

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ**  
**ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД**  
**“УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ”**  
**ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**  
**КАФЕДРА ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ**

**ПОТІЧНИЙ ОЛЕКСАНДР АНДРІЙОВИЧ**

**ДЕТЕКТОР ГАММА-ФОТОННОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

Спеціальність 171 Електроніка

Освітня програма Електронні системи

Кваліфікаційна робота

на здобуття освітнього ступеня бакалавра

Науковий керівник :

**Заяць Т.М.**

кандидат фізико-математичних наук, доцент

**Ужгород – 2026**

Реєстрація \_\_\_\_\_

(номер)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 р. \_\_\_\_\_ Тетяна СЕМАК

(підпис)

**Кваліфікаційна робота допущена до захисту**

Завідувач кафедри

Тарас ЗАЯЦЬ

(підпис)

к.ф.-м.н., доцент

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 р.

Рецензент \_\_\_\_\_

(підпис)

\_\_\_\_\_  
(Ім'я, Прізвище)

\_\_\_\_\_  
(науковий ступінь, вчене звання)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

Інженерно-технічний факультет

Кафедра електронних систем

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедрою,

доц. \_\_\_\_\_ (Заяць Т. М.)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2026 року

## ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

На кваліфікаційну роботу бакалавра

на тему:

«Детектор гамма-фотонного випромінювання»

Студента 4 курсу

Потічного Олександра Андрійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник к.ф.-м.н., доц. кафедри ЕС Заяць Тарас Михайлович

(посада, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Ужгород – 2026

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

Факультет: Інженерно-технічний

Кафедра: Електронних систем

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедрою, доц. [підпис] (Заяць Т. М.)

«25» січня 2026 року

## ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну бакалаврську роботу

студента Потічного Олександра Андрійовича

1. Тема роботи: «Детектор гамма-фотонного випромінювання».
2. Термін подання студентом роботи: 25.01.2026.
3. Термін закінчення роботи: 29.03.2026
4. Вихідні дані до роботи: Створити пристрій для детектування іонізуючого випромінювання з використанням PIN-діода як сенсора та мікроконтролера для обробки сигналів. Забезпечити наступні характеристики детектора:
  - 4.1. Реєстрація гамма-квантів з порогом спрацювання від 50 кеВ;
  - 4.2. Використання схеми підсилювача заряду для формування імпульсів;
  - 4.3. Фільтрація сигналу від наводок мережі (50 Гц) та високочастотних завад;
  - 4.4. Відображення рівня радіаційного фону (у мкЗв/год) на LCD-дисплеї;
  - 4.5. Живлення схеми від стабілізованого джерела (напруга  $U = 12$  В, споживаний струм  $I \leq 50$  мА).
5. Зміст роботи (перелік питань, що підлягають розробці):
  - 5.1. Теоретичний огляд фізичних принципів роботи PIN-діода як детектора іонізуючого випромінювання;

5.4. Тестування розробленої схеми в симуляторі;

5.5. Розрахунок надійності пристрою

5.6. Моделювання схеми.

Перелік посилань

ДОДАТКИ:

Додаток А. Структурна схема пристрою.

Додаток Б. Принципова схема пристрою.

Додаток В. Перелік елементів.

Додаток Г. Специфікація елементів.

6. Консультанти роботи:


Розділ	Консультант	Підпис, дата: завдання видав	Підпис, дата: завдання прийняв
Нормоконтроль			

Дата видачі завдання: « 25 » січня 2026 року.

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Найменування етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання	Примітки
1	Уточнення технічного завдання, підбір та аналіз джерел.	до 25.02.2026р.	
2	Огляд аналогів і вибір структурної схеми	до 10.03.2026р.	
3	Розрахунок блоків схеми.	до 20.03.2026р.	
4	Моделювання принципової схеми.	до 20.04.2026р.	
6	Оформлення пояснювальної записки і графічної документації	до 20.05.2026р.	
7	Нормоконтроль, попередній захист, доопрацювання	до 20.06.2026р.	

Студент  (Потічний О.А.)

Керівник кваліфікаційної роботи  (доц. Заяць Т. М.)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи бакалавра: 51 сторінки, 24 рисунки, 2 таблиці, 4 додатки, 11 джерел посилань.

Сучасний етап розвитку прецизійної електроніки та ядерної фізики характеризується потребою у високочутливих та портативних засобах контролю іонізуючого випромінювання. Проектування та реалізація напівпровідникових детекторів випромінювання на основі сучасних компонентів є актуальним в сьогоденні.

Об'єкт дослідження - фізичні процеси взаємодії іонізуючого випромінювання з напівпровідниковою PIN-структурою та наступне перетворення заряду в електронний сигнал.

Мета роботи – проектування та дослідження аналогового тракту обробки сигналу для PIN-діодного детектора гамма-випромінювання із низьким рівнем шумів та стабільною роботою.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети використано методи моделювання електронних схем у середовищах Proteus, а також теоретичний аналіз параметрів підсилювачів та компараторів.

У роботі проведено розрахунки PIN-діодного детектора, виконано підбір оптимальних компонентів для попереднього підсилювача та компаратора, а також розроблено та промодельовано схеми аналогового тракту обробки сигналу.

НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ ДЕТЕКТОР, PIN-ДІОД, ПІДСИЛЮВАЧ  
ЗАРЯДУ, КОМПАРАТОР, МОДЕЛЮВАННЯ PROTEUS, АНАЛОГОВИЙ  
ТРАКТ, ГАММА-ВИПРОМІНІВАННЯ.

## ABSTRACT

Explanatory Note for the Bachelor's Thesis: 51 pages, 24 figures, 2 tables, 4 appendices, 11 references.

The current stage of development in precision electronics and nuclear physics is characterized by the need for highly sensitive and portable means of monitoring ionizing radiation. The design and implementation of semiconductor radiation detectors based on modern components is a pressing issue today.

The subject of the study is the physical processes of interaction between ionizing radiation and a semiconductor PIN structure, followed by the conversion of charge into an electronic signal.

The objective of this work is to design and investigate an analog signal processing circuit for a low-noise, stable-operating PIN-diode gamma-ray detector.

Research methods. To achieve the set goal, methods of electronic circuit modeling in the Proteus environment were used, as well as theoretical analysis of amplifier and comparator parameters.

The work includes calculations for the PIN-diode detector, selection of optimal components for the preamplifier and comparator, as well as the development and simulation of analog signal processing circuit diagrams.

SEMICONDUCTOR DETECTOR, PIN DIODE, CHARGE AMPLIFIER, COMPARATOR, PROTEUS SIMULATION, ANALOG CIRCUIT, GAMMA RADIATION.

## ЗМІСТ

<b>Вступ</b> .....	9
<b>Перелік скорочень</b> .....	10
<b>1.Теоретична частина</b> .....	11
1.1. Механізм взаємодії гамма-випромінювання з кремнієм .....	11
1.2. Фізичні основи та принципи роботи PIN-діода.....	12
1.3. Огляд аналогів.....	16
1.4. Огляд компонентів.....	28
<b>2.Практична частина</b> .....	36
2.1. Опис основних блоків .....	36
2.2.Розрахунки елементів.....	41
2.3.Розрахунок ймовірності безвідмовної роботи .....	45
2.4. Моделювання схеми .....	46
<b>Висновки</b> .....	49
<b>Список використаних джерел</b> .....	51

					<b>КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ</b>			
<b>Змн.</b>	<b>Арк.</b>	<b>№ докум.</b>	<b>Підпис</b>	<b>Дата</b>	<b>Детектор гамма-фотонного випромінювання</b>	<b>Літ.</b>	<b>Арк.</b>	<b>Акрушіє</b>
Розроб.		Потічний О.А.					2	51
Перевір.		Заяць Т.М.						
Реценз.								
Н. Контр.		Пап О. В.						
Затверд.		Заяць Т.М.				<b>УжНУ, ІТФ, 4 курс, група ЕС</b>		

Радіаційна безпека є одним із головних напрямків захисту людей у сучасному світі. Події на Чорнобильській АЕС та на Фукусімі показали, наскільки важливо швидко виявляти та мати можливість моніторити іонізуюче випромінювання. Традиційні прилади для вимірювання дози радіації, які працюють на основі газорозрядних лічильників Гейгера-Мюллера, хоча й є надійними й недорогими, мають певні недоліки. Вони не можуть аналізувати спектр випромінювання, мають низьку ефективність при вимірюванні гамма-випромінювання (менше 1%) та великий мертвий час, що ускладнює їх використання при високих рівнях радіації. Напівпровідникові детектори, які використовують кремнієві PIN-структури разом із сцинтиляційними матеріалами, є більш перспективною альтернативою.

Мета цієї роботи — створити та виконати електричні розрахунки детектора гамма-фотонного випромінювання, який базується на кремнієвому PIN-діоді, має зарядочутливий підсилювач та наступний формувач-підсилювач. У роботі розглянуто фізичні процеси, які відбуваються під час взаємодії гамма-квантів з кремнієм, обрано основні елементи схеми та виконано розрахунки електричних параметрів та шумів.

Об'єктом дослідження є процес перетворення енергії іонізуючого гамма-випромінювання в електричні сигнали за допомогою напівпровідникових структур. Предметом дослідження є схемотехнічні рішення для трансїмпедансного підсилення, аналогового формування та мікропроцесорної обробки струмових імпульсів.

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Перелік скорочень

GND — заземлення, земля

VCC — джерело живлення (напруга живлення)

PIN — P-I-N (структура напівпровідникового діода)

PN — P-N (звичайний p-n перехід)

Si — кремній

CdTe — телурид кадмію

CZT — кадмій-цинку-телур

NaI(Tl) — йодид натрію, допований талієм (сцинтилятор)

ФЕП — фотоелектронний помножувач (PMT)

ЗЧП — зарядочутливий попередній підсилювач

ІНСТИТУТ ФІЗИКИ АТОМНОЇ ЕНЕРГІЇ

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

## 1. Теоретична частина

### 1.1. Механізм взаємодії гамма-випромінювання з кремнієм

Робота напівпровідникового детектора базується на реєстрації носіїв заряду, що виникають внаслідок іонізації матеріалу при проходженні через нього іонізуючого випромінювання. Гамма-кванти, на відміну від заряджених частинок (альфа або бета), не викликають іонізацію безпосередньо. Вони взаємодіють з електронною оболонкою атомів кремнію через три основні процеси, ймовірність яких залежить від енергії фотона ( $E_\gamma$ ) та атомного номера матеріалу ( $Z$ ).

Фотоелектричний ефект (фотоефект). При низьких енергіях (до ~50-100 кеВ для кремнію) домінує фотоефект. Гамма-квант повністю поглинається атомом, передаючи всю свою енергію орбітальному електрону, який викидається за межі атома. Кінетична енергія фотоелектрона ( $E_e$ ) визначається як різниця енергії гамма-кванта та енергії зв'язку електрона на оболонці ( $E_b$ ):

$$E_e = E_\gamma - E_b \quad (1.1)$$

Фотоелектрон, рухаючись у кристалічній ґратці, втрачає енергію на іонізацію інших атомів, створюючи лавину вторинних носіїв заряду. Цей процес є ключовим для спектрометрії, оскільки весь заряд, зібраний детектором, пропорційний початковій енергії кванта [1].

Ефект Комптона (Комптонівське розсіювання). У діапазоні середніх енергій (від сотень кеВ до декількох МеВ) переважає некогерентне розсіювання фотона на вільному або слабозв'язаному електроні. Гамма-квант передає електрону лише частину своєї енергії і змінює напрямок руху в діапазоні від 0 до 180°. Розсіяний фотон може залишити об'єм детектора, не взаємодіючи повторно. Це призводить до реєстрації не повної енергії, а лише її частини, формуючи в енергетичному спектрі так званий "комптонівський континуум" (комптонівський континуум — це безперервний фон енергій, присутніх у гамма- та рентгенівській спектроскопії), що ускладнює ідентифікацію радіонуклідів у кремнієвих детекторах малого об'єму[1].

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

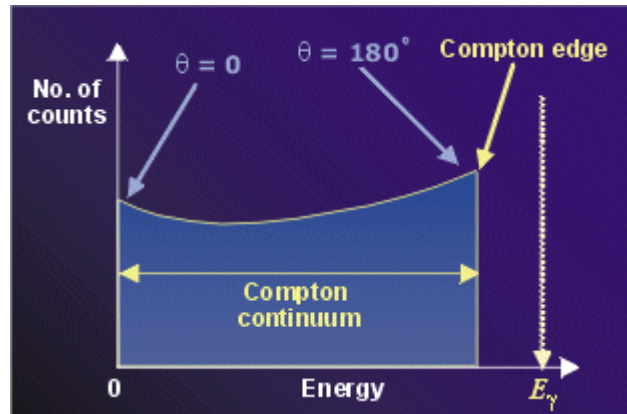


Рис. 1.1 Комптонівський континуум

Утворення електрон-позитронних пар. Цей процес можливий лише при енергіях  $E_\gamma > 1.022 \text{ MeV}$ . У полі ядра фотон перетворюється на пару електрон-позитрон. Для кремнієвих детекторів, що використовуються в портативній дозиметрії, цей ефект є менш значущим порівняно з фотоефектом та комптонівським розсіюванням.

## 1.2. Фізичні основи та принципи роботи PIN-діода

PIN-діод — це особливий тип діода, виконаний з трьох різних напівпровідникових шарів. Його структура формується шляхом розміщення внутрішнього шару власного напівпровідника (І-шару) між сильнолегованими шарами Р-типу та N-типу. Від цієї конфігурації і походить назва приладу.

Середній власний шар являє собою чистий напівпровідниковий кристал кремнію або германію без домішок. Він характеризується високим питомим опором, забезпечує здатність витримувати високі робочі напруги, а також збільшує загальну ширину переходу, що суттєво знижує його власну ємність. Завдяки цьому PIN-діод має високу швидкість перемикання. Додатковою важливою властивістю власної (і) області є її світлочутливість, тобто здатність генерувати електричний струм під дією оптичного або іонізуючого випромінювання [2].

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Середня власна область залишається вільною від рухомих носіїв заряду (кількість електронів і дірок у ній збалансована), тому вона діє як ізолятор між основними шарами, і струм через бар'єр не протікає.

- Режим прямого зміщення: Анод (P-область) підключається до позитивного, а катод (N-область) — до негативного полюса джерела живлення. Прикладений потенціал створює електричне поле, яке штовхає дірки та електрони назустріч один одному вглиб переходу, зменшуючи його ефективну ширину. Носії заряду рекомбінують, викликаючи протікання прямого струму. Це різко знижує динамічний опір діода, дозволяючи йому виконувати роль змінного опору, що керується струмом. Оскільки наявність і-шару збільшує геометричну ширину переходу, для високої концентрації інжекттованих носіїв потрібна підвищена напруженість поля. Це поле прискорює дрейф носіїв уздовж усього кристала, що підвищує швидкість приладу і робить його придатним для високочастотних застосувань.

- Режим зворотного зміщення: Анод підключається до негативного виводу, а катод — до позитивного. Прикладений зворотний потенціал відтягує вільні носії від межі переходу, розширюючи збіднену область до тих пір, поки весь власний шар повністю не очиститься від мобільних зарядів. Напруга, за якої відбувається повне видалення вільних носіїв з і-області, називається напругою повного збіднення. За таких умов струм через пристрій практично не протікає, а накопичений заряд зосереджується на межах P- та N-шарів, які починають працювати як обкладки плоского конденсатора, де сам і-шар виконує роль діелектрика.

Вольт-амперна характеристика (ВАХ)

Крива ВАХ описує математичну та фізичну залежність між напругою на виводах діода та струмом, що протікає через його кристал. Графік чітко ділиться на дві ключові зони: область прямого зміщення та область зворотного зміщення (де за критичних напруг настає пробій  $V_{BD}$ ).

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При прямому зміщенні PIN-діод практично не проводить струм, доки зовнішня напруга не подолає поріг прямого падіння напруги  $V_f$ . Через наявність широкого проміжного власного шару цей поріг є помітно вищим, ніж у стандартних сигнальних чи випрямних PN-діодів. Для кремнієвих PIN-структур типове значення прямого падіння напруги  $V_f$  становить близько 1.4 В. В області зворотного зміщення через пристрій протікає лише мізерний зворотний струм витоку  $I_R$  [3].

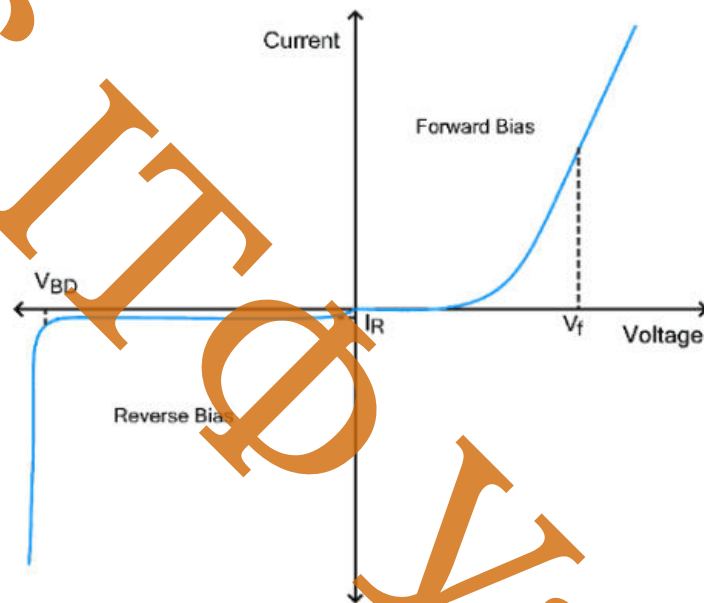


Рис. 1.3 ВАХ PIN-діоду

### Генерація носіїв заряду в PIN-структурі

Фундаментальною характеристикою детекторного матеріалу є середня енергія утворення пари носіїв заряду ( $\omega$ ). Для кристалічного кремнію при кімнатній температурі (300 К) ця величина становить  $\omega_{Si} \approx 3.62$  еВ.

Це означає, що поглинання гамма-кванта певної енергії призведе до появи фіксованої кількості електрон-діркових пар (N):

$$N = \frac{E_\gamma}{\omega_{Si}} \quad (1.2)$$

### Роль збідненої області та зворотного зміщення

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Звичайний PN-перехід не є ефективним детектором гамма-випромінювання через малу товщину області просторового заряду (збідненої області). Носії заряду, що виникають у нейтральних областях напівпровідника, рекомбінують раніше, ніж встигають досягти електродів, або рухаються за рахунок повільної дифузії, що спотворює часові характеристики сигналу.

Структура PIN (P-type, Intrinsic, N-type) вирішує цю проблему введенням широкої області власного (або високоомного) напівпровідника (і-шар) між сильно легованими р- та n-областями. При подачі зворотної напруги зміщення ( $V_R$ ), збіднена область розширюється на весь і-шар. Електричне поле в цій зоні забезпечує швидкий дрейф носіїв заряду до електродів, що дозволяє зібрати заряд з усього активного об'єму.

Товщина збідненої області ( $W$ ) залежить від питомого опору кремнію ( $\rho$ ) та прикладеної напруги ( $V$ ):

$$W \approx \sqrt{2\epsilon\mu\rho V} \quad (1.3)$$

Збільшення зворотної напруги виконує дві критичні функції:

1. Збільшення активного об'єму: максимізує ймовірність взаємодії гамма-кванта з речовиною детектора.
2. Зменшення ємності переходу ( $C_j$ ): ємність діода поводить себе як ємність плоского конденсатора, обернено пропорційна ширині збідненої області ( $C_j \propto 1/W$ ) [4].

### 1.3. Огляд аналогів

#### 1. Газорозрядні лічильники (Трубки Гейгера-Мюллера)

Це класичне рішення для дозиметрії, яке залишається стандартом де-факто для побутових та професійних радіометрів (наприклад, трубки СБМ-20, СБТ-10, LND-712).

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16



Рис. 1.4 Класичний лічильник Гейгера

- **Принцип дії:** Базується на іонізації газу в герметичному об'ємі під дією високої напруги (близько 400 В). Вторинна іонізація призводить до лавинного розряду, що генерує потужний електричний імпульс.

- **Переваги:** Висока чутливість до бета-випромінювання; велика амплітуда вихідного сигналу, що спрощує електроніку; надійність та відносно низька вартість.

- **Недоліки:**

- Відсутність спектроскопії: Амплітуда імпульсу не залежить від енергії частинки, що робить неможливим ідентифікацію радіонуклідів.

- Низька ефективність до гамма-випромінювання: Ефективність реєстрації гамма-квантів зазвичай становить менше 1%.

- Мертвий час: Після кожного імпульсу лічильник втрачає чутливість на 100-300 мкс.

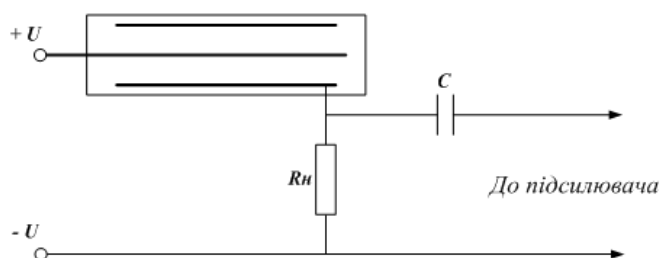


Рис. 1.5 Схема лічильника Гейгера

Аналог:

СБМ-20:

- Тип: Сталева трубка (реєструє жорстке Бета та Гамма випромінювання).
- Робоча напруга: 350–475 В (типова 400 В).
- Чутливість: 60–75 імпульсів на мкР (близько 108 імпульсів за хвилину = 1 мкЗв/год).
- Мертвий час: 190 мкс [5].

SBM-20, SBM-20U  
HARD BETA and GAMMA GM DETECTORS

GENERAL SPECIFICATIONS

Parameters	SBM-20 / SBM-20U
Gas Filling	Ne + Br2 + Ar
Cathode Material	Stainless Steel, 50 mkm
Maximum Length (mm)	108 / 101
Effective Length (mm)	91.0 / 83.5
Maximum Diameter (mm)	11
Effective Diameter (mm)	10
Connector	Pin
Operating Temperature Range °C	-60 to +70

WALL SPECIFICATIONS

Parameters	SBM-20 / SBM-20U
Areal Density (mg/cm <sup>2</sup> )	40
Thickness (mm)	0.05

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Parameters	SBM-20 / SBM-20U
Minimum Anode Resistor (meg ohm)	1.0
Recommended Anode Resistor (meg ohm) <a href="#">circuit diagram</a>	5.1
Recommended Operating Voltage (volts)	400
Operating Voltage Range (volts)	350 - 475
Initial voltage (volts)	260 - 320
Plateau length (volts)	at least 100
Maximum Plateau Slope (%/100 volts)	10
Minimum Dead Time (at U=400V, micro sec)	190
Working range (mkr/s)	0.004 - 144
Working range (mR/h)	0.014 - 144

Рис. 1.6 Технічні характеристики SBM-20

Терра-П(мкс-05):

- Вимірювання гамма/рентген:
  - Потужність амбієнтного еквівалента дози (МАЕД): 0.1 – 999.9 мкЗв/год.
  - Енергетичний діапазон: 0.05 – 3.0 МеВ.
  - Сумарна еквівалентна доза (ЕД): 1 мкЗв – 9999 мЗв/год.

- Вимірювання бета:
  - Щільність потоку частинок (від  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ . Стронцій-90+): 10 – 100000 част./ $(\text{см}^2 \cdot \text{хв})$ .
  - Енергетичний діапазон: 0.5 – 3.0 MeV.
- Живлення: 2 елементи ААА, до 6000 годин роботи.
- Габарити: 120×52×26 мм.
- Маса: 200 г.
- Умови роботи:  $-10^\circ\text{C} \dots +50^\circ\text{C}$ .



Рис. 1.7 Терра-П(мкс-05)

## 2. Сцинтиляційні детектори

Детектори радіоактивного випромінювання, принцип дії яких базується на люмінесценції.

Сцинтиляційні лічильники використовують для реєстрації радіоактивного випромінювання люмінофори — речовини, що випромінюють світло при поглинанні гамма-квантів, нейтронів або заряджених частинок. У сучасних приладах світловий сигнал передається на фотоелектронні помножувачі. Завдяки послідовному використанню кількох таких помножувачів можна досягти підсилення сигналу в мільярди разів.

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

- Принцип дії: Гамма-квант поглинається важким кристалом (йодид натрію або цезію), викликаючи спалах видимого світла, який реєструється фотопомножувачем.

- Переваги: Матеріали з високим атомним номером ( $Z$ ) забезпечують відмінну ефективність поглинання (зупиняючу здатність). Великі об'єми кристалів дозволяють реєструвати навіть слабкий фон.

- Недоліки: Громіздкість та крихкість (особливо гігроскопічність NaI). Фотопомножувачі вимагають стабільного високовольтного живлення (до 1000 В) і чутливі до магнітних полів.

- Комбінація Scintillator-Coupled Diode: Існує гібридний варіант, за якого світло від кристала CsI(Tl) реєструється не фотоелектронним помножувачем, а великим PIN-діодом. Це дає змогу зменшити габарити пристрою, проте потребує застосування наднизькошумних підсилювачів через малу кількість утворених світлових фотонів.

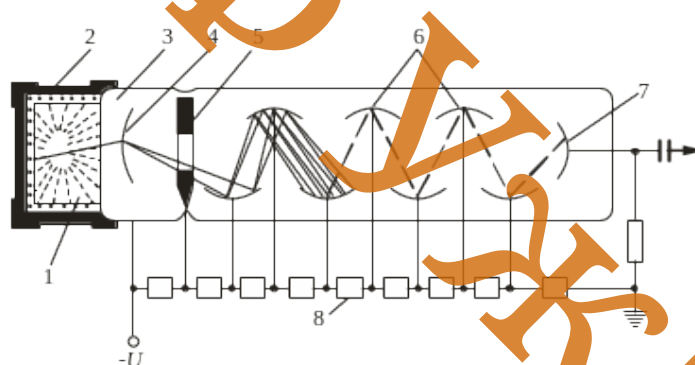


Рис. 1.8 Схема сцинтиляційного детектора

Приклад детектора:

Ludlum Model 44-10 (NaI(Tl))

Це високочутливий детектор для пошуку радіоактивних джерел.

- Призначення: Виявлення низьких рівнів гамма-випромінювання в широкому діапазоні енергій.
- Тип детектора: Сцинтилятор NaI(Tl) (йодид натрію, допований талієм).

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

- Розмір кристала: 5.1 см × 5.1 см
- Ефективність реєстрації (4π):
  - $^{125}I = 4\%$
  - $^{57}Co = 20\%$
  - $^{137}Cs = 9\%$
  - $^{60}Co = 15\%$
- Типова чутливість ( $^{137}Cs$ ): 900 срт (імпульсів на хвилину) на 1 мкР/год.
- Рекомендований енергетичний діапазон: 30 кеВ-3.0 МеВ.
- Енергетична залежність: Чутливість залежить від енергії випромінювання (нелінійна).
- Типовий фоновий відлік: 9750 срт (у полі випромінювання 10 мкР/год).
- Фотоприймач: Фотоелектронний помножувач (ФЕП), діаметр 5.1 см.
- Робоча напруга: 500 – 1200 В (вимагає високовольтного живлення).
- Температурний діапазон: -20°C... +50°C.
- Клас захисту: IP65 (пилонепроникний, захист від струменів води).
- Габарити: 6.6×27.9 см.
- Вага: 1.04 кг.

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21



Рис. 1.9 Ludlum Model 44-10

### Radiacode 103

- Тип детектора: Сцинтиляційний кристал CsI(Tl) (йодид цезію, активований талієм) розміром 10x10x10 мм. На відміну від вашого PIN-діода, цей детектор має значно вищу чутливість до гамма-квантів.
- Фотоприймач: Твердотільний фотоелектронний помножувач (SiPM).
- Енергетичний діапазон: 20 кеВ – 3 МеВ. Це дозволяє реєструвати як м'яке рентгенівське випромінювання, так і жорстке гамма-випромінювання.
- Енергетична роздільна здатність:  $8,2\% \pm 0,4\%$  (для лінії Cs-137 при 662 кеВ). Це високий показник для кишенькового приладу, що дозволяє проводити ідентифікацію ізотопів.
- Швидкість підрахунку на фоні: 300–500 СРМ (імпульсів на хвилину), що у 15–20 разів швидше за звичайні лічильники Гейгера.

### 3. Напівпровідникові детектори

Детектори на основі телуриду кадмію (CdTe) або кадмій-цинк-телуру (CZT) представляють собою вершину сучасної кімнатної спектрометрії.

- Принцип дії: Пряме перетворення заряду, аналогічно до кремнієвих PIN-діодів, але у матеріалі з високим атомним номером.
- Переваги: Ефективність поглинання гамма-квантів на порядки вища, ніж у кремнію.

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Забезпечують енергетичну роздільну здатність, близьку до криогенних германієвих детекторів, при кімнатній температурі.

- Недоліки: Технологічна складність вирощування кристалів робить їх надзвичайно дорогими (сотні та тисячі доларів за малий об'єм). Присутні ефекти поляризації та неповного збору заряду (hole tailing), що вимагає складної корекції сигналу.

#### Основні характеристики Amptek XR-100CR (Si-PIN)

- Тип детектора: Si-PIN фотодіод (кремнієвий PIN-діод).
- Охолодження: 2-ступеневий термоелектричний охолоджувач (елемент Пельтьє). Забезпечує робочу температуру кристала близько  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  для мінімізації теплових шумів.
  - Активна площа кристала: Доступні варіанти  $6\text{ мм}^2$ ,  $13\text{ мм}^2$  або  $25\text{ мм}^2$  (ефективна колімована площа дещо менша).
  - Товщина кристала:  $500\text{ мкм}$  (стандартна) або  $300\text{ мкм}$ .
  - Енергетична роздільна здатність (FWHM):
    - Для лінії  $5.9\text{ кеВ}$  : від  $145\text{ еВ}$  (для  $6\text{ мм}^2$ ) до  $230\text{ еВ}$  (для  $25\text{ мм}^2$ ).
    - Це приблизно  $2.5\%$  на  $5.9\text{ кеВ}$ , що є дуже високим показником для напівпровідникових детекторів цього класу.
  - Вхідне вікно: Берилієве (Be). Товщина:  $12.5\text{ мкм}$  ( $0.5\text{ mil}$ ) або  $25\text{ мкм}$  ( $1\text{ mil}$ ). Забезпечує пропускання м'якого рентгенівського випромінювання.
  - Співвідношення пік/фон (Peak to Background Ratio): До  $6200:1$  (для детектора  $6\text{ мм}^2$ ).
  - Попередній підсилювач (Preamplifier): Зарядочутливий, конструкція Amptek зі скиданням (reset) через високовольтне з'єднання.
  - Чутливість попереднього підсилювача: Типово  $1\text{ мВ/кеВ}$ .

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

- Діапазон енергій, що реєструються: Оптимізовано для 1.5 кеВ – 30 кеВ (ефективність реєстрації > 90% у діапазоні 2–12 кеВ).
- Електричні параметри:
  - Напруга зміщення детектора (Bias): +100...200 В.
  - Живлення охолоджувача: макс. 4 В, 350 мА.
- Фізичні параметри:
  - Габарити корпусу: 7.6 х 4.4 х 2.9 см (ТО-8 корпус всередині металевого боксу).
  - Вага: 139 г.

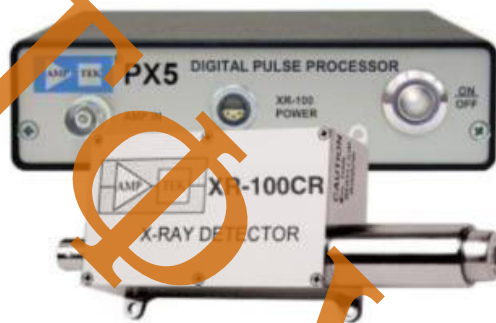


Рис. 1.10 Amptek XR-100CR

Гібридні прилади (PRD) для служб екстреної допомоги, зокрема Mirion AccuRad PRD або Polimaster PM1703MO-1BT, поєднують сцинтилятор для виявлення слабких джерел випромінювання з кремнієвим діодом або лічильником Гейгера. Така конструкція дозволяє долати обмеження чутливості датчиків під час аварійних ситуацій та забезпечує вимірювання високих доз радіації зі збереженням безпеки оператора.

Polimaster PM1703MO-1BT Гібридний дозиметр-радіометр, який поєднує в собі функції надчутливого пошукового приладу та повноцінного дозиметра.

- Принцип дії: Прилад містить два детектори: сцинтилятор CsI(Tl) для пошуку та локалізації джерел гамма-випромінювання, а також енергокомпенсовану трубку Гейгера-Мюллера для вимірювання потужності дози в широкому діапазоні. Система оснащена алгоритмом придушення

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

NORM, що дозволяє виключати сигнали від природних радіоактивних матеріалів, таких як добрива або кераміка.

- Переваги: Пристрій забезпечує запис та зберігання до 2000 подій в енергонезалежній пам'яті. Діапазон робочих температур становить від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ . Передача даних на смартфон або ПК у режимі реального часу здійснюється за допомогою Bluetooth.

- Технічні характеристики:

- Енергетичний діапазон: 33 кеВ — 3,0 МеВ (пошук), 60 кеВ — 1,33 МеВ (вимірювання).
- Діапазон вимірювання МАЕД: 0,1 мкЗв/год — 200 мЗв/год.
- Діапазон вимірювання ЕД: до 10 Зв.
- Живлення: 1 елемент АА, до 1000 годин роботи.
- Габарити та маса:  $87 \times 72 \times 32$  мм, 200 г.



Рис. 1.11 Polimaster PM1703MO-1BT

Mirion AccuRad PRD Це сучасний персональний пошуковий детектор (PRD), розроблений для правоохоронних органів та служб екстреного реагування. Пристрій призначений для виявлення та локалізації радіоактивних матеріалів у складних умовах.

- Принцип дії: Використовує гібридну систему виявлення: чутливий сцинтилятор CsI(Tl) з чіпом SiPM для виявлення слабких джерел та кремнієвий діод для вимірювання високих рівнів дози. Технологія

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Variable Background Suppression (VBS) дозволяє приладу самостійно налаштовуватися на рівень природного фону, який постійно змінюється, що зменшує кількість помилкових сигналів.

- Переваги: Висока стійкість до зовнішніх впливів (клас захисту IP67, витримує падіння з висоти 1,5 метра на бетон); присутність верхнього дисплея, який забезпечує зручне зчитування інформації, коли прилад прикріплений на поясі; підтримка Bluetooth для інтеграції з мобільними застосунками та системами моніторингу.
- Технічні характеристики:
  - Енергетичний діапазон: 25 кеВ — 3 МеВ.
  - Діапазон вимірювання МАЕД: від 0,01 мкЗв/год до 10 Зв/год.
  - Похибка вимірювання:  $\pm 20\%$ .
  - Живлення: 2 елементи АА, до 900 годин безперервної роботи.
  - Габарити та маса: 108×61×36 мм, 200 г.



Рис. 1.12 Mirion AccuRad PRD

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

## Порівняльна характеристика детекторів гамма-випромінювання

Тип детектора	Приклад приладів	Основні переваги	Основні недоліки
Газорозрядний (Гейгера-Мюллера)	СБМ-20, «Terra-P»	Низька вартість, проста схемотехніка	Відсутність спектрометрії, низька ефективність (<1%)
Сцинтиляційний з ФЕМ	Ludlum Model 44-10	Висока чутливість та ефективність (9%)	Великі габарити, крихкість кристалів, висока напруга
Напівпровідниковий (PIN-діод)	First Sensor X100-7, Amptek XR-100CR	Компактність, дуже низьке енергоспоживання	Низька ефективність для жорсткого гамма-випромінювання
Сцинтиляційний з SiPM	Radiacode 103G, Raysid, Atom Fast	Кишеньковий розмір, побудова спектра в реальному часі	Гірша роздільна здатність порівняно з CZT
Напівпровідниковий (CZT)	Kromek D3S ID	Точна ідентифікація ізотопів	Висока вартість, складність виробництва



#### 4.Динамічний опір ( $r_f$ )

Хоча для детектора випромінювання прямий опір менш важливий, ніж ємність, помірне значення  $r_f$  свідчить про якісну структуру І-шару, що забезпечує хорошу лінійність.

#### 5.Корпус SOD523

Це дуже компактний SMD-корпус. Це тип корпусу електронних компонентів (резисторів, транзисторів, мікросхем), призначений для монтажу безпосередньо на поверхню друкованої плати.

Перевага: Мінімальна паразитна індуктивність виводів.

Недолік: Потребує обережності при ручному монтажі та якісного розведення друкованої плати, щоб не внести додаткову ємність через довгі доріжки.

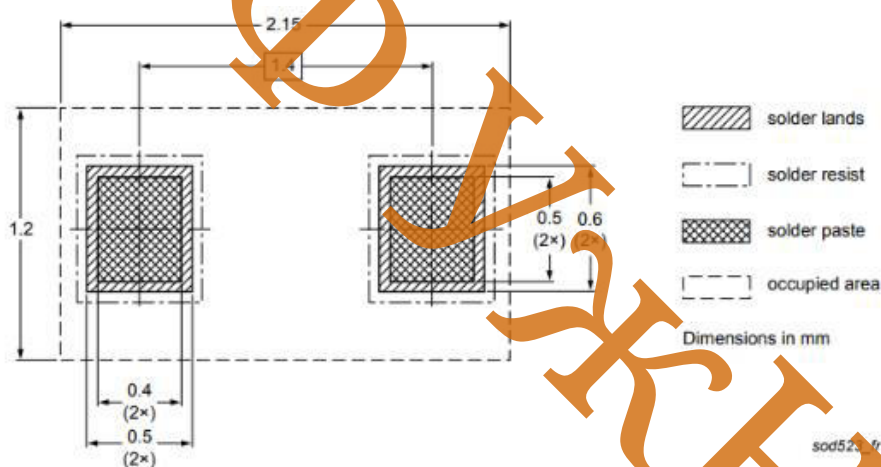


Рис. 1.14 Розміри та матеріали корпусу

#### 2. Операційний підсилювач ОРА2350

ОРА2350 — це високошвидкісний, прецизійний CMOS операційний підсилювач від компанії Texas Instruments, що містить два незалежні канали в одному компактному корпусі.

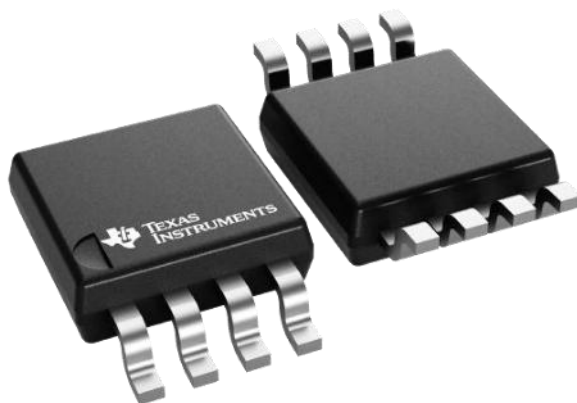


Рис. 1.15 OPA2350

### 1. Архітектура Rail-to-Rail та однополярне живлення

OPA2350 розроблений спеціально для низьковольтної роботи (від 2.7 В до 5.5 В) і підтримує технологію Rail-to-Rail як на вході, так і на виході.

Підсилювачі rail-to-rail визначаються як підсилювачі, які використовують увесь діапазон живлення як для входів, так і для виходів, що дозволяє досягати максимального динамічного діапазону в низьковольтних схемах. Вони особливо вигідні для акумуляторних систем завдяки низькому споживанню струму та збереженню точності.

Це означає, що він здатен без спотворень приймати та видавати напругу майже від абсолютного нуля до 5 В (з точністю до 10 мВ від меж живлення).

### 2. Наднизький вхідний струм (CMOS вхід)

OPA2350 має CMOS-входи, завдяки чому його власний струм зсуву становить не більше 10 пА (пікоампер). Це критично важливо: якби підсилювач мав більший струм зсуву, він протікаючи через резистори великого номіналу, створював би величезну хибну постійну напругу на виході (DC offset), що повністю паралізувало б схему і вивело її в стан насичення.

### 3. Висока швидкість наростання та смуга пропускання

Імпульс струму, що генерується у PIN-діоді при влучанні гамма-кванта, є екстремально коротким. Для точної обробки таких швидких транзйєнтних процесів OPA2350 має дуже широку смугу пропускання — 38 МГц.

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Достатній запас не дозволяє імпульсу "звужуватися" або перетворюватися на трикутний сигнал через обмеження швидкості самого кристала.

#### 4. Низький рівень шуму

Оскільки корисний заряд від фотона є мікроскопічним, саме власний шум електроніки є головним обмеженням чутливості детектора. ОРА2350 характеризується низькою щільністю шуму напруги — лише  $5 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ . Це гарантує, що мікрвольтові сигнали від розсіяних частинок не потонуть у власному фоновому шумі першого каскаду підсилення.

Загалом, ОРА2350 успішно поєднує швидкість, необхідну для аналізу імпульсів радіації, з низькими шумами та сумісністю з портативним батарейним живленням (5В).

#### 3. Компаратор LM393

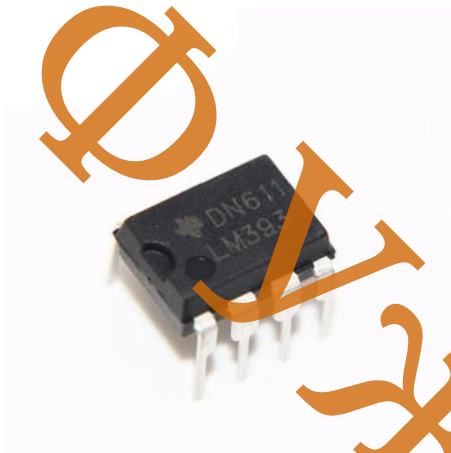


Рис.1.16 LM393

##### 1. Вихід типу "відкритий колектор"

На відміну від звичайного операційного підсилювача, LM393 не видає напругу самостійно. Його вихід працює як електронний ключ, що зміє лише притягувати сигнал до землі (0 В). Завдяки використанню зовнішнього підтягуючого резистора, підключеного до шини логіки +5 В, вихідний сигнал легко конвертується в прямокутні імпульси з розмахом рівно від 0 до 5 В. Це забезпечує безпечну сумісність із цифровою CMOS/TTL логікою мікроконтролера PIC16F628A.

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

## 2. Підтримка однополярного живлення та синфазний діапазон від нуля

LM393 здатний стабільно працювати від напруг від 2 В до 36 В. Більше того, його вхідний синфазний діапазон (Common-Mode Range) гарантовано включає рівень "землі" (0 В). Це абсолютно необхідно для детектора, оскільки в стані спокою напруга аналогового тракту знаходиться дуже близько до нульової позначки.

## 3. Оптимальна швидкодія для спектроскопії (Response Time)

Для того, щоб перетворити швидкий імпульс від прольоту гамма-кванта на цифровий сигнал, компаратор має діяти без затримок. Час відгуку (Response Time) LM393 становить приблизно 1 - 1.3 мікросекунди.

## 4. Низьке енергоспоживання та малий струм зміщення

Для портативного дозиметра економія батареї є пріоритетом. LM393 споживає мізерний струм — лише близько 0.4 мА, незалежно від напруги живлення. Крім того, його вхідний струм зміщення становить лише близько 25 нА. Такий низький показник означає, що входи компаратора мають високий опір і не "просаджують" аналоговий сигнал, що надходить з виходу попереднього підсилювача.

## 4. Мікроконтролер PIC16F628A



Рис. 1.17 PIC16F628A

## 1. Апаратне зовнішнє переривання

Радіоактивний розпад і випромінювання — це абсолютно випадковий, пуассонівський процес.

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Частинки можуть прилітати з великими інтервалами, а можуть влучити двічі за мілісекунду. Якби мікроконтролер просто періодично "опитував" стан входу в циклі, він би неминуче пропускав частину імпульсів.

На схемі транзисторний ключ Q1 передає сигнал від компаратора саме на пін 6. В архітектурі PIC цей вивід відповідає за апаратне переривання INT (Interrupt on change). Це означає, що незалежно від того, чим зараз зайнятий процесор (наприклад, оновлює текст на LCD-екрані), приліт гамма-кванта миттєво призупинить поточну програму, змусить процесор додати +1 до лічильника подій, і лише після цього поверне його до звичайної роботи. Це гарантує 100% фіксацію кожної частинки.

## 2. Точна хронометрія для дозиметрії

Для того, щоб перетворити звичайну кількість імпульсів на наукову величину — потужність еквівалентної дози (мкЗв/год), системі потрібен бездоганно точний еталон часу. Мікроконтролер має вбудований генератор, проте на схемі ви використали зовнішній кварцовий резонатор X1 з конденсаторами. Це забезпечує максимальну стабільність тактової частоти.

Завдяки цьому прошивка може ідеально точно вираховувати параметр CPM (Counts Per Minute — кількість імпульсів за хвилину), збираючи статистику у часове вікно (наприклад, за останні 10 чи 60 секунд).

## 3. Пряме керування LCD-дисплеєм

Цей мікроконтролер має 16 виводів загального призначення (GPIO). Цього цілком достатньо для прямого паралельного керування символьним дисплеєм LM016L.

Це дозволяє виводити розгорнуту інформацію для користувача без необхідності додавати в схему додаткові мікросхеми-розширювачі (на кшталт регістрів зсуву чи I2C модулів), що економить місце на платі.

## 4. Наявність EEPROM та енергоефективність

Для портативного дозиметра критично важливо економити заряд батареї. PIC16F628A має низьке енергоспоживання та підтримку режимів сну.

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Крім того, він має на борту 128 байт енергонезалежної пам'яті даних (EEPROM). У цю пам'ять прошивка може зберігати калібрувальні коефіцієнти або накопичену загальну дозу. Ці дані не зітруться навіть якщо пристрій повністю вимкнута або витягнути акумулятор.

## 5. Мікросхема ICL7660

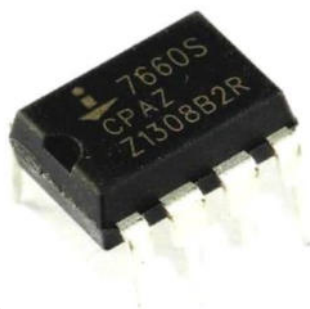


Рис. 1.2 ICL7660

### 1. Вирішення проблеми живлення екрана.

У схемі використовується класичний символічний дисплей стандарту. Щоб символи на такому екрані були видимими, до його виводу потрібно прикласти певну напругу зміщення, яка керує закручуванням рідких кристалів.

Коли портативний дозиметр живиться від низької напруги (наприклад, +3 В після стабілізатора, як на другій схемі), різниці потенціалів між +3 В та землею (0 В) фізично недостатньо для того, щоб символи стали темними. Щоб екран працював коректно, на пін V<sub>ee</sub> потрібно подати негативну напругу (нижче рівня землі). Саме для цього в схему додано ICL7660.

### 2. Принцип роботи

ICL7660 працює як зарядова помпа.

Внутрішній генератор мікросхеми керує чотирма транзисторними ключами.

У першій половині такту мікросхема заряджає перший конденсатор від позитивного джерела живлення.

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

У другій половині такту вона відключає його від джерела і "перекидає" паралельно другому (вихідному) конденсатору, але зворотною полярністю. В результаті, якщо ви подали на вхід мікросхеми +3 В, на її виході (пін 5, Vout) з'являться стабільні -3 В. Саме цей мінус через резистор подається на екран.

### 3. Мінімальна кількість компонентів

Для перетворення напруги класичним імпульсним DC-DC перетворювачам потрібні громіздкі котушки індуктивності (дроселі) та швидкодіючі діоди. ICL7660 використовує топологію на комутованих конденсаторах, тому для повноцінної роботи їй потрібні лише два звичайні електролітичні або керамічні конденсатори. Це робить цей вузол надзвичайно дешевим, компактним і простим у розведенні на друкованій платі.

### 4. Висока енергоефективність (Критично для портативного дозиметра)

ICL7660 має типову ефективність перетворення напруги (Voltage Conversion Efficiency) близько 99.9% та енергетичну ефективність (Power Efficiency) близько 98%. При цьому її власний струм споживання в режимі спокою становить лише близько 200 мікроампер. Це гарантує, що генерація негативної напруги для екрана майже не розряджатиме акумулятор.

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

## 2. Практична частина

### 2.1. Опис основних блоків



Рис. 2.1 Структурна схема

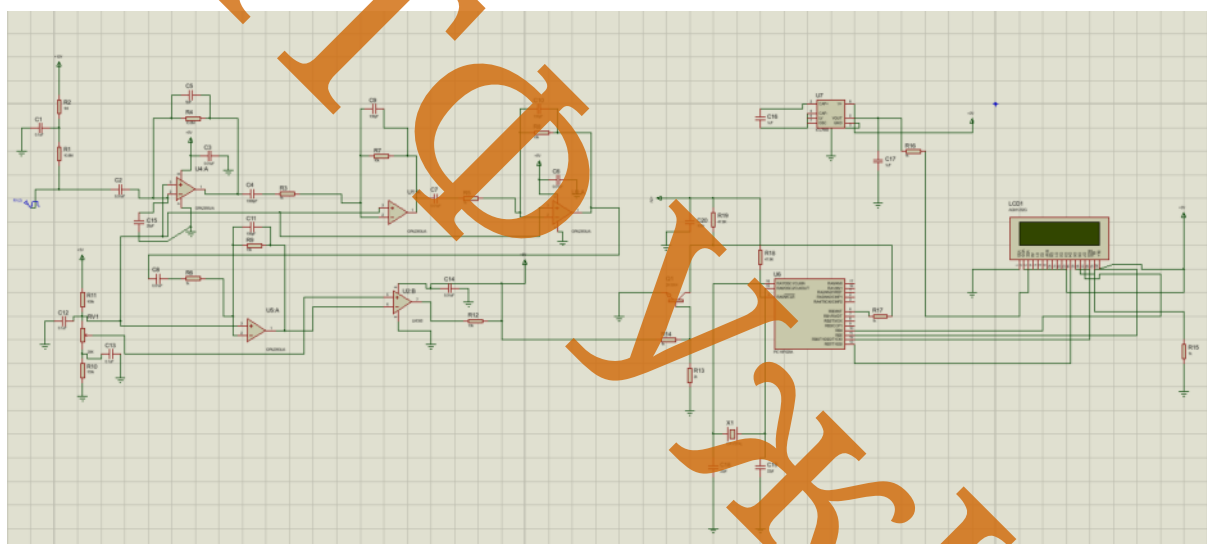


Рис. 2.2 Принципова схема

#### Блок 2: Детекторний вузол

На схемі цей блок представлений елементом D1 (PIN-фотодіод), конденсатором зв'язку C2 та колами зміщення (R1, R2).

#### Призначення та принцип роботи

В якості чутливого елемента використовується кремнієвий PIN-діод. На відміну від звичайного PN-переходу, PIN-діод має широку область власної провідності між сильнолегованими областями P та N типів.

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

- Зворотне зміщення: На катод діода через резистори R1 та R2 подається позитивна напруга VDC1 (12.0V). Це вводить діод у режим зворотного зміщення.

- Збіднена область: Зворотна напруга розширює збіднену область на всю товщину І-шару. Саме тут створюється сильне електричне поле. При потраплянні гамма-кванта в цю область виникають носії заряду, які миттєво розділяються полем: електрони дрейфують до катода, дірки — до анода

Вхідні/Вихідні сигнали

- Вхід: Потік гамма-квантів (іонізуюче випромінювання).
- Вихід: Струмний імпульс. Повний інтеграл струму дорівнює генерованому заряду.
- Роль компонентів.
  - R1, R2: Фільтр низьких частот для живлення (разом з C1) та обмеження струму у випадку пробоя.
  - C1: Блокувальний конденсатор, що замикає високочастотні завади з шини живлення на землю, запобігаючи їх потраплянню на вхід підсилювача.

Блок 3: Зарядочутливий попередній підсилювач

Цей блок побудований на операційному підсилювачі U4A (OPA2350), елементах зворотного зв'язку R4, C4 та вхідному розділовому конденсаторі C2.

Призначення

Зарядочутливий передпідсилювач (ЗЧП) є стандартом у ядерній електроніці. Його завдання — перетворити слабкий заряд Q у напругу V, причому коефіцієнт перетворення має залежати лише від елементів зворотного зв'язку, а не від ємності детектора.

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Схемотехнічний аналіз

- Топологія: Інвертуючий інтегратор. Вхідний імпульс струму інтегрується на конденсаторі зворотного зв'язку C4.
- Віртуальна земля: Неінвертуючий вхід U4A підключений до джерела опорної напруги VDC2, створюючи віртуальну землю.
- Формування сигналу:

Вихідна напруга визначається як:

$$V_{out} = -\frac{Q_{in}}{C_f} \quad (2.1)$$

де  $C_f$  — ємність конденсатора C4.

Резистор R4 необхідний для розрядки конденсатора C4, інакше ОП увійде в насичення від постійного струму витoku діода та інтеграції фонових подій.

- Вибір ОП. Використання є не випадковим. Це широкопasmовий, низькошумний ОП. Критичними параметрами є низький вхідний струм зміщення та низька шумова напруга. Оскільки джерело сигналу (діод) має високий імпеданс, вхідний струм ОП створює дробовий шум, який може повністю перекрити сигнал.

## Вхідні/Вихідні сигнали

- Вхід: Струмовий імпульс від детектора.
- Вихід: Імпульс напруги з швидким фронтом (визначається швидкодією ОП та діода) і довгим експоненціальним спадом, що визначається сталою часу.

## Блок 4: Формувач-підсилювач

### Призначення

Сигнал з виходу ЗЧП має дві проблеми: дуже малу амплітуду (мілівольти) та довгий "хвіст", що призводить до накладання імпульсів (pile-up) при високій

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

інтенсивності випромінювання. Формувач вирішує ці задачі, підвищуючи співвідношення сигнал/шум (SNR).

#### Схемотехнічний аналіз

- С3-R3: Це диференціюючий ланцюг (фільтр високих частот - CR).

Він "обрізає" довгий хвіст імпульсу, перетворюючи його на короткий сплеск і повертаючи рівень сигналу до базової лінії. Це усуває низькочастотний шум.

- U1 (Активний підсилювач): Конфігурація з R7/C9 у зворотному зв'язку діє як фільтр низьких частот (RC). Він обмежує смугу пропускання зверху, відсікаючи високочастотний тепловий шум.
- CR-RC формування: Комбінація диференціювання на вході та інтегрування в зворотному зв'язку перетворює експоненційний на напів-гаусовий або дзвоноподібний імпульс. Така форма є оптимальною для вимірювання амплітуди.
- U3A та U5A: Виступає як додатковий каскад підсилення напруги (або буфер для узгодження імпедансів перед компаратором).

#### Вхідні/Вихідні сигнали

- Вхід: "Хвіст" з виходу U4A.
- Вихід: Сформований аналоговий імпульс дзвоноподібної форми з амплітудою порядку (залежно від енергії частинки).

#### Блок 5: Компаратор (Амплітудний дискримінатор)

Блок реалізовано на U2 (LM393), дільнику напруги R10, R11, RV1.

#### Призначення

Перетворення аналогового імпульсу в цифрову форму (логічний сигнал) для підрахунку. Також виконує функцію відсікання шумів.

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

## Схемотехнічний аналіз

- Принцип дії: ОП U2 працює без зворотного зв'язку (у режимі компаратора).
  - На інвертуючий вхід (-) подається корисний сигнал з формувача.
  - На неінвертуючий вхід (+) подається порогова напруга з потенціометра RV1.
- Поріг дискримінації: Потенціометр RV1 дозволяє встановити рівень відсікання. Всі сигнали, амплітуда яких нижча (наприклад, тепловий шум або низькоенергетичні фонові події), ігноруються. Сигнали, що перевищують поріг, викликають перемикання виходу у стан логічної "1" (або "0" залежно від полярності підключення).

## Вхідні/Вихідні сигнали

- Вхід: Аналоговий сформований імпульс.
- Вихід: Цифровий прямокутний імпульс (TTL/CMOS рівні), сумісний з лічильними входами мікроконтролерів (Arduino, STM32).

## 5. Допоміжний блок: Віртуальна земля

Оскільки схема живиться від однополярного джерела (наприклад, +5В), операційним підсилювачам потрібна середня точка для роботи з сигналами змінного струму. U2 створює стабільну опорну напругу (наприклад, +2.5В), яка слугує "землею" для змінного сигналу. Це критично для забезпечення динамічного діапазону.

## Блок 6: Цифровий блок обробки (Мікроконтролер)

- U6 (PIC16F628A): Він рахує кількість імпульсів за одиницю часу.
- Тактування: Кварцовий резонатор X1 з конденсаторами C18, C19 забезпечує стабільну частоту роботи процесора, що важливо для точного вимірювання.

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Блок 7: Виведення інформації

- LCD1 (AGM1232): Рідкокристалічний дисплей 16x2, який виводить результати вимірювань у зручному для користувача вигляді.

### 2.2. Розрахунки елементів

#### 1. Блок імітації сенсора (Еквівалентний заряд від гамма-кванту)

У симуляторі генератор імпульсного струму на 50 nA (наноампер) з тривалістю імпульсу 1mS (мікросекунда). Знайдемо загальний електричний заряд  $Q$ , який "вибиває" одну віртуальна частинка у PIN-діоді.

- Формула заряду:

$$Q = I * t(2.2)$$

$I$  – струм

$t$  – час

- Розрахунок:

$$Q = 50 * 10^{-15} = 50 \text{ fC}(2.3)$$

- Висновок: Один гамма-квант генерує заряд у 50 fC (фемтокулонів). Це реалістичне значення для детектування за допомогою кремнієвих структур.

Розрахунок ширини збідненої зони PIN-діода

Ширина збідненої зони ( $W$ ), яка є активним об'ємом для захоплення гамма-квантів, прямо залежить від прикладеної зворотної напруги ( $V$ ).

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Формула для наближеного розрахунку:

$$W \approx \sqrt{2 * \epsilon_0 \epsilon_r * \mu * \rho} \quad (2.4)$$

Де  $\rho$  — питомий опір кремнію,  $\mu$  — рухливість носіїв,  $\epsilon_0 \epsilon_r$  — діелектрична проникність.

З формули видно, що ширина чутливої зони  $W$  зростає пропорційно квадратному кореню з прикладеної напруги  $\sqrt{V}$ . Одночасно з цим паразитна ємність діода падає ( $C \propto \frac{1}{W}$ ). Саме тому підвищення напруги до 12 - 15V є критично необхідним кроком: це фізично збільшує ймовірність захоплення гамма-фотона та зменшує шуми на вході трансімпедансного підсилювача.

Трансімпедансний підсилювач (ТІП) — це тип підсилювача, чий коефіцієнт передачі визначається як співвідношення вихідної напруги до вхідного струму ( $V_{OUT} / I_{IN}$ ). Внаслідок цього, він має одиницю вимірювання опору і виражається в Омах. Такі підсилювачі можуть бути реалізовані на основі стандартного операційного підсилювача, що є поширеним у схемах для фотодіодних підсилювачів.

## 2. Трансімпедансний передпідсилювач / ТІА (U4:A)

Цей каскад перетворює згенерований заряд на напругу. Його ключовими компонентами є резистор зворотного зв'язку та компенсаційний конденсатор.

- Амплітуда первинного імпульсу: Оскільки час прольоту заряду менший за сталу часу підсилювача, каскад працює як інтегратор заряду.

$$V_{out} = \frac{Q}{C_5} = \frac{50 * 10^{-15}}{5 * 10^{-12}} = 10 \text{ mV} \quad (2.5)$$

- Час розряду: Визначається сталою часу  $\tau$  RC-ланцюга у зворотному зв'язку.

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\tau_{tia} = R4 * C5 = 50 * 10^{-6} = 50\mu s \quad (2.6)$$

Підсилювач миттєво видасть різкий стрибок напруги амплітудою 10 mV, який потім експоненційно спадатиме до нуля протягом 50μs.

### 3. Формуючий підсилювач / Shaper (U1:A та U3:A)

Щоб імпульси з довгими хвостами не накладалися один на одного при високому рівні радіації, їх потрібно скоротити (сформувати).

Час диференціювання (High-Pass фільтр):

$$\tau_{diff} = R3 * C4 = 10^3 * 1000 * 10^{-12} = 1\mu s \quad (2.7)$$

Час інтегрування (Low-Pass фільтр):

$$\tau_{int} = R7 * C9 = 10^4 * 100 * 10^{-12} = 1\mu s \quad (2.8)$$

Частота зрізу диференціатора (ФВЧ)

$$f_{hp} = \frac{1}{2\pi * R_3 * C_4} = \frac{1}{2\pi * 10^3 * 1000 * 10^{-12}} = 159.1 \text{ kHz} \quad (2.9)$$

Частота зрізу інтегратора (ФНЧ)

$$f_{lp} = \frac{1}{2\pi * R_7 * C_9} = \frac{1}{2\pi * 10^4 * 100 * 10^{-12}} = 159.1 \text{ kHz} \quad (2.10)$$

Розрахунки доводять, що схема є налаштованим смуговим фільтром із центральною частотою близько 159kHz.

### 4. Дискримінатор на компараторі (U2:В LM393)

Компаратор LM393 має вихід типу "відкритий колектор" і потребує підтягуючого резистора R12, підключеного до шини +5V.

Розрахунок струму відкритого колектора:

$$I_{open} = \frac{V_{cc}}{R12} = 0.5 \text{ mA} \quad (2.11)$$

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Згідно з технічною документацією, вихідний транзистор компаратора LM393 може безпечно пропускати струм до 16mA. Струм у 0.5 mA є мізерним.

Це означає, що компаратор працюватиме абсолютно надійно, без нагрівання, видаючи ідеальні прямокутні імпульси для мікроконтролера.

#### 4. Розрахунок транзисторного ключа Q1 у режимі насичення

Транзистор Q1 (2N3904) узгоджує вихід компаратора з входом переривання мікроконтролера. Для надійної роботи цифрової логіки він повинен працювати в режимі глибокого насичення.

Струм бази транзистора ( $I_B$ ): Коли на виході компаратора формується логічна "1" (напруга підтягується до 5V), струм тече через базовий резистор  $R_{14}$ . Падіння напруги на переході база-емітер  $V_{BE} \approx 0.7$  В.

$$I_B = \frac{V_{cc} - V_{BE}}{R_{14}} = \frac{5V - 0.7V}{1000 \text{ Ом}} = 4.3 \text{ mA} \quad (2.12)$$

Струм колектора ( $I_C$ ): Колектор підключений до напруги 5V через підтягуючий резистор R19.

$$I_C = \frac{V_{cc}}{R_{19}} = \frac{5V}{47000 \text{ Ом}} = 0.106 \text{ mA} \quad (2.13)$$

#### 5. Обчислювальний блок (Мікроконтролер PIC16F628A)

Мікроконтролер працює від зовнішнього кварцового резонатора X1 із частотою 4 MHz.

Частота машинного циклу: Архітектура 8-бітних мікроконтролерів PIC виконує одну інструкцію за 4 такти осцилятора.

$$F_{cy} = \frac{F_{osc}}{4} = \frac{4\text{MHz}}{4} = 1\text{MHz} \quad (2.14)$$

Час виконання однієї інструкції (швидкодія):

$$T_{inst} = \frac{1}{F_{cy}} = 1\mu s \quad (2.15)$$

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Процесор виконує один крок кожну мікросекунду. Вхід в апаратне переривання у PIC-контролерів займає приблизно 3-4 машинних цикли.

Отже, через 3 - 4  $\mu\text{s}$  після того, як гамма-квант влучить у детектор, мікроконтролер вже почне обробляти цю подію у своєму програмному коді. Це виключає втрату будь-яких імпульсів.

### 2.3. Розрахунок ймовірності безвідмовної роботи

Відомість елементів та їх базова інтенсивність відмов

Таблиця 2

Група елементів	Кількість $N_i$	Базова інтенсивність $\lambda_0$	Сумарна інтенсивність $\lambda_i$
Інтегральні мікросхеми (PIC, ОРА, LM, ICL)	8	0.15	1.2
Напівпровідники (діод ВРW34, транзистор 2N3904)	2	0.05	0.1
Резистори постійні та підстроювальні	19	0.01	0.19
Конденсатори (керамічні та електролітичні)	19	0.03	0.57
Кварцовий резонатор (4 МГц)	1	0.2	0.2
Рідкокристалічний дисплей(LM016L)	1	1.5	1.5

$$\sum \lambda_i = 3.76 \quad (2.6)$$

Оскільки дозиметр є портативним приладом, який буде використовуватися не лише в ідеальних лабораторних, а й у реальних (польових) умовах, базову суму необхідно помножити на поправочний коефіцієнт експлуатації  $K_E$ . Для портативної апаратури зазвичай приймають  $K_E = 1.5$ .

Загальна експлуатаційна інтенсивність відмов розраховується за формулою:

$$\lambda_{sys} = K_E * \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1.5 * 3.76 * 10^{-6} = 5.64 * 10^{-6} \quad (2.17)$$

Ймовірність безвідмовної роботи

Цей параметр показує ймовірність того, що прилад гарантовано пропрацює заданий час  $t$  без жодної поломки.

Формула розрахунку експоненційного закону надійності:

$$P(t) = e^{-\lambda_{sys}t} \quad (2.18)$$

Розрахунок для 1000 годин:

$$P(1000) = e^{-5.64 * 10^{-6} * 1000} \approx 0.9943 (99.4\%) \quad (2.19)$$

## 2.4. Моделювання схеми

Для моделювання, замість діоду був використаний генератор імпульсів.

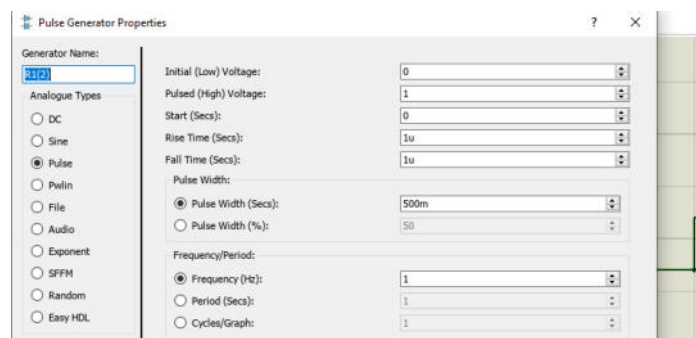


Рис. 2.3 Генератор імпульсів

					<b>КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ</b>	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Основні рівні напруги

- **Initial (Low) Voltage: 0** Початкова (нижня) напруга сигналу. Це рівень «паузи» або логічного нуля. Встановлено 0 В.
- **Pulsed (High) Voltage: 1** Імпульсна (верхня) напруга. Це амплітуда самого імпульсу або рівень логічної одиниці. Встановлено 1 В.

## Часові параметри фронтів

• **Start (Secs): 0** Затримка старту (в секундах). Визначає, через скільки часу після початку симуляції генератор видасть перший імпульс. 0 означає, що він починає працювати миттєво.

• **Rise Time (Secs): 1u** Час наростання фронту. Час, за який напруга піднімається від 0 В до 1В. Перехід триває 1 мікросекунду — фронт майже ідеально вертикальний.

• **Fall Time (Secs): 1u** Час спаду фронту. Час, за який напруга падає назад з 1 В до 0 В. Так само встановлено 1 мікросекунду.

## Тривалість та частота сигналу

• **Pulse Width (Secs): 500m** Ширина (тривалість) імпульсу. Час, протягом якого сигнал утримується на верхньому рівні (1 В). Імпульс триває 500 мілісекунд (або 0.5 секунди).

• **Frequency (Hz):** Кількість повних циклів за одну секунду. 1 Гц означає, що кожен секунду генерується один повний цикл.

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

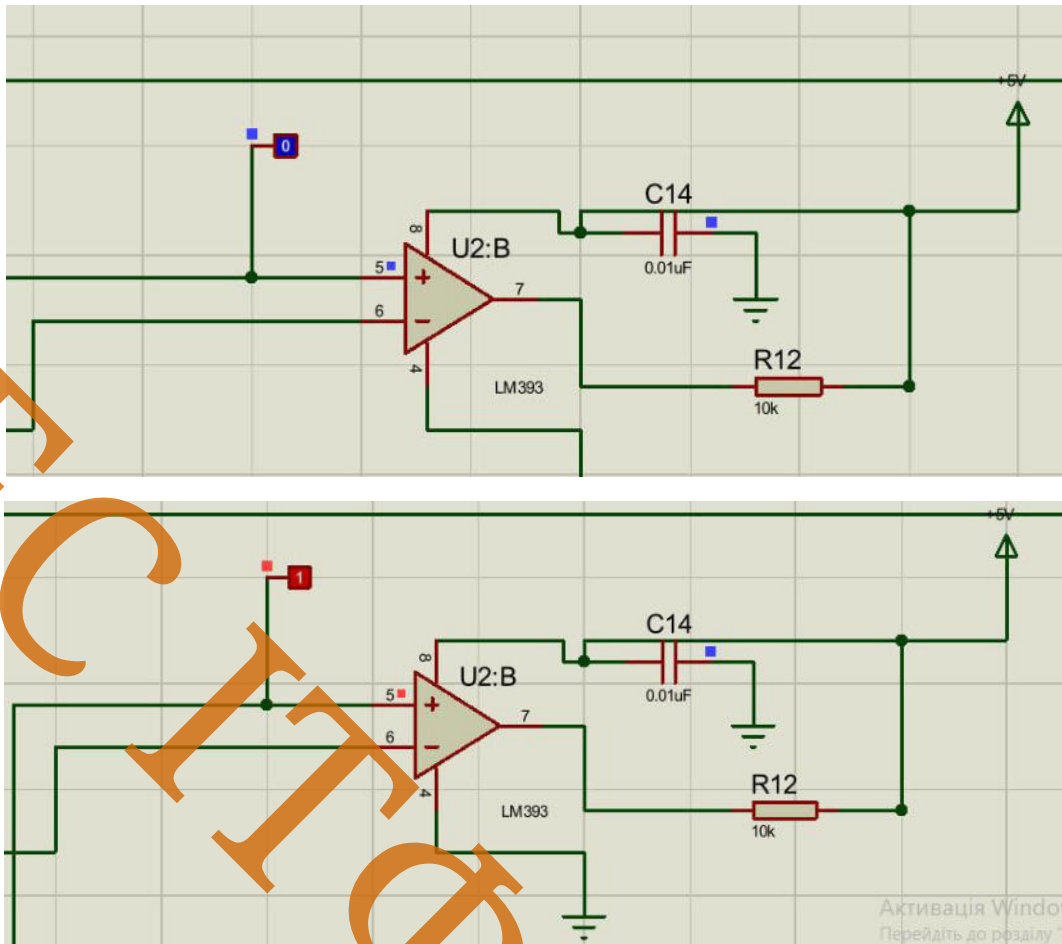


Рис. 2.4-2.5 Показ роботи компаратора

Вище показано роботу компаратора, це імітує ситуацію, коли детектор зафіксував гамма-квант, і аналоговий тракт видав імпульс напруги. І логічний нуль перетворюється на логічну одиницю.

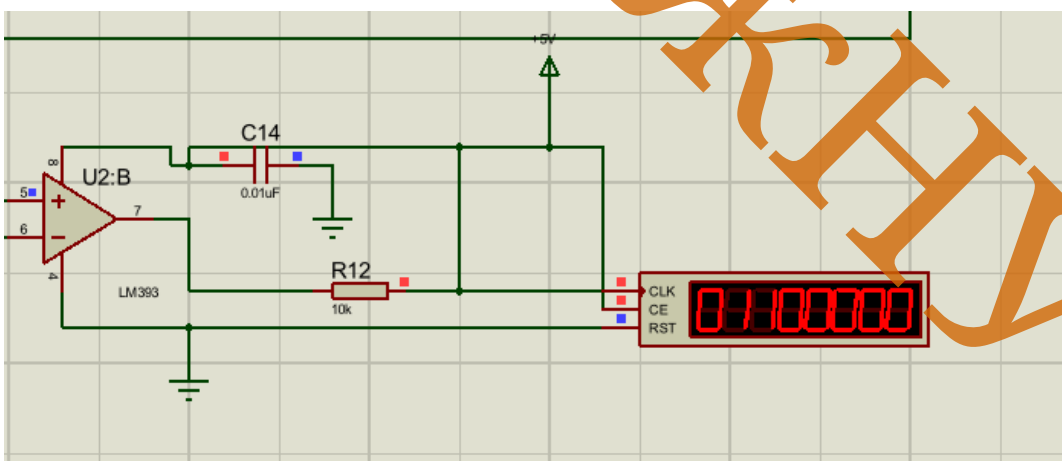


Рис. 2.6 Показ роботи лічильника

Також на зображенні вище, показано, що при кожному імпульсі напруги лічильник буде збільшувати своє значення.

## Висновки

У результаті виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було створено схему портативного детектора гамма-фотонного випромінювання та проведено комплексний аналіз і розрахунок його вузлів. Було отримано наступні результати:

Було досліджено фізичні основи реєстрації випромінювання. Детально проаналізовано механізми взаємодії гамма-квантів з матеріалом детектора.

Розроблено схемотехнічну архітектуру приладу. Після аналізу наявних на даний момент елементів було вирішено змодельовати трансімпедансний зарядочутливий підсилювач (на базі ОРА2350), що дозволяє ефективно інтегрувати мікроскопічний заряд, генерований у PIN-діоді (на рівні 50 фемтокулонів).

Здійснено розрахунок формувача імпульсів. Узгодження сталих часу диференціюючого та інтегруючого ланцюгів на рівні 1 мкс дозволило перетворити довгий експоненційний сигнал на симетричний дзвоноподібний імпульс із частотою зрізу фільтрів близько 159 кГц, що мінімізує ймовірність накладання сигналів та ефективно пригнічує низькочастотні і теплові шуми. Далі було змодельовано цифрову обробку сигналів. За допомогою середовища Proteus проведено симуляцію роботи амплітудного дискримінатора на базі компаратора LM393. Доведено ефективність перетворення аналогового імпульсу на цифрові логічні рівні.

Обґрунтовано також використання апаратного переривання мікроконтролера PIC16F628A, що гарантує фіксацію кожної події розпаду (з часом реакції 3-4 мкс) без пропусків. Використання мікросхеми ICL7660 дозволило розв'язати проблему живлення LCD-дисплея без внесення додаткових імпульсних завад.

На основі експоненційного закону розподілу відмов розраховано базову та експлуатаційну інтенсивність відмов системи.

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З урахуванням коефіцієнта для портативної апаратури доведено, що ймовірність безвідмовної роботи спроектованого детектора протягом 1000 годин становить 99.43%, що підтверджує високу надійність обраних рішень.

Також на основі теоретичної частини роботи, була опублікована доповідь на конференції.

ЕС ТТФ УЖЕНУ

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

## Список використаних джерел

1. Kapoor, S.S., Ramamurthy, V.S. "Nuclear Radiation Detectors". URL: <https://books.google.co.in/books?id=RX5Xdo030X0C&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false> (дата звернення: 18.09.2025).
2. What is PIN Diode? Definition, Structure, Features & Applications - Jotrin Electronics. Jotrin Electronics - Global Electronic Components Distributor. URL: <https://www.jotrin.com/technology/details/what-is-pin-diode-definition-structure-features-applications> (дата звернення: 18.09.2025).
3. PIN Diode – Working, Construction, and Applications URL: <https://www.electricaltechnology.org/2024/05/pin-diode.html> (21.09.2025).
4. Microsemi Corporation, "PIN Diode Circuit Designers' Handbook" URL: [https://www.ieee.li/pdf/essay/pin\\_diode\\_handbook.pdf](https://www.ieee.li/pdf/essay/pin_diode_handbook.pdf) (дата звернення: 02.10.2025).
5. SBM-20 URL: [https://electronicprojectsforfun.wordpress.com/wp-content/uploads/2022/08/sbm-20specs.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://electronicprojectsforfun.wordpress.com/wp-content/uploads/2022/08/sbm-20specs.pdf?utm_source=chatgpt.com)
6. Application Note 2236: "Gamma-Photon Radiation Detector". URL: <https://www.ece.ucf.edu/seniordesign/su2013fa2013/g09/Documents/Portable%20Gamma%20Spectrometer.pdf>
7. Semiconductor & System Solutions | Infineon Technologies. URL: <https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/24/45/infineon-rf-pin-diodes-productbrief-en.pdf> (дата звернення: 03.10.2025).
8. Project | Gamma PIN - Semiconductor Radiation Detector | Hackaday.io. Hackaday.io | The world's largest collaborative hardware development community. URL: <https://hackaday.io/project/159909/logs> (дата звернення: 21.12.2025).
9. Op Amps used as Comparators—is it okay?. TIE2E support forums. URL: [https://e2e.ti.com/blogs\\_/archives/b/thesignal/posts/op-amps-used-as-comparators-is-it-okay](https://e2e.ti.com/blogs_/archives/b/thesignal/posts/op-amps-used-as-comparators-is-it-okay) (дата звернення: 01.02.2026).
10. DIY Gamma Spectrometry - PhysicsOpenLab. PhysicsOpenLab. URL: <https://physicsopenlab.org/2016/01/26/diy-gamma-spectrometry/> (дата звернення: 23.03.2026).
11. Research on the Technological Progress of CZT Array Detectors. MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/3/725> (дата звернення: 23.05.2026).
12. IX Міжнародна науково-практична конференція «SCIENCE, TECHNOLOGY AND GLOBAL CHALLENGES», 1-3.05.2026, Токіо, Японія.. URL: <https://sci-conf.com.ua/ix-mizhнародna-naukovo-praktichna-konferentsiya-science-technology-and-global-challenges-1-3-05-2026-tokio-yaponiya-arhiv/>.

					КБР.ЕС.10314212.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

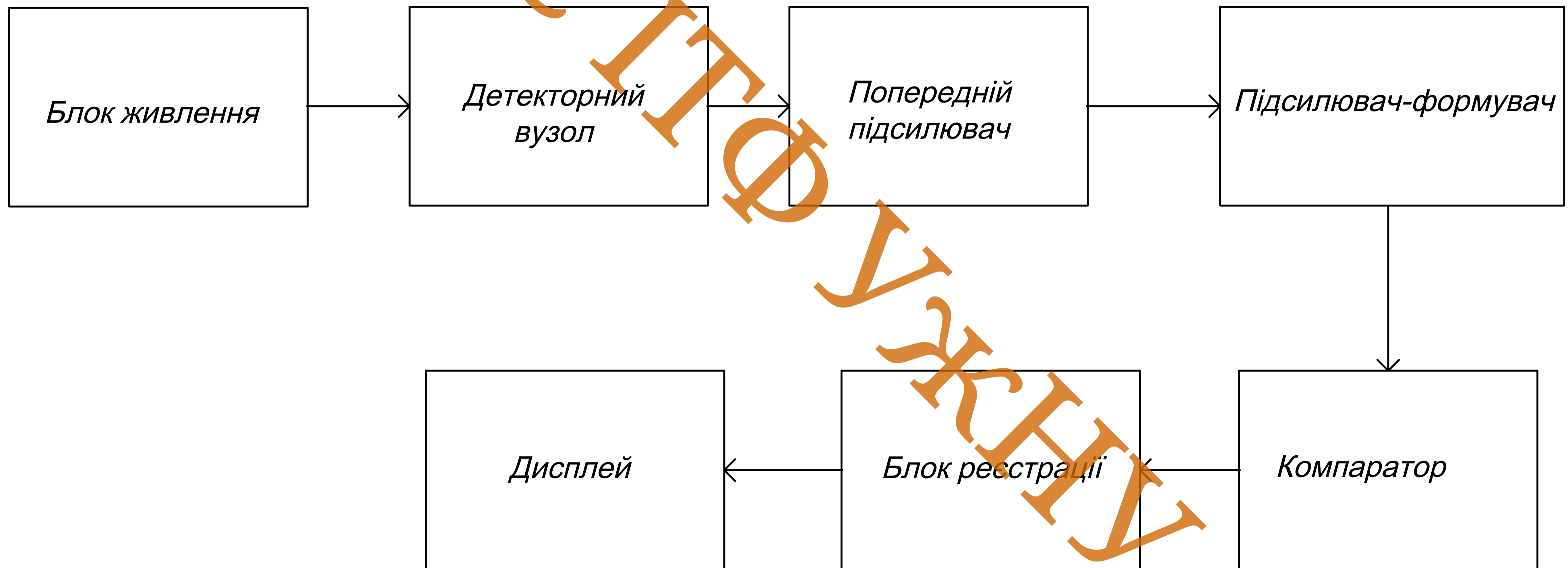


Поз. познач.	Найменування	Кіл.	Примітка		
<b><u>Резистори</u></b>					
R1	Current Sense Resistors - SMD RLC73PV 2B R01 1% 1K RL	1	TE Connectivity / CGS		
R2	Metal Film Resistors - Through Hole 1/2watt 1Mohms 1%	1	Vishay / BC Components		
R3	1k Ohm ±2% 125mW	1	Bourns Inc.		
R4	Current Sense Resistors - SMD RLC73PV 2B R01 1% 1K RL	1	TE Connectivity / CGS		
R5	1k Ohm ±2% 125mW	1	Bourns Inc.		
R6	1k Ohm ±2% 125mW	1	Bourns Inc.		
R7	Metal Film Resistors - Through Hole .25watt 10Kohm .1% 10ppm	1	Vishay / Beyschlag		
R8	Metal Film Resistors - Through Hole .25watt 10Kohm .1% 10ppm	1	Vishay / Beyschlag		
R9	Metal Film Resistors - Through Hole .25watt 10Kohm .1% 10ppm	1	Vishay / Beyschlag		
R10	Carbon Film Resistors - Through Hole 150K Ohm 1/4W 5%	1	Ohmite		
R11	Carbon Film Resistors - Through Hole 100K Ohm 1/4W 2%	1	Ohmite		
R12	Metal Film Resistors - Through Hole .25watt 10Kohm .1% 10ppm	1	Vishay / Beyschlag		
R13	2k Ohm ±2% 125mW	1	Bourns Inc.		
R14	1k Ohm ±2% 125mW	1	Bourns Inc.		
R15	1k Ohm ±2% 125mW	1	Bourns Inc.		
R16	1k Ohm ±2% 125mW	1	Bourns Inc.		
R17	1k Ohm ±2% 125mW		Bourns Inc.		
R18	Metal Film Resistors - Through Hole .25watt 47Kohm .1% 5ppm	1	Vishay / Beyschlag		
R19	Metal Film Resistors - Through Hole .25watt 47Kohm .1% 5ppm	1	Vishay / Beyschlag		
<b><u>Конденсатори</u></b>					
C1,C12,	Safety Capacitors 0.1uF X440 Y300VAC 20% Y5U	3	Vishay / BC Components		
C2,C3,C6	Safety Capacitors 0.01uF X340 Y300VAC 10% Y5U	5	Vishay / BC Components		
C7,C8,C1	Safety Capacitors 0.01uF X340 Y300VAC 10% Y5U	5	Vishay / BC Components		
C18,C19	Ceramic Disc Capacitors 22pF 5% .25LS NPO	2	Vishay / Cera-Mite		
C5	Multilayer Ceramic Capacitors MLCC - SMD/SMT 5pF C0G 0805 5%	1	KYOCERA AVX		
C9,C10,C1	Multilayer Ceramic Capacitors MLCC - SMD/SMT 100pF X8G 0805 5%	3	KYOCERA AVX		
<b>КБР.ЕС.10314212.004.ПЕ</b>					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	
Розроб.	Потічний О.А.				
Перевір.	Заяць Т.М.				
Реценз.					
Н. Контр.	Папп О.В.				
Затверд.	Заяць Т.М.				
Перелік елементів			Літ.	Арк.	Аркуші
				1	2
			УЖНУ, ІТФ, 4 курс, група ЕС		

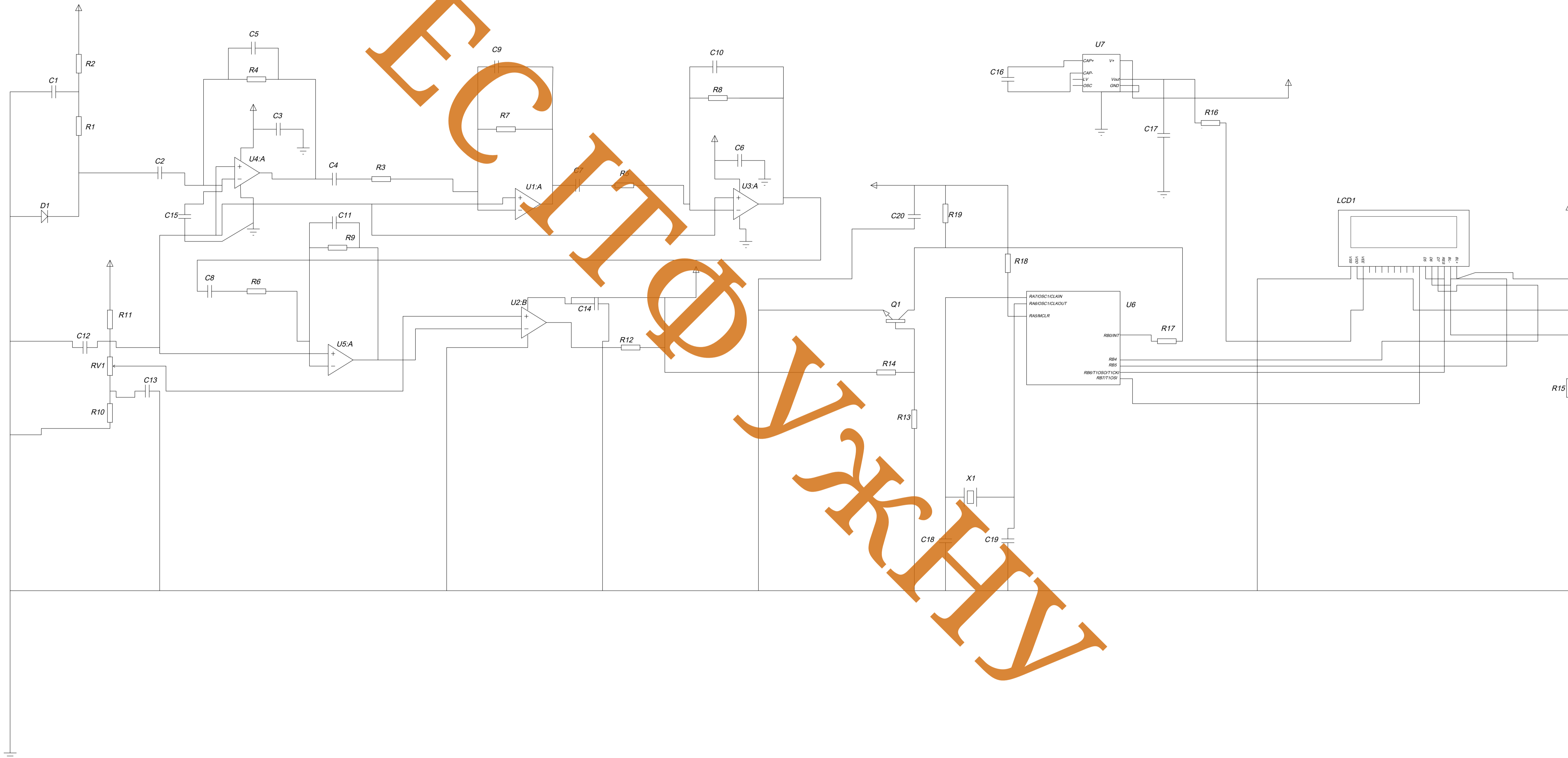
Поз. познач.	Найменування	Кіл.	Примітка
C15	Multilayer Ceramic Capacitors MLCC - SMD/SMT 20pF 0805 5%	1	KYOCERA AVX
C16,C17	Film Capacitors 1uF 5%	2	Vishay / Roederstein
C20	Multilayer Ceramic Capacitors MLCC - SMD/SMT 100nF 10	1	KYOCERA AVX
<b><u>Операційні підсилювачі</u></b>			
U1,U3,U4,U5	595-OPA2350UA/2K5	4	Texas Instruments
<b><u>Компаратори</u></b>			
U2	Mfr. Part No LM393	1	STMicroelectronics
<b><u>Транзистори</u></b>			
Q1	Bipolar Transistors - BJT TC92,NPN,0.2A,60V,GenPur	1	Rectron
<b><u>Мікросхеми</u></b>			
U6	8-bit Microcontrollers - MCU 3.5KB 224 RAM 16 I/O	1	Microchip Technology
U7	Switched-Capacitor Voltage Converters	1	Maxim Integrated
<b><u>LCD-дисплеї</u></b>			
LCD1	AGM1232G	1	AZ Displays

КБР.ЕС.10314212.004.ПЕ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Потічний О.А.			Перелік елементів	Лім.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Заяць Т.М.					2	2
Реценз.						УжНУ, ІТФ, 4 курс, група ЕС		
Н. Контр.		Папп О. В.						
Затверд.		Заяць Т.М.						



				КБР.ЕС.10314.212.001.Е1			
Зм. Арк.	№ Док.	Підп.	Дата	Структурна схема детектора гамма-фотонного випромінювання	Літера	Маса	Масш.
Розроб.	Патічна О.А.						
Перев.	Заяць Т.М.				Архив 1		Архив 1
Н. контр.	Папп О.В.			Структурна схема	УжНУ, ІТФ, ЕС, 4-а курс		
Затвер.	Заяць Т.М.						



ЕФІТІ

УЖНУ

				КБР.ЕС.10314212.001 ЕЗ			
Зм. Арк.	№ Докум.	Пізн.	Дата	Принципова схема детектора гамма-фотонного випромінювання	Літера	Маса	Масш.
Розроб.	Патічний О.А.				Аркуш 1		Аркуш 1
Перев.	Заяць Т.М.			Принципова схема	УжНУ, ІТФ, ЕС, 4-а курс		
Н.контр.	Папп О.В.						
Затвер.	Заяць Т.М.						

Додаток 1

Завідувачу кафедри ЕС ІТФ ДНВЗ УжНУ

Кф. - м. н. доц. Заяць Марос Михайлович

Студента (-ки) 4-10 курсу  
спеціальності 171 Електроніка  
Потічний Александра Андрійовича  
(прізвище, ініціали)

## ЗАЯВА

щодо самостійного виконання  
навчальної/кваліфікаційної роботи здобувачем освіти

Я, Потічний Александр Андрійович  
(прізвище, ім'я, по батькові),

Студент(-ка) денна, інтенсивна технологічний факультет, 4-й курс  
(форма навчання, факультет, курс)

заявляю: моя письмова робота на тему: Детектор лямпи - фотодиод випромінювання

виконана самостійно і в ній не міститься елементів плагіату.

Всі запозичення з друкованих та електронних джерел, а також із захищених раніше робіт мають відповідні посилання. Я ознайомлений(а) з діючим Положенням, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску навчальної/кваліфікаційної роботи до захисту та притягнення до академічної відповідальності.

17.06.2016  
Дата

[Підпис]  
Підпис

Додаток 2.

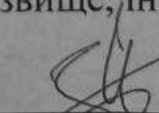
**ДОВІДКА**  
про результати перевірки на унікальність  
кваліфікаційної, навчальної (курсової) роботи

Автор роботи	Потічний Александр Андрійович
Назва роботи	Детектор гамма-променів випромінювання
Спеціальність	111 Електроніка
Курс	4
Факультет	Механіко-технічний факультет
Кафедра	Електронних систем
Керівник роботи	Зачець Марія Михайлівна
Роботу перевірено в програмі	АНТІРІА
Додано до бази даних	
Ідентифікаційний номер роботи	2026-КБД ПОТІЧНИЙ О.А.
Результати перевірки	
Показник унікальності тексту через перевірку роботи у внутрішній базі кафедри ЕС ІТФ ДНВЗ УжНУ	
Показник унікальності тексту в мережі Інтернет	97%

Відповідальна особа/  
Науковий керівник роботи

Зачець Т.М.  
(прізвище, ініціали)

12.06.2026  
Дата

  
Підпис

ANTIPLA

Виявлення плагіату та аналіз ШІ-контенту

# Звіт про аналіз на плагіат

2026\_КБР\_ПОТІЧНИЙ О.А.docx

5 990 слів · 12 червня 2026 р., 15:57 · Звіт #9961B073

Автор: Олександр Потічний

97%

ОРИГІНАЛЬНІСТЬ

3%

ПЛАГІАТ

11%

ШІ-КОНТЕНТ

ПЕРЕВАЖНО ОРИГІНАЛ

13

часткових

3

ШІ

1

джерело



Відскануйте для перевірки звіту онлайн  
<https://antip.la/shared/g0GNnMxbj4GarJfkErVBwaCbOu14t5p>

Цей звіт створено Antipla 12 червня 2026 р.. Аналіз використовує автоматизоване порівняння тексту та виявлення ШІ. Результати повинні бути перевірені кваліфікованим фахівцем перед вжиттям заходів.

# CERTIFICATE

is awarded to

**Potichnyi Oleksandr**

for being an active participant in  
IX International Scientific and Practical Conference

**“SCIENCE, TECHNOLOGY AND  
GLOBAL CHALLENGES”**

**24 Hours of Participation**  
**(0,8 ECTS credits)**

**TOKYO**

**1-3 May 2026**

**sci-conf.com.ua**

