

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Ігоря Сікорського»**

**ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ
КАФЕДРА КОНСТРУЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ
АПАРАТУРИ**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Лисенко О.М.
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ____ ” _____ 20__ р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 6.050902 РАДІОЕЛЕКТРОННІ АПАРАТИ
(код та назва напрямку підготовки або спеціальності)

на тему Система візуалізації гамма-випромінювання

Виконав: студент IV курсу, групи ДК-51
Махньов Олександр Ігорович
(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Керівник ст. викл. Антонюк О.І.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент _____
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ - 2019 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»
Факультет електроніки
Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури

Освітньо-кваліфікаційний рівень – бакалавр
Спеціальність 6.050902 РАДІОЕЛЕКТРОННІ АПАРАТИ
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Лисенко О.М.
(підпис) (прізвище ініціали)

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту
Махньова Олександра Ігоровича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Система візуалізації гамма-випромінювання
керівник проекту Антонюк Олександр Ігорович, старший викладач
затверджені наказом по університету №1405с від 27.05.2019 р.
2. Термін подання студентом проекту 10 червня 2019 р..
3. Вихідні дані до проекту: Система складається з блоку детектування, пристрою зв'язку з об'єктом та персонального комп'ютера. Система повинна забезпечувати візуалізацію поля гамма-випромінювання та накладення зображення поля на зображення з відеокамери.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

- Аналіз технічного завдання;
- Огляд існуючих методів візуалізації гамма-поля, патентний пошук;
- Обґрунтування вибору елементної бази;
- Розробка функціональної схеми системи;
- Розробка схеми електричної принципової;
- Розробка геометричної схеми та механічної конструкції системи;
- Розробка конфігурації мікроконтролера або програмованої логічної мікросхеми;
- Розробка програмного забезпечення для візуалізації;
- Розрахунок надійності системи;
- Конструкторсько-технологічний розрахунок;
- Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, плакатів, презентацій тощо):

- Складальне креслення системи;
- Складальне креслення розроблених вузлів;
- Креслення розроблених деталей, в т.ч. друкованих плат;
- Схема електрична принципова;

6. Дата видачі завдання 15 квітня 2019 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання Дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	15.04.19-17.04.19	виконано
2	Розробка функціональної схеми	17.04.19-19.04.19	виконано
3	Схемотехнічне проектування	19.04.19-26.04.19	виконано
4	Розробка конфігурації програмованих компонентів	26.04.19-3.05.19	виконано
5	Розробка програмного забезпечення	3.05.19-10.05.19	виконано
6	Конструкторсько-технологічні розрахунки	10.05.19-12.06.19	виконано
7	Електричний розрахунок компонентів друкованих вузлів	12.05.19-15.05.19	виконано
8	Виконання креслень розроблених деталей	15.05.19-20.05.19	виконано
9	Виконання креслень друкованої плати та складального креслення друкованого вузла	20.05.19-27.05.19	виконано
10	Оформлення пояснювальної записки	27.05.19-10.06.19	Виконано

Студент _____ Махньов О.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту _____ Антонюк О.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Анотація

Дипломний проект викладено на 80 сторінках, він містить 7 розділів, 45 ілюстрацій, 3 таблиці, 21 джерело у переліку посилань та 13 креслень.

Метою даного проекту є розробка системи візуалізації гамма-випромінювання, що за експлуатаційними та вагогабаритними характеристиками перевершує існуючі аналоги.

В результаті проектування розроблено конструкцію системи, характеристики якої відповідають або перевершують вимоги технічного завдання та задовольняють потреби сучасних радіаційних досліджень.

По матеріалам дипломного проекту виготовлено макетний зразок системи, зроблено доповідь на науково-технічній конференції. Результати впроваджені у роботу НВМСП «Опит», яке видало технічне завдання.

Матеріали дипломного проекту можуть бути використані для виготовлення промислового зразку системи, проведення модернізації конструкції та виконання досліджень та розробок у сумісних наукових сферах.

Результати виконаного проектування мають практичну цінність та можуть бути підставою для отримання патенту на корисну модель.

Ключові слова: гамма-телескоп, гамма-бачення, дозиметрія, спектрометрія, комп'ютерний зір.

Abstract

The diploma project is presented in 80 pages; it contains 7 sections, 45 illustrations, 3 tables, 21 entries in the list of references and 13 drawings.

The purpose of this project is to develop a gamma-ray imaging system that, in terms of operational and weight characteristics, exceeds the existing analogues.

Development resulted in a design of the system, the characteristics of which meet or exceed the requirements of the specification and satisfy the needs of modern radiation research.

Based on the materials of the diploma project a prototype of the system has been built. Project's materials have been presented during the "Elconf-2019" scientific conference. Project's materials are implemented into SPSJE "Opyt" workflow.

The materials of the diploma project can be used for design and construction of an industrial design of the system, carrying out modernization of the design, and performing research and development in compatible scientific areas.

Project's materials have practical value and may be used as a basis for obtaining a patent.

Key words: gamma-ray imaging, gamma-ray telescope, dosimetry, spectrometry, computer vision.

**Пояснювальна записка
до дипломного проекту**

на тему: **Система візуалізації гамма-випромінювання**

Київ – 2019 року

Зміст

Вступ.....	4
1. Аналіз технічного завдання та огляд існуючих рішень	6
1.1. Вибір методу візуалізації гамма-випромінювання.	6
1.2. Вибір методу реєстрації гамма-квантів.....	13
1.3. Вибір методу отримання та обробки даних	17
2. Розробка електричної схеми системи	19
2.1. Принцип роботи та функціональна схема.....	19
2.2. Вхідний підсилювач та дискримінатор нижнього рівню	20
2.3. Пристрій рахування імпульсів	25
2.4. Система живлення	26
3. Вибір та обґрунтування елементної бази	31
4. Розробка геометричної схеми та механічної конструкції системи.....	35
4.1. Розробка геометричної схеми системи	35
4.2. Розробка механічної конструкції системи	38
4.3. Розробка друкованого вузлу блоку приймання-передачі лічильної інформації	42
4.4. Розробка друкованого вузлу блоку реєстрації сцинтиляцій	46
5. Розробка конфігурації програмованої логічної інтегральної схеми.....	47
5.1. Функціональна схема та розробка проекту.....	47
5.2. Перевірка роботи проекту	49
6. Розробка програмного забезпечення для візуалізації	52

					<i>ДК-51.4 11711.001ПЗ</i>							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Махньов О.І			Система візуалізації гамма-випромінювання. Пояснювальна записка			Літ.	Арк.	Акрушів		
Перевір.		Максимович Б.О.						0	1	76		
Реценз.								НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», КЕОА, ФЕЛ, гр. ДК-51				
Н. Контр.												
Затверд.		Антонюк О.І.										

7. Інші розрахунки, що підтверджують працездатність системи.....	58
7.1. Розрахунок ефективності реєстрації детектору	58
7.2. Розрахунок екранування випромінювання конструкціями детектору та маски.....	59
7.3. Прогнозування надійності системи	61
7.4. Розрахунок теплового режиму лінійного стабілізатора	63
7.5. Конструкторсько-технологічний розрахунок елементів друкованих плат	64
Висновки	70
Список використаних джерел	73

Додатки

Додаток А – Технічне завдання

Додаток Б – Verilog-реалізація пристрою підрахунку імпульсів

Додаток В – LabVIEW-код програмного забезпечення

Додаток Г – Про участь у конференції молодих вчених "Електроніка-2019"

Додаток Д - Акт впровадження результатів проектування

Додаток Е - Система візуалізації гамма-випромінювання. Специфікація

Додаток Є - Блок приймання та передачі лічильної інформації.
Специфікація

Додаток Ж - Блок приймання та передачі лічильної інформації. Перелік елементів

Додаток З - Блок реєстрації сцинтиляцій. Специфікація

Додаток И - Блок реєстрації сцинтиляцій. Перелік елементів

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2

Список прийнятих скорочень

ПЧД	Позиційно-чутливий детектор
ФЕП	Фотоелектронний помножувач
ПЛІС	Програмована логічна інтегральна схема
ОП	Операційний підсилювач
LLD	Low-level discriminator
ІС	Інтегральна схема
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
САПР	Система автоматичного проектування
ДВ	Друкований вузол
ПЗ	Програмне забезпечення

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		3

Вступ

З моменту відкриття рентгенівське і гамма-випромінювання знайшли широке застосування в науці, техніці, промисловості та медицині. Значне число практичних застосувань цих випромінювань пов'язане з їх проникаючою здатністю, тобто зі здатністю проходити через щільну речовину, не вступаючи з ним у взаємодію. Ця властивість дозволила застосувати гамма-випромінювання для спостереження внутрішньої структури оптично непрозорих об'єктів і процесів, що відбуваються в них.

Успішне застосування нових методів досліджень та діагностики стає можливим тільки з розвитком існуючих та розробкою нових методів візуалізації гамма і рентгенівського випромінювання. Візуалізація включає в себе детектування та комп'ютерну обробку лічильної і спектральної інформації про випромінювання з метою отримання його оптичного уявлення, а також вивчення структури джерела випромінювання.

Розвиток ядерних технологій, різного роду радіаційні аварії, некоректне поводження з джерелами випромінювання, випробовування та використання ядерної зброї та епізоди радіаційного тероризму призводять до збільшення кількості та поширення джерел іонізуючих випромінювань, через що спостерігається загострення проблеми контролю та моніторингу радіоактивних матеріалів, виявлення їх несанкціонованого перевезення або зберігання. Тому завдання візуалізації поля гамма-випромінювання виникає також і для проведення дистанційної локалізації радіоактивних матеріалів.

Системи візуалізації гамма-випромінювання, так звані гамма-телескопи та гамма-мікроскопи є представниками найвищого рівня апаратури радіаційного контролю через можливість надання найбільш комплексної інформації про інтенсивність та спектральний характер гамма-поля.

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
						4
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Як буде детальніше розглянуто у наступному розділі, існуючі розробки у сфері візуалізації гамма-випромінювання являють собою експериментальні прилади, розроблені у наукових та освітніх інститутах або частини складних вимірювальних комплексів, таких як космічні апарати, ядерно-фізичні установки, тощо.

Та невелика кількість систем, придатних до польового використання незалежно від інших приладів є зазвичай складним, масивним та коштовним (від 200 тис. дол. США) обладнанням.

Ця ніша може бути заповнена створенням легкого, відносно дешевого апаратно-програмного комплексу, який орієнтовано на польове використання.

Для вирішення такої задачі у проекті розглянуто існуючі методи отримання зображення гамма-поля та за вимогою найменшої ваги та максимальної ефективності обрано метод кодованої апертури.

У якості принципу реєстрації гамма-квантів обрано сцинтиляційні детектори, так як вони надають найбільшу чутливість із можливістю отримання інформації про енергетичний спектр випромінювання.

Для реалізації збирання інформації та пристрою зв'язку з об'єктом використовується мікросхема програмованої логіки, так як за допомогою неї можна реалізувати отримання даних з найменшим мертвим часом.

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
						5
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

1. Аналіз технічного завдання та огляд існуючих рішень

У цьому розділі буде проведений огляд існуючих методологічних підходів до візуалізації гамма-випромінювання, чутливих елементів реєстрації гамма-квантів та конструкційних рішень задачі отримання та обробки даних. Із розглянутих методів та рішень будуть обрані такі, що найкраще задовольняють вимогам, що викладені у технічному завданні.

1.1. Вибір методу візуалізації гамма-випромінювання.

Прийняття одного з існуючих методів визначатиме загальну конструкцію системи, її характеристики та вимоги до усіх її вузлів. Зокрема, цей вибір визначатиме роздільну здатність, кут зору, кількість осей у отриманій візуалізації, вагу та чутливість.

Як вже було викладено у роботах [1][2][3], реалізації методів візуалізації гамма-випромінювання поділяють на три групи:

- Системи із колімованими детекторами.
- Системи із кодовою апертурою.
- Системи з обертальною модуляцією.

Розглянемо кожний з цих методів, визначимо їх переваги та недоліки.

- Системи із колімованими детекторами.

Цей та наступний методи базуються на двох функціональних вузлах:

1. Позиційно-чутливий детектор (ПЧД).

ПЧД являє собою одно- або багато-вимірний масив чутливих до гамма-випромінювання елементів (детекторів). ПЧД мають деяку просторову розрядність показів, через скінченну кількість детекторів у масиві. Також існують так звані неперервні ПЧД, що не мають розділення на окремі детектори та потенційно нескінченну розрядність просторових показів.

2. Екран (маска).

Маска являє собою достатньо непрозорий для гамма-випромінювання у специфікованому діапазоні енергій екран.

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Система із колімованими детекторами складається із ПЧД, на який відкидається тінь від екрану.

Екран у такій системі являє собою лист непрозорого для гамма-випромінювання матеріалу, у якому створюється невеликий отвір. За функціональною схемою така система еквівалентна камері-обскури – для отримання картини гамма-поля потрібно знайти світло (випромінювання) у показах детекторів ПЧД.

Так як екран пропускає через себе лише малу частину випромінювання, задача отримання чутливості та часу вимірювання, що зазначені у технічному завданні, стає нетривіальною.

Для вирішення цієї проблеми використовують екрани-коліматори, що являють собою структуру із багатьох паралельних трубок – вони пропускають через себе більше випромінювання. Такі системи (також називаються камери Ангера) використовуються у медицині для реалізації радіаційних методів обстежень. Різні варіанти коліматорів наведені на рисунку 1.1.1 [4].

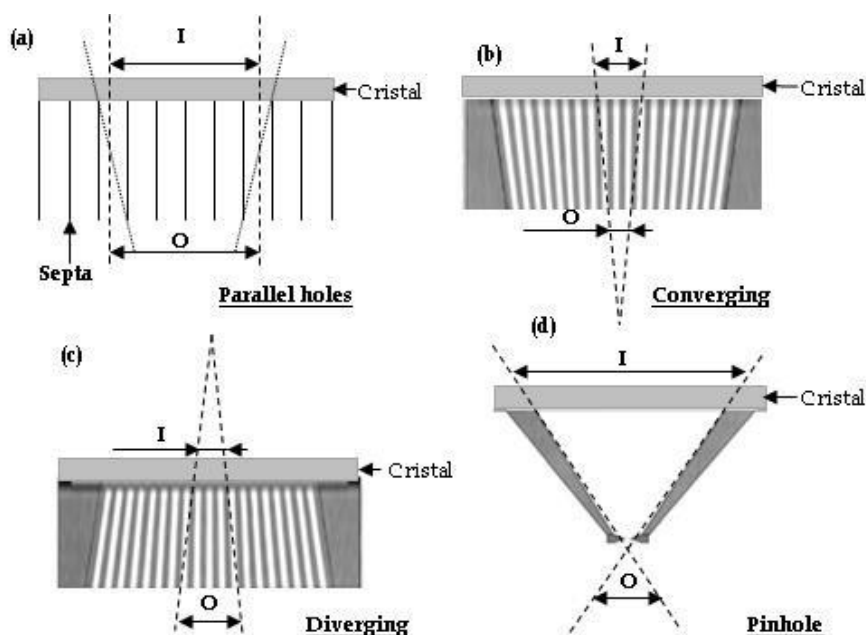


Рисунок 1.1.1 – Різні конфігурації коліматорів

Таке рішення хоча і вирішує проблему низької корисної прозорості екрану, але також приводить до іншої проблеми – прозорості екрану для більших енергій випромінювання, як такі, що зазначені у технічному завданні.

Тонкі структури екрану можуть бути непрозорі для більших енергій, але тоді вони потребують використання дорогих та складних у використанні надщільних матеріалів, що також не відповідає технічному завданню.

Однак, варто відмітити, що даний метод відповідає вимогам по роздільній здатності та полю зору системи – вони вільно конфігуруються геометричними параметрами екрану та ПЧД, і можуть навіть бути змінними у готовій системі.

Прикладом системи, що побудована з використанням коліматору є камера під назвою MGRC, побудована у університеті Лестеру. [5]

- Системи із кодовою апертурою.

Системи з кодовою апертурою являють собою модифікований варіант систем із колімованими детекторами. Замість малого отвору у екрані створюється декілька отворів за деяким детермінованим рисунком. Схема такої системи наведена на рисунку 1.1.2.

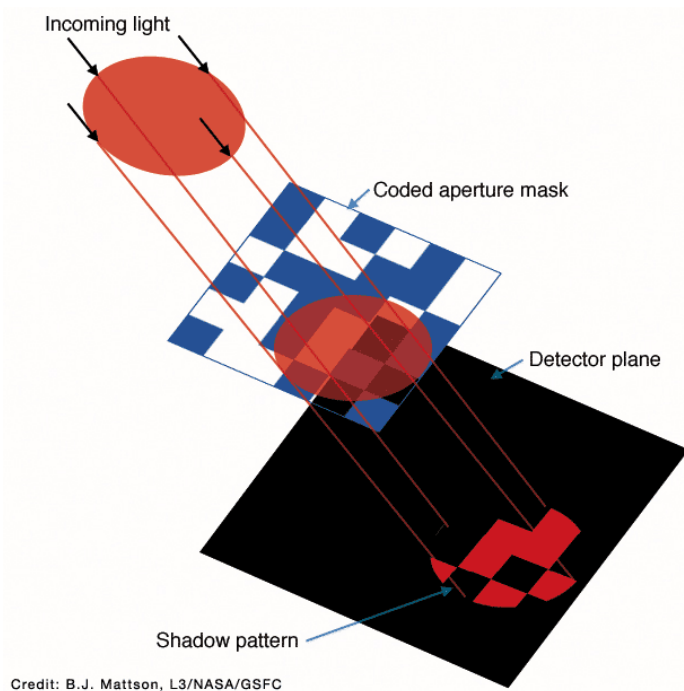


Рисунок 1.1.2 – Схема системи з кодовою апертурою

Таким чином, зберігається корисна непрозорість екрану для гамма-променів специфікованого технічним завданням діапазону та вирішується проблема малої корисної прозорості екрану – на детектори потрапляє більше випромінювання.

Процес проходження випромінювання через маску називається кодуванням [6].

У такій системі процес отримання картини поля є пошуком рисунку маски у показах детекторів ПЧД, що опромінений кодованим випромінюванням. Такий пошук виконується автоматично, за допомогою кореляційної машини.

Визначальним для системи з кодовою апертурою є рисунок маски. Маски зазвичай складають із елементів правильної форми, що є прозорими або непрозорими для випромінювання. В залежності від розмірності маски (кількості одиничних елементів) використовують різні рисунки маски [7]: зонні пластинки Френеля, оптимізовані випадкові рисунки, рівномірно надлишкові масиви, модифіковані рівномірно-надлишкові масиви, шестикутні рівномірно-надлишкові масиви, масиви типу «Левін» [8].

З усього розмаїття рисунків масок виділяється рівномірно-надлишковий масив. Він складається за формулою (1.1.1) [8]:

$$A_i = \begin{cases} 1, \text{ якщо } i = 0 \\ 1, \text{ якщо } i = \text{квадратичний лишок } L, i \neq 0 \\ 0, \text{ інакше} \end{cases} \quad (1.1.1)$$

Де:

$$L = 4m + 3, m = 1, 2, 3 \dots \quad (1.1.2)$$

Рівномірно-надлишкові масиви мають декілька корисних властивостей:

1. Автокореляційна функція від такого масиву має вигляд, близький до дельта-функції [6]. Це означає, що результат кореляційної операції між показами ПЧД та рисунком маски за таким масивом завжди буде однозначним.

2. Рівномірно-надлишковий масив може бути практично повністю обернений у свою інверсну форму (таку, де відкриті комірки стають закритими, та навпаки) за допомогою обертання масиву вздовж його центральної точки (для випадку одномірного масиву). Це явище нескладно спостерігати на прикладі такого масиву на рисунку 1.1.3:

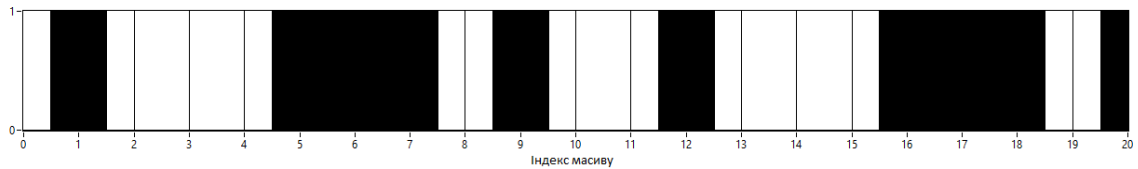


Рисунок 1.1.3 – Одномірний рівномірно-надлишковий масив, чорні елементи – закриті, білі - відкриті

Можливість простого перетворення масиву у інверсний є визначальною для використання методу маски-антимаски, що описаний у роботі [6].

Метод маски-антимаски є способом компенсації нерівномірності показів ПЧД та пригнічення спотворень, викликаних джерелами випромінювання, що не знаходяться у полі зору системи.

Розглянемо приклад роботи методу. Припустимо, система із кодовою апертурою із ПЧД з трьома детекторами спостерігає за джерелом випромінювання у полі зору (рисунок 1.1.4):



Рисунок 1.1.4 – Система с кодовою апертурою та джерело

Детектори у ПЧД, що знаходяться за закритими комірками маски, вимірюють 2 умовних одиниці потужності дози, за відкритою – 10.

Введемо у картину деяке джерело, що знаходиться за полем зору, в результаті чого покази детекторів значно спотворяться (рисунок 1.1.5):



Рисунок 1.1.5 – Система с кодованою апертурою та джерела

Тепер виконаємо вимір у такій же ситуації, але із маскою, що є оберненою версією оригіналу (рисунок 1.1.6):

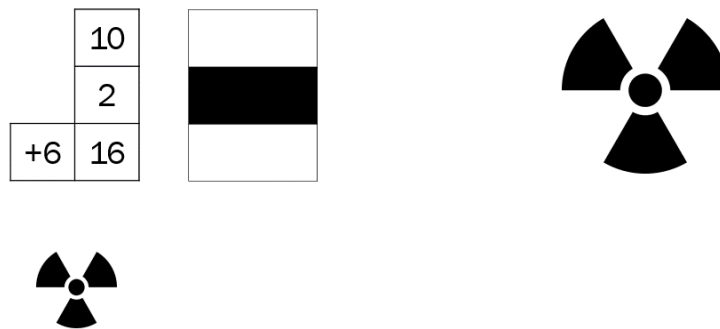


Рисунок 1.1.6 – Система с кодованою апертурою, антимакою та джерела

Після проведення обох вимірів виконаємо по-елементне віднімання показів одного виміру від іншого (рисунок 1.1.7):

$$\begin{array}{|c|} \hline 2 \\ \hline 10 \\ \hline 8 \\ \hline \end{array}
 -
 \begin{array}{|c|} \hline 10 \\ \hline 2 \\ \hline 16 \\ \hline \end{array}
 =
 \begin{array}{|c|} \hline -8 \\ \hline 8 \\ \hline -8 \\ \hline \end{array}$$

Рисунок 1.1.7 – Віднімання показів

Як можна побачити з рисунку, було отримано результат, у якому повністю скомпенсовано спотворення, викликане джерелом поза полем зору. Цей метод також ефективно пригнічує спотворення, викликані нерівномірністю показів ПЧД, оброблюючої електроніки, тощо.

Цей метод можна використати для покращення відношення сигнал/шум та збільшення чутливості, що спрощує виконання вимог технічного завдання.

Система із кодовою апертурою зберігає властивості щодо вільної конфігурації поля зору та роздільної здатності. Як вже було зазначено, така система і без нетривіальних рішень відповідає вимогам технічного завдання за чутливістю та енергетичним діапазоном.

Прикладом системи, що побудована за принципом кодової апертури є камера іPIX, розроблена у CERN. [9]

- Системи із обертальною модуляцією

Реалізації усіх вищезазначених методів мають ряд технологічних недоліків, а саме – складність конструкції ПЧД, що у тривіальному виконанні являє собою масив детекторів, у нетривіальному – складний детектор із неперервною просторовою чутливістю (неперервний ПЧД).

Ця технологічна складність проявляється у необхідності збирання великої кількості чутливих елементів, забезпечення їх світло-, магніто-, завадо- та влаго-захисності, створення для кожного окремого каналу обробки даних та живлення.

Технічне завдання накладає обмеження на складність конструкції, тому має сенс розглянути методи, що не використовують ПЧД.

Один з таких методів використовується у системах із обертальною модуляцією.

Система, створена за таким методом, являє собою один чутливий елемент та набір екрануючих ґраток, що обертаються. (рисунок 1.1.8). Система знімає залежність рівня опромінення детектора від кута повороту ґраток та відновлює з цих даних зображення.

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Основною перевагою даного методу є можливість використання лише одного детектора, що значно спрощує складання цієї частини системи.

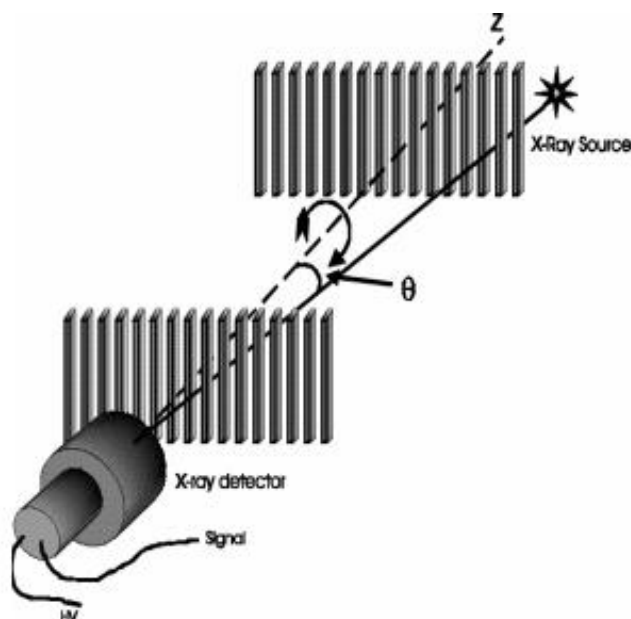


Рисунок 1.1.8 – Система із обертальною модуляцією

Однак додаткова складність, що викликана необхідністю мати масивні обертальні ґратки, відповідні обертальні кріплення, привід до них, датчики кута повороту, відповідний електронний блок для коректної зйомки даних та нетривіальні алгоритми відновлення зображення нівелюють це спрощення.

Прикладом системи, що використовує принцип обертальної модуляції є космічний апарат RHESSI, побудований NASA. [10]

Загалом, цей метод можна визнати таким, що не відповідає технічному завданню.

Із наведеного огляду можна зробити висновок, що для виконання технічного завдання найкраще підходить метод одновимірної кодуваної апертури із вертикальним рисунком маски за рівномірно-надлишковим масивом та ПЧД на основі одновимірного масиву детекторів.

1.2. Вибір методу реєстрації гамма-квантів

Вибір методу реєстрації гамма-квантів (конструкції детектора) визначає досягнення таких характеристик з технічного завдання, як чутливість, час вимірювання, вага, діапазон енергій та максимальну завантаженість.

Як розглянуто у роботах [14][15], у сучасній індустрії представлено декілька методів реєстрації гамма-квантів. Серед них:

- Пропорційні камери
- Лічильники Гейгера-Мюллера
- Сцинтиляційні детектори
 - На основі фотоелектронних помножувачів (ФЕП)
 - На основі твердотільних лічильників фотонів
 - На основі фотодіодів
- Напівпровідникові детектори

Основною характеристикою детектора у даному використанні є чутливість та діапазон енергій. Чутливість вимірюється у імп./с.мкЗв/год. та визначає кількість імпульсів (та статистичних подій), що генерує детектор, що опромінено.

Пропорційні камери та лічильники Гейгера-Мюллера конструктивно є порожніми камерами, заповненими газом, у яких виникають іонізаційні явища при потраплянні у них гамма-кванта. В залежності від розміру та особливостей конструкції вони мають чутливість біля 2-20 імп./с.мкЗв/год. [15]

Детектори на основі сцинтиляторів мають принципово інакшу конструкцію. Такі детектори складаються із кристалу сцинтилятору та світлочутливого елементу – ФЕП, твердотільного лічильника фотонів або фотодіоду.

Їх принцип роботи оснований на появі спалахів світла (сцинтиляцій) при взаємодії гамма-кванта та кристала сцинтилятору. Ці спалахи світла перетворюються на електричний сигнал світлочутливим елементом. Завдяки тому, що яскравість сцинтиляції залежить від енергії частки, що мала взаємодію із сцинтилятором, сигнал від світлочутливого елемента несе не лише інформацію про факт взаємодії, а ще й про енергію частки.

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Завдяки набагато більшій щільності кристалу сцинтилятора відносно лічильників Гейгера-Мюллера та пропорційних камер, чутливість таких детекторів мінімум на два порядки більша – набагато більша вірогідність взаємодії гамма-кванта та кристалу.

Чутливість сцинтиляційних детекторів залежить від розміру та матеріалу сцинтилятора та складає від сотень до сотень тисяч імп./с.мкЗв/год.

Напівпровідникові детектори ґрунтовані на ефекті генерації носіїв у напівпровідниковому матеріалі під час його взаємодії із гамма-квантом.

Хоча сигнал з таких детекторів і несе інформацію про енергію гамма-кванту з більшою роздільною здатністю аніж у сцинтиляційних датчиків, ці детектори потребують нетривіальної апаратури для знімання сигналів, а також охолодження до криогенних температур для зменшення шумів.

Загалом, вимогам технічного завдання із чутливості, спрощення та зменшення масо-габаритних характеристик найкраще відповідають детектори на основі сцинтиляторів.

Світлочутливий елемент є визначальним для електричних та експлуатаційних характеристик сцинтиляційного детектору. Проведемо огляд згаданих вище методів реєстрації сцинтиляцій – ФЕП, твердотільних лічильників фотонів та фотодіодів.

ФЕП є історично найпоширенішим методом реєстрації сцинтиляцій через те, що вони мають високу чутливість, значне підсилення-перетворення сигналу при малих шумах, їх чутливість легко регулювати, а сигнал з виходу ФЕП не потребує складної або чутливої електроніки для отримання та перетворення. Недоліком ФЕП є велика напруга живлення – від 500В до 2000В, а також значні габарити самих ФЕП.

Твердотільні лічильники фотонів – відносно нова технологія реєстрації сцинтиляцій (окрім інших їх використань). Ці лічильники являють собою інтегральну структуру з декілька тисячами фотодіодів на одному кристалі. Загалом, твердотільні лічильники фотонів мають такі ж переваги, що і ФЕП, без потреби у високовольтному живленні.

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
						15
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Сигнал с цих лічильників отримується такою ж електронікою, що і із ФЕП, тому їх часто називають «твердотільними ФЕП».

Для реєстрації сцинтиляцій також використовують фотодіоди, у своєму звичайному включенні. Особливістю використання фотодіодів із сцинтиляторами є потреба у складній електроніці – високочутливих зарядочутливих підсилювачів, так як спалах світла у сцинтиляторі дуже слабкий.

Загалом, вимогам технічного завдання краще за все відповідають твердотільні лічильники фотонів. Але під час розробки конструкції потрібно зважати на можливість її покращення та модернізації. Найбільш очевидний шлях таких змін – реалізація можливості отримання спектральних даних, що описано у роботі [6]. Під час роботи у спектральному режимі дуже важливою є характеристика якості світлозбирання у детекторі. Ця характеристика визначається геометрією кристалу та світлочутливого елемента. Треба відмітити, що типовий розмір чутливого вікна твердотільного лічильника фотонів – до 8*8 мм, а більші площі забезпечуються дорогими масивами лічильників. В той же час, ФЕП представлені у широких діапазонах площин чутливих вікон та можуть забезпечити світлозбирання з будь-якого кристалу.

Так як електроніка для збирання сигналів із детекторів практично не відрізняється для ФЕП та твердотільних лічильників, та перехід з одного елемента на інший може бути легко виконаний, у розробку береться сцинтиляційний детектор на основі компактних ФЕП та кристалів NaI (Tl).

Саме ці кристали обрані через те, що у технічному завданні не ставиться ніяких вимог про властивості детекторів у роботі у спектральному режимі, на яких більше всього впливає вибір кристалу, а NaI (Tl) є найпоширенішим матеріалом для вироблення таких кристалів.

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

1.3. Вибір методу отримання та обробки даних

Отримання даних з ПЧД зводиться до підрахунку кількості імпульсів з кожного з детекторів та передачі цієї інформації на персональний комп'ютер (реалізацію пристрою зв'язку із об'єктом).

Сучасна елемента база пропонує такі варіанти вирішення цієї задачі:

- Побудова системи на основі мікроконтролера
- Побудова системи на основі програмованої логічної інтегральної схеми (ПЛІС)
- Побудова системи на основі дискретних компонентів

Розглянемо кожне з цих рішень та оберемо таке, що найкраще підходить для вирішення технічного завдання, а саме – забезпечення максимальної можливої статистичної завантаженості (мінімізації мертвого часу).

Системи на основі мікроконтролерів здатні підраховувати імпульси за допомогою використання системи переривань або вбудованих лічильників, із наступним збереженням та передачею даних відповідно до програми, що виконує ядро. Хоча і використання мікроконтролерів спрощує розробку – вони мають готові ядра, систему переривань, лічильники та блоки передачі даних за різними інтерфейсами, мертвий час, що вноситься часом реакції ядра на переривання може створювати обмеження максимальної статистичної завантаженості.

Системи на основі ПЛІС являють собою цифрові схеми, що реалізуються за допомогою конфігурування інтегральної схеми, що складається з деякої кількості комірок-реалізацій таблиць істинності та регістрів. У таких системах рахування імпульсів з кожного детектору може виконуватись незалежно одне від одного, без внесення додаткового мертвого часу. Розробка такої системи може бути ускладнена необхідністю створення реалізації інтерфейсів комунікації, але ця складність нівелюється наявністю відкритих реалізацій таких блоків.

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		17

Реалізація системи на основі дискретних компонентів буде більшою частиною еквівалентною до системи на ПЛІС, без, власне, ПЛІС, що призведе до ускладнення конструкції. Єдиною перевагою такої системи може бути дешевизна, але із появою дешевих ПЛІС, що будуть розглянуті у розділі обґрунтування вибору елементної бази, ця перевага більше такою не є.

Висновки за розділом:

Проведено аналіз технічного завдання та огляд існуючих рішень основних задач, що в нього входять – загального методу візуалізації гамма-випромінювання, методу реєстрації гамма-квантів та отримання-передачі лічильної інформації. Прийнято до розробки систему, основу на методі кодованої апертури із рисунком маски типу рівномірно-надлишкового масиву, реєстрацією гамма-квантів сцинтиляційними детекторами та отриманням лічильної інформації за допомогою ПЛІС.

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		18

2. Розробка електричної схеми системи

В цьому розділі буде проведена розробка схемотехнічних рішень для забезпечення функціонування системи.

2.1. Принцип роботи та функціональна схема

Виходячи з оглядів та розробок, що були наведені у попередньому розділі, можна описати загальний принцип роботи та скласти функціональну схему системи:

1. Випромінювання від джерела потрапляє на екран-маску, де відбувається його кодування.
2. Кодоване випромінювання потрапляє на масив сцинтиляційних детекторів. Взаємодія гамма-квантів випромінювання із матеріалом сцинтилятора призводить до появи у ньому спалахів світла.
3. Спалахи світла реєструються фотоелектронним помножувачем, що живиться від високовольтного блоку живлення. ФЕП перетворює світловий потік від спалаху на струмовий електричний сигнал.
4. Електричний сигнал потрапляє на електронний блок приймання та передачі лічильної інформації на основі ПЛІС.
5. Комунікаційна лінія ПЛІС, а також сигнал з відеокамери, змонтованої на пристрої, потрапляють на концентратор та передаються на персональний комп'ютер.
6. Програмне забезпечення на персональному комп'ютері виконує обробку даних, візуалізацію гамма-випромінювання та накладення отриманої інформацію на зображення з відеокамери.

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Функціональна схема, що відповідає даному опису, представлена на рисунку 2.1.1:

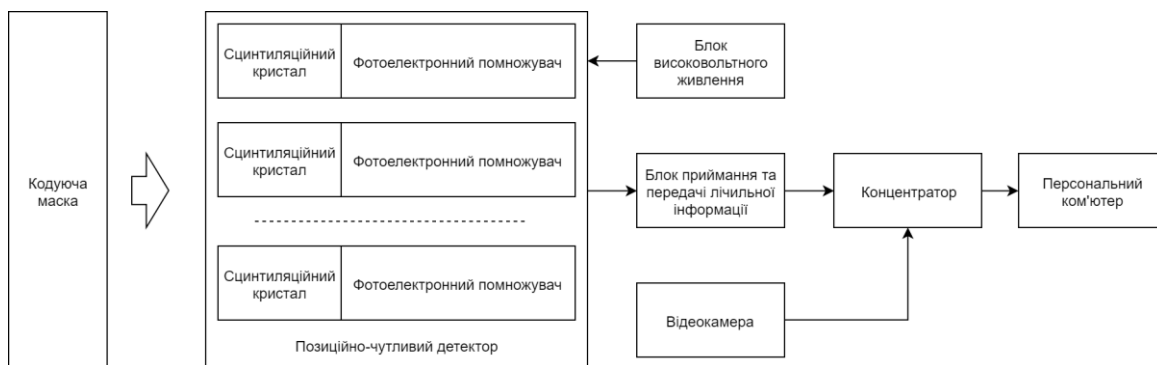


Рисунок 2.1.1 – Функціональна схема системи

Таким чином, необхідна розробка лише блоку приймання-передачі лічильної інформації, так як усі інші компоненти є доступними для придбання. Далі буде описано розробку схеми електричної принципової цього блоку.

2.2. Вхідний підсилювач та дискримінатор нижнього рівню

Для отримання інформації про потрапляння на детектори кодованого випромінювання необхідно зняти з анодів ФЕП сигнал – імпульси струму. Реалізацію типового рішення цієї задачі розглянуто у роботі [13]. Воно являє собою трансімпедансний підсилювач, що працює у режимі, комбінованим із зарядочутливим підсилювачем. (рисунок 2.3)

Трансімпедансний підсилювач в такому застосуванні складається із ОП, якому у коло зворотного зв'язку включено резистор та конденсатор.

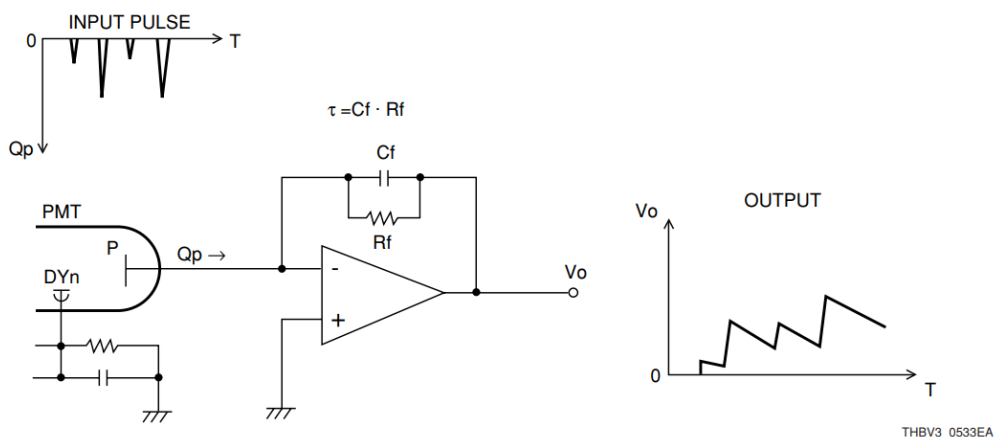


Рисунок 2.2.1 – Трансімпедансний підсилювач

					ДК51.4 11711.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

За постійним струмом ця схема працює як перетворювач струм-напруга, а при подачі коротких імпульсів, як такі, що надходять з ФЕП, як зарядочутливий підсилювач – імпульс струму заряджає конденсатор, що відносно повільно розряджається у резистор. ОП повторює (підсилює) процес розряду, в результаті чого на виході з’являється імпульс напруги.

Для вибору резистора та конденсатора у зворотному зв’язку підсилювача, звернемося до роботи [13], довідника з застосування ФЕП від Hamamatsu [14] та роботи з проектування підсилювачів для фотодіодів [15]. Резистор та конденсатор у даному застосуванні визначають постійну часу розряду зарядочутливої ланки.

У роботі [14] з цього приводу відзначено: «In most cases, the condition of $\tau \gg \tau_s$ is used since higher energy resolution can be expected.» Під τ_s у цій цитаті мається на увазі постійна часу висвічування кристалу сцинтилятора. Ця константа для найбільш поширеного сцинтилятора NaI (Tl), який буде використаний у системі, дорівнює 250 нс.

У роботі [14] зазначено, що такий підсилювач має нуль на частоті $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$. Це означає, що можна використовувати вхідний каскад також для фільтрації завад, що можуть наводитись на кабелі та конструкції детектора.

Виберемо такі резистор та конденсатор, щоб задовольнити рекомендаціям обох джерел: 360 кОм, 100 пФ. Розрахуємо постійну часу за формулою, наведену у роботі [14] та частоту, на якій спостерігається точка нуля:

$$\tau = RC = 360 \text{ кОм} \times 100 \text{ пФ} = 36 \text{ мкс} \gg 250 \text{ нс} \quad (2.1.1)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2 \times 3,14 \times 360 \text{ кОм} \times 100 \text{ пФ}} \approx 4,42 \text{ кГц} \quad (2.1.2)$$

Дана частота значно менше будь-яких радіочастотних завад та частот роботи імпульсних перетворювачів.

Можна зробити висновок, що цю постійну часу можна вважати прийнятною.

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Для реєстрації імпульсів (роботи в лічильному режимі) до виходу вхідного підсилювача під'єднують так званий дискримінатор нижнього рівня (low level discriminator – LLD) [13][14]. LLD вводиться для того, щоб відсіяти шуми, що генеруються вхідним підсилювачем, самим ФЕП, потраплянням світла у детектор, а також для регулювання мінімальної енергії кванту, що реєструється, та впливу на чутливість.

LLD складається із компаратора із введенням гістерезисом. Типова схема LLD наведена на рисунку 2.2.2:

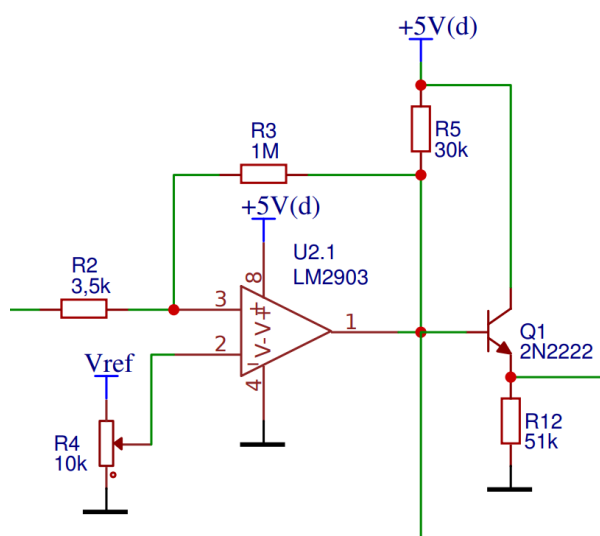


Рисунок 2.2.2 – Дискримінатор нижнього рівня

З даної схеми варто запозичити лише власне компаратор, схему налаштування рівня дискримінації та схему введення гістерезису.

Підтягуючий резистор та транзистор на виході не потрібний, так як сигнал з виходу LLD буде подаватися на ПЛІС, що має вбудовані підтягуючі резистори.

Для коректної роботи значення гістерезису повинно бути більшим за половину очікуваного рівня шумів. Прийнемо реалістичний випадок – амплітуда шумів дорівнюватиме 25% мінімального корисного сигналу.

Прийmemo, що підсилення ФЕП буде налаштовано таким чином, щоб використовувати увесь динамічний діапазон вхідного підсилювача, а також лінійність системи за ходом жорсткості випромінювання. Тобто, частка енергією 3 MeV (максимально специфікована енергія) відповідатиме 4.5 В напруги на підсилювачі, а сигнал від частки енергії 50 keV (мінімально специфікована енергія) відповідатиме 75 мВ. Тоді рівень шуму дорівнює 18,75 мВ.

Запропонуємо резистори для створення ланки гістерезису (у позначеннях схеми на рисунку 2.2.2) – R3 = 1 МОм та R2 = 3,6 кОм. R1 значно більший за R2, тоді гістерезис дорівнює:

$$h = \frac{V_{cc} \times R2}{R3} = \frac{3,3\text{В} \times 3,6 \text{кОм}}{1 \text{МОм}} \approx 12 \text{ мВ} \quad (2.1.3)$$

V_{cc} = 3,3 В, так як напруга логічної одиниці на виході компаратора визначається напругою підтягуючих резисторів ПЛІС, а не напругою живлення. Отриманий рівень більший за половину рівня шуму, тому такі значення резисторів вважаємо прийнятними.

Так як LLD зазвичай налаштовується на рівень, трохи більший за рівень шумів, можна обмежити діапазон регулювання включенням послідовно до змінного ще один, постійний резистор та використати однооборотні змінні резистори.

У системі наявно 11 детекторів, тому в схемі необхідно передбачити мінімум стільки же вхідних підсилювачів. ІС (інтегральні схеми) ОП (операційних підсилювачів) та компараторів поставляються, серед інших варіантів, по 4 в корпусі, тому має сенс передбачити 12 підсилювачів.

Типова схема вхідного підсилювача та LLD наведена на рисунку 2.2.3:

						<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			23

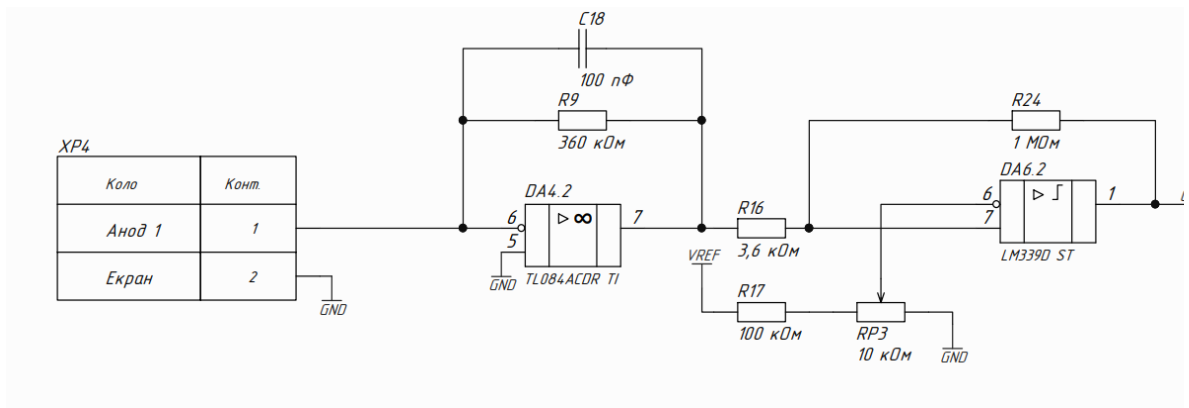


Рисунок 2.2.3 – Типова схема вхідного підсилювача та LLD

Для перевірки працездатності такої схеми виконаємо її моделювання у середовищі LTSpice. Для цього складемо її у середовищі, створимо аналог ФЕП за допомогою джерела струму, аналог вхідного каскаду ПЛІС – за допомогою джерела напруги, та змінного резистора – за допомогою дільника. Складена у середовищі схема, а також директиви симулятора наведені на рисунку 2.2.4.

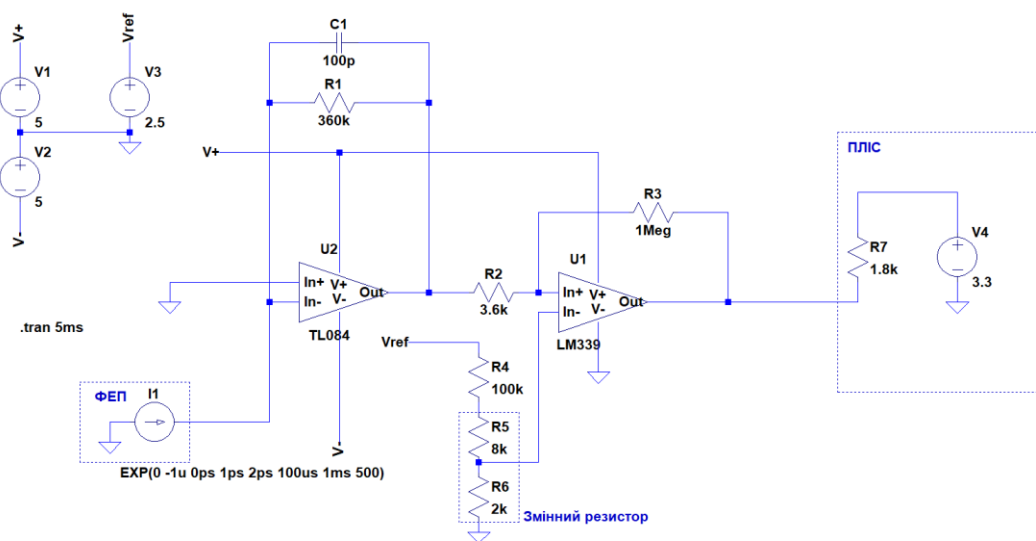


Рисунок 2.2.4 – Схема вхідного підсилювача та LLD у середовищі LTSpice

Вибір використаних підсилювачів буде обґрунтований у наступному розділі.

Задамо спостерігання у таких точках: вихідний струм ФАП, вихід вхідного підсилювача та вихід LLD. Отримали наступні результати симуляції (рисунок 2.2.5):

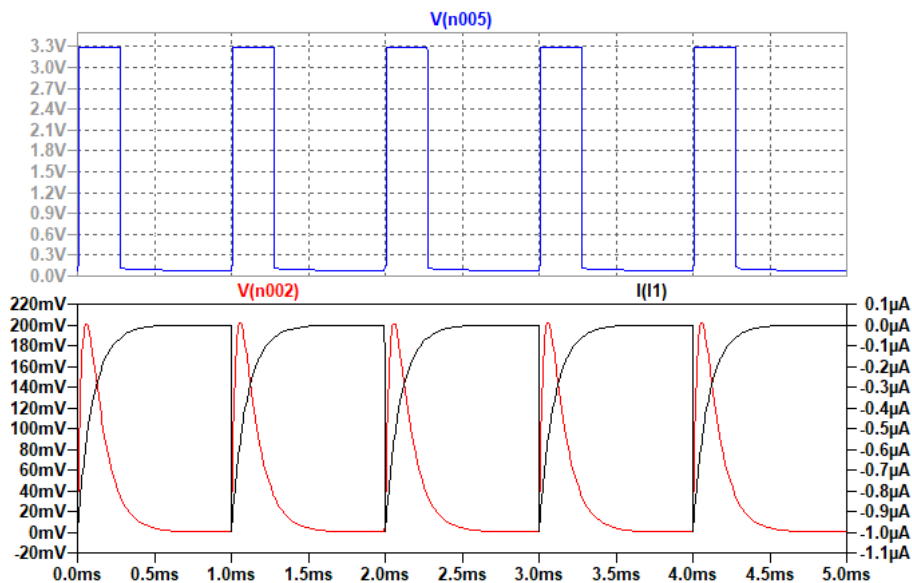


Рисунок 2.2.5 – Результати симуляції

З результатів симуляції можна зробити висновок про працездатність схеми: вхідні імпульси струму перетворюються на напругу, а на виході LLD з'являються логічні імпульси, що відповідають вхідним.

2.3. Пристрій рахування імпульсів

Як було розглянуто у попередньому розділі, отримання та передача на персональний комп'ютер лічильної інформації з детекторів будуть реалізовані за допомогою мікросхеми програмованої логіки – ПЛІС ICE5LP2K. Вибір саме цієї мікросхеми буде обґрунтований у наступному розділі.

Для роботи ПЛІС необхідно забезпечити усі необхідні їй напруги живлення, а також передбачити інтерфейс програмування та мікросхему енергонезалежної пам'яті, так як ці ІС потребують повторне програмування при кожному циклі живлення.

Також необхідно передбачити реалізацію «пристрою зв'язку з об'єктом» - засіб для передачі даних з ПЛІС на персональний комп'ютер.

Забезпечення живлення буде розглянуто у наступній частині цього розділу. Розглянемо інтерфейс для програмування ПЛІС, що приведений у типовій схемі підключення від виробника [16].

На типовій схемі ПЛІС програмується по SPI-інтерфейсу, до якого паралельно під'єднується програматор та мікросхема енергонезалежної пам'яті. Вибір того, який пристрій програмується, та звідки ПЛІС має очікувати конфігурацію виконується лініями вибору (chip select). Найпростішим варіантом буде повторення такого рішення у цій системі.

Для реалізації пристрою зв'язку з об'єктом використаємо мікросхему, що реалізує послідовний порт UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) по USB-шині. Найбільш поширеною мікросхемою, що має такий функціонал є CP2102 від Silicon Labs. Входи-виходи UART-інтерфейсу мікросхеми під'єднаємо до довільних виводів ПЛІС.

Робота системи такої складності потребує джерело тактів, а так як для передачі даних використовується UART, то джерело має бути стабільним. ІС даного сімейства не мають вбудованого підсилювача для під'єднання до нього кварцового резонатора, тому необхідно використовувати гібридну мікросхему-кварцовий генератор.

2.4. Система живлення

Компоненти, означені у попередніх розділах, потребують декілька різних напруг живлення:

- Високовольтне живлення ФЕП
- Лінія +5В для живлення вхідних підсилювачів та компараторів
- Лінія -5В для живлення вхідних підсилювачів
- Лінія +3,3В для живлення ПЛІС, пам'яті зберігання конфігурації, тактового генератора та UART-моста
- Лінія +2,5В для живлення ПЛІС
- Лінія +1,2В для живлення ПЛІС
- Опорна напруга для порогу спрацювання LLD

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Високовольтне живлення ФЕП виконує одночасно дві ролі – власне, живлення, а також – регулювання чутливості детектору. Регулювання чутливості необхідне для компенсації відмінності у чутливості кожного з детекторів ПЧД. Цю властивість можна легко побачити на характеристиці підсилення ФЕП (рисунок 2.4.1).

Figure 2: Typical gain

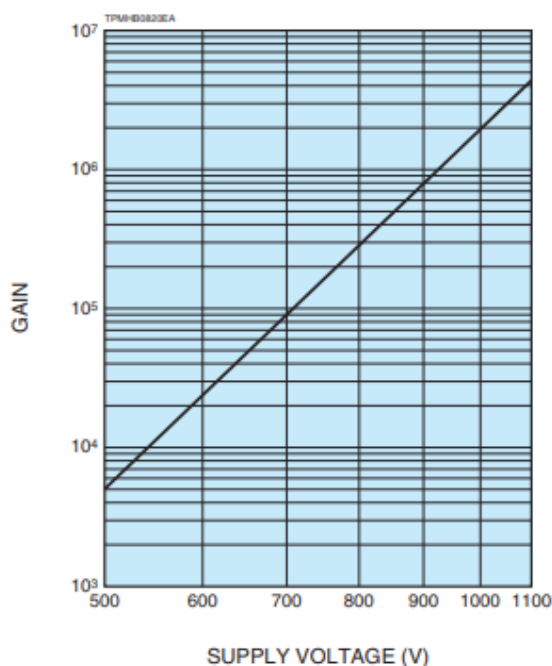


Рисунок 2.4.1 – Залежність підсилення ФЕП від напруги живлення

Живлення на ФЕП подається напряму на фотокатод та, за допомогою резистивного дільника, [14] на діноди. Дільник створює на дінодах градієнт напруг, що є необхідним для коректної роботи ФЕП.

Додаванням між дільником ФЕП та блоком живлення додаткового змінного резистора у реостатному включенні дозволить регулювати напругу на фотокатоді та дінодах, змінюючи підсилення ФЕП.

Також до схеми високовольтного живлення має сенс додати блокуючі конденсатори для мінімізації пульсацій високої напруги.

Лінія +5В формується із напруги, що подається із USB-роз'єму. На платі, що розробляється, необхідно передбачити лише блокувальні конденсатори, так як схеми захисту вже наявні на USB-концентраторі, до якого буде під'єднана плата.

Лінія -5В потрібна для живлення вхідних підсилювачів для спрощення їх конструкції та уникнення негативних ефектів при роботі на напругах виходу, що наближаються до однієї з напруг живлення (0 В).

Для створення -5В можна скористатися імпульсними перетворювачами, або так званими зарядними насосами. Зарядні насоси для формування 5В є мікросхемами, що в одній частині циклу роботи заряджають конденсатор від вхідної напруги, а на іншому – підключають заряджений конденсатор до виходу у зворотній полярності. (рисунок 2.4.2) Для малих струмів споживання ОП такі мікросхеми є кращім варіантом, так як вони створюють менше завад, адже вони не використовують індуктивні компоненти для роботи.

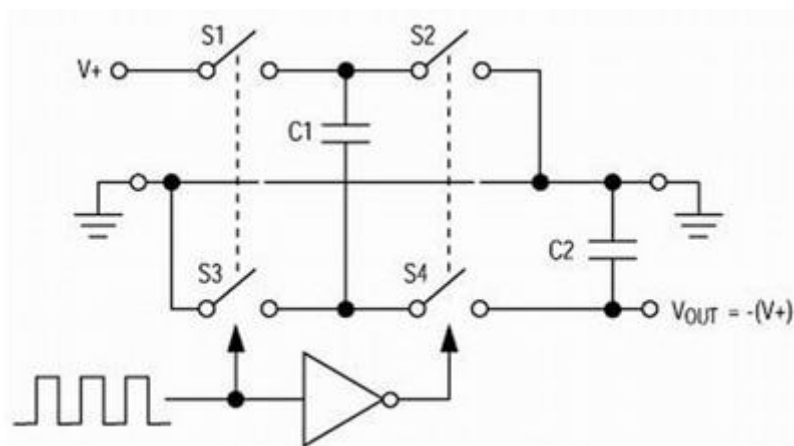


Рисунок 2.4.2 – Робота зарядного насоса

Типова схема підключення зарядного насосу приведена на рисунку 2.4.3:

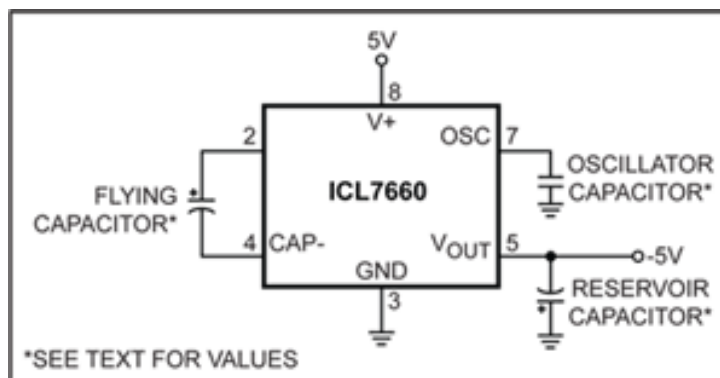


Рисунок 2.4.3 – Схема включення зарядного насоса

Лінії 3.3В, 2.5В та 1.2В формуються лінійними перетворювачами з 5В. Таке рішення прийнятне для малих струмів споживання ПЛІС та створює найменше завад.

Для формування опорної напруги LLD необхідно скористуватися однією із класичних схем стабілізатора, незалежного від температури, наприклад, стабілізатора на основі прецизійного регульованого стабілітрона TL431. Такий стабілізатор є звичайним стабілізатором на стабілітроні, але з більшою температурною стабільністю за рахунок використання TL431, що має додаткові активні каскади.

Використаємо типову схему формування опорної напруги в 2.5В (рисунок 2.4.4):

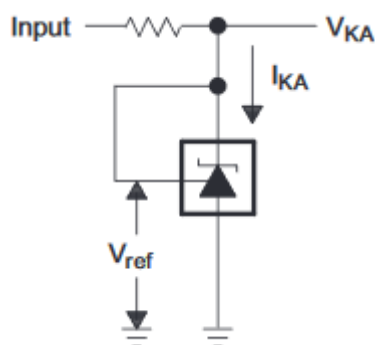


Рисунок 2.4.4 – Схема формування опорної напруги

Для таких схем струм через активний компонент повинен бути в декілька (3-10) разів більше за струм, що споживається навантаженням. Навантаженням для цієї схеми будуть 12 ланок по $10 + 100$ кОм, як можна бачити на рисунку 2.2.3. Тому струм навантаження:

$$I_{\text{н}} = \frac{2,5\text{В}}{110 \text{ кОм} / 12} \approx 0,27 \text{ мА} \quad (2.4.1)$$

Нехай струм стабілізації буде в 10 разів більше за струм навантаження, а схема буде живитися від 5В. Тоді номінал обмежувального резистору:

$$R = \frac{5\text{В} - 2,5\text{В}}{10 \times 0,27 \text{ мА}} \approx 926 \text{ Ом} \quad (2.4.2)$$

Обираємо найближчий в сторону зменшення резистор із стандартного ряду E24 – 910 Ом.

Розроблена схема електрична принципова наведена на кресленні ДК51.411711.001ЕЗ.

Висновки за розділом:

Проведено розробку функціональної схеми та загального принципу роботи. Розробили основні блоки електричної схеми системи та розрахували параметри використаних компонентів. Виконали симуляцію складніших блоків схеми, чим довели вірність прийнятих технічних рішень.

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

3. Вибір та обґрунтування елементної бази

У цьому розділі буде проведений вибір компонентів, що є визначальними для роботи та характеристик системи.

3.1. Позиційно-чутливий детектор

Як було описано у аналізі технічного завдання, значна частина характеристик детектору визначається вибором фотоелектронного помножувача.

Варіанти вибору ФЕП можна розділити на 3 категорії:

- ФЕП вітчизняного виробництва класичної конфігурації
- ФЕП зарубіжного виробництва класичної конфігурації
- Компактні ФЕП зарубіжного виробництва

У даному використанні основна частина параметрів ФЕП, такі як: рівень шумів, підсилення, лінійність, спектральна характеристика не мають суттєвого впливу на роботу системи, так як детектори на їх основі працюватимуть у лічильному режимі – ФЕП потрібно лише видати достатньо сильний сигнал для реєстрації факту взаємодії гамма-кванту з кристалом.

Виходячи з цього, можна зробити висновок, що ФЕП потрібно обирати за признаками доступності, конструктивного виконання та розмірів самого ФЕП та його чутливої області.

З розмаїття доступних помножувачів виділяється лінійка компактних ФЕП у металевих корпусах від Hamamatsu, наприклад – R9880U (рисунок 3.1.1). Вони являють собою циліндричні прилади в металевому корпусі з магнітним екраном, мають зовнішній діаметр в 16 мм та чутливу область діаметром 8 мм. Ці конструктивні параметри дозволяють монтувати їх у стандартну алюмінієву трубу 20x16 мм та з'єднувати їх із кристалами необхідного за розрахунками діаметру – 11 мм – без значних втрат якості світлозбирання.

					ДК51.4 11711.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31



Рисунок 3.1.1 – ФАП R9880U

3.2. Блок приймання-передачі лічильної інформації

Конструкція блоку приймання-передачі лічильної інформації включає в себе декілька визначальних для роботи системи компонентів – вхідний операційний підсилювач (ОП), ПЛІС та високовольтний блок живлення.

Вхідний підсилювач буде ввімкнений за схемою перетворення струм-напруга із значним опором зворотного зв'язку. Це може призвести до того, що на виході підсилювача в стані спокою з'явиться постійне зміщення нуля.

Виходячи з цього, основним критерієм при виборі вхідного ОП буде вхідний струм зміщення. Також вхідний підсилювач повинен мати достатню швидкість наростання вихідної напруги для реакції на швидкі фронти ФАП.

Зведемо у таблицю параметри деяких доступних на ринку ОП, що загалом відповідають поставленим вимогам (таблиця 3.2.1).

Таблиця 3.2.1 – Характеристики ОП

Модель	Струм зміщення, пА	Швидкість наростання, В/мкс	Струм живлення (на один підсилювач), мА	Рівень шумів, нВ/ $\sqrt{\Gamma\text{ц}}$
TL07x	65	13	1,4	18
TL08x	30	13	1,4	18
OPA2192	2	20	1	5,5

З даних, наведених у таблиці, можна зробити висновок, що ОРА2192 є таким, що найкраще задовольняє вимогам. Але також треба зазначити, що цей ОП є в декілька раз дорожчим за приведені аналоги та зазвичай недоступним для придбання у вітчизняних постачальників.

Так як струм зміщення у всіх наведених підсилювачів є досить малим та відповідає умовам його роботи, як буде показано у наступному розділі, можна обрати більш дешевий та доступний TL08х. Більш того, усі наведені ОП є взаємозамінними по розміщенню виводів та можуть бути змінені один на одній при змінах умов роботи.

У виборі ПЛІС для використання у даній системі необхідно врахувати наступні параметри та властивості: кількість елементарних комірок, корпус та рівень розвитку засобів розробки для їх сімейства.

За попередньою оцінкою, проект, що повинен буде реалізований у ПЛІС, не займатиме більше 2000 елементарних комірок, та буде тактуватися частотою, не більшою 25 МГц. Зведемо у таблицю представників ПЛІС такого класу від різних виробників (таблиця 3.2.2):

Табл. 3.2.2 – Параметри ПЛІС

Назва	Сімейство	Кількість елементарних комірок	Корпус	Максимальна тактова частота, МГц
10M02DCV36C8G	MAX10	2000	36-UFBGA	472
ICE5LP2K	iCE40 Ultra	2048	48QFN	133
122-1734-ND	Spartan-6 LX	3840	144-TQFP	160

За даними, що наведені у таблиці, можна зробити висновок, що будь-яка із розглянутих ПЛІС відповідає очікуваним вимогам. Тож, вибір варто здійснити за простотою роботи із пристроєм під час розробки та монтажу компонентів.

З розглянутих ПЛІС за цими параметрами виділяються матриці сімейства іСЕ40 Ultra, що програмуються по SPI-шині та поставляються у QFN-корпусах, що не потребують ускладнення друкованих вузлів та операцій складання.

Вибір блоку живлення для системи з сцинтиляційними детекторами, серед інших факторів, визначатиме рівень шумів на виході ФЕП, тому необхідний блок живлення із малими пульсаціями. В той же час у даній системі ці детектори представлені у великій кількості (11 штук), що ставить вимогу великої навантажувальної здатності.

Для вибору блоку живлення звернемося до роботи [17] – посібнику по конструюванню наукової апаратури Гарвардського університету. У даній роботі зазначено, що продукція фірми Hamamatsu є стандартом де-факто при виборі високовольтних джерел живлення.

Для даного застосування з асортименту Hamamatsu найкраще за все підходить інтегральний блок живлення лінійки С4900, так як він має малі пульсації (0.003%) та гарну навантажувальну здатність (0.5 мА).

Висновки за розділом:

Провели огляд та вибір компонентів, що мають значний вплив на характеристики системи. Обрали модель фотоелектронного помножувача, ПЛІС та високовольтного блоку живлення, що найкраще відповідають вимогам технічного завдання та умовам роботи у системі.

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

4. Розробка геометричної схеми та механічної конструкції системи

У цьому розділі буде виконано вибір геометричних параметрів маски та ПЧД, а також розробка механічної конструкції системи.

4.1. Розробка геометричної схеми системи

Для визначення геометричних параметрів детекторів у ПЧД, розміру та кількості одиничних елементів маски необхідно взяти до уваги такі параметри, означені у технічному завданні, як: вага, поле зору та роздільну здатність.

Почнемо з визначення розмірності маски. Як було визначено у попередньому розділі, маска повинна мати рисунок, визначений рівномірно-надлишковим масивом. Рівномірно-надлишковий масив є періодичним рисунком, та маски складають із декількох його періодів. В той же час кількість детекторів у ПЧД має дорівнювати довжині одного періоду [6].

Як зазначено у формулі (1.1.2), довжини періоду рисунку не можна обирати довільно. Ряд можливих довжин має вигляд: 7, 11, 15, 19...

У технічному завданні наведено вимогу у поле зору в 20° , при роздільній здатності не менше 2° . Це означає, що система повинна розділяти у полі зору мінімум 10 секторів чутливості. Таким чином, система повинна мати можливість знаходження тіні від рисунка маски мінімум в 10 можливих позиціях. Для отримання такого результату обираємо найближчий можливий розмір ПЧД та періоду маски – 11. Маску складатимемо з двох періодів рівномірно-надлишкового масиву. Таким чином маска матиме біля 11 відкритих та закритих елементів.

Наступним кроком буде визначення розміру елемента ПЧД. Технічне завдання ставить вимогу ваги не більше 5 кг. Відведемо 2 кг під конструкцію ПЧД та задаймося висотою маски в 20 см., квадратним профілем елемента маски та свинцем у якості матеріалу маски. Таким чином, маска буде складатися із свинцевих прутів.

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Визначимо максимальну вагу кожного елемента маски:

$$m_{\text{ел}} = \frac{3 \text{ кг}}{11} \approx 273 \text{ г. (4.1.1)}$$

Об'єм кожного елемента маски:

$$V_{\text{ел}} = a^2 \times h \text{ (4.1.2)}$$

Де a – грань квадратного профілю елемента, h – висота маски.

Далі визначимо максимальний об'єм елемента з його ваги та щільності свинця $\rho = 11,34 \text{ г/см}^3$:

$$V_{\text{ел max}} = \frac{m_{\text{ел}}}{\rho} = \frac{273 \text{ г}}{11,34 \text{ г/см}^3} \approx 24 \text{ см}^3 \text{ (4.1.3)}$$

Визначимо максимальну довжину грані профіля з формули (4.1.2) та значення з формули (4.1.3):

$$a_{\text{max}} = \sqrt{\frac{V_{\text{ел max}}}{h}} = \sqrt{\frac{24 \text{ см}^3}{20 \text{ см}}} \approx 1.1 \text{ см (4.1.4)}$$

Наступним кроком буде визначення відстані від маски до ПЧД виходячи з вимоги технічного завдання до роздільної здатності системи (2°).

Виконаємо креслення системи та нанесемо на нього сектор чутливості (рисунок 4.1.1).

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

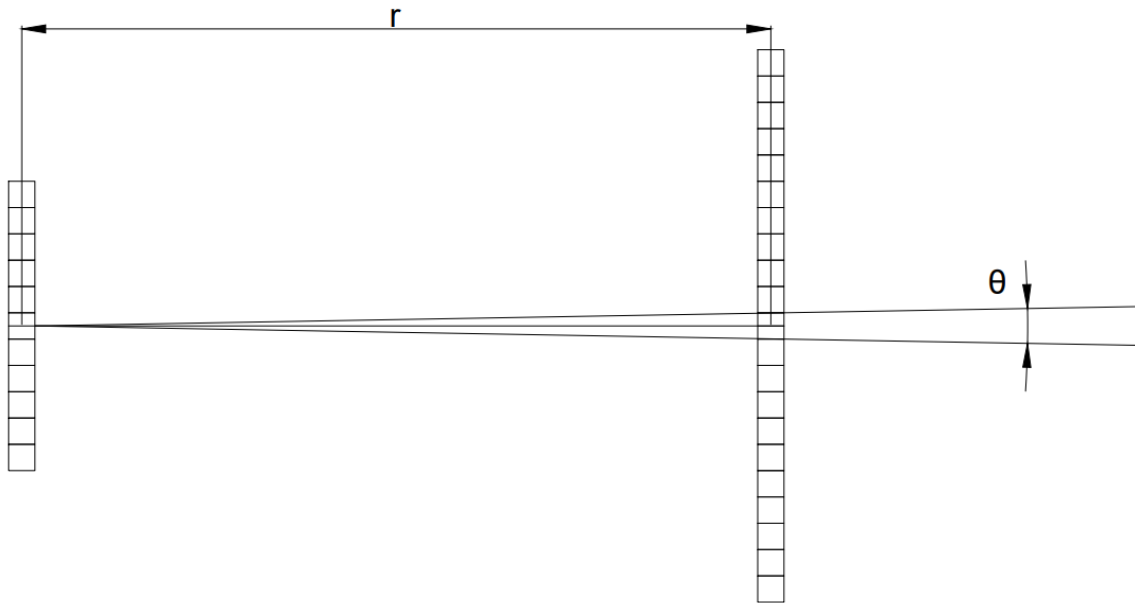


Рисунок 4.1.1 – Геометричне креслення системи, вид зверху

На цьому кресленні справа знаходиться маска, зліва – ПЧД, r – відстань від маски до ПЧД, θ – кут, визначаючий сектор чутливості.

Як видно з креслення, визначення відстані від маски до ПЧД зводиться до визначення дожини катету прямокутного трикутника з відомим іншим катетом (половина ширини одиничного елемента маски) та кутом між катетом та гіпотенузою.

Знайдемо цю відстань за формулою:

$$\theta/2 = \operatorname{tg}\left(\frac{a/2}{r}\right) \quad (4.1.5)$$

$$\frac{a/2}{r} = \operatorname{arctg}(\theta/2) = \operatorname{arctg}(1^\circ) \approx 0,01745 \quad (4.1.6)$$

$$r = \frac{5,5 \text{ мм}}{0,01745} \approx 315,2 \text{ мм} \quad (4.1.7)$$

											Арк.
											37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

Прийmemo те, що система буде працювати в умовах паралельності променів від джерела, що досліджується (джерело достатньо далеко від системи). С цією умовою розмір чутливого елемента (кристалу сцинтиляційного детектору) треба вибрати рівним розміру одиничного елемента маски (1.1 см). Прикладом сцинтиляційного кристалу із такими геометричними параметрами є кристал СДН.31, або його аналоги від інших виробників.

4.2. Розробка механічної конструкції системи

Проектування механічної конструкції системи було виконано у системі автоматичного проектування (САПР) Autodesk Fusion 360.

Під час проектування потрібно притримуватися використання легких та мало-щільних матеріалів. Ця вимога обумовлена тим, що будь-яке щільне тіло буде відкидати додаткові радіаційні тіні на ПЧД, що призведе до спотворення зображення. Це явище називається паразитним кодуванням та розглянуто у роботі [6].

Конструкція складається з двох основних вузлів: маски та ПЧД. Обидва вузли монтуються на алюмінієвий короб за допомогою кронштейнів.

Маска складається із свинцевих прутів квадратного профілю, що вклеюються між двома пластинами з прозорого вдаротримкого полістиролу. Пластини із прутами монтуються в рамку з алюмінієвого профілю. Для кріплення маски в нижню грань рамки за допомогою гайок монтується шпилька. Модель маски зображена на рисунку 4.2.1.

Маска кріпиться на короб за допомогою пластикового кронштейну (наведений на кресленні ДК51.301653.001), у який вставлено два латунних підшипника ковзання. Підшипники необхідні для можливості перетворення маски у антимаску поворотанням та захисту пластикової конструкції кронштейна від зносу при терті із шпилькою. Фрагмент креслення кріплення маски наведений на рисунку 4.2.2.

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

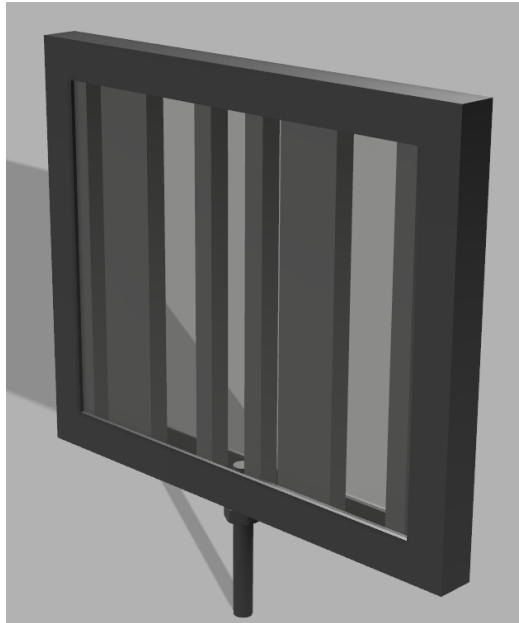


Рисунок 4.2.1 – Модель маски

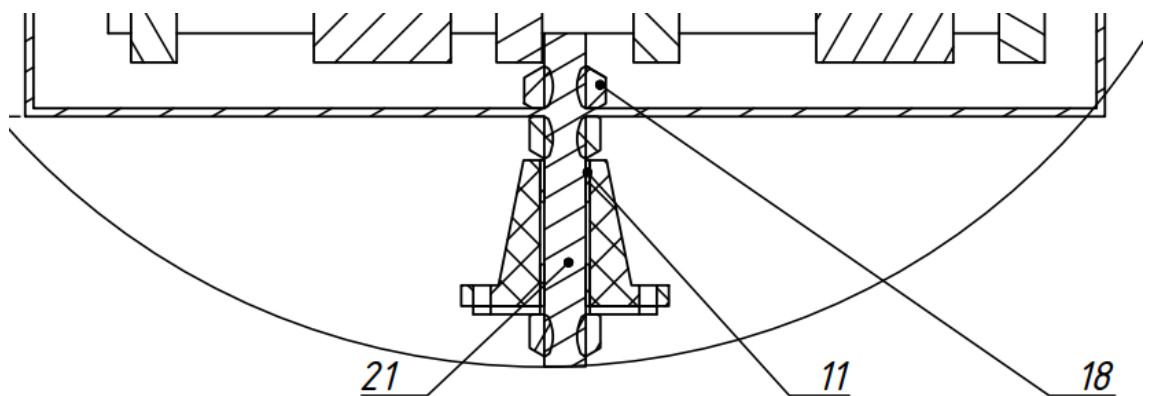


Рисунок 4.2.2 – Фрагмент креслення кріплення маски. 11 – підшипник ковзання, 21 – шпилька, 18 - гайка

З передньої сторони у короб вставляється пластикова деталь – кришка-тримач (наведена на кресленні ДК51.301251.001), на яку кріпиться USB-відеокамера.

З задньої сторони на короб надягається кронштейн (наведений на кресленні ДК51.301568.001), що тримає корпус ПЧД. Кронштейн фіксується на коробі за допомогою двох гвинтів. Варто зазначити, що можлива зміна кута зору та роздільної здатності системи шляхом зміни положення кронштейну на коробі.

					ДК51.4 11711.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Як було сказано вище, на кронштейн монтується пластиковий корпус ПЧД. Всередині корпусу на стійках закріплено монтажну плату з того ж пластику, що і використаний у масці.

Зі сторони маски на платі змонтовано 11 детекторів. Кожен детектор являє собою сцинтиляційний кристал, до якого приклеєно прозорим герметиком ФЕП. На виводах ФЕП монтується плата з дільником напруги. Ця конструкція вставляється у алюмінієву трубу та захищається від світла чорним непрозорим герметиком зі сторони кристалу та пластиковою деталлю (наведена на кресленні ДК51.301568.002) з іншої. В деталі передбачено отвір для кріплення її до монтажної плати та проведення екранованого кабелю. Розріз конструкції детектору приведено на рисунку 4.2.3.

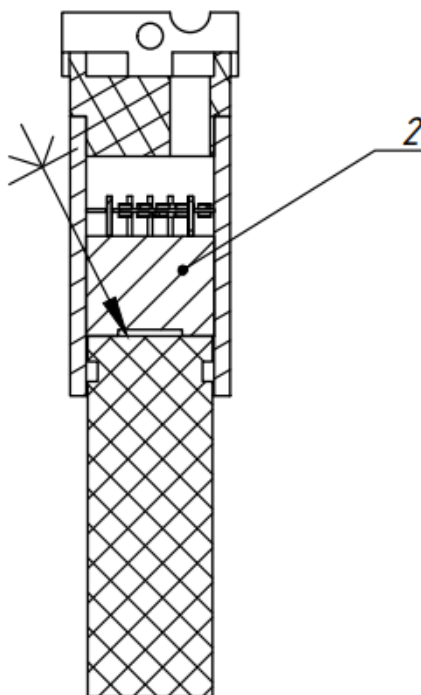


Рисунок 4.2.3 – Розріз конструкції детектору

Для точного позиціонування детекторів у ПЧД на монтажну плату монтується спеціальна деталь-проставка, у яку вставляються кристали. Загальний вигляд змонтованих на плату детекторів наведений на рисунку 4.2.4.

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

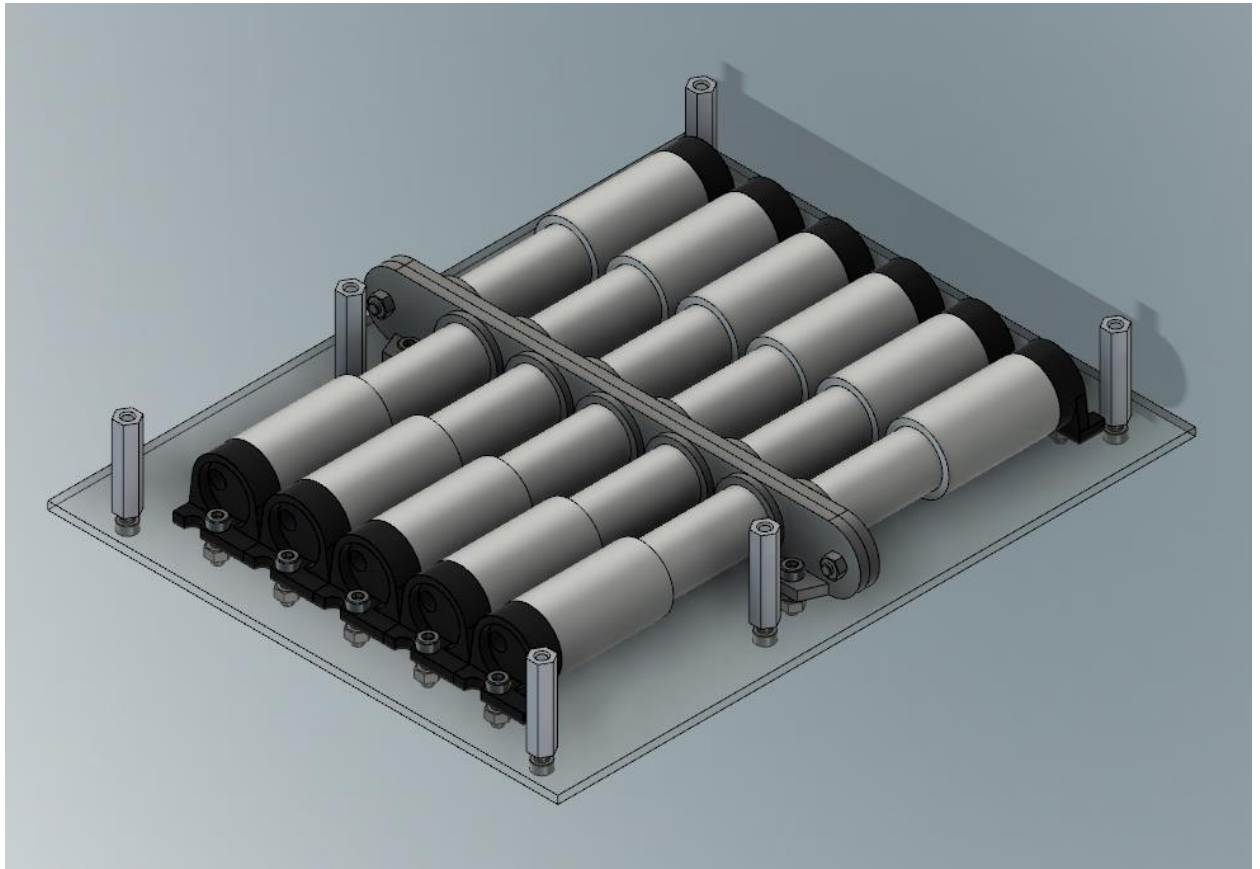


Рисунок 4.2.4 – Загальний вигляд детекторів ПЧД

З іншої сторони на монтажну плату на стійках монтується друковані вузли – блок приймання та передачі лічильної інформації та USB-концентратор. В бокову стінку корпусу ПЧД монтується роз’єми живлення, USB-шини до персонального комп’ютеру та відеокамери. Загальний вигляд системи наведений на рисунку 4.2.5, складальне креслення - ДК51.412161.001СК.

					<i>ДК51.411711.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

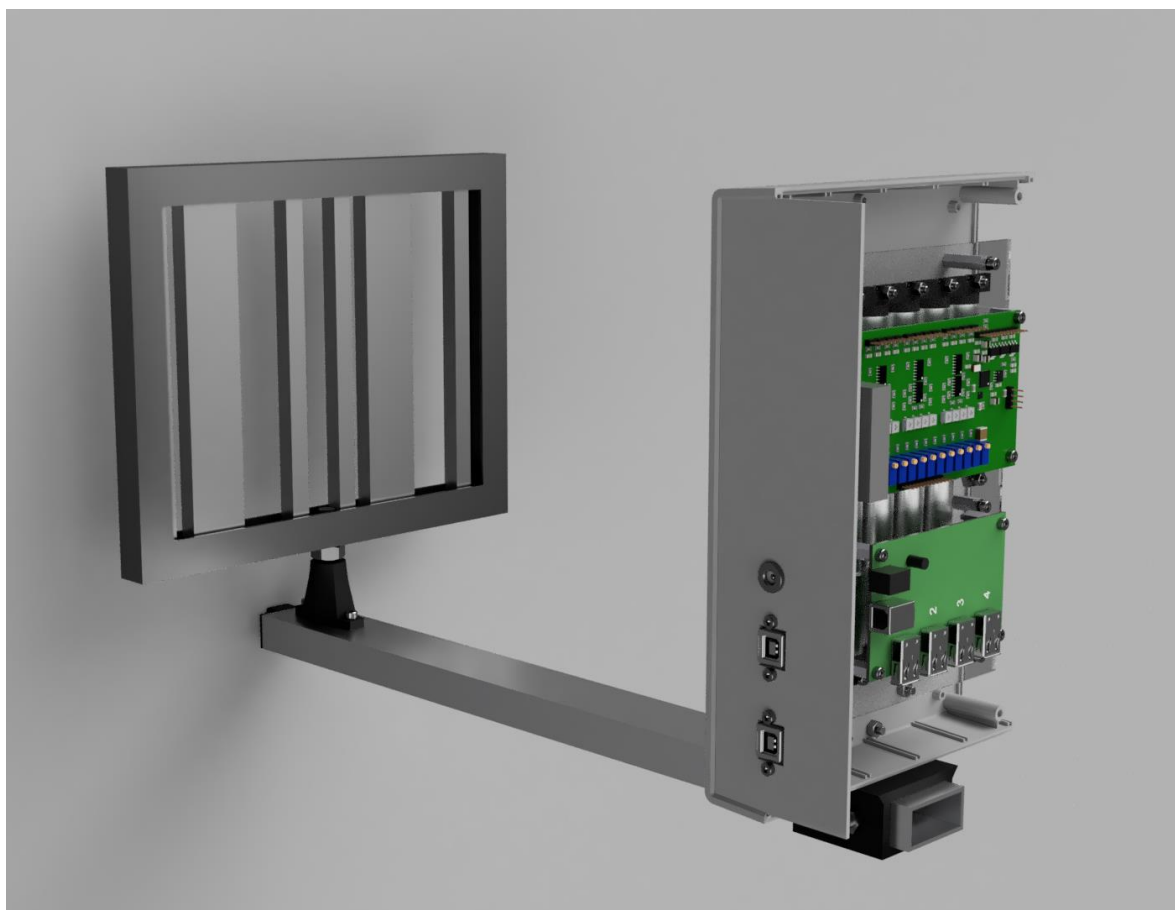


Рисунок 4.2.5 – Загальний вигляд системи

4.3. Розробка друкованого вузлу блоку приймання-передачі лічильної інформації

З урахуванням відносно високої конструкційної складності блоку приймання-передачі лічильної інформації, а також необхідності закладення найбільш технологічних конструкційних рішень, в конструкцію блоку у якості носія компонентів та електричних зв'язків закладемо двосторонній друкований вузол – діелектричну основу з шарами провідного матеріалу певного шаблону.

У сучасній практиці у якості матеріалів для виготовлення друкованого вузлу (ДВ) використовують такі види матеріалів:

1. Склотекстолітові панелі
2. Керамічні панелі
3. Полімерні пластини
4. Гнучкі полімери

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Також наявні конструкції з металів, скла та інші.

Окремо варто звернути увагу на матеріали FR2..4 – композитні панелі з паперу або склотекстоліту, з нанесенням мідних шарів. Ці пластини являють собою багат шарові сітчасті структури, що є міцними при деформації у будь-якому напрямку, мають високі технологічні параметри з точки зору твердості та свердлування отворів та гарні діелектричні властивості.

Найбільш поширеним матеріалом для виготовлення друкованих вузлів є FR4. Маючи на увазі вимоги технічного завдання з технологічності виробу, доступності матеріалів, та беручи до уваги більш ніж задовільні властивості даного матеріалу, обираємо його у якості матеріалу для виготовлення ДВ даного приладу.

Для проведення проектування ДВ, виконання розрахунків його технологічних властивостей, визначення методу та вибору підрядника-виготовлювача необхідно визначитись з класом точності ДВ.

Класи точності визначаються електричними та технологічними параметрами схеми друкованого вузлу, такими як струми між компонентами, типами обраних корпусів компонентів, простором між компонентами.

У вітчизняній конструкторській практиці класи точності ДВ визначаються відповідно до ГОСТ 23571-86, що виділяє 5 класів точності, де 1 – найменш точний клас, 5 – найбільш точний.

Для виготовлення приладу, що розглядається, були обрані елементи, що передбачають планарний монтаж, що означає значно більшу щільність монтажу на стороні ДВ, де будуть розміщені ці компоненти.

Сучасне обладнання великих виробників друкованих плат дозволяє виробляти ДВ високих класів точності з доволі низькою вартістю. Винятком є закордонні аналоги п'ятого класу точності, який потребує спеціального обладнання та підвищеного захисту виробництва від зовнішніх впливів.

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Маючи на увазі зазначенні вище фактори, обираємо четвертий клас точності для ДВ даного приладу. Цей вибір буде також обґрунтовано у цьому розділі цієї роботи.

У виробничій практиці виділяють такі методи виготовлення ДВ:

1. Хімічний (субтрактивний)
2. Електрохімічний (аддитивний)
3. Комбінований позитивний
4. Напівааддитивний з диференційним травленням

Маючи на увазі вимогу ТЗ з технологічності приладу та можливості виготовлення ДВ у сучасних підрядників, обираємо комбінований позитивний метод, так як з зазначених вище лише він отримав практичне значення та широке використання.

Також варто окремо зазначити необхідність нанесення діелектричної маски на ДВ для спрощення монтажу компонентів та додаткового захисту плати від зовнішніх впливів.

Проектування розміщення компонентів на друкованому вузлу та розробку рисунку провідників виконаємо у САПР Altium Designer.

Під час розміщення компонентів необхідно брати до уваги фактори електромагнітної сумісності, технологічності складальних операцій, а також зручність налаштування блоку.

Так як на платі блоку приймання-передачі лічильної інформації знаходяться і ланки живлення, необхідно також передбачити рознесення високовольтних компонентів від усіх інших.

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розроблений друкований вузол зображено на рисунку 4.3.1. На друкованому вузлі розміщено високовольтний блок живлення та серію змінних резисторів для налаштування підсилення ФЕП. Із віддаленням від високовольтних ланок розміщені вхідні підсилювачі та LLD. Змінні резистори налаштування кожного LLD розміщені відповідно до вхідного роз'єму для спрощення налаштування. Також на вузлі розміщено цифрову частину блоку – ПЛІС, USB-UART перетворювач, пам'ять конфігурації та роз'єми для програмування та підключення до концентратора. У конструкції вузла передбачені монтажні отвори.

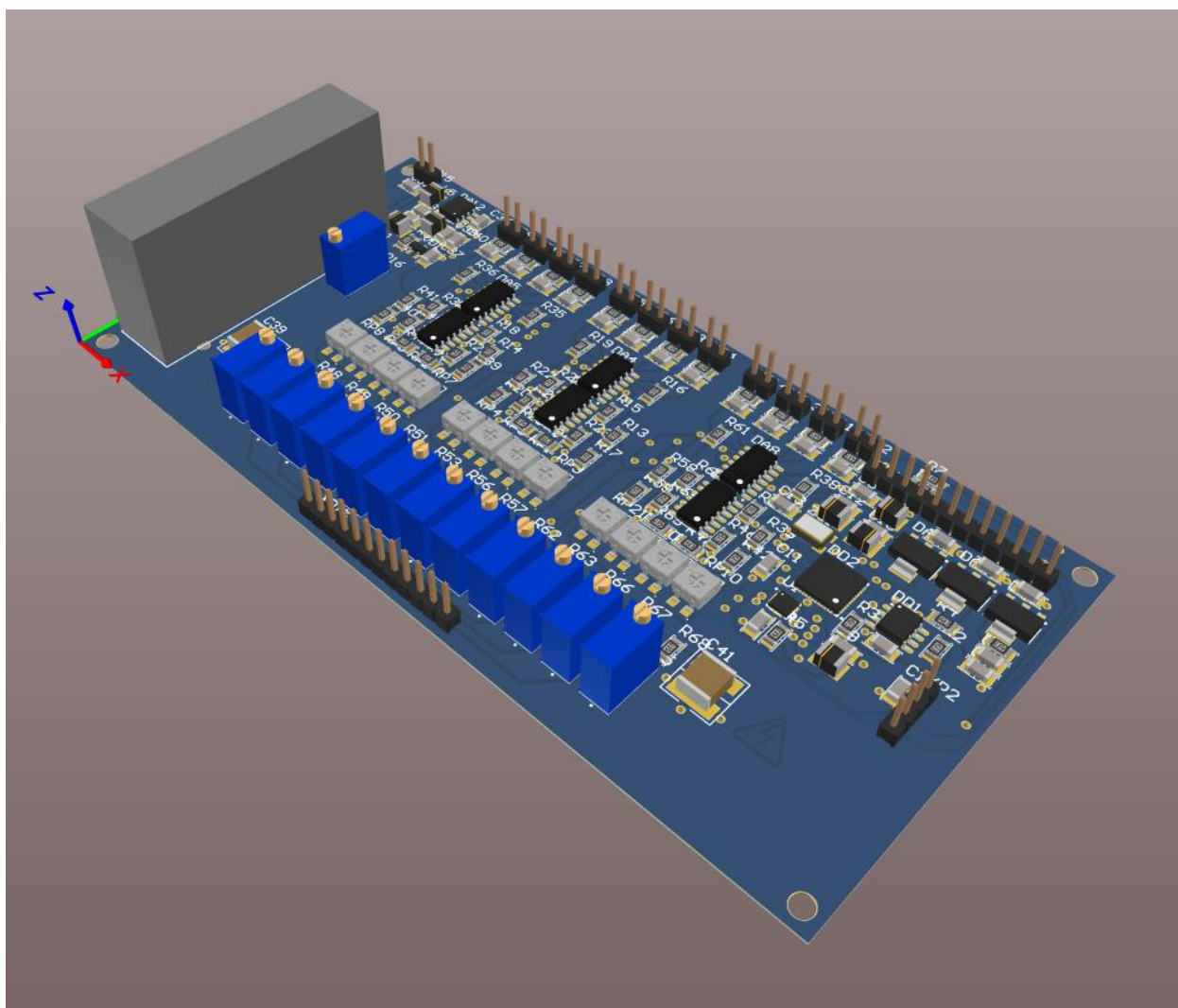


Рисунок 4.3.1 – Блок приймання-передачі лічильної інформації

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

4.4. Розробка друкованого вузлу блоку реєстрації сцинтиляцій

Друкований вузол блоку реєстрації сцинтиляцій є механічним вузлом, на якому будуть монтуватися резистори дільника напруги ФЕП. Для спрощення процесу пошуку підрядників та складання цей друкований вузол можна виготовляти таким же чином, як і вузол блоку приймання-передачі лічильної інформації – на двосторонньому склотекстоліті із маскою та створення рисунку комбінованим позитивним методом.

Вигляд розробленого блоку наведено на рисунку 4.4.1:

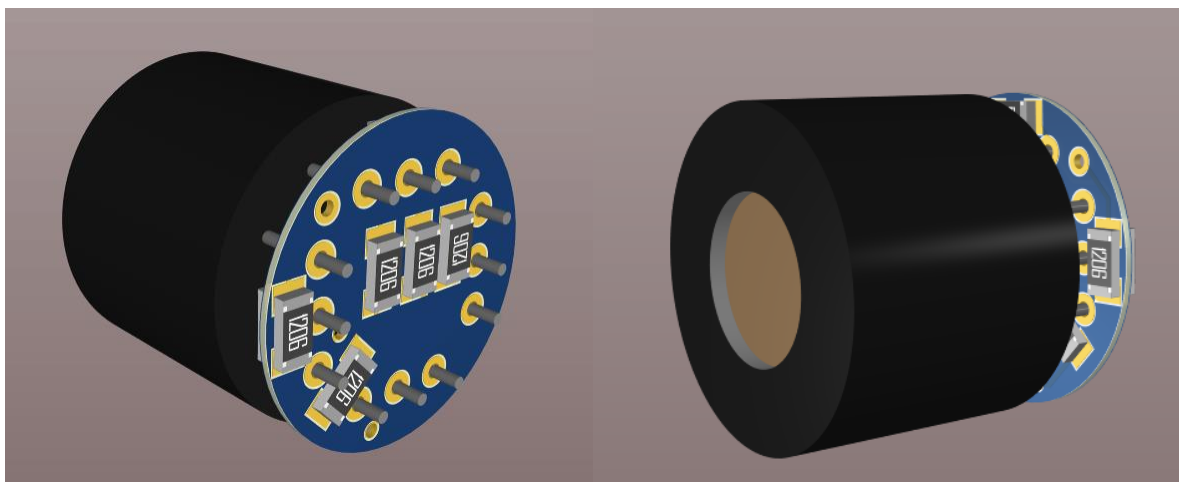


Рисунок 4.4.1 – Блок реєстрації сцинтиляцій

Висновки за розділом:

Провели розрахунок головних геометричних параметрів системи. Приймаючи до уваги специфічні вимоги до конструкції – уникнення щільних матеріалів – розробили механічну конструкцію системи: загального монтажу компонентів та виконання друкованих вузлів.

5. Розробка конфігурації програмованої логічної інтегральної схеми

У цьому розділі буде описаний принцип роботи та реалізація конфігурації ПЛІС за допомогою мов опису цифрової апаратури.

5.1. Функціональна схема та розробка проекту

Задачею ПЛІС у блоці приймання-передачі лічильної інформації є підрахунок імпульсів з детекторів та формування UART-пакетів для передачі їх на персональний комп'ютер через пристрій зв'язку з об'єктом - USB-UART перетворювач.

Так як імпульси з детекторів можуть приходити як окремо один від одного у часі, так і разом, необхідно передбачити набір незалежних лічильників імпульсів.

Для передачі даних про кількість прийнятих імпульсів використовуємо одну із існуючих реалізацій UART-інтерфейсу, а для видачі команд блоку, що реалізує інтерфейс, керування передачею та скидання лічильників розробимо спеціальний керуючий скінченний автомат.

Блок-схема розробленої конфігурації наведена на рисунку 5.1.1.

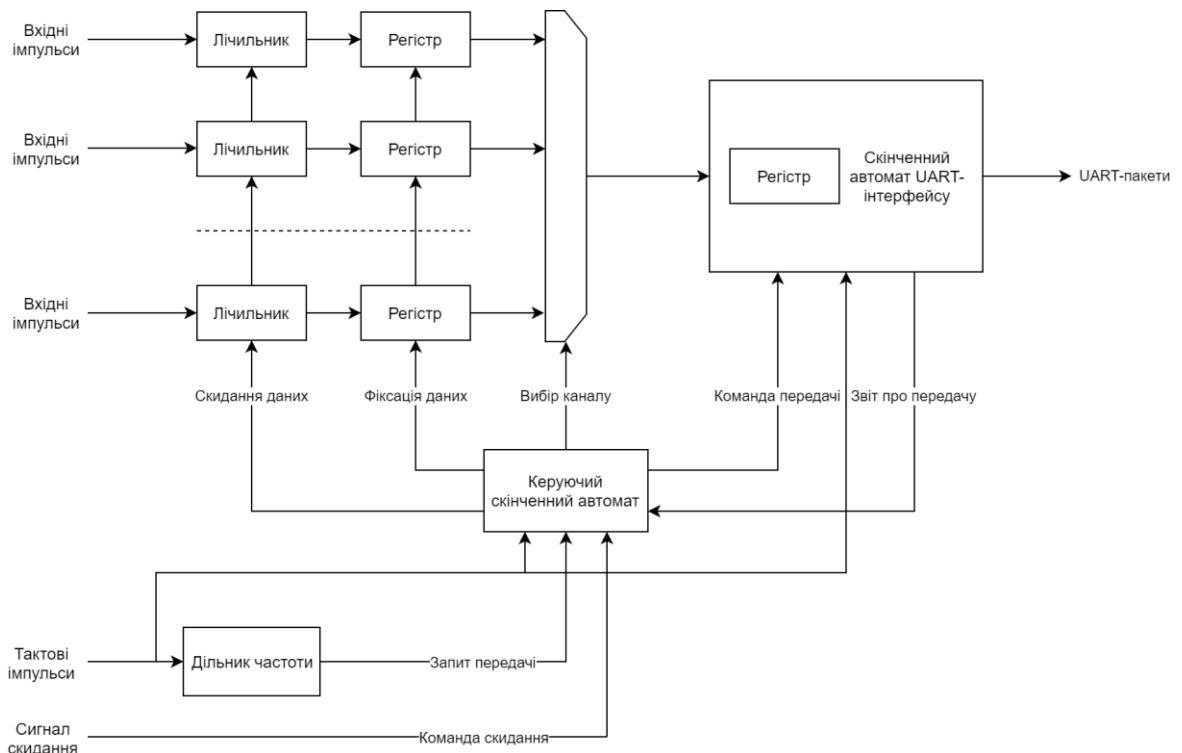


Рисунок 5.1.1 – Блок-схема конфігурації ПЛІС

										Арк.
										47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

ДК51.4 11711.001 ПЗ

Розглянемо детальніше її роботу.

Керуючий скінченний автомат працює за графом станів, що наведено на рисунку 5.1.2:

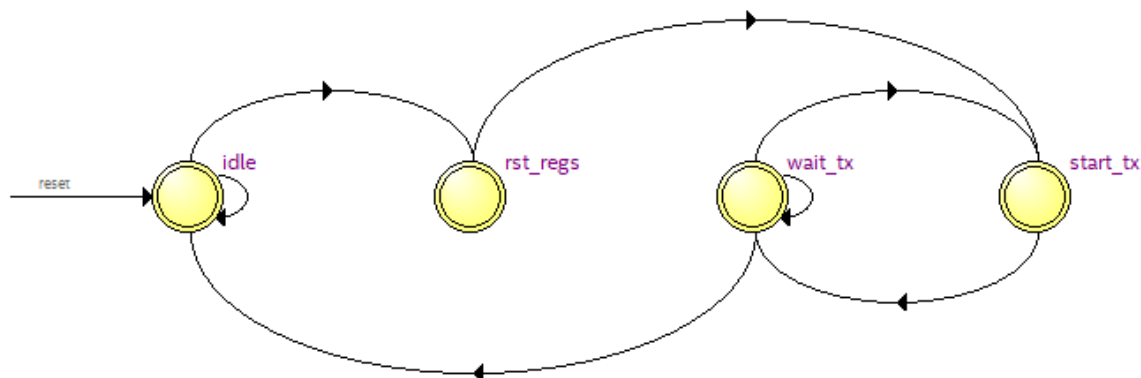


Рисунок 5.1.2 – Граф станів керуючого скінченного автомату

Розглянемо роботу ПЛІС через стани цього автомату.

1. За сигналом скидання автомат входить у фазу очікування (стан автомату idle). Імпульси, що приходять на вхідні виводи, збільшують значення на лічильниках – накопичуються дані.
2. Дільник тактової частоти 2 рази в секунду генерує сигнал запити передачі. Автомат переходить у фазу фіксації даних (стан автомату rst_regs). У цій фазі дані, що накопилися у лічильниках, зберігаються у під'єднаних до них регістрів.
3. Після фіксації даних лічильники скидаються та продовжують накопичення нових імпульсів. В той же час на автомат UART-інтерфейсу через мультиплексор подаються збереженні у регістрах дані, а також команда початку передачі (стан автомату start_tx).
4. Після початку передачі автомат входить у фазу очікування завершення передачі (стан автомату wait_tx). Автомат знаходиться у цьому стані до появи сигналу звіту про передачу. Після появи цього сигналу мультиплексором обирається наступний канал, як джерело даних для автомату UART-інтерфейсу.

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Після того як автомат передає дані з усіх каналів виконується перехід у фазу очікування.

Канали мультиплексору підключені так, щоб після подачі команди на передачу формувалась така посилка даних (таблиця 5.1.1):

Таблиця 5.1.1 – Формат посилки даних

Резервне поле	Канал 0, біти 0-7	Канал 0, біти 8-15	...	Канал 11, біти 0-7	Канал 11, біти 8-15
---------------	-------------------	--------------------	-----	--------------------	---------------------

Проект із описом цієї конфігурації був реалізований мовою опису цифрової апаратури Verilog та наведений у додатку Б. Для створення та налагодження використовували САПР Quartus Prime Lite Edition. Окремі блоки (автомати, дільник частоти) розробили на Verilog, з'єднали за допомогою редактору схем Quartus, а потім експортували кінцеву конфігурацію у вигляді Verilog-опису.

Для коректної роботи аналогової частини, а саме, LLD із ПЛІС, необхідно налаштувати виводи, на які подаються вхідні імпульси, на режим роботи із вбудованим підтягуючим резистором.

5.2. Перевірка роботи проекту

Для перевірки роботи проекту виконаємо моделювання у середовищі ModelSim. Моделювання покриватиме такі умови роботи:

- Очікування
- Реєстрація окремих імпульсів
- Реєстрація імпульсів, що прийшли одночасно
- Формування пакетів UART

Прийmemo такі умовні позначення сигналів у результатах симуляції:

- clk – сигнал тактування
- LLD_IO – вхідні імпульси
- Ctrl_IO – сигнал скидання
- TX – UART-лінія
- state – стан скінченного автомата

При відсутності вхідних імпульсів проект формує та передає UART-пакети із деяким значенням у резервному полі та з нулями у всіх інших (рисунок 5.2.1):

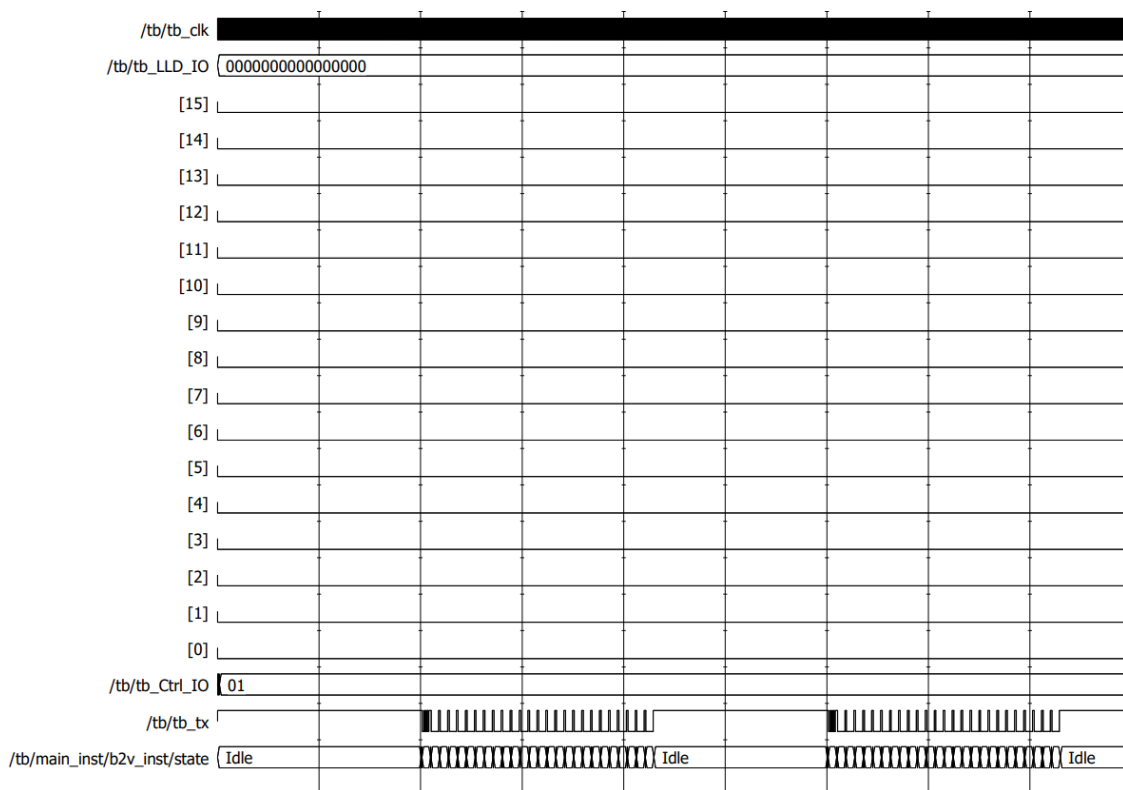


Рисунок 5.2.1 – Проект під час очікування

Детальніше розглянемо початок передачі (рисунок 5.2.2):

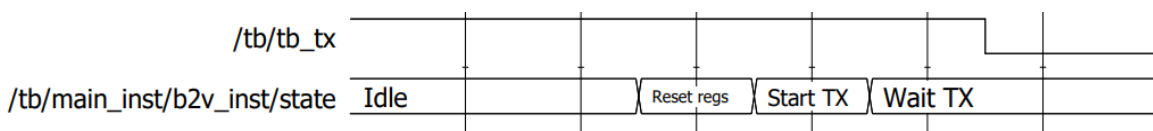


Рисунок 5.2.2 – Початок передачі

В результатах симуляції явно представлено, що автомат проходить через фази збереження результатів та скидання регістрів, входить у стан очікування передачі та виходить з нього після завершення передачі.

Створимо на вході проекту окремий та декілька одночасних імпульсів та визначимо, чи будуть вони зареєстровані системою. Результати такої симуляції наведені на рисунку 5.2.3.

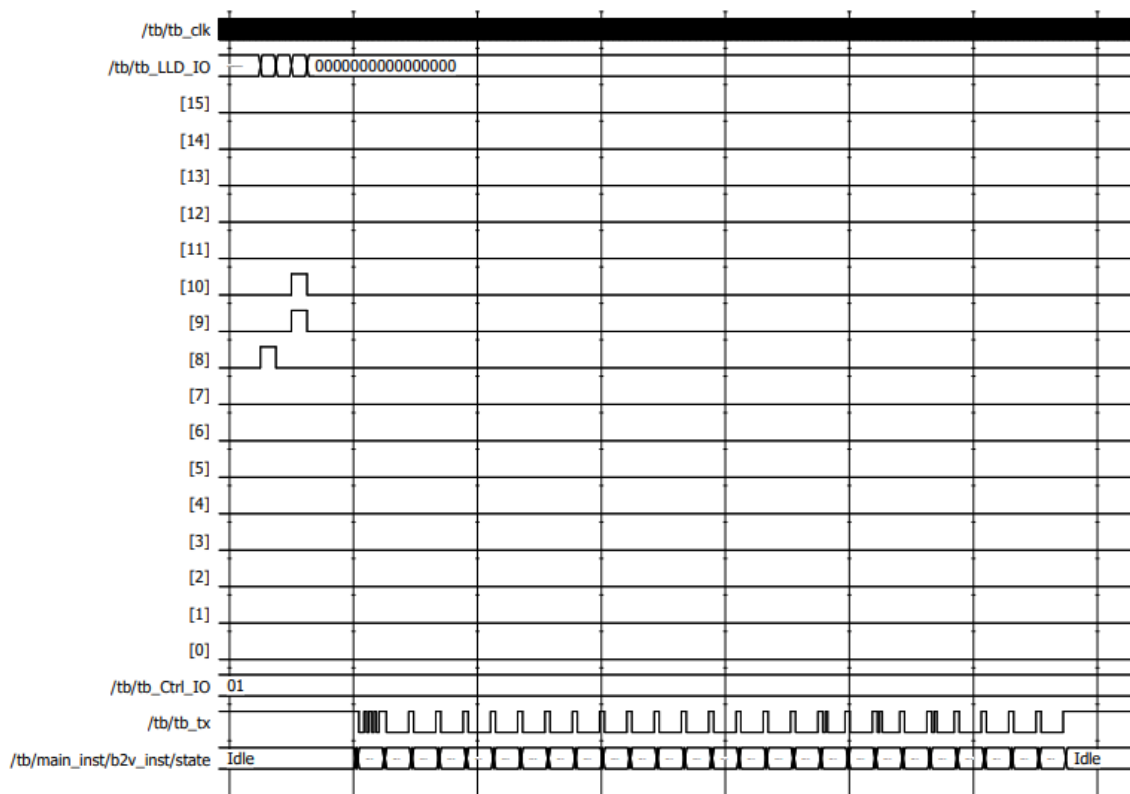


Рисунок 5.2.3 – Реакція проекту на імпульси

З результатів симуляції видно, що видані проектом UART-пакети змінилися при подачі на вхід імпульсів, а саме, у трьох послідовно переданих каналах з'явилися одиниці на позиціях молодших бітів у пакеті (рисунок 5.2.4):

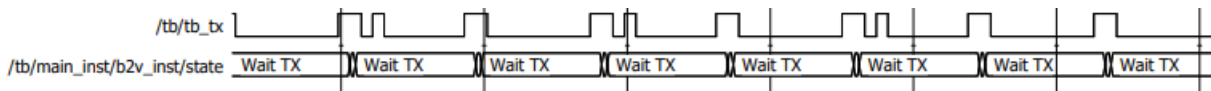


Рисунок 5.2.4 – Передача даних про зареєстровані імпульси

Висновки за розділом:

Розробили проект конфігурації ПЛІС мовою описання цифрової апаратури Verilog та провели моделювання його роботи у різних умовах, чим підтвердили працездатність конфігурації.

6. Розробка програмного забезпечення для візуалізації

В цьому розділі буде описане розроблене програмне забезпечення, що реалізує приймання та зберігання даних, що передаються пристроєм зв'язку з об'єктом.

Програмне забезпечення (ПЗ) реалізовано графічною мовою програмування G у середовищі LabVIEW. Для зручності опису його роботи приведемо блок-схему основних компонентів ПЗ (рисунок 6.1):

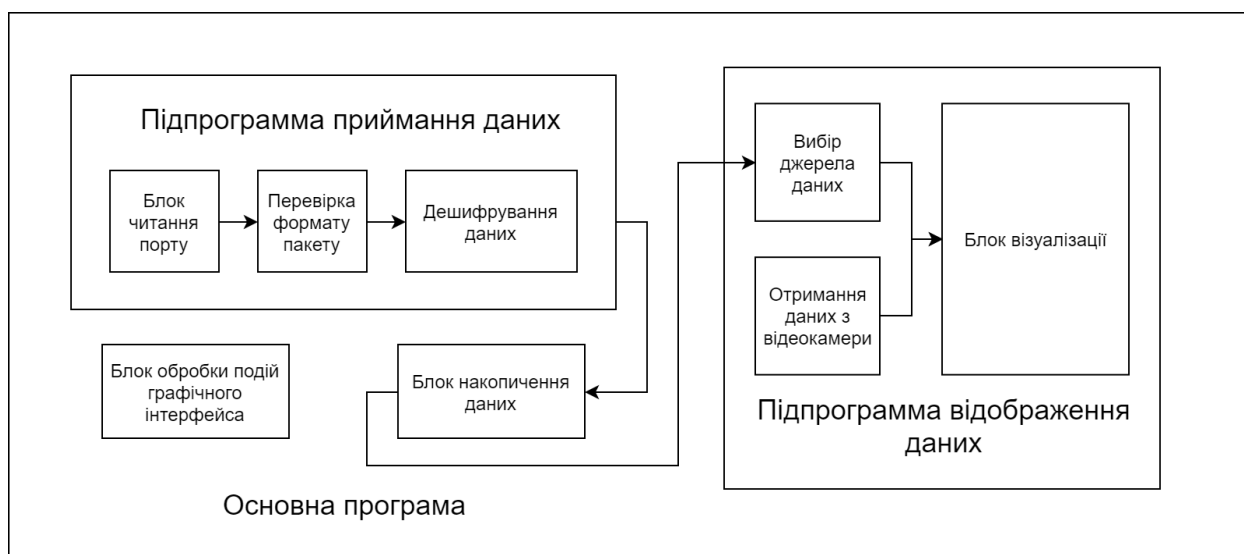


Рисунок 6.1 – Блок-схема програмного забезпечення

Програмне забезпечення складається із основної програми, що викликає дві підпрограми.

Перша підпрограма – приймання даних – виконує роботу із віртуальним послідовним портом, що створюється пристроєм зв'язку з об'єктом. Прийняті дані перевіряються на цілісність – за довжиною пакету та значенням резервного поля. Після проходження перевірки пакет дешифрується та отримані дані складаються у контейнер-чергу.

Отримані дані виймаються із черги у основній програмі та накопичуються у векторних масивах – основному буфері, буфері накоплення «маска», буфері накоплення «антимаска» та буфері ковзаючого середнього значення. Керування накопиченням: пуск-зупинка, скидання даних, переміщення між буферами виконується користувачем за допомогою графічного інтерфейсу.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Взаємодія користувача із графічним інтерфейсом викликає відповідні події графічного інтерфейсу, які оброблюються окремим блоком основної програми.

Реалізована можливість накопичення даних у основний буфер за деякий час, що задає користувач та переміщення накопичених даних у два окремих буфери. Таким чином, користувач може накопичити дані з різними конфігураціями кодуючої маски для реалізації технології маска-антимаска.

Також реалізовано буфер ковзаючого середнього значення, який зберігає декілька останніх пакетів даних.

Дані із буферів складаються у іншу чергу, з якої їх виймає підпрограма відображення даних.

У підпрограмі відображення даних, що виконується у окремому вікні, користувач має можливість вибору джерела даних, по яким має бути виконана візуалізація – буферу маски, буферу антимаки, буферу ковзаючого середнього значення або із результату віднімання буферу антимаки із буферу маски.

Також ця підпрограма має блок отримання зображення із відеокамери, що відповідає за підтримання із нею зв'язку та приймання кадрів.

Обрані користувачем дані потрапляють на блок візуалізації, у якому кореляційний алгоритм відтворює зображення поля гамма-випромінювання та накладає його на зображення із відеокамери. Зображення відтворюється за функцією розсіювання точки (SPSF). Масив відновленого зображення формується як:

$$SPSF_j = \sum_i A_i \times G_{i+j} \quad (6.1)$$

Де: G – кількість імпульсів з детекторів, доповнений нулями до розміру A ,
 A – оброблюючий масив, що формується з рисунку маски за правилом:

$$A_i = \begin{cases} 1, \text{ якщо елемент } i \text{ відкритий} \\ -1, \text{ якщо елемент } i \text{ закритий} \end{cases} \quad (6.2)$$

Графічний код ПЗ наведений у додатку В.

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДК51.4 11711.001 ПЗ				53

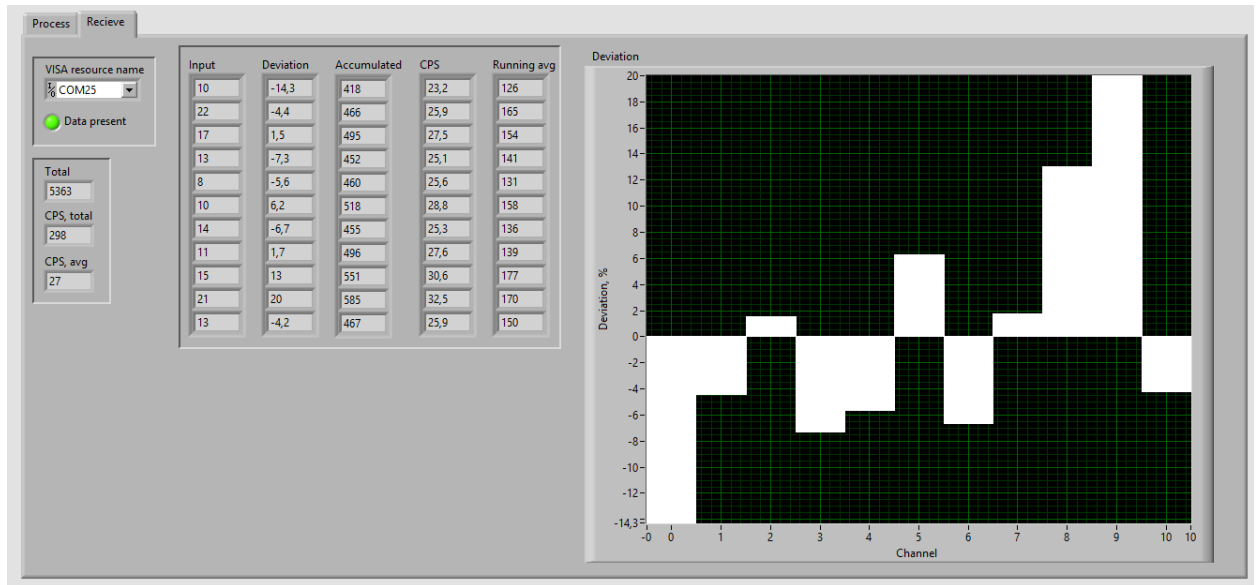


Рисунок 6.3 – Вікно приймання та обробки даних

Користувач накопичує дані із деякою конфігурацією кодуючої маски та перетягуванням переносить дані із гістограми накопичених даних у буфер маски або антимаки відповідно (рисунок 6.4).

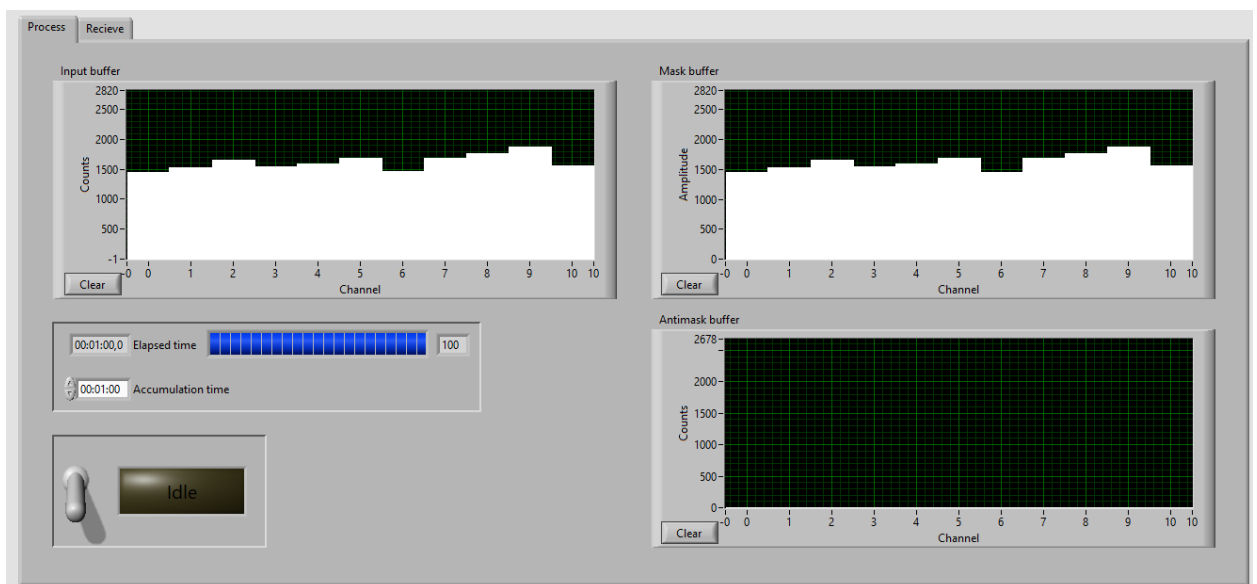


Рисунок 6.4 – Копіювання даних

Після накопичення даних користувач може переглянути результат відновлення зображення або виконати таке ж накоплення з інверсною конфігурацією маски та перенести дані у відповідний буфер.

У другому вікні – індикації – користувачу доступний результат відновлення зображення. Це вікно також розбите на дві вкладки – для отримання візуалізації у вигляді гистограми або у вигляді накладеного на відео з камери зображення (рисунки 6.5).

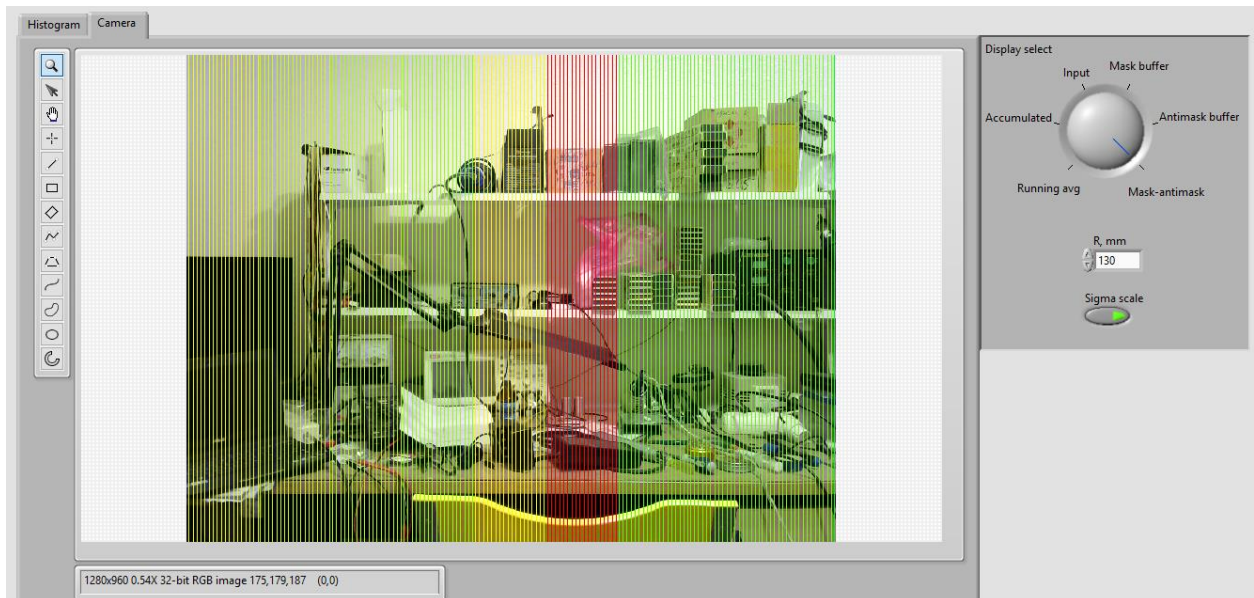


Рисунок 6.5 – Вікно індикації

Користувачу доступний вибір джерела, з якого програма виконує відновлення зображення – з вхідних даних, з буферу ковзаючого середнього, з накопичених даних, з буферу маски, з буферу антимаки, або з результату віднімання буферу антимаки з буферу маски (рисунки 6.6).

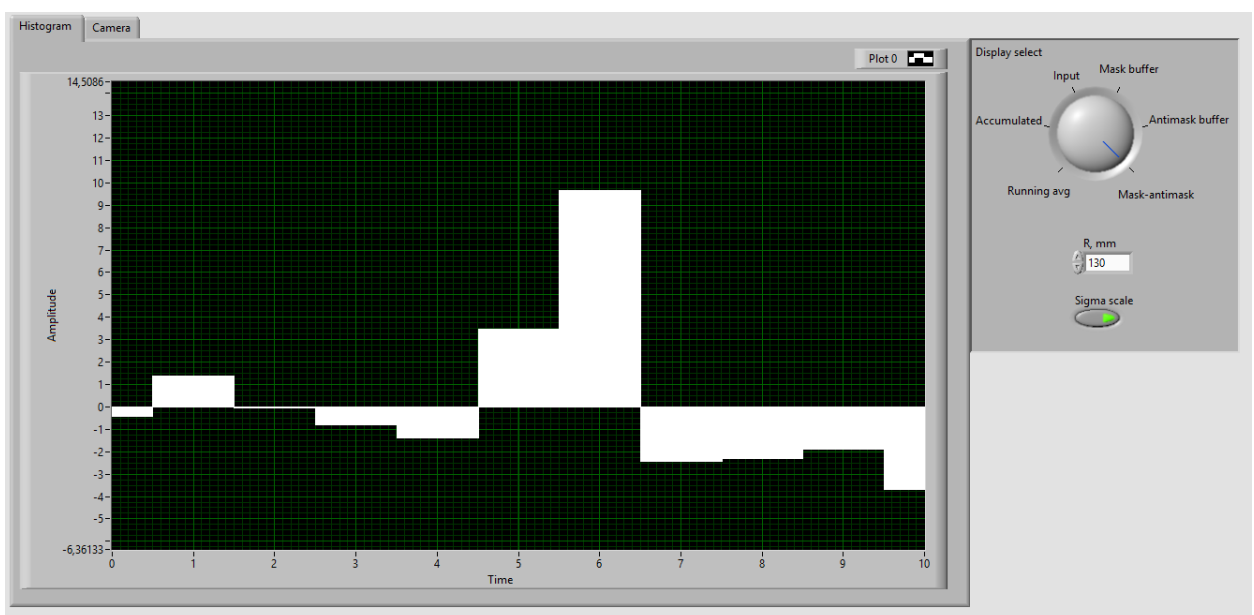


Рисунок 6.6 – Вікно індикації

Відновлення можна виконувати ще під час накопичення, у масштабі реального часу.

Користувач має можливість змінити масштаб гістограми для виводу результату у одиницях статистичної значимості. Також користувачу доступно задання відстані між ПЧД та маскою для забезпечення відповідності між реальною роздільною здатністю та лініями, що рисує програма.

Висновки за розділом:

Розроблено та перевірено роботу програмного забезпечення візуалізації. ПЗ успішно виконує приймання даних, накопичує їх у буферах та реалізує роботу кореляційного алгоритму для відновлення зображення гамма-поля.

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		57

7. Інші розрахунки, що підтверджують працездатність системи

У цьому розділі будуть проведені розрахунки, не приведені у попередніх розділах, але потрібні для обґрунтування прийнятих технічних рішень.

7.1. Розрахунок ефективності реєстрації детектору

Ефективність реєстрації детектору – це оцінка вірогідності взаємодії гамма-кванту деякої енергії із матеріалом сцинтилятора та реєстрації цієї взаємодії. Ця характеристика визначатиме максимальну енергію, яку з прийнятною ефективністю можуть реєструвати детектори.

Знехтуємо геометричними параметрами кристалу сцинтилятора (прийmemo його за призму замість циліндру), тоді ефективність реєстрації можна оцінити за законом поглинання вузького паралельного пучка матеріалом (7.1.1) [18]:

$$\varepsilon_{abs} = \varepsilon_g \times \varepsilon_{int} = \varepsilon_g (1 - e^{-\mu(E)L}) \quad (7.1.1)$$

Де: ε_g – геометрична ефективність, ε_{int} – внутрішня ефективність, $\mu(E)$ – лінійний коефіцієнт поглинання (сумарний), E – енергія гамма-кванта.

На рисунку 7.1.1 зображено залежність ефективності реєстрації від енергії для використаного сцинтилятора (NaI (Tl)):

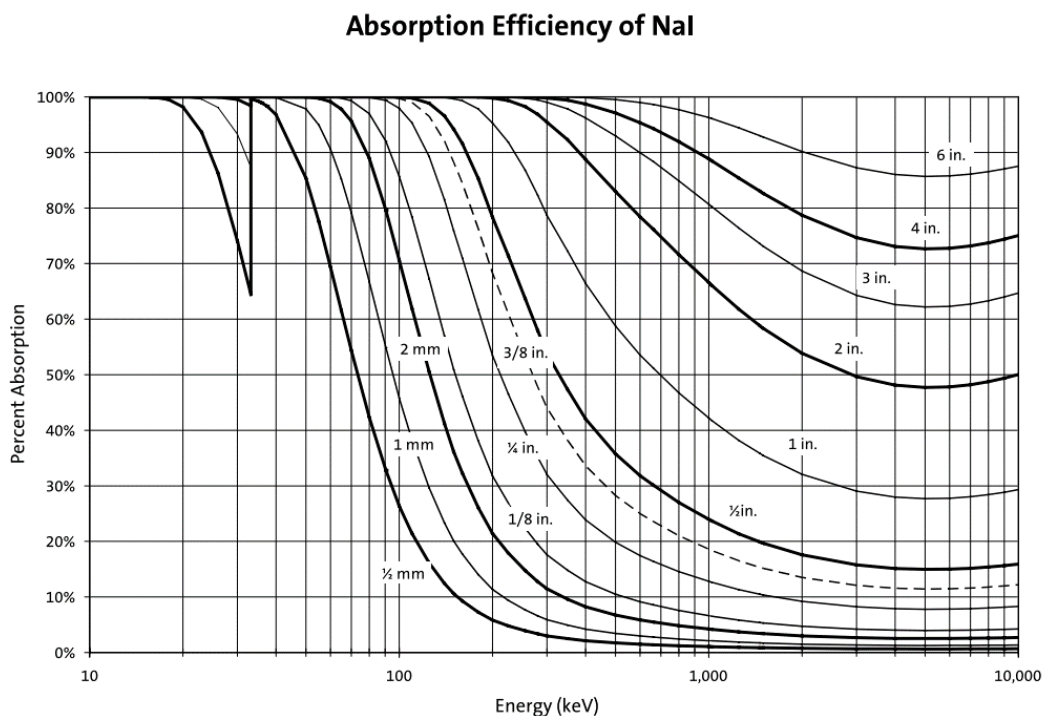


Рисунок 7.1.1 – Залежність ефективності реєстрації від енергії для NaI (Tl)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДК51.4 11711.001 ПЗ

Арк.

58

Розглянемо найгірший з точки зору енергії випадок – на кристал падає пучок гамма-квантів з енергією 3 МеВ (найбільша специфікована технічним завданням) та усі вони потрапляють у детектор ($\varepsilon_g = 1$). Сумарний коефіцієнт поглинання при такій енергії: $\mu_\nu = 0,04 \frac{\Gamma}{\text{см}}$ [18], щільність сцинтилятора $\rho = 3,67 \frac{\Gamma}{\text{см}^3}$, розмір – 1,1 см. Тоді:

$$\varepsilon_{abs} = 1 - e^{-0,15\text{см}^{-1} \times 3,67 \frac{\Gamma}{\text{см}^3} \times 1,1\text{см}} \approx 0,15 \quad (7.1.2)$$

Ця величина сходиться із експериментальними даними, наведеними у роботі [19] та на рисунку 7.1.1.

З результатів розрахунку можна зробити висновок, що такий детектор здатний реєструвати гамма-кванти енергією 3 МеВ, хоча і із значним послабленням ефективності. Це не є критичним, так як основна частина спектру техногенних джерел (наприклад, Ra-226) знаходиться у низько енергетичній частині (рисунок 7.1.2):

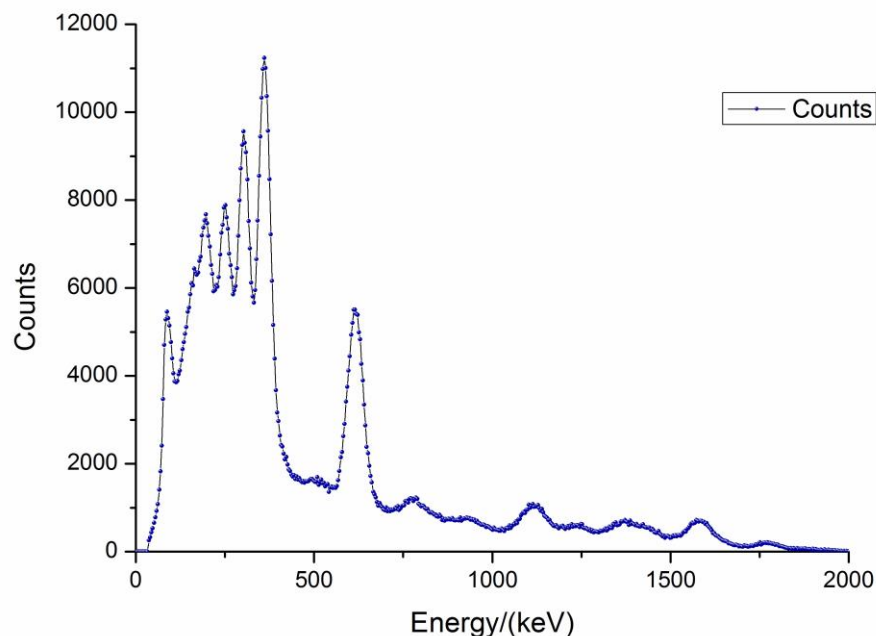


Рисунок 7.1.2 – Графік спектру випромінювання Ra-226

7.2. Розрахунок екранування випромінювання конструкціями детектору та маски

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

Для забезпечення ефективної реєстрації випромінювання у специфікованому діапазоні енергій необхідно пересвідчитися, що конструкції детекторів не поглинають значну частину низькоенергетичного випромінювання. Також необхідно пересвідчитись, що конструкції маски здатні екранувати випромінювання для появи ефекту кодування.

Спочатку, розрахуємо поглинання випромінювання конструкціями детектору – алюмінієвою упаковкою кристалу NaI (Tl) товщиною 0,15 мм для найгіршого випадку – опромінення частками енергією 30 кеВ (найменша специфікована технічним завданням).

Закон послаблення потужності дози випромінювання D однорідним захистом товщиною x в геометрії вузького пучка для плоского моноспрямованого джерела виражається як [19]:

$$D = D_0 \times \exp(-\mu x) \quad (7.2.1)$$

Де: μ – лінійний коефіцієнт послаблення, x – товщина слою захисту.

Лінійний коефіцієнт послаблення алюмінію для енергії 30 кеВ дорівнює $3,024 \text{ см}^{-1}$ [20]. Тоді відносно послаблення розраховується як:

$$N_1 = \frac{D_0}{D} = \exp(-3,024 \text{ см}^{-1} \times 0,015 \text{ см}) \approx 0,95 \quad (7.2.2)$$

З цього розрахунку можна зробити висновок, що матеріали конструкції детекторів не створюють істотного екранування для кодованного випромінювання.

Проведемо аналогічний розрахунок для свинцевих прутів, із яких складається кодуєча маска. Розрахунок виконаємо для найгіршого випадку – енергії квантів в 3 МеВ. Прути мають товщину в 1,1 см та виконуються із свинця. Для них лінійний коефіцієнт послаблення на енергії 3 МеВ дорівнює $0,48 \text{ см}^{-1}$ [20].

$$N_2 = \frac{D_0}{D} = \exp(-0,48 \text{ см}^{-1} \times 1,1 \text{ см}) \approx 0,59 \quad (7.2.3)$$

Можна зробити висновок, що навіть на такій високій енергії пруди поглинатимуть достатньо випромінювання для появи кодування.

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7.3. Прогнозування надійності системи

Для забезпечення вимоги технічного завдання щодо напрацювання на відмову виконаємо грубу оцінку надійності системи.

Розрахунок ймовірності раптової відмови за ГОСТ 27.003-2016 виконується за формулою:

$$P(t) = e^{-\lambda t} \quad (7.3.1)$$

де λ у - сумарна інтенсивність відмов з урахуванням умов експлуатації, а t - час, необхідний для безвідмовної роботи.

Інтенсивність відмов показує, яка частина елементів, по відношенню до загальної кількості справно працюючих в середньому виходить з ладу в одиницю часу. Інтенсивність відмов визначається за формулою:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times k \quad (7.3.2)$$

де λ_i - інтенсивність відмов i -го елемента, n - число елементів, а k - коефіцієнт навантаження.

Напрацювання на відмову T - середній час роботи виробу між сусідніми відмовами.

$$T_n = \frac{1}{\lambda} \quad (7.3.3)$$

Зведемо у таблицю усі наявні у системі компоненти та їх базову вірогідність відмови:

Таблиця 7.3.1 – Базові вірогідності відмов

№	Назва	λ , 10 ⁻⁶ /год	Кількість	Напрацювання групи, 10 ⁻⁶ /год
1	Діод TL431	0,25	1	0,25
2	Конденсатор Samsung 1206	0,022	41	0,902
3	Резистор Vishay 1206	0,044	79	3,476
4	Резистор змінний Bourms	0,179	25	4,475
5	ІС аналогова	0,028	3	0,084

Таблиця 7.3.1, продовження

№	Назва	λ , $10^{-6}/\text{год.}$	Кількість	Напрацювання групи, $10^{-6}/\text{год.}$
6	ІС цифрова	0,023	3	0,069
7	Мікросхема системи живлення	0,0041	4	0,0164
8	Велика цифрова ІС	0,043	2	0,086
9	Мікросхема енергонезалежної пам'яті	0,018	1	0,018
10	Інтегральний блок живлення	0,12	1	0,12
11	Котушка індуктивності	0,033	7	0,231
12	Роз'ємні з'єднання	0,00012	44	0,00528
13	Паяні з'єднання	0,5	590	295
14	Фотоелектронний помножувач	1	11	11
15	Плата друкована	0,5	13	6,5
16	Стійка	0,06	14	0,84
17	USB-концентратор	0,2	1	0,2
18	USB-відеокамера	2	1	2
Сумарна λ				325,27

Розрахуємо напрацювання на відмову:

$$T_H = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{325,27 \times 10^{-6}} \approx 3075 \text{ год. (7.3.4)}$$

Таке напрацювання на відмову задовольняє вимоги технічного завдання

Проведемо розрахунок вірогідності відмови за формулою (7.3.1) та вірогідності безвідмовної роботи за формулою:

$$Q(t) = 1 - P(t) \text{ (7.3.5)}$$

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

Графіки отриманих залежностей наведені на рисунку 7.3.1:

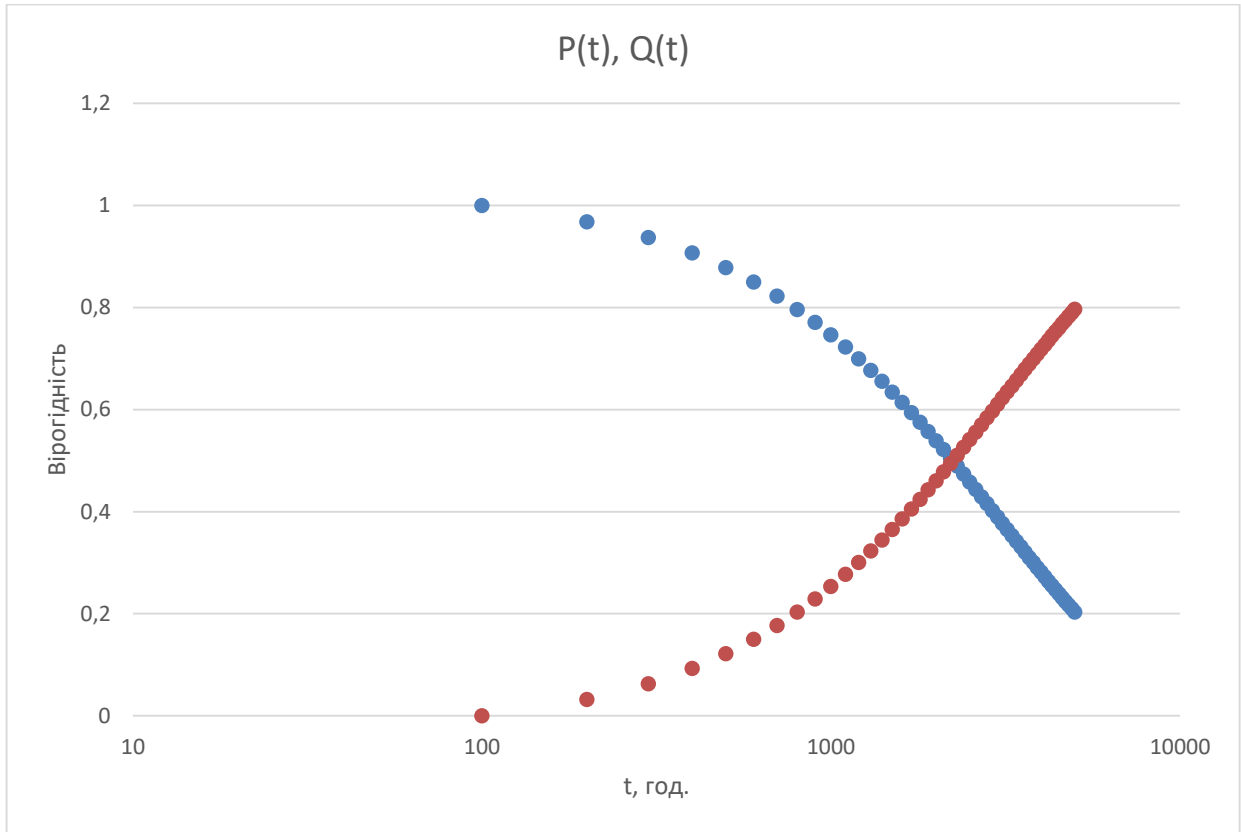


Рисунок 7.3.1 – Графік вірогідності відмови та безвідмовної роботи

Графіки перетинаються на відмітці 2100 год, що є ресурсом цієї (системи.

7.4. Розрахунок теплового режиму лінійного стабілізатора

Обраний ПЛІС має режим зберігання конфігурації у одноразово-програмованій пам'яті. На випадок використання такого режиму у блоці приймання-передачі лічильної інформації передбачено лінійний стабілізатор, що створює напругу 2,5 В, якою програмується пам'ять ПЛІС. Виконаємо розрахунок теплового режиму цього стабілізатора.

Вхідні дані для розрахунку:

- Корпус SOT-223, температурний опір кристал-середовище при монтуванні на двохшарову друковану плату із безпосередньо під'єднаною площею металізації 2400 мм. кв. [21]: $R_{кc} = 45 \text{ К/Вт}$
- Постійний струм стабілізації: $I_{ст} = 230 \text{ мА}$
- Падіння напруги на стабілізаторі: $U_{ст} = 5 \text{ В} - 2,5 \text{ В} = 2,5 \text{ В}$

Слід зазначити, що в загальному випадку температурний опір між кристалом і середовищем знаходиться по формулі: $R_{KC} = R_{KK} + R_{КОР.СЕР}$, де R_{KC} , R_{KK} , $R_{КОР.СЕР}$ – теплові опори між кристалом і середовищем, кристалом і корпусом, корпусом і середовищем.

Так як прямий розрахунок температурного опору є нетривіальною задачею, приймемо усереднений опір, що наведено вище.

Тоді, потужність, що виділяється на кристалі:

$$P = U_{CT} \times I_{CT} = 2,5 \text{ В} \times 0,23 \text{ А} \approx 575 \text{ мВт} \quad (7.4.1)$$

За технічним завданням, система повинна зберігати працездатність на температурах до $T_{amb \max} = 50$ градусах Цельсія. Допустима температура роботи стабілізатора – $T_{\max} = 150$ градусів.

Тоді в таких умовах роботи, максимальна потужність дорівнює:

$$P_{\max} = \frac{T_{\max} - T_{amb \max}}{R_{KC}} = \frac{150^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}}{45 \text{ К/Вт}} \approx 2,2 \text{ Вт} \quad (7.4.2)$$

Можна зробити висновок, що корпус здатний розсіяти достатньо потужності. Розрахуємо перегрів корпусу:

$$T_{over} = P \times R_{KC} = 0,575 \times 45^{\circ}\text{C} \approx 25,9^{\circ}\text{C} \quad (7.4.3)$$

Такий тепловий режим можна вважати прийнятним.

7.5. Конструкторсько-технологічний розрахунок елементів друкованих плат

Обґрунтуємо вибір класу точності друкованих плат проведенням розрахунку граничних геометричних параметрів провідників.

7.5.1. Визначення мінімальної ширини провідника з урахуванням струму

З усієї конструкції максимальний постійний струм (протягом усього часу роботи, а не, наприклад, під час програмування) протікає від роз'єму +15 В до високовольтного блоку живлення. При максимальному навантаженні блоку цей струм складає 90 мА.

Мінімальна ширина друкованого провідника по постійному струму $b_{\min I}$ визначається виразом:

						<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			64

$$b_{\min I} = \frac{I_{\max}}{j_{\text{доп}} \cdot t_{\text{пров}}} \quad (7.5.1.1)$$

Де: I_{\max} – максимально можливий струм в ланцюгу, $j_{\text{доп}}$ – допустима щільність струму, $t_{\text{пров}}$ – товщина друкованого провідника.

$j_{\text{доп}}$ для ДВ, який виготовлений комбінованим позитивним методом дорівнює за ІРС - 2152: $j_{\text{доп}} = 48 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$.

Товщина друкованого провідника визначається виразом:

$$t_{\text{пров}} = h_{\text{ф}} + h_{\text{ГМ}} + h_{\text{ХМ}} \quad (7.5.1.2)$$

Де $h_{\text{ф}}$ – товщина фольги, $h_{\text{ГМ}}$ – товщина шара гальванічно осадженої міді, $h_{\text{ХМ}}$ – товщина шара хімічно осадженої міді. Для використаного для друкованих вузлів фольгованого склотекстоліту:

$$t_{\text{пров}} = 0,035 + 0,055 + 0,0065 = 0,0965 \text{ (мм)} \quad (7.5.1.3)$$

Визначимо мінімальну ширину провідника підстановкою в (7.5.1.1):

$$b_{\min I} = \frac{0,09 \text{ А}}{48 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2} \times 0,0965 \text{ мм}} = 0,02 \text{ мм} \quad (7.5.1.4)$$

Отримане значення мінімальної ширини входить в межі значень для 4 класу точності $b_{\min} = 0,15$ мм. Для зменшення технологічних складнощів приймемо ширину провідника 0,2 мм в тонких місцях, $b_{\max} = 0,5$ – в усіх інших.

7.5.2. Визначення мінімальної ширини провідника з урахуванням допустимого падіння напруги на ньому

Визначимо мінімальну ширину найдовшого провідника на розроблених друкованих вузлах – лінії +5 В живлення.

Мінімальна ширина провідника з урахуванням допустимого падіння напруги на ньому, визначається:

$$b_{\min U} = \frac{\rho \cdot I_{\max} \cdot L_{\text{пров}}}{U_{\text{доп}} \cdot t_{\text{пров}}} \quad (7.5.2.1)$$

					ДК51.4 11711.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

Де: ρ – питомий опір провідника, виготовленого комбінованим позитивним методом, $L_{\text{пров}}$ – довжина найдовшого друкованого провідника ДВ, $U_{\text{доп}}$ – допустиме падіння напруги на друкованому провіднику, 5% від номінальної напруги, I_{max} – максимальний струм по провіднику ($I_{\text{живл}}$).

Для розроблених вузлів:

$$\rho = 0,0175 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$$

$$U_{\text{доп}} = 0,05 \times 5 = 0,25 \text{ В}$$

$$L_{\text{пров}} = 0,32 \text{ м}$$

$$I_{\text{живл}} = 0,06 \text{ А}$$

Виконаємо підстановку в (7.5.2.1):

$$b_{\min U} = \frac{\rho \times I_{\text{живл}} \times L_{\text{пров}}}{U_{\text{доп}} \times t_{\text{пров}}} = \frac{0,0175 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} \times 0,06 \text{ А} \times 0,32 \text{ м}}{0,25 \text{ В} \times 0,0965 \text{ мм}}$$

$$= 0,014 \text{ мм (7.5.2.2)}$$

Обрана ширина провідника значно більша за розраховану мінімальну.

7.5.3. Визначення мінімального діаметру монтажної отвору

Мінімальний діаметр монтажної отвору визначається як:

$$d \geq d_{\text{вз}} + \Delta d_{\text{мо}} + r \text{ (7.5.3.1)}$$

Де: $d_{\text{вз}}$ – діаметр виводу елементів, для якого визначається діаметр монтажної отвору, Δd – нижнє граничне відхилення від номінального діаметру монтажної отвору, r – різниця між мінімальним діаметром монтажної отвору та максимальним діаметром виводу елемента.

Для виводів змінних резисторів регулювання підсилення ФЕП:

$$\Delta d_{\text{мо}} = 0,1 \text{ мм}$$

$$r = 0,1 \dots 0,2 \text{ мм}$$

$$d \geq d_{\text{вз}} + \Delta d_{\text{мо}} + r = 0,4 + 0,1 + 0,2 = 0,7 \text{ (мм) (7.5.3.2)}$$

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

7.5.4. Визначення мінімального діаметру контактної площини біля отвору
 Згідно IPC-2222 контактна площа біля отвору компоненту наскрізного монтажу повинна дорівнювати діаметру отвору плюс 0,15...0,25 мм в залежності від типу плати.

Для визначення діаметру, що буде використаний, додаймо до діаметру виводу 0,25 мм та 1,5 товщини фольги на склотекстоліті для компенсації підтравлення. Отримаємо:

$$D_{max} = 0,4 + 0,25 + 1,5h_{\phi} = 0,4 + 0,25 + 1,5 \times 0,035 \approx 0,7 \text{ (мм)} \quad (7.5.4.1)$$

7.5.5. Визначення мінімальної відстані між провідником та контактною площиною

Мінімальна відстань між провідником визначається за формулою:

$$l_{ПКМ \min} = L_0 - \left(\frac{D_{max}}{2} + \delta_{км} + \frac{b_{max}}{2} + \delta_{сп} \right) \quad (7.5.5.1)$$

Де: L_0 – відстань між центрами отворів та друкованим провідником, які кратні кроку координатної сітки, D_{max} – максимальний діаметр контактної площини, b_{max} – максимальна ширина провідника, $\delta_{км}$ – похибка розташування центра контактної площини, $\delta_{сп}$ – похибка, яка враховує зміщення провідника. Величини позначені на рисунку 7.5.5.1.

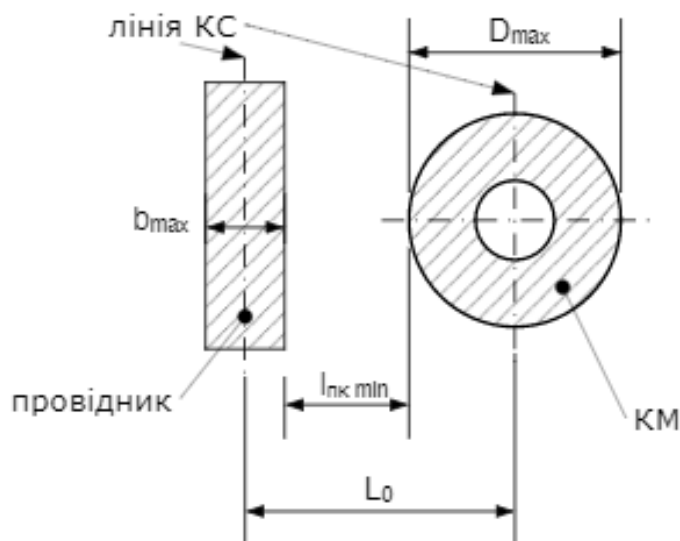


Рисунок 7.5.5.1 – Провідник та контактна площа

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДК51.4 11711.001 ПЗ

Арк.

67

Для розроблених ДВ та типових підрядників:

$$L_0 = 1,25 \text{ мм (найгірший випадок)}$$

$$\delta_{\text{км}} = 0,05 \text{ мм}$$

$$\delta_{\text{сп}} = 0,05 \text{ мм}$$

Виконаємо підстановку в (7.5.5.1):

$$\begin{aligned} l_{\text{ПКМ min}} &= L_0 - \left(\frac{D_{\text{max}}}{2} + \delta_{\text{км}} + \frac{b_{\text{max}}}{2} + \delta_{\text{сп}} \right) \\ &= 1,25 - \left(\frac{0,7}{2} + 0,05 + \frac{0,5}{2} + 0,05 \right) = 0,55 \text{ (мм)} \end{aligned} \quad (7.5.5.2)$$

Таке значення відповідає обраному (четвертому) класу точності.

7.5.6. Визначення мінімальної відстані між двома сусідніми провідниками (між краями провідників)

Мінімальна відстань між двома сусідніми провідниками визначається за формулою:

$$l_{\text{ПП min}} = L_0 - (b_{\text{max}} + 2 \cdot \delta_{\text{сп}}) \quad (7.5.6.1)$$

Величини позначені на рисунку 7.5.6.1:

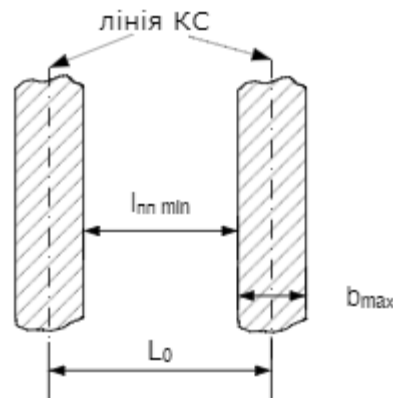


Рисунок 7.5.6.1 – Два провідника

Виконаємо підстановку у (7.5.6.1):

$$l_{\text{ПП min}} = L_0 - (b_{\text{max}} + 2 \cdot \delta_{\text{сп}}) = 1,25 - (0,5 + 2 \cdot 0,05) = 0,65 \text{ (мм)} \quad (7.5.6.2)$$

Таке значення відповідає обраному (четвертому) класу точності.

					ДК51.4 11711.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

Вимоги до точності щодо розмірів посадкових місць компонентів перевіримо через звернення до стандарту на корпус компонента із найменшим кроком виводів – QFN20. Стандарт AN1902 визначає відстань між контактними майданчиками в 0.35 мм, що відповідає обраному класу точності.

Висновки за розділом:

Проведено розрахунки, що підтверджують працездатність конструкції, але не наведені у інших розділах. Перевірили поглинання випромінювання конструкціями детектору та маски, ефективність реєстрації детекторів та підтвердили їх відповідність умовам роботи та технічному завданню. Виконали розрахунок надійності системи, що прогнозував напрацювання на відмову таким, що відповідає технічному завданню. Також виконали конструкторсько-технологічний розрахунок елементів друкованих вузлів, що довів коректність вибору класу точності.

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		69

Висновки

В дипломному проекті викладено необхідні методологічні, загальнотехнічні, схемотехнічні, конструкційні, технологічні та програмні рішення, необхідні для реалізації системи візуалізації гамма-випромінювання.

Розроблена система має такі технічні характеристики:

Назва характеристики	Отримане значення	Вимога технічного завдання
Енергетичний діапазон:	Не гірше 50 кеВ - 3 МеВ	50 кеВ - 3 МеВ
Кутова роздільна здатність:	Конфігурована, не гірше 2°	не гірше 2°
Поле зору	Конфігуроване, не менше 22°	не менше 20°
Чутливість при часі вимірювання 5 с.	0,053 мкЗв/год. над рівнем фону в 0,13 мкЗв/год. (виміряно на макетному зразку)	0,065 мкЗв/год. над рівнем фону в 0,13 мкЗв/год.
Максимальна вхідна статистична завантаженість	$2,7 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$
Вага	5 кг	не більше 5 кг
Напрацювання на відмову	3075 год.	не менше 3000 год.
Конструкція детектора	Сцинтиляційний неорганічний NaI (Tl)	-
Напруги живлення	15 В, 5 В (USB 2.0)	-

Для розробки проекту системи виконані такі етапи:

1. Проведено огляд існуючих методів та засобів візуалізації гамма-випромінювання, наведені приклади реалізацій цих рішень. З розглянутих методів обрані такі, що найкраще відповідають технічному завданню, а саме - система із кодовою апертурою, сцинтиляційними детекторами та використанням мікросхеми програмованої логіки для отримання даних.

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк. 70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Розроблено загальний принцип роботи та структурну схему системи. Виконано схемотехнічне проектування усіх вузлів системи, що недоступні для придбання. Розроблені вузли базуються на сучасній елементній базі, не створюють додаткових складнощів при монтуванні та налагодженні та надають усі необхідні можливості для налаштування. Проведено моделювання роботи розробленої схеми у середовищі LTSpice, яке підтвердило її працездатність. Підготовлено відповідну проектну документацію до розроблених схем.

3. Проведено обґрунтування вибору елементної бази на основі огляду та порівняння наявних на ринку компонентів. Вибрані компоненти відповідають вимогам технічного завдання та не накладають обмежень на можливі покращення конструкції.

4. Розроблено геометричну схему конструкції із урахуванням вимог технічного завдання щодо кутової роздільної здатності, поля зору, ваги, тощо. На основі геометричної схеми за допомогою систем автоматичного проектування Autodesk Fusion 360 та Autocad розроблено механічну конструкцію системи та відповідну проектну документацію. Розроблена конструкція відповідає специфічним вимогам системи, виробляється з доступних матеріалів та деталей за допомогою простих технологічних операцій. Для монтажу електронних компонентів розроблено проекти та документацію до відповідних друкованих плат за допомогою середовища Altium Designer.

5. Розроблено проект конфігурації програмованої логічної мікросхеми, за допомогою якої проводиться отримання даних. Проект реалізовано мовою опису цифрової апаратури Verilog, що дозволяє просте його налагодження та перенос на різні програмовані логічні мікросхеми. Проведено моделювання роботи проекту, під час якого підтвердили його працездатність.

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>71</i>

6. Виконали розробку програмного забезпечення у середовищі LabVIEW, яке виконує отримання, накопичення та обробку даних. Програмне забезпечення виконує відновлення зображення гамма-поля на основі отриманих даних. Розроблені програмні продукти мають простий інтерфейс користувача, не навантажують машину, на якій виконуються, мають функції контролю за потоком даних та обробки відмов каналу зв'язку.

7. Провели необхідні перевірочні розрахунки – визначили ефективність детекторів, якість екранування випромінювання конструкціями маски та детекторів, виконали прогноз надійності системи та провели конструкторсько-технологічний розрахунок елементів друкованого монтажу для перевірки відповідності обраного класу точності друкованих плат умовам роботи. Усі виконані розрахунки підтверджують коректність прийнятих технічних рішень та вказують на відповідність характеристик спроектованої системи технічному завданню.

Завдання на дипломний проект виконано в повному обсязі, розроблена конструкція відповідає вимогам технічного завдання. По матеріалам дипломного проекту виготовлено макетний зразок системи, зроблено доповідь на науково-технічній конференції. Результати впроваджені у роботу НВМСП «Опит», яке видало технічне завдання.

Матеріали дипломного проекту можуть бути використані для виготовлення промислового зразку системи, проведення модернізації конструкції та виконання досліджень та розробок у сумісних наукових сферах.

Результати виконаного проектування мають практичну цінність та можуть бути підставою для отримання патенту на корисну модель, особливо враховуючи малу кількість робіт із практичними результатами, виконаних на території України.

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		72

9. A panoramic coded aperture gamma camera for radioactive hotspots localization / [V. Paradiso, K. Amgarou, N. Blanc De Lanaute та ін.]. – Триєст: Journal of Instrumentation, SISSA, 2017. – 18 с.
10. <https://hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessi3/> [Електронний ресурс] // NASA. – 2002. – Режим доступу до ресурсу: <https://hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessi3/>.
11. DETECTION OF GAMMA RADIATION – Jyväskylä: University of Jyväskylä, 2002. – 19 с.
12. Махньов О. І. Новітній підхід до пошуку радіаційних аномалій та його реалізація – Київ: НТУУ «КПІ. ім. І. Сікорського», 2018. – (Міжнародна Науково-Технічна конференція Молодих Вчених «Електроніка-2018», Збірник статей).
13. Махньов О. І. Курсова робота по темі: «Пошуковий дозиметр гамма-опромінення» - Київ: НТУУ «КПІ», ФЕЛ, КЕОА, 2017.
14. Photomultiplier tubes: basics and applications. Third edition / [Т. Nakamata, Н. Kume, К. Okano та ін.]. – Хамамацу: Hamamatsu photonics, 2007. – 323 с.
15. Rako P. Photodiode Amplifiers / Paul Rako. – Санта-Клара: National Semiconductor.
16. iCE40 Ultra Breakout Board [Електронний ресурс] // Lattice semiconductor. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.latticesemi.com/Products/DevelopmentBoardsAndKits/iCE40UltraBreakoutBoard.aspx>.
17. BUILDING SCIENTIFIC APPARATUS / [J. Moore, С. Davis, М. Coplan та ін.]. – Кембрідж: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2012. – 658 с.
18. Calculation of Intrinsic Efficiency of NaI(Tl) Detector Using MCNP Code / [A. Mowlavi, R. Izadi Najafabadi, R. Koohi Faygh та ін.]. – Мешхед: Ferdowsi University. – (Physics Department, Faculty of Sciences).
19. Efficiency Calculations for Selected Scintillators [Електронний ресурс] // Saint-Gobain Ceramics & Plastics, Inc. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/efficiency-calculations.pdf>.

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

20. Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest – Гейтерсберг: U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE, 1997. – 52 с. – (Technology Administration National Institute of Standards and Technology Physics Laboratory Ionizing Radiation Division).
21. Understanding Thermal Characteristic of SOT-223 Package [Электронный ресурс] // Richtek. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.richtek.com/Design%20Support/Technical%20Document/AN044>. AN1902 - Assembly guidelines for QFN (quad flat no-lead) and SON (small outline no-lead) packag
- IPC – 2152 - Standard for Determining Current-Carrying Capacity In Printed Board Design
- IPC-2222 - Sectional Design Standard for Rigid Organic Printed Boards
- ГОСТ 23571-86 – Платы печатные. Основные параметры конструкции
- ГОСТ 27.003-2016 - Надежность в технике

					<i>ДК51.4 11711.001 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		75

Додатки

Додаток А – Технічне завдання

ПОГОДЖЕНО, ЗАТВЕРДЖЕНО

Директор

НВМСП «Опит»

І.О. Махньов

1. Найменування та галузь використання

Система візуалізації гамма-випромінювання «Антрацит». Система відноситься до галузі радіаційного контролю.

Система використовується для:

- Оперативного контролю за станом зберігання радіоактивних речовин.
- Моніторингу навколишнього середовища в місцях зберігання радіоактивних речовин.
- Виявлення несанкціонованих місць зберігання радіоактивних речовин.
- Виявлення джерел гамма-випромінювання під час аварійних ситуацій.
- Для оцінки радіаційної обстановки на територіях, забруднених під час радіаційних аварій.

2. Мета і призначення розробки

Розробка малогабаритної системи візуалізації гамма-випромінювання, що матиме покращені у порівнянні з існуючими системами ваго-габаритні та експлуатаційні показники та буде придатною до польового використання.

Система призначена для візуалізації гамма-поля джерел, що створюють потік гамма-квантів не гірший за 0,065 мкЗв/год. при часі вимірювання не більш 5с.

3. Джерело розробки

Система розробляється вперше.

4. Технічні вимоги

4.1 Склад виробу й вимоги до системи, що розробляється.

Система складається з блоку детектування, пристрою зв'язку з об'єктом та персонального комп'ютера.

Ступінь захисту блоку детектування – IP64H.

Система задовольняє вимогам стандартів ГОСТ 27451-87, IEC 61526, ANSI 42.20.

4.2 Показники призначення

Система повинна забезпечувати:

- Візуалізацію поля гамма-випромінювання.
- Накладення зображення поля на зображення з відеокамери.

4.3 Вимоги до надійності

Напрацювання на відмову не менше 3000 год.

4.4 Вимоги до технологічності

Блок детектування та пристрій зв'язку з об'єктом мають бути виконані у стандартному корпусі, що серійно виробляється. Конструкція має передбачати мінімум механічної обробки складальних одиниць та простоту складання. Припускається використання технологій 3Д-друку під час виготовлення пристрою.

4.5 Вимоги до рівня уніфікації й стандартизації.

Для виготовлення системи передбачається максимальне застосування стандартних, уніфікованих деталей та виробів. Конструкція передбачає заміну чутливих елементів детекторів на їх аналоги.

4.6 Вимоги безпеки обслуговування.

Керуватися загальними вимогами безпеки до апаратури класу II за ГОСТ 12.2.007-75

4.7 Вимоги до складових частин виробу, сировини, вихідних й експлуатаційних матеріалів.

Для виробництва системи припускається використання матеріалів імпортного виробництва

4.8 Умови експлуатації.

Кліматичне виконання УХЛ.2.3 за ГОСТ 15150-69.

4.9 Вимоги до транспортування і зберігання.

Система в упакованому вигляді допускає транспортування будь-яким закритим видом транспорту при температурі навколишнього повітря від -50 до +50° С.

Упакована система повинна бути закріплена в транспортному засобі. Розміщення і кріплення в транспортному засобі упакованих систем має забезпечувати їх стійке положення, виключати можливість ударів один об одного, а також об стінки транспортного засобу. У разі перевезення морським транспортом система в упакованому вигляді повинна поміщатися в поліетиленовий герметичний чохол з осушувачем силікагелем за ГОСТ 3956-76. При транспортуванні літаком система в упакованому вигляді повинна розміщуватися в герметичних відсіках.

4.10 Додаткові технічні умови.

5.10.1 Основні вимоги

Енергетичний діапазон гамма-випромінювання, що реєструється	50.0 кеВ - 3.0 МеВ
Кутова роздільна здатність, не гірше	2°
Поле зору, не менше	20°
Чутливість, при часі вимірювання не більше 5 с.	0,065 мкЗв/год. над рівнем фона в 0,13 мкЗв/год.
Максимальна вхідна статистична завантаженість, не менше	1·10 ⁴
Вага, не більше	5 кг
Діапазон робочих температур	-20 до +50 °С

6. Результати роботи

6.1. Результати даної роботи можуть бути використані як вихідна документація по створенню прототипу системи, його програмування, налагодження й подальшого впровадження в серійне виробництво. Матеріали роботи можуть бути визнані корисними для дослідницько-виробничого процесу та впроваджені у роботу підприємства.

6.2. Дана робота (звітна документація та графічні матеріали) після виконання надається на кафедру КЕОА для подальшого захисту й зберігання як навчальної документації.

Додаток Б – Verilog-реалізація пристрою підрахунку імпульсів

```
module main(
    clk_outer,
    LLD_IO,
    Ctrl_IO,
    TX_Out
);

input wire    clk_outer;
input wire    [13:2] LLD_IO;
input wire    [1:1] Ctrl_IO;
output wire   TX_Out;

wire    SYNTHESIZED_WIRE_0;
wire    SYNTHESIZED_WIRE_1;
wire    SYNTHESIZED_WIRE_2;
wire    SYNTHESIZED_WIRE_3;
wire    [7:0] SYNTHESIZED_WIRE_4;
wire    SYNTHESIZED_WIRE_5;

ctrl_fsmb2v_inst(
    .clk(clk_outer),
    .reset(SYNTHESIZED_WIRE_0),
    .tx_ready(SYNTHESIZED_WIRE_1),
    .transmit_request(SYNTHESIZED_WIRE_2),
    .in(LLD_IO),
    .tx_allow(SYNTHESIZED_WIRE_3),
    .data_out(SYNTHESIZED_WIRE_4));
defparamb2v_inst.idle = 0;
defparamb2v_inst.rst_regs = 3;
defparamb2v_inst.start_tx = 1;
defparamb2v_inst.wait_tx = 2;

uart_tx b2v_inst1(
    .i_Clock(clk_outer),
    .i_Tx_DV(SYNTHESIZED_WIRE_3),
    .i_Tx_Byte(SYNTHESIZED_WIRE_4),

    .o_Tx_Serial(TX_Out),
    .o_Tx_Done(SYNTHESIZED_WIRE_1));
defparamb2v_inst1.CLKS_PER_BIT = 2;

assign SYNTHESIZED_WIRE_0 = ~Ctrl_IO;

Clock_divider b2v_inst5(
    .clock_in(clk_outer),

    .clock_out(SYNTHESIZED_WIRE_5));

single_clock b2v_inst6(
    .clk(clk_outer),
    .trig(SYNTHESIZED_WIRE_5),
    .out(SYNTHESIZED_WIRE_2));

endmodule

module Clock_divider(clock_in,clock_out);
input clock_in; // input clock on FPGA
output clock_out; // output clock after dividing the input clock by divisor
reg[27:0] counter=28'd0;
parameter DIVISOR = 28'd1000;
// The frequency of the output clk_out
// = The frequency of the input clk_in divided by DIVISOR
// For example: Fclk_in = 50Mhz, if you want to get 1Hz signal to blink LEDs
// You will modify the DIVISOR parameter value to 28'd50.000.000
// Then the frequency of the output clk_out = 50Mhz/50.000.000 = 1Hz
always @(posedge clock_in)
begin
    counter <= counter + 28'd1;
end
endmodule
```

```

        if(counter>=(DIVISOR-1))
            counter <= 28'd0;
        end
        assign clock_out = (counter<DIVISOR/2)?1'b0:1'b1;
    endmodule

module single_clock
(
input clk, trig,
output reg out
);

    reg done;

    always @(posedge clk)
        if(trig & ~done) begin
            out <= 1'b1;
            done <= 1'b1;
        end
        else
            if(trig)
                out <= 1'b0;
            else
                done <= 1'b0;

endmodule

module counter
(
    input cnt, reset, latch,
    output reg [15:0] out = 0
);

    reg [15:0] count_reg = 0;

    always @(posedge latch)
        out <= count_reg;

    always @(posedge cnt, posedge reset)
        if(reset)
            count_reg <= 16'd0;
        else
            if(count_reg < 16'hffff)
                count_reg <= count_reg + 1;

endmodule

// Quartus Prime Verilog Template
// Safe state machine

module ctrl_fsm
(
    input  clk, reset, tx_ready, transmit_request,
    input [11:0] in,
    output reg [7:0] data_out,
    output reg tx_allow
);

    reg [5:0] package_select = 0;
    reg [5:0] loop_cnt = 0;
    reg reg_reset = 0;
    reg reg_latch = 0;

    wire [15:0] ch_data0;
    wire [15:0] ch_data1;
    wire [15:0] ch_data2;
    wire [15:0] ch_data3;
    wire [15:0] ch_data4;
    wire [15:0] ch_data5;
    wire [15:0] ch_data6;
    wire [15:0] ch_data7;
    wire [15:0] ch_data8;
    wire [15:0] ch_data9;
    wire [15:0] ch_data10;
    wire [15:0] ch_data11;

```



```

counter cnt0(in[0], reg_reset, reg_latch, ch_data0);
counter cnt1(in[1], reg_reset, reg_latch, ch_data1);
counter cnt2(in[2], reg_reset, reg_latch, ch_data2);
counter cnt3(in[3], reg_reset, reg_latch, ch_data3);
counter cnt4(in[4], reg_reset, reg_latch, ch_data4);
counter cnt5(in[5], reg_reset, reg_latch, ch_data5);
counter cnt6(in[6], reg_reset, reg_latch, ch_data6);
counter cnt7(in[7], reg_reset, reg_latch, ch_data7);
counter cnt8(in[8], reg_reset, reg_latch, ch_data8);
counter cnt9(in[9], reg_reset, reg_latch, ch_data9);
counter cnt10(in[10], reg_reset, reg_latch, ch_data10);
counter cnt11(in[11], reg_reset, reg_latch, ch_data11);

reg [7:0] status_reg = 8'haa;

always @* begin
    case(package_select)
        5'd0: data_out = status_reg;
        5'd1: data_out = ch_data0[7:0];
        5'd2: data_out = ch_data0[15:8];
        5'd3: data_out = ch_data1[7:0];
        5'd4: data_out = ch_data1[15:8];
        5'd5: data_out = ch_data2[7:0];
        5'd6: data_out = ch_data2[15:8];
        5'd7: data_out = ch_data3[7:0];
        5'd8: data_out = ch_data3[15:8];
        5'd9: data_out = ch_data4[7:0];
        5'd10: data_out = ch_data4[15:8];
        5'd11: data_out = ch_data5[7:0];
        5'd12: data_out = ch_data5[15:8];
        5'd13: data_out = ch_data6[7:0];
        5'd14: data_out = ch_data6[15:8];
        5'd15: data_out = ch_data7[7:0];
        5'd16: data_out = ch_data7[15:8];
        5'd17: data_out = ch_data8[7:0];
        5'd18: data_out = ch_data8[15:8];
        5'd19: data_out = ch_data9[7:0];
        5'd20: data_out = ch_data9[15:8];
        5'd21: data_out = ch_data10[7:0];
        5'd22: data_out = ch_data10[15:8];
        5'd23: data_out = ch_data11[7:0];
        5'd24: data_out = ch_data11[15:8];
    endcase
end

// Declare the state register to be "safe" to implement
// a safe state machine that can recover gracefully from
// an illegal state (by returning to the reset state).
(* syn_encoding = "safe" *) reg [1:0] state;

// Declare states
parameter idle = 0, start_tx = 1, wait_tx = 2, rst_regs = 3;

// Output depends only on the state
always @ (state) begin
    case (state)
        idle:
            begin
                package_select = 5'd0;
                tx_allow = 1'b0;
                reg_reset = 1'b0;
            end
        start_tx:
            begin
                package_select = loop_cnt;
                tx_allow = 1'b1;
                reg_reset = 1'b0;
            end
        wait_tx:
            begin
                package_select = loop_cnt;
                tx_allow = 1'b0;
                reg_reset = 1'b0;
            end
        rst_regs:
    end
end

```

```

        begin
            package_select = 5'd0;
            tx_allow = 1'b0;
            reg_reset = 1'b1;
        end
        default:
        begin
            package_select = 5'd0;
            tx_allow = 1'b0;
            reg_reset = 1'b0;
        end
    endcase
end

// Determine the next state
always @ (posedge clk or posedge reset) begin
    if (reset)
        state <= idle;
    else
        case (state)
            idle:
            begin
                loop_cnt = 5'd0;
                if(transmit_request == 1'b1) begin
                    state <= rst_regs;
                    reg_latch <= 1'b1;
                end
                else
                    state <= idle;
            end
            start_tx:
                state <= wait_tx;
            wait_tx:
                if (tx_ready) begin
                    if(loop_cnt < 25) begin
                        state <= start_tx;
                        loop_cnt <= loop_cnt + 1'b1;
                    end
                    else
                        state <= idle;
                end
                else
                    state <= wait_tx;
            rst_regs: begin
                state <= start_tx;
                reg_latch <= 1'b0;
            end
        endcase
end

endmodule

```

```

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
// File Downloaded from http://www.nandland.com
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
// This file contains the UART Transmitter. This transmitter is able
// to transmit 8 bits of serial data, one start bit, one stop bit,
// and no parity bit. When transmit is complete o_Tx_done will be
// driven high for one clock cycle.
//
// Set Parameter CLKS_PER_BIT as follows:
// CLKS_PER_BIT = (Frequency of i_Clock)/(Frequency of UART)
// Example: 10 MHz Clock, 115200 baud UART
// (10000000)/(115200) = 87

```

```

module uart_tx
#(parameter CLKS_PER_BIT = 87)
(
    input    i_Clock,
    input    i_Tx_DV,
    input [7:0] i_Tx_Byte,
    output    o_Tx_Active,
    output reg o_Tx_Serial,
    output    o_Tx_Done
);

```



```

        r_Bit_Index <= 0;
        r_SM_Main   <= s_TX_STOP_BIT;
    end
end
end // case: s_TX_DATA_BITS

// Send out Stop bit. Stop bit = 1
s_TX_STOP_BIT :
begin
    o_Tx_Serial <= 1'b1;

    // Wait CLKS_PER_BIT-1 clock cycles for Stop bit to finish
    if (r_Clock_Count < CLKS_PER_BIT-1)
        begin
            r_Clock_Count <= r_Clock_Count + 1;
            r_SM_Main     <= s_TX_STOP_BIT;
        end
    else
        begin
            r_Tx_Done     <= 1'b1;
            r_Clock_Count <= 0;
            r_SM_Main     <= s_CLEANUP;
            r_Tx_Active   <= 1'b0;
        end
    end // case: s_Tx_STOP_BIT

// Stay here 1 clock
s_CLEANUP :
begin
    r_Tx_Done <= 1'b1;
    r_SM_Main <= s_IDLE;
end

default :
    r_SM_Main <= s_IDLE;

endcase
end

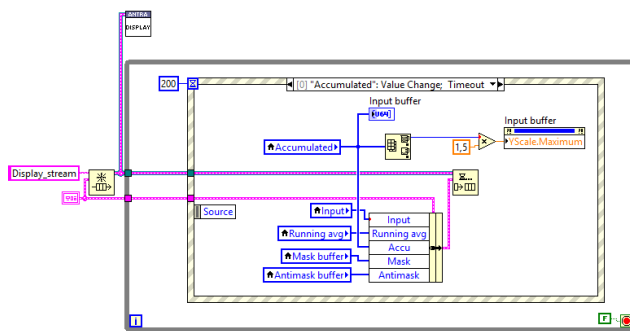
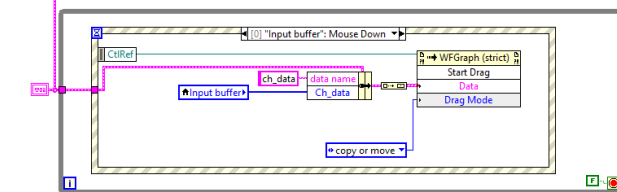
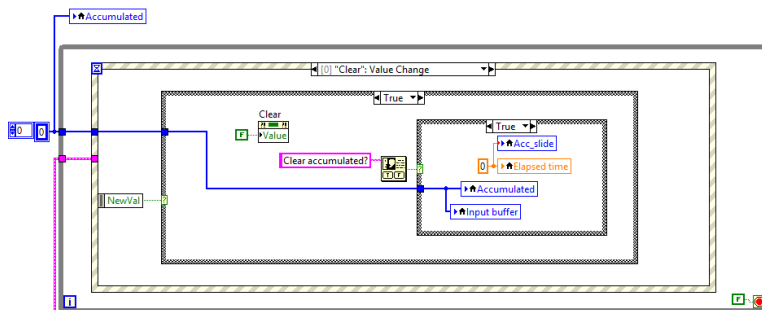
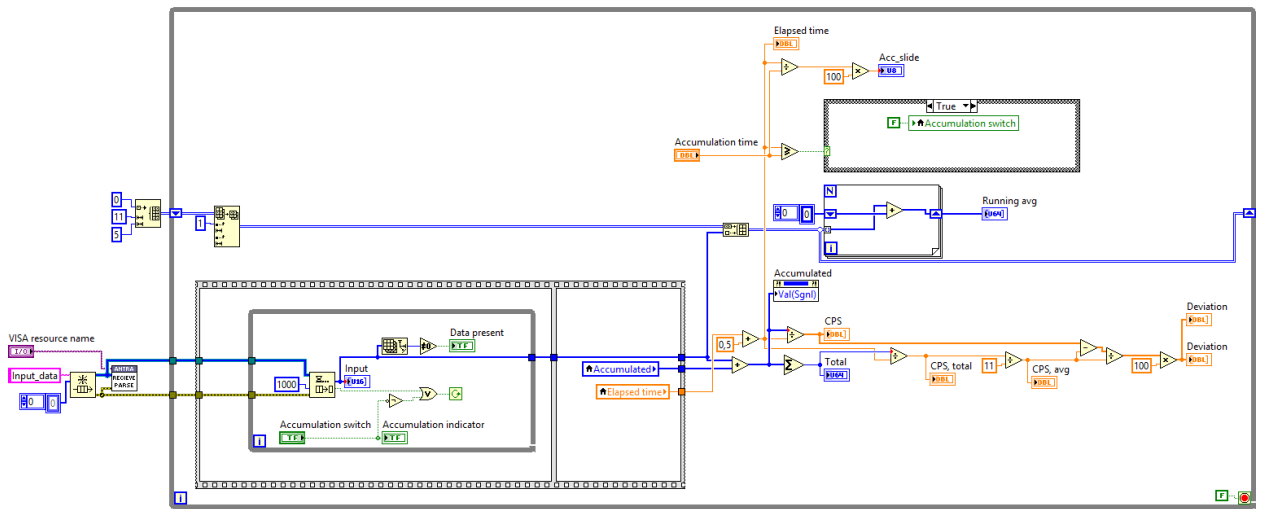
assign o_Tx_Active = r_Tx_Active;
assign o_Tx_Done   = r_Tx_Done;

endmodule

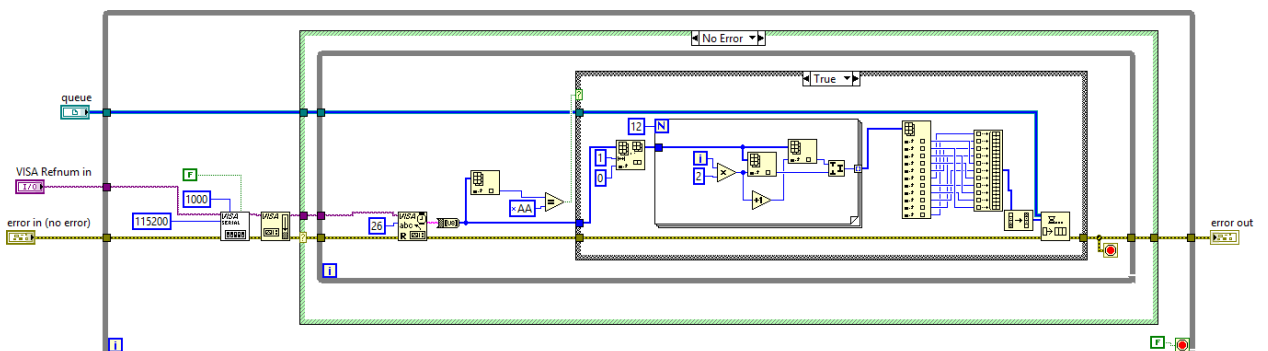
```

Додаток В – LabVIEW-код програмного забезпечення

main.vi



recieve_and_parse.vi



display.vi

