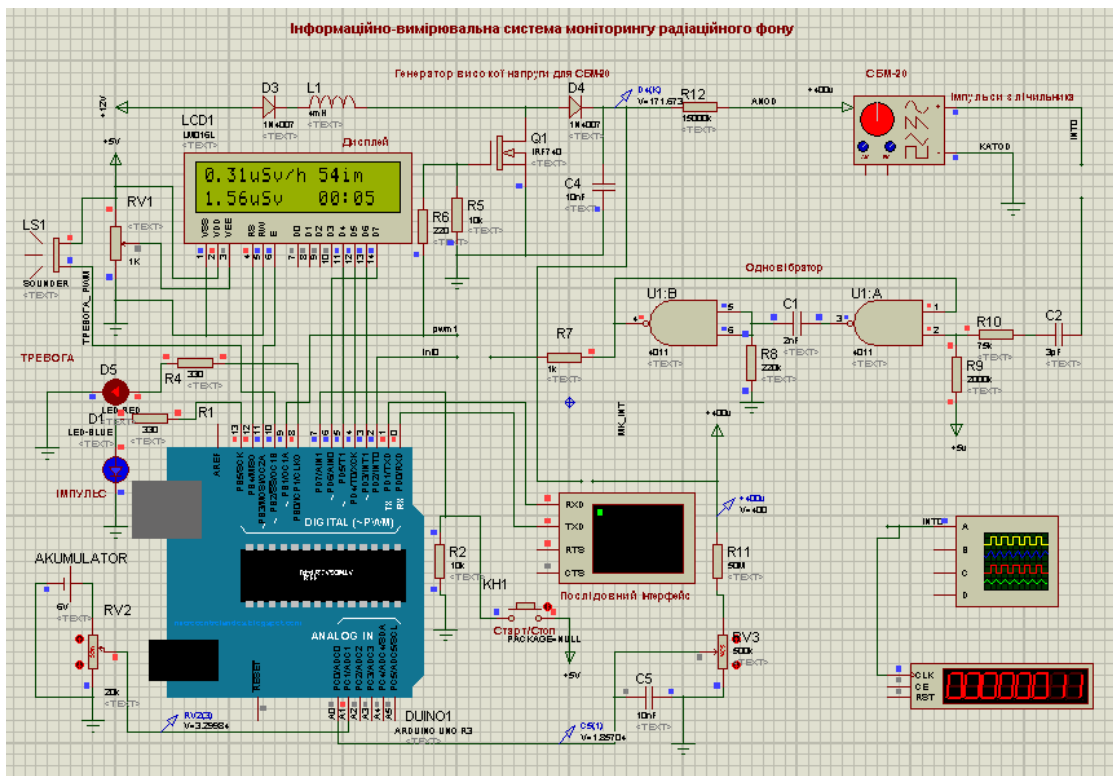


Рис. 4.7. Візуалізація результатів імітаційного моделювання системи у функціональному режимі дозиметра

На Рис.4.7 представлено результати моделювання функціонування системи у режимі дозиметра. Активація процесу вимірювання здійснюється натисканням клавіші КН1 (“Старт/Стоп”), після чого ініціалізується внутрішній таймер і починається розрахунок інтегральної (накопиченої) дози випромінювання. Програмно встановлено ліміт таймера тривалістю 24 години, після завершення яких відбувається автоматичне скидання та новий цикл відліку. Індикація часу на дисплеї реалізована у форматі “години:хвилини”, а значення поглинутої дози подається в мікросівертах (мкЗв). Деактивація режиму та обнулення поточних показників на рідкокристалічному дисплеї (РКД) виконується повторним натисканням клавіші КН1.

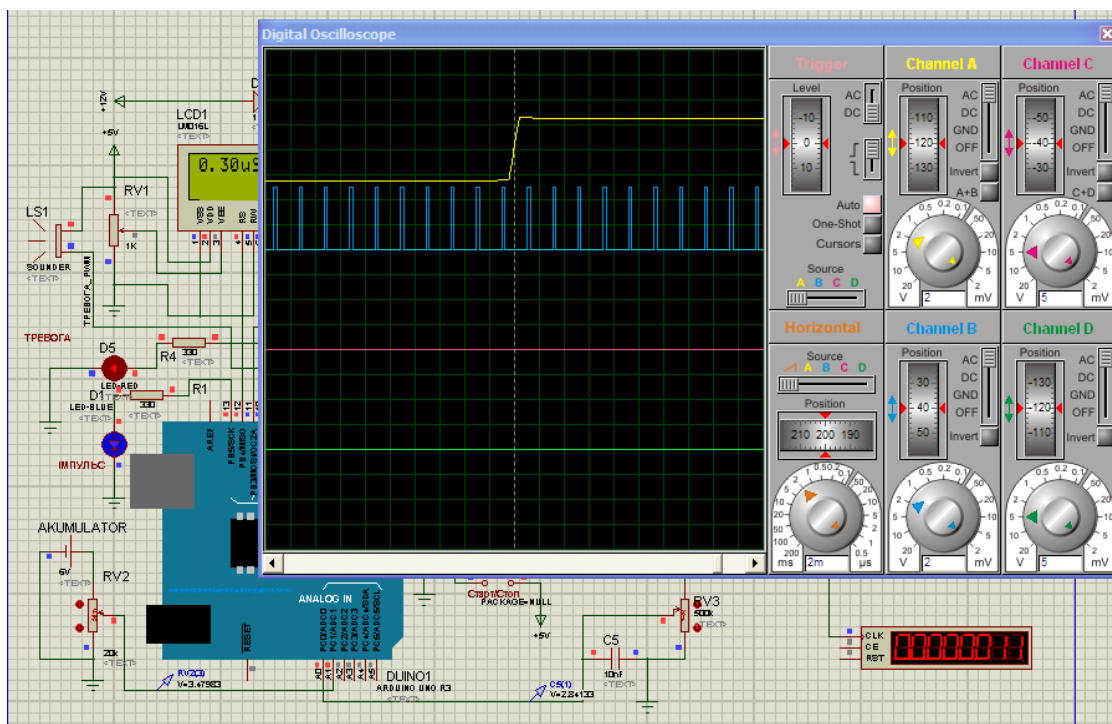


Рис. 4.8. Візуалізація процесу ШІМ-стабілізації анодної напруги для детектора СБМ-20: динаміка зниження робочого потенціалу

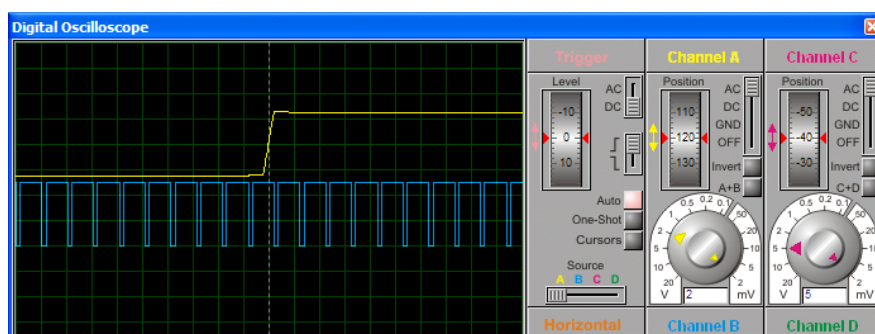


Рис. 5.9. Моделювання процесу адаптивного ШІМ-регулювання: ітераційне підвищення анодної напруги детектора СБМ-20 до номінального рівня

На Рис. 4.8 та Рис. 4.9 продемонстровано функціонування вузла автоматичної стабілізації анодної напруги газорозрядного лічильника СБМ-20. Процес динамічного коригування рівнів напруги (збільшення та зменшення) імітувався за допомогою змінного резистора RV3, що виступав у ролі джерела зворотного зв'язку. Моніторинг ШІМ-сигналів здійснювався безпосередньо на виході мікроконтролера ATmega328P (цифровий вивід D9). Отримані осцилограми підтверджують повну відповідність роботи програмного забезпечення раніше розробленому алгоритму керування (Рис.4.1).

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі на основі аналітичного огляду досліджено методи та інструменти реєстрації радіації. Визначено ключові технічні характеристики газорозрядних лічильників Гейгера. На базі платформи Arduino Uno (МК ATmega328) розроблено систему моніторингу радіаційного фону, призначену для детектування нелегального переміщення радіоактивних матеріалів.

Розроблена система забезпечує моніторинг потужності еквівалентної дози та розрахунок накопиченої дози за визначений інтервал часу. Результати вимірювань візуалізуються на рідкокристалічному дисплеї та дублюються через послідовний порт на ПК. При перевищенні встановлених порогів радіаційної безпеки пристрій активує систему попереджувальної сигналізації.

Ключовими перевагами розробленої системи радіаційного моніторингу є її висока економічна ефективність та багатофункціональність. Конструкція пристрою передбачає універсальність живлення: можливість тривалої автономної роботи від акумуляторних батарей або стаціонарну експлуатацію від побутової мережі напругою 220 В.

Високий рівень надійності розробленої системи моніторингу забезпечується алгоритмами оперативного реагування на критичні ситуації. Зокрема, реалізовано безперервний контроль потужності еквівалентної дози та моніторинг стану заряду акумуляторної батареї. Своєчасна генерація сповіщень дозволяє мінімізувати ризики радіаційного опромінення персоналу, оперативно ідентифікувати джерела випромінювання та локалізувати небезпеку на ранніх етапах.

Система моніторингу реалізована на базі мікроконтролера Atmel ATmega328 (платформа Arduino Uno). Основними функціональними блоками пристрою є детектори іонізуючого випромінювання (лічильники Гейгера-Мюллера), модуль високовольтного живлення та символний дисплей для відображення показників радіаційного фону.

У межах роботи виконано проектування електричної принципової схеми та розроблено імітаційну модель системи радіаційного моніторингу в

середовищі Proteus VSM. Сформовано алгоритм функціонування пристрою та реалізовано прикладне програмне забезпечення для платформи Arduino Uno. Системний код написано мовою C із використанням спеціалізованого середовища розробки Arduino IDE.

Програмна частина системи містить модулі для генерації та контролю високої напруги детектора, а також підсистему діагностики рівня заряду акумулятора. Працездатність алгоритмів збору та обробки радіаційних даних підтверджено результатами комплексного моделювання в емуляторі Proteus ISIS, що дозволило перевірити взаємодію апаратної та програмної складових.

Отримані результати імітаційного моделювання підтвердили адекватність програмної реалізації ключового алгоритму функціонування системи та коректність роботи всіх розроблених прикладних модулів у середовищі Proteus.

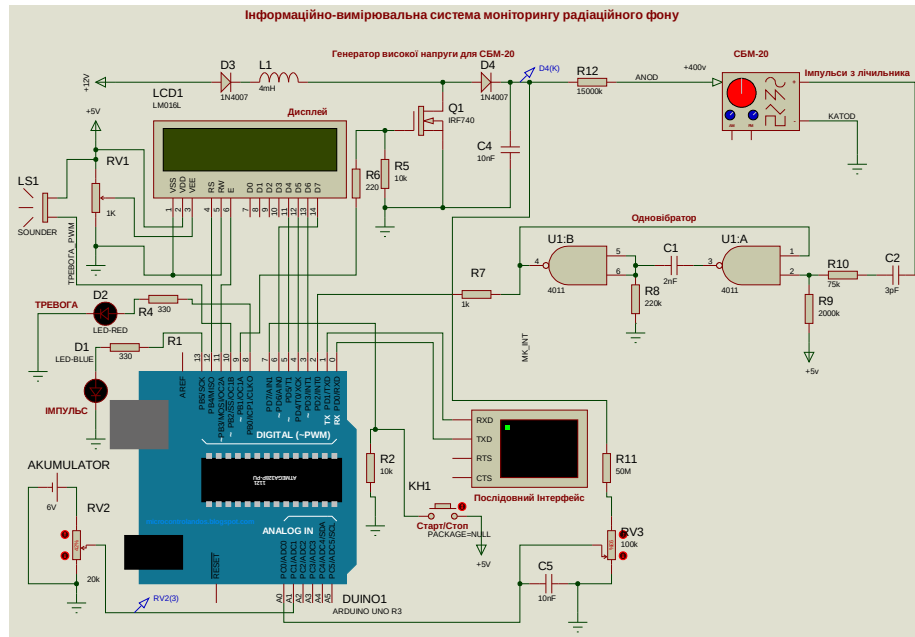
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про захист людини від впливу іонізуючих випромінювань : Закон України від 14 січня 1998 р. № 15/98-ВР.
2. Про захист населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру : Закон України від 08 червня 2000 р. № 1809-III.
3. Про правові засади цивільного захисту : Закон України від 24 червня 2004 р. № 1859-IV.
4. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97): Державні гігієнічні нормативи. Затверджено постановою Міністерства охорони здоров'я України від 14 липня 1997 р. № 62.
5. Основні санітарні правила протирадіаційного захисту населення України (ОСПУ-2005). Затверджено наказом МОЗ України від 02 лютого 2005 р. № 54 (взамін редакції 2000 р.).
6. Порядочний Л. В., Заплатинський В. М. Безпека в надзвичайних ситуаціях та цивільна оборона : навч. посібник. Київ : КНТЕУ, 2003. 301 с.
7. Стеблюк М. І. Цивільна оборона : підручник. Київ : Знання, 2006. 455 с.
8. Франчук В. С. Цивільна оборона : підручник. Львів : Афіша, 2001. 333 с.
9. Демиденко Г. П. Защита объектов народного хозяйства от оружия массового поражения : справочник. Киев : Выща школа, 1989. 282 с.
10. Gerald J. Hine, Gordon L. Brownell. Radiation Dosimetry. Academic Press, 2013. 925 p.
11. Jonathan Osher, Hugh Blemings. Practical Arduino: Cool Projects for Open Source Hardware. Springer-Verlag New York, 2009. 445 p.
12. Massimo Banzi. Getting Started with Arduino. 2nd Edition. O'Reilly Media Inc., 2011. 130 p.
13. Michael Margolis. Arduino Cookbook, 2nd Edition. O'Reilly Media Inc., 2012. 724 p.

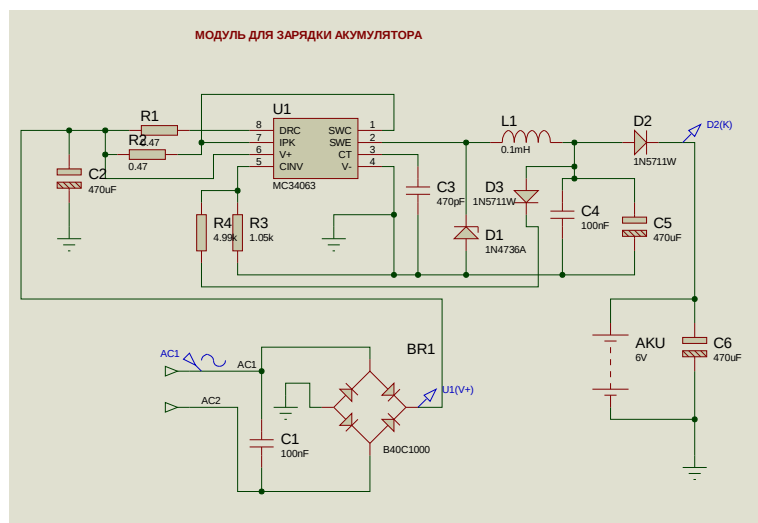
14. Jonathan Bartlett. Electronics for Beginners: A Practical Introduction to Schematics, Circuits, and Microcontrollers. Apress, 1st ed., 2020. 537 p.
15. Buruiană V., Oprea M. A Microcontroller-Based Radiation Monitoring and Warning System. IFIP International Conference on Artificial Intelligence Applications and Innovations. 2012. P. 380–389.
16. Priya P., Gowdani J., Roshini V., Sinthanai Selvi G. Detection and Measurement of Nuclear Radiations. Materials Today: Proceedings. 2017. Vol. 4. Issue 2. Part B. P. 4213–4218.
17. Petrušić Z., Jovanović I., Jovanović U., Mančić D. Wireless System for Measurement of Natural Background Gamma Radiation. Facta Universitatis. Series Working and Living Environmental Protection. 2014. Vol. 11. No 3. P. 177–184.
18. Jeong Ho Kim, Ki Hyun Park, Koan Sik Joo. Development of low-cost, compact, real-time, and wireless radiation monitoring system in underwater environment. Nuclear Engineering and Technology. 2018. Vol. 50. Issue 5. P. 801–805.
18. Lane R., Thompson S. PIC digital Geiger counter. Everyday Practical Electronics. 2007. No. 2. P. 12–19.
19. Proteus VSM Professional Simulation Software. URL: <https://www.labcenter.com/> (дата звернення: 22.03.2026).
20. Arduino IDE Software. URL: <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>.
21. ATmega328P Datasheet. Microchip Technology Inc. URL: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf (дата звернення: 22.03.2026).
22. Geiger-Muller tube SBM-20: Technical Note. URL: <https://iot-devices.com.ua/en/technical-note-how-to-calculate-the-conversion-factor-for-geiger-tube-sbm20/>.

ДОДАТКИ

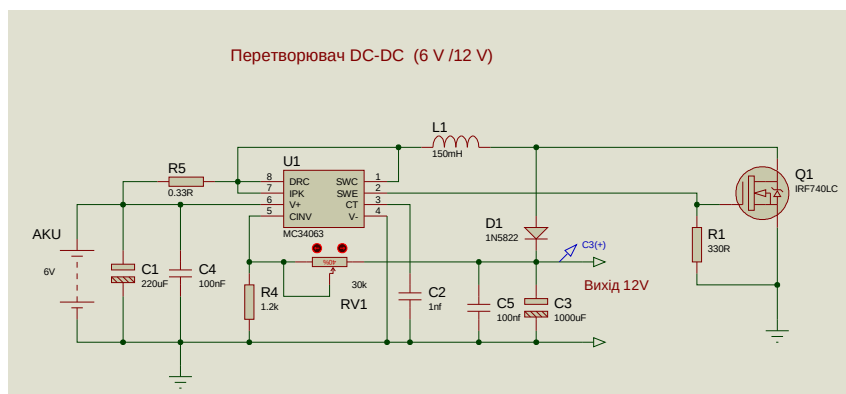
Додаток 1. Апаратне забезпечення системи моніторингу радіаційного фону



Модуль керування мікроконтролерної системи радіаційного моніторингу



Модуль контролю та керування процесом заряджання акумуляторної батареї



Принципова схема підвищувального DC-DC перетворювача напруги 6 В/12 В

Додаток 2

Лістинг програмного забезпечення системи моніторингу радіаційного фону

```
/******  
Проект: ПЗ системи моніторингу радіаційного фону  
Платформа: Arduino (Atmel AVR ATmega328P)  
Частота: 16.0 MHz  
*****/  
  
#include <LiquidCrystal.h>  
  
// Ініціалізація LCD (RS, E, D4, D5, D6, D7)  
LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 6);  
  
// Визначення пінів та констант  
const int PIN_GEIGER = 2; // Вхід від лічильника (INT0)  
const int PIN_LED_IMP = 13; // Індикація імпульсів  
const int PIN_LED_ALARM = 8; // Світлодіод тривоги  
const int PIN_SPEAKER = 10; // П'єзовипромінювач  
const int PIN_PWM_HV = 9; // ШІМ для високої напруги (HV)  
const int PIN_BTN = 7; // Кнопка керування дозиметром  
  
const float CONV_FACTOR = 0.0057; // Коефіцієнт для СБМ-20 (імп/хв -> мкЗв/год)  
const int ALARM_THRESHOLD = 30; // Поріг тривоги (0.30 мкЗв/год * 100)  
const int TARGET_V_ANODE = 400; // Необхідна напруга на аноді (В)  
  
// Глобальні змінні  
volatile unsigned long pulseCount = 0;  
unsigned long lastMeasureTime = 0;  
float radiationLevel = 0.0;  
float cumulativeDose = 0.0;  
int pwmDuty = 127; // Початкове заповнення ШІМ (50%)  
  
// Змінні таймера  
unsigned long startTime = 0;  
int hours = 0, minutes = 0;  
bool isDoseActive = false;  
  
void setup() {  
  pinMode(PIN_LED_IMP, OUTPUT);  
  pinMode(PIN_LED_ALARM, OUTPUT);  
  pinMode(PIN_PWM_HV, OUTPUT);  
  pinMode(PIN_BTN, INPUT);  
  pinMode(PIN_GEIGER, INPUT_PULLUP);  
  
  Serial.begin(9600);  
  lcd.begin(16, 2);  
  lcd.print("System Ready...");  
  delay(1000);  
  lcd.clear();  
}
```

```

// Налаштування переривання по спаду імпульсу (FALLING)
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_GEIGER), countPulse, FALLING);
}

void loop() {
  handleHV();    // Регулювання напруги живлення лічильника
  calculateRadiation(); // Обчислення ПЕД
  handleInterface(); // Оновлення екрану та кнопок
  checkAlarm();  // Перевірка перевищення фону
}

// Обробник переривань від лічильника Гейгера
void countPulse() {
  pulseCount++;
  digitalWrite(PIN_LED_IMP, HIGH);
  // Коротка затримка в перериванні для візуалізації імпульсу (не рекомендується для
  // серійних пристроїв)
  digitalWrite(PIN_LED_IMP, LOW);
}

// Автоматичне регулювання високої напруги (Зворотний зв'язок)
void handleHV() {
  int sensorValue = analogRead(A0);
  float voltage = (sensorValue * 5.0 / 1024.0) * 100.0; // Спрощений перерахунок

  if (voltage < TARGET_V_ANODE && pwmDuty < 250) pwmDuty += 1;
  else if (voltage > TARGET_V_ANODE && pwmDuty > 5) pwmDuty -= 1;

  analogWrite(PIN_PWM_HV, pwmDuty);
}

void calculateRadiation() {
  if (millis() - lastMeasureTime >= 60000) { // Оновлення раз на хвилину
    radiationLevel = pulseCount * CONV_FACTOR;

    // Передача даних у термінал
    Serial.print("CPM: "); Serial.print(pulseCount);
    Serial.print(" | uSv/h: "); Serial.println(radiationLevel);

    pulseCount = 0;
    lastMeasureTime = millis();
  }
}

void checkAlarm() {
  if ((int)(radiationLevel * 100) >= ALARM_THRESHOLD) {
    digitalWrite(PIN_LED_ALARM, HIGH);
    tone(PIN_SPEAKER, 1000, 100); // Звуковий сигнал 1кГц
  } else {
    digitalWrite(PIN_LED_ALARM, LOW);
    noTone(PIN_SPEAKER);
  }
}

```

```
}  
}  
  
void handleInterface() {  
    // Логіка оновлення LCD та обробки натискання PIN_BTN  
    lcd.setCursor(0, 0);  
    lcd.print(radiationLevel, 2);  
    lcd.print(" uSv/h ");  
}
```