

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЄЗЕРСЬКИЙ НІКІТА ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК 520.6.05/621.3.084.6

**ДИСЕРТАЦІЯ
МОДУЛЬ ЦОС ДЛЯ ВИВЧЕННЯ СЕЙСМІЧНО-МАГНІТОСФЕРНОЇ
КОРЕЛЯЦІЇ**

172 Телекомунікації та радіотехніка
17 Електроніка та телекомунікації

Подається на здобуття наукового ступеня доктор філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Н.В. Єзерський

Науковий керівник: Мовчанюк Андрій Валерійович, кандидат технічних наук,
доцент

Київ – 2023

АНОТАЦІЯ

Езерський Н.В. Модуль ЦОС для вивчення сейсмічно-магнітосферної кореляції. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктор філософії з галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2023.

Землетруси завдають великої шкоди як у матеріальному вимірі, так і забирають багато людських життів. Було запропоновано багато різноманітних методів їх прогнозування, але достовірність таких методів є вкрай низькою. В ході вивчення напрямку досліджень для було обрано шлях дослідження потоків плазми у радіаційних поясах Землі.

Вперше збурення радіаційних поясів Землі було зафіксовано ще у 1964 році, також було запущено декілька супутникових місій з метою дослідження потоків плазми на низькій навколоземній орбіті, але вивчивши матеріали науковців про висновки, щодо фіксації передвісника землетрусу не можна створити достовірну модель його прогнозування.

Для аналізу змін концентрації потоків плазми в поясах Ван-Аллена було прийнято рішення обрати метод ідентифікації типу та сорту заряджених частинок високих енергій питомих втрат енергії та повної енергії з розділів ядерної фізики запуском малогабаритного реєстратора-аналізатора потоків плазми на навколоземну орбіту у форматі наносупутника.

На жаль, через сучасні проблеми економічного, соціального характеру та реалізації різних стадій проекту групами інженерів, що ніяк не взаємодіють між собою накладаються додаткові проблеми з фінансуванням та, відповідно, серіями випробувань на шляху до реалізації проекту, тож постає необхідність у заміні

серії випробувань іншими операціями для налагодження роботи усіх складових наносупутника разом.

Метою даної роботи є розроблення науково-методичних підходів у методиках сортування заряджених частинок за їхніми типами та сортами, зареєстровані системою сцинтиляційних детекторів для накопичення статистики та фіксації передвісника землетрусу.

У дисертаційній роботі вирішено такі **науково-технічні завдання**:

- Виявити найдоцільніші в застосуванні методи прогнозу сейсмічної активності.

- Встановити критерії достовірності відпрацювання алгоритмів сортування заряджених частинок за їхніми типами та сортами.

- Описати єдиною математичною моделлю джерела шуму для їхньої оптимізації

- Удосконалити методики покращення співвідношення сигнал/шум.

- З'ясувати такі параметри супутникового каналу зв'язку, що зведуть до мінімуму кількість прийнятих помилок.

- Адаптувати характеристики спектрометричних каналів для оптимізації процедури калібрування модулю ЦОС.

- Розробити модуль ЦОС фіксації передвісників землетрусу реалізуючи алгоритми сортування заряджених частинок

- Розробити модуль імітатора сигналів з сцинтиляційного детектора для оптимізації процедури калібрування модулю ЦОС.

Основний зміст дисертаційної дослідницької роботи наведено в п'яти розділах, де представлено та обґрунтовано основний результат.

У вступній частині підтверджена актуальність роботи, сформульована мета, завдання та методи дослідження, надана інформація про наукову новизну, а також практичне значення отриманих результатів.

В першому розділі було проведено огляд методів прогнозування землетрусів, процес виникнення сейсмічної активності, опис феномену радіаційних поясів Землі, методу ідентифікації типу та сорту заряджених частинок високих енергій питомих втрат енергії та повної енергії та досвіду попередніх наукових місій. Наприкінці розділу було сформульовано мету дослідження та висунуто вимоги до модулю ЦОС.

В другому розділі описується розробка алгоритму з ідентифікації сортів та енергій заряджених частинок для вивчення явища сейсмічно-магнітосферної кореляції. Початковою точкою було обрано результати розрахунку розподілу енергій електронів і протонів, продетектованих системою з сцинтиляційних детекторів методом Монте-Карло з використанням ПЗ CERN GEANT-4. В підсумку було розроблено програму, за допомогою якої можна здійснити перевірку достовірності розподілу кількості частинок по діапазонах енергій при різних співвідношеннях С/Ш, що є перевіркою вірності функціонування алгоритму.

В третьому розділі було розроблено модуль ЦОС, реалізуючи алгоритм з ідентифікації сортів та енергій заряджених частинок. Показано взаємозв'язок між алгоритмом ідентифікації та програмно-апаратною частиною модулю ЦОС. При побудові класифікатору заряджених частинок за сортами та енергіями було запропоновано перехід від енергій, з якими заряджені частинки було поглинуто детекторною системою до напруги, яка дискретизується АЦП та фіксацією кодів АЦП з якими збільшується лічильник відповідних діапазонів енергій на борту модулю ЦОС.

В четвертому розділі запропоновано механізм випробування модулю ЦОС без залучення інших складових корисного навантаження наносупутника та іонізаційної камери. Також показано програмно-апаратну реалізацію модулю імітатора сигналів зі сцинтиляційних детекторів.

В п'ятому розділі йдеться про методику прогнозування та зменшення рівня шумів, що будуть накладатися на результати через нюанси проектування підсилювачів слабких сигналів модулю АОС та встановлення критерію достатності придушення шумів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в:

1) Дістала подальшого розвитку модель для ідентифікації сортів та енергій заряджених частинок для вивчення явища сейсмічно-магнітосферної кореляції.

2) Вперше було запропоновано метод заміщення корисного навантаження та іонізаційної камери імітатором сигналів зі сцинтиляційних детекторів з довільним співвідношенням С/Ш для налаштування модулю ЦОС.

3) Вперше запропоновано методику оптимізації аналогового спектрометричного каналу для зменшення впливу рівня шумів на достовірність реєстрації сортів та енергій частинок у потоках плазми.

Практичне значення отриманих результатів полягає в:

1) Прикладному застосуванні моделі для ідентифікації сортів та енергій заряджених частинок, створенням модулю ЦОС для вивчення явища сейсмічно-магнітосферної кореляції.

2) Сформульовано метод спрощення процедури калібрування модуля ЦОС, шляхом заміщення високовартісних процедур налаштування корисного навантаження одним дешевим модулем імітатора сигналів зі сцинтиляційних детекторів.

3) Створені рекомендації, щодо подальшої модернізації реєстратора-аналізатора заряджених частинок.

Результати цього дослідження можуть бути використані при розробці аналізаторів потоків плазми заряджених частинок, проектуванні підсилювачів слабких сигналів, та покращення шумових характеристик метрологічного обладнання в цілому. Основні результати використовуються в лабораторних та

практичних занять з навчальної дисципліни [RE-248] «Дизайн цифрових та аналогових схем. Частина 1» для студентів за спеціальністю 172 — «Телекомунікації та радіотехніка»

Ключові слова: гіпервізор, вибірка даних, негаусові завади, математична модель, надійне керування, радар з синтезованою апертурою, матриця передачі, високочутливий датчик, маскувальний шум, сейсмічні сигнали, модуляція, аналогова обробка сигналів, цифрова обробка сигналів, співвідношення сигнал-шум.

ABSTRACT

Yezerkyi N. DSP module for seismic-magnetosphere correlation research.

– Qualification manuscript.

PhD thesis in the field of knowledge 17 Electronics, and Telecommunications in specialty 172 Electronic Communications and Radio Engineering. – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2023.

Earthquakes cause great harm both in the material dimension and take away many human lives. Many different methods for predicting them have been proposed, but the reliability of such methods is extremely low. In the course of studying the direction of research, a path was chosen to study plasma flows in the radiation belts of the Earth.

For the first time, the perturbation of the Earth's radiation belts was recorded back in 1964, several satellite missions were also launched to study plasma flows in low Earth orbit, but having studied the materials of scientists on the conclusions regarding the fixation of an earthquake precursor, it is impossible to create a reliable model for predicting it.

To analyze changes in the concentration of plasma flows in the Van Allen belts, it was decided to choose a method for identifying the type and type of high-energy charged particles of specific energy losses and total energy from the sections of nuclear physics by launching a small-sized plasma flow recorder-analyzer into a near-Earth orbit in the format.

Unfortunately, due to modern problems of an economic, social nature and the implementation of various stages of the project by groups of engineers who do not interact with each other, additional problems are imposed with funding and, accordingly, with a series of tests on the way to the implementation of the project, so there is a need to replace the series of tests other operations to establish the work of all components of the nanosatellite together.

The purpose of this work is to develop algorithms for sorting charged particles according to their types and sorts, registered by a system of scintillation detectors, in order to accumulate statistics and fix an earthquake precursor. The developed DSP module should fit into the format of a cube with a side of 10 cm and implement the method of anticoincidence of detected signals from scintillation detectors. If there are clear signals-precursors of earthquakes, it will be possible to prevent the loss of partly material values and human casualties. Secondary objectives of the study can be:

- verification of the existence of an additional internal electron radiation belt at $L \sim 1.6$ for particles with energies from tens of keV to $E \sim 0.5$ MeV in geomagnetic calm conditions;
- determination of the energy spectra of particles in stationary radiation belts and in a disturbance outside the belts;
- determination of the degree of anisotropy of the directions of electron velocities inside the radiation belts and in disturbance at the edges of the Van Allen belts and beyond them during manifestations of solar, magnetosphere and ionosphere activity;
- search and determination of distinguishing features between the perturbation of electrons generated due to magnetosphere, solar and interplanetary activity, and bursts correlated with seismic activity;

In the first chapter, an overview of earthquake prediction methods, the process of seismic activity occurrence, a description of the phenomenon of the Earth's radiation belts, a method for identifying the type and variety of high-energy charged particles of specific energy loss and total energy, and the experience of previous scientific missions was carried out. At the end of the section, the purpose of the study was formulated and requirements for the DSP module were put forward.

The second section describes the development of an algorithm for identifying types and energies of charged particles for studying the phenomenon of seismic-magnetosphere correlation. The starting point was the results of calculating the energy

distribution of electrons and protons detected by a system of scintillation detectors by the Monte Carlo method using the CERN GEANT-4 software. As a result, a program was developed that can be used to check the reliability of the distribution of the number of particles over energy ranges at various S/N ratios, which is a check of the correct functioning of the algorithm.

In the third chapter, the DSP module was developed, implementing an algorithm for identifying varieties and energies of charged particles. The relationship between the identification algorithm and the hardware and software part of the DSP module is shown. When constructing a classifier of charged particles by types and energies, a transition was proposed from the energies with which the charged particles were absorbed by the detector system to the voltage with which the counter of the corresponding energy ranges on board the DSP module increases.

The fourth section proposes a mechanism for testing the DSP module without involving other components of the nanosatellite payload and the ionization chamber. The software and hardware implementation of the signal simulator module from scintillation detectors is also shown.

The fifth section discusses a technique for predicting and reducing the level of noise that will be superimposed on the results due to the design features of the small signal amplifiers of the ASP module.

The scientific novelty of the results obtained lies in:

- 1) An algorithm for identifying types and energies of charged particles was developed to study the phenomenon of seismic-magnetosphere correlation.
- 2) For the first time, a method was proposed to replace the majority of the payload and the ionization chamber with a simulator of signals from scintillation detectors to reduce the cost of setting up the DSP module.
- 3) The designed ASP module was analyzed and a method for changing its configuration for reducing the influence of the noise level on the reliability of registration of varieties and energies of particles in plasma flows.

The practical significance of the results obtained lies in:

- 1) Hardware-software implementation of the algorithm for identifying varieties and energies of charged particles to study the phenomenon of seismic-magnetosphere correlation due to the development of the DSP module.
- 2) Replacing the costly payload setup routines with a single cheap signal simulator module from scintillation detectors.
- 3) Recommendations are formulated for potential modernization of the charged particle analyzer. The results of this study can be used in the development of plasma flow analyzers for charged parts, in the design of weak signal amplifiers, and in the improvement of the noise characteristics of metrological equipment as a whole.

The main results are used in the laboratory and practical classes in the discipline [RE-248] "Design of digital and analog circuits. Part 1" for students majoring in 172 — "Telecommunications and Radio Engineering".

Keywords: Hypervisor, data sampling, non-Gaussian noise, mathematical model, robust control, synthetic aperture radar, transfer matrix, masking noise, high-sensitive sensor, seismic signals, modulation, analog signal processing, digital signal processing, signal-to-noise ratio.

Список публікацій здобувача, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Єзерський Н. Оптимізація аналогового модулю за шумовими характеристиками у бортовому детекторі реєстратора-аналізатора для ідентифікації заряджених частинок / Н. Єзерський, А. Мовчанюк // Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології. – 2023. – Т. 1, № 5. – С. 93–104. doi: 10.36994/2788-5518-2023-01-05-12
2. Єзерський Н. Алгоритм з ідентифікації сортів та енергій заряджених частинок для вивчення явища сейсмічно-магнітосферної кореляції [Електронний ресурс] / Н. Єзерський, А. Мовчанюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2023. – № 3. – С. 66–71. – Режим доступу: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-168-3-66-71>
3. Єзерський Н. Імітатор спрацювань детекторів заряджених частинок та модуль цифрової обробки сигналу малогабаритного спектрометра елементарних частинок [Електронний ресурс] / Н. Єзерський, А. Мовчанюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2023, № 4. – Режим доступу: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-169-4-92-97>
4. Simulation of CubeSat caliber particle detector “MiRA_ep” response to energetic electrons and protons using GEANT4 package [Electronic resource] / N. Yezerskyi [et al.] // Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments. – 2019. – Vol. 11176. – P. 1–10. – Mode of access: <https://doi.org/10.1117/12.2536748>
5. Yezerskyi N. Concept of implementation the digital signal processing of the miniature particle detector MIRA_ep in the cubesat format / N. Yezerskyi, A. Movchanuk, O. Dudnik // Radio-technical fields, signals, apparatus and systems: Abstracts International Conference, Kyiv, 18 листоп. 2019 р. – Київ, 2019. – С. 159–161.

6. Єзерський Н. Вибір частотного діапазону та оптимізація каналу зв'язку Земля-наносупутник / Н. Єзерський, А. Мовчанюк // Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи : Міжнар. науково-техн. конф., Київ, 17 листоп. 2020 р. – Київ, 2020. – С. 96–99.

7. Yezerskyi N. Electronic simulator of signals derived from scintillation detectors in spectrometric identification of high-energy charged particles / N. Yezerskyi, A. Movchanuk, O. Dudnik // Radio-technical fields, signals, apparatus and systems : Abstracts International Conference, Kyiv, 9 November 2021. – Kyiv, 2021. – P. 75–77.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АОС – аналогова обробка сигналів;
АУОС – автоматична універсальна орбітальна станція;
АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;
ЗЗ – зворотній зв'язок;
ЗЧПП – зарядо чутливий підсилювач-перетворювач;
кeВ – кіло електрон Вольт;
ККД – Коефіцієнт корисної дії;
КМОН – комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник;
МеВ – Мега електрон Вольт;
МП – мікропроцесор;
ОП – операційний підсилювач;
ПАМА – Південно Американська магнітна аномалія
ПЗ – програмне забезпечення;
ПК – персональний комп'ютер;
ПЛІС – програмована логічна інтегральна схема;
САПР – система автоматизованого проектування;
С/Ш – співвідношення сигнал/шум;
ФП – формуючий підсилювач;
ФНЧ – фільтр низьких частот;
ЦАП –цифро-аналоговий перетворювач;
ЦОС – цифрова обробка сигналів;
АВС – analog buffer cascade;
АНВ – Advanced High-performance Bus;
АРВ – Advanced Peripheral Bus;
ASP – analogue signal processing;
AWGN – Additive white Gaussian noise;

BER – Bit Error Ratio;
EPS – Entry-Level Power Supply;
DBC – digital buffer cascade;
DMA – direct memory access;
DSP – digital signal processing;
FIFO – First In, First Out;
GPIO – General-Purpose Input/Output;
GPS – Global Positioning System;
LEO – Low Earth Orbit;
MPPC – Multi-Pixel Photon Counter;
OBC – on-board computer;
OQPSK – Offset quadrature phase-shift keying;
PAM – Pulse Amplitude Modulation;
PSK – Phase Shift Keying;
QAM – Quadrature Amplitude Modulation;
SNR – signal-to-noise ratio;
UART – universal asynchronous receiver/transmitter;
UHF – ultra high frequency;
USB – universal serial bus;
VAB – Van Allen Belts;
VHF – very high frequency;

Зміст

1. ОГЛЯД ЯВИЩА СЕЙСМІЧНО-МАГНІТОСФЕРНОЇ КОРЕЛЯЦІЇ ТА ІНШИХ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗЕМЛЕТРУСІВ	23
1.1 Розподілення сейсмічної активності по земному шару	23
1.2 Методи оцінки з руйнувань, завданих підземними поштовхами	24
1.3 Потенційна шкода, яку завдають землетруси	25
1.4 Методи прогнозу сейсмічної активності.....	27
1.4.1 Перед та постсейсмічні методи прогнозу сейсмічної активності	27
1.4.2 Методи прогнозування, що спираються на базис прикладних наукових дисциплін	27
1.4.3 Короткий аналіз методів прогнозу сейсмічної активності	28
1.5 Опис радіаційних методів передбачення сейсмічної активності.....	30
1.5.1 Вимірювання радіоактивного радону та супутникове спостереження деформацій радіаційних поясів Землі	30
1.5.2 Опис феномену радіаційних поясів Землі	32
1.5.3 Вплив сонячного вітру на структуру радіаційних поясів Землі.....	36
1.5.4 Досвід попередніх наукових місій, що використовували подібні методи досліджень	37
1.6 Постановка мети дослідження.....	40
Висновки до першого розділу дисертаційного дослідження.....	42
2. РОЗРОБКА МОДЕЛІ З ІДЕНТИФІКАЦІЇ СОРТІВ ТА ЕНЕРГІЙ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ЯВИЩА СЕЙСМІЧНО-МАГНІТОСФЕРНОЇ КОРЕЛЯЦІЇ	43
2.1 Обґрунтування вибору методу реєстрації заряджених частинок	43
2.2 Використання логіки антизбігів для ідентифікації частинок	48
2.3 Визначення типу зафіксованих детектором часток.....	50
2.4 Формування загального алгоритму ідентифікації сортів та енергій заряджених частинок	55
2.5 Формування підпрограм алгоритму з ідентифікації сортів та енергій заряджених частинок	58
2.6 Концепція апаратної реалізації алгоритму	58

	16
2.7	Перевірка коректності роботи алгоритму 60
2.8	Вибір формату розміщення дослідницької апаратури 63
	Висновки до другого розділу дисертаційного дослідження 65
3.	РОЗРОБКА МОДУЛЮ ЦОС 66
3.1	Описання цілей та задач модулю ЦОС 66
3.2	Опис роботи наносупутника за його структурою 67
3.2.1	Опис та призначення сигналів, що протікають по схемі 69
3.3	Опис схеми електричної принципової 70
3.3.1	Блок перетворювача диференційного сигналу в уніполярний 73
3.3.2	Включення перетворювача логічних рівнів 74
3.3.3	Розв'язка за живленням цифрової та аналогової частини схеми 75
3.3.4	Вибір варіанту взаємодії модулю ЦОС з бортовим комп'ютером 78
3.4	Опис роботи модулю ЦОС по програмі 78
3.4.1	Робота АЦП по програмі 78
3.4.2	Робота блоку USART 79
3.4.3	Робота блоку DMA 80
3.4.4	Робота блоку DAC 80
3.4.5	Програмна ідентифікація частинок 81
3.5	Вибір частотного діапазону каналу супутникового зв'язку та його оптимізація 82
	Висновки до третього розділу дисертаційного дослідження 86
4.	РОЗРОБКА МЕТОДУ ІМІТАЦІЇ СИГНАЛІВ ЗІ СЦИНТИЛЯЦІЙНИХ ДЕТЕКТОРІВ 88
4.1	Формування цілей та задач імітатора сигналів зі сцинтиляційних детекторів 88
4.2	Вибір конфігурації та опис роботи імітатора сигналів зі сцинтиляційних детекторів за структурною схемою 89
4.3	Адаптація характеристик спектрометричних каналів для побудови імітатора сигналів 91
4.4	Варіанти взаємодії імітатора сигналів з бортовим комп'ютером 92
4.5	Розробка апаратної реалізації імітатора 94

4.6 Розробка програмного забезпечення імітатора сигналів зі сцинтиляційних детекторів	98
Висновки до четвертого розділу дисертаційного дослідження	100
5. МЕТОДИКА ОЦІНКИ ТА ЗМЕНШЕННЯ РІВНЯ ШУМІВ АНАЛОГОВОГО СПЕКТРОМЕТРИЧНОГО КАНАЛУ	102
5.1 Огляд джерел шуму, які потенційно мають вплив на достовірність отриманих результатів	102
5.2 Детальний розбір обраних джерел шуму, що впливатимуть на достовірність отриманих результатів.....	103
5.3 Вибір ключових елементів модулю АОС, що потребують оптимізації	105
5.4 Процес приведення шумів каскаду до входу підсилювача	107
5.5 Методика зменшення рівня шумів	112
5.6 Методика прогнозування допустимого коефіцієнту шуму при наявності емпорів сигналів та інформації про динамічний діапазон	117
5.7 Методика визначення достатностнього рівня шумів для достовірної дискретизації сигналу	118
Висновки до п'ятого розділу дисертаційного дослідження	119
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ.....	121
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ І ПОСИЛАНЬ	123
- ДОДАТОК А	131
- ДОДАТОК Б.....	134
- ДОДАТОК В.....	147
- ДОДАТОК Г.....	149
- ДОДАТОК Д.....	151
- ДОДАТОК Е.....	158

ВСТУП

Актуальність теми. Землетруси завдають великої шкоди як у матеріальному вимірі, так і забирають багато людських життів. Було запропоновано багато різноманітних методів їх прогнозування, але достовірність таких методів є вкрай низькою. В ході вивчення напрямку досліджень для вивчення можливості передбачення землетрусів було обрано шлях дослідження потоків плазми у радіаційних поясах Землі.

Вперше збурення радіаційних поясів Землі було зафіксовано ще у 1964 році, також було запущено декілька супутникових місій з метою дослідження потоків плазми на низькій навколоземній орбіті, але вивчивши матеріали науковців про висновки, щодо фіксації передвісника землетрусу не можна створити достовірну модель його прогнозування, або виокремити ключові події, які можна використати за основу.

Для аналізу змін концентрації потоків плазми в поясах Ван-Аллена було прийнято рішення обрати метод ідентифікації типу та сорту заряджених частинок високих енергій питомих втрат енергії та повної енергії з розділів ядерної фізики та імпантувати у запланований до запуску малогабаритний реєстратор-аналізатор потоків плазми високих енергій на навколоземну орбіту у форматі наносупутника.

На жаль, через сучасні проблеми економічного, соціального та воєнного характеру і реалізації різних стадій проекту групами інженерів, що ніяк не взаємодіють між собою накладаються додаткові проблеми з фінансуванням та, відповідно, серіями випробувань на шляху до реалізації проекту, тож постає необхідність у пошуку та заміні серії випробувань іншими, оптимальнішими, операціями з огляду на обмеження в часі та фінансах для налагодження роботи усіх складових наносупутника разом.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є розроблення науково-методичних підходів у методиках сортування заряджених частинок за

їхніми типами та сортами, зареєстровані системою сцинтиляційних детекторів для накопичення статистики та фіксації передвісника землетрусу.

При наявності чітких сигналів-передвісників землетрусів можливо буде запобігти втраті частково матеріальних цінностей та людських жертв.

Основними *завданнями* дослідження є:

- Виявити найдоцільніші в застосуванні методи прогнозу сейсмічної активності.
- Встановити критерії достовірності відпрацювання алгоритмів сортування заряджених частинок за їхніми типами та сортами.
- Описати єдиною математичною моделлю джерела шуму для їхньої оптимізації
- Удосконалити методики покращення співвідношення сигнал/шум.
- З'ясувати такі параметри супутникового каналу зв'язку, що зведуть до мінімуму кількість прийнятих помилок.
- Адаптувати характеристики спектрометричних каналів для оптимізації процедури калібрування модулю ЦОС.
- Розробити модуль ЦОС фіксації передвісників землетрусу реалізуючи алгоритми сортування заряджених частинок
- Розробити модуль імітатора сигналів з сцинтиляційного детектора для оптимізації процедури калібрування модулю ЦОС.

Пошук та визначення відмінних рис між збуренням електронів, згенерованих внаслідок магнітосферної, сонячної та міжпланетної активності і сплесками, корельованими з сейсмічною активністю.

Об'єктом дослідження є процес виявлення спектрометричних сигналів, що спричиняють проліт зарядженої частинки через детекторну систему.

Предметом дослідження є сукупність теоретичних та практичних положень для класифікації заряджених частинок за типами та діапазонами енергій.

Методи дослідження. В роботі використовуються методи ядерної фізики, математичного програмування та теорії кіл. Для моделювання фізичних процесів та розрахунків використовувалися пакети програм числового аналізу, електронних симуляторів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в:

1) Дістала подальшого розвитку модель для ідентифікації сортів та енергій заряджених частинок для вивчення явища сейсмічно-магнітосферної кореляції.

2) Вперше було запропоновано метод заміщення корисного навантаження та іонізаційної камери імітатором сигналів зі сцинтиляційних детекторів з довільним співвідношенням С/Ш для налаштування модулю ЦОС.

3) Вперше запропоновано методику оптимізації аналогового спектрометричного каналу для зменшення впливу рівня шумів на достовірність реєстрації сортів та енергій частинок у потоках плазми.

Практичне значення отриманих результатів полягає в:

1) Прикладному застосуванні моделі для ідентифікації сортів та енергій заряджених частинок, створенням модулю ЦОС для вивчення явища сейсмічно-магнітосферної кореляції.

2) Сформульовано метод спрощення процедури калібрування модуля ЦОС, шляхом заміщення високовартісних процедур налаштування корисного навантаження одним дешевим модулем імітатора сигналів зі сцинтиляційних детекторів.

3) Створені рекомендації, щодо подальшої модернізації реєстратора-аналізатора заряджених частинок.

Результати цього дослідження можуть бути використані при розробці аналізаторів потоків плазми заряджених частин, проектуванні підсилювачів слабких сигналів на базі ОП та покращення шумових характеристик метрологічного/вимірювального обладнання в цілому.

Особистий внесок. Основні теоретичні висновки, результати моделювання в дисертаційній роботі отримані автором самостійно. У співпраці з науковим керівником сформульовано мету і завдання досліджень, висновки. Особистий внесок автора в наукових працях, опублікованих у співавторстві наступний: в [31] складено методку оцінки та оптимізації рівня шумів модулю АОС з перевіркою в пакеті симулятора для впевненості у результатах моделювання. В [28] автором дисертаційної роботи розроблено алгоритм ідентифікації сортів та енергій заряджених частинок для вивчення явища сейсмічно-магнітосферної кореляції та проведено випробовування алгоритму на вірність спрацювання в середовищі числового аналізу. В [30] описано розробку імітатора сигналів зі сцинтиляційного детектора та модулю ЦОС, що реалізує алгоритм, описаний в [24].

Апробація матеріалів дисертації відбулася на 4-х міжнародних конференціях:

1. Міжнародній науково-технічній конференції «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи – 2019» (РТПСАС-2019), Київ, Україна, 2019
2. Міжнародній науково-технічній конференції «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи – 2020» (РТПСАС-2020), Київ, Україна, 2020
3. Міжнародній науково-технічній конференції «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи – 2021» (РТПСАС-2021), Київ, Україна, 2021
4. Міжнародній науково-технічній конференції «Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019», Wilga, Poland, 2019

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 7 наукових робіт, в тому числі 3 статті в провідних фахових виданнях, 4 тези доповіді на міжнародних конференціях.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, шести додатків. Робота містить

157 (128 без додатків) сторінок, в тому числі 101 сторінка основного тексту, 68 рисунків, 7 таблиць. Список використаної літератури включає 50 найменувань. Додатки розміщено на 25 сторінках.

1. ОГЛЯД ЯВИЩА СЕЙСМІЧНО-МАГНІТОСФЕРНОЇ КОРЕЛЯЦІЇ ТА ІНШИХ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗЕМЛЕТРУСІВ

1.1 Розподілення сейсмічної активності по земному шару

Землетруси по земному шару розподілені нерівномірно. Найбільш активні зони-це Тихоокеанський пояс, де спричиняється близько 90% сейсмічної активності та Середземноморсько-Азійський, де стається 5-6% сейсмічної активності (рис. 1.1.) [27].

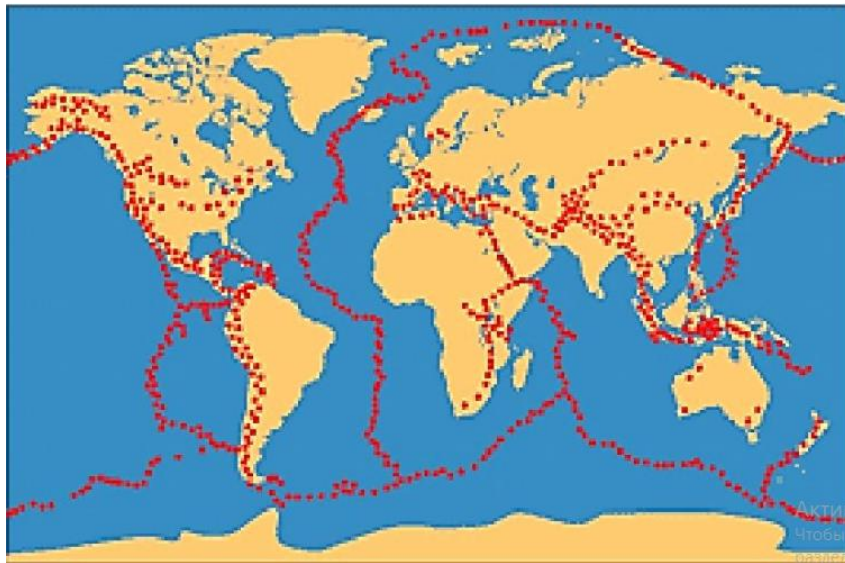


Рис.1.1 – Сейсмічні пояси Землі [45]

Середземноморсько-Азійський сейсмічний пояс проходить через територію України і зонами традиційного сейсмічного впливу в Україні є Закарпаття, Крим, Прикарпаття (Чернівці, Львів, Івано-Франківськ та Тернопіль), Одеська, Кропивницька, Хмельницька, Донецька та Вінницька області. Загалом, до зони значного сейсмічного ризику відноситься більше 20% території України (рис. 1.2.) на якій проживає близько 22% наших співгромадян, що становить мільйони людей [35].



Рис.1.2 – Карта очікуваної сейсмічної активності на території України [35]

1.2 Методи оцінки з руйнувань, завданих підземними поштовхами

Для уніфікації руйнівних властивостей, що завдають землетруси було розроблено декілька шкал:

- Медведєва-Шпонхойера-Карника використовується у Росії, складає 12 балів;
- Європейська макросейсмічна шкала застосовується в Європі, також 12 бальна;
- Модифікована шкала Меркалли у США також 12 балів;
- Шкала Японського метеорологічного агентства запроваджена в Японії, відомої своїми землетрусами складає 7 балів.

Але найчастіше користуються шкалою Ріхтера до прикладу, в [11], [18] виражають магнітуди саме за цією шкалою, а коли не вказана шкала за якою оцінюють магнітуду, то за замовчуванням мають на увазі шкалу Ріхтера.

Ця шкала визначає і класифікує такі величини як: силу і швидкість струсів земної кори при початку сейсмічної активності. Можна вважати спробою опису кількості коливань ґрунту, виміряні сейсмографом [32]. Для цього випадку шкала вимірювань є математичною формулою, а не якимось приладом та розраховується так:

$$M_L = \lg(A) + f, \quad (1.1)$$

де: f - коригувальна функція, яка обчислюється по таблиці в залежності від відстані до епіцентру.

Енергія землетрусу приблизно пропорційна $A^{3/2}$, тобто збільшення магнітуди на 1,0 відповідає збільшенню амплітуди коливань в 10 разів і збільшення енергії приблизно в 32 рази [48]. Сейсмічна величина – це, скоріше, величина вібрації, яку вона випускає.

Недоліки шкали Ріхтера [48]:

- Неможливість виміряти величину землетрусів магнітудою більше 8.
- Величина - це єдине число, яке не може повністю охарактеризувати складне явище таке, як землетрус. Землетруси з однаковою магнітудою можуть відрізнятися багатьма фундаментальними способами, в тому числі напрямками коливань і їх відносної амплітудою в різні періоди під час поштовхів. Ці відмінності можуть привести до землетрусів однакової величини, які мають суттєво різний рівень руйнівності.
- Фактично за допомогою сучасних чутливих сейсмографів можна ідентифікувати землетрус з від'ємним значенням за шкалою Ріхтера.

1.3 Потенційна шкода, яку завдають землетруси

При прогнозуванні землетрусів варто звертати увагу на об'єкти критичної інфраструктури. Посилення природного катаклізму техногенним-неприпустиме. Звісно, що сейсмічні ризики прораховуються при будівництві об'єктів, але їх

роботу треба зупиняти за деякий час до настання землетрусу, щоб уникнути досвіду хімічного, радіаційного та інших видів забруднення. Серед таких об'єктів можуть бути: електростанції, виробничі потужності, лікарні.

При вірному прогнозуванні мінімізуються втрати, як матеріальні, так і нематеріальні. Це досягається шляхом евакуації людей у безпечні зони та зупинкою виробництв. Але при спробах таких дій було спричинено фінансові втрати, оскільки в переважній більшості відбувалося невірне прогнозування землетрусів. Але, невірне прогнозування також завдає економічних збитків [16].

Тому наведемо приклади невірного прогнозування землетрусів, що сталися наприкінці ХХ-на початку ХХІ століття:

1. Землетрус на Гаїті: Після основного поштовху магнітудою 7 було зареєстровано безліч повторних поштовхів, з них 15 з магнітудою понад 5. За офіційними даними на 18 березня 2010 року кількість загиблих склало 222 570 осіб, які отримали поранення - 311 тис. чоловік, зниклих без вісти 869 чоловік. Матеріальний збиток оцінюється в 5,6 млрд євро. Без даху над головою залишилося близько 3 мільйонів чоловік [34], [41].

2. Землетрус в Індійському океані: 26 грудня 2004 року магнітуда землетрусу склала, за різними оцінками, від 9,1 до 9,3 будучи початково підводним землетрусом, зхрештою було викликано цунамі, через яке загинуло, за різними оцінками, від 225 тисяч до 300 тисяч чоловік [33].

3. Спітакський землетрус: землетрус магнітудою 9-10, що відбувся 7 грудня 1988 року. Загинули 25 тисяч чоловік (за іншими даними - до 150 тисяч), 140 тисяч стали інвалідами, 514 тисяч людей залишилися без даху над головою [47].

4. Серія землетрусів у Туреччині та Сирії, лютий 2023 року. Кількість жертв становить десятки тисяч осіб та спричинено великі руйнування будівель та інфраструктури вцілому.

1.4 Методи прогнозу сейсмічної активності

1.4.1 Перед та постсейсмічні методи прогнозу сейсмічної активності

Таке умовне трактування можна надати методам за часом надходження ознаки сейсмічної активності.

Постсейсмічні методи можна назвати статистичними, бо вони ґрунтуються на накопиченні статистики кількості землетрусів за певний період часу в певному регіоні. Це поклало початок до складення каталогів землетрусів та намагань до подальшого передбачення по цих накопичених даних. Але про точність майбутніх передбачень говорити не доводиться. Також існують закони Гутенберга–Ріхтера та Оморі, які допомагають підвищити точність вищезгаданого методу, бо закон Гутенберга–Ріхтера пов'язує магнітуду та загальну кількість землетрусів з врахуванням тектонічної структури регіону, а закон Оморі свідчить про те, що частота афтершоків спадає гіперболічно з плином часу [21], [40].

Передсейсмічні методи використовують здатність потужної сейсмічної активності до перетворення в кілька видів енергії, таких, як: акустична, електромагнітна, світлова, електромагнітна, ударна та інші. Тому людство почало пошук для опанування інших, потенційно більш перспективних методів прогнозування.

1.4.2 Методи прогнозування, що спираються на базис прикладних наукових дисциплін

Перерахуємо методи, потенційно придатні для використання при дослідженнях сейсмічної активності [43]:

Методи радіоастрономії:

1. Вимірювання температури Землі з супутників;

2. Вимірювання полів швидкостей руху окремих областей (деформацій) за допомогою лазерного, оптичного, радіовипромінювального обладнання, на різних висотах спостереження;

Методи геофізики:

1. Моніторинг об'ємно-напруженого стану глибин поверхні;
2. Вимірювання радіоактивного радону та витоку інших газів на поверхню Землі;
3. Вимірювання електричних і магнітних полів на поверхні Землі;
4. Вимірювання електроопору земної кори, що засноване на зменшенні електричного опору через пористість і волого насиченість ґрунту.
5. Вимірювання провідності середовища, електричних і магніто-телуричних струмів на невеликих глибинах;

Методи етології:

1. Спостереження поведінки живих організмів;

Методи геології:

1. Вимірювання рівня ґрунтових вод в неглибоких свердловинах;

Методи ядерної фізики (радіаційні методи):

1. Вимірювання концентрації заряджених частинок у навколосемних потоках плазми.

1.4.3 Короткий аналіз методів прогнозу сейсмічної активності

Вимірюванням температури Землі з супутнику передувала різка зміна температури в зоні розділу тропосфери і стратосфери. Ймовірно, явищем, що слугувало індикатором стала довгохвильова радіація, що відходить від Землі та аномальні зміни температури у вертикальній термічній структурі атмосфери (тропопаузі) [39].

Застосування багатьох геофізичних методів, здебільшого, потребує буріння свердловин та викопування розрізів. Видобуті дані такими методами можна

застосовувати для аналізу вельми обмеженої ділянки земної поверхні. Враховуючи неоднорідність середовища, що складають ґрунтові породи потрібна побудова складних функцій розповсюдження електромагнітних хвиль та знання детального розташування шарів місцевих порід. Загалом, для аналізу зовнішньої та внутрішньої оболонок Землі існує більше двадцяти методів [42], які можна умовно розподілити на 5 груп за середовищем дослідження: аерокосмічні, наземні, акваторіальні, гірські, картографічні. Та на 5 груп за фізичною природою: гравітаційні, магнітні, електромагнітні, сейсмічні, термічні, ядерно-фізичні. Але ці методи використовуються, здебільшого, для розвідки родовищ корисних копалин, придатність переважної більшості з цих методів для дослідження сейсмічної активності ще варто досліджувати, тому їх відкидаємо через ненадійність для використання в умовах поставленого завдання [42].

При вивченні методів етології передвісником землетрусу може слугувати зміна емоційного стану тварин, або цілеспрямоване прагнення до полишення місця, де має статися землетрус. Звісно, що час передбачення та залежність від епіцентру у тварин різна. Зазвичай, спостереження ведеться за такими тваринами як: собаки, кішки, коні, вівці, свійські птахи, корови, риби, хробаки [2]. Але перекласти методи етології та зоопсихології у числові характеристики не є можливим, тому продовжимо пошук інших методів.

Методи геології побудовані майже виключно на бурінні свердловин та оснащенні додатковими конструкціями навколо досліджуваної ділянки. При вимірюванні рівня ґрунтових вод, дослідники розташували на десятках метрів одна від одної, свердловини та заміряли зміну рівня води перед землетрусом. Зміна рівня води перед землетрусом склала 0,3 та 5 метрів, відповідно. Цим вдалося тільки довести складність мозаїчної структури ґрунту [43]. Також ці явища, що спостерігаються можуть і не свідчити про майбутню сейсмічну активність, а про зовсім інші процеси, що не стосуються землетрусу.

Радіаційні методи дослідження мають довгу історію застосування та можливість використання при дослідженні явища сейсмічно-магнітосферної кореляції. Перевагою такого підходу є можливість охоплення великих зон земної поверхні для аналізу сейсмічної активності через еволюцію технічних рішень, що застосовуються при реєстрації типів та сортів частинок.

1.5 Опис радіаційних методів передбачення сейсмічної активності

1.5.1 Вимірювання радіоактивного радону та супутникове спостереження деформацій радіаційних поясів Землі

Радон, як радіогенний газ безперервно генерується в гірських породах. Тобто він завжди присутній в будь-якому гірському масиві, і зменшення його концентрації за рахунок міграції з масиву в повітря постійно компенсується новою генерацією цього газу. Тому, середній вміст радону в масиві завжди постійний і визначається концентрацією урану (радію) в цьому масиві. Не дивлячись на те, що реєстрація продуктів напіврозпаду не має складнощів, але така реєстрація носить все-таки «місцевий» характер. Нейтрони в земній корі генеруються за рахунок ізотопних (α , n) ядерних поділів, при дочірніх продуктах розпаду Радію ^{222}Rn ($E_{\alpha} = 5,49\text{MeV}$); ^{220}Rn ($E_{\alpha} = 6.29\text{MeV}$); ^{218}Po ($E_{\alpha} = 6.0\text{MeV}$); ^{216}Po ($E_{\alpha} = 6.78\text{MeV}$); ^{214}Po ($E_{\alpha} = 7,68\text{MeV}$), умовно назвемо їх постійними, і діляться вони на миттєві (99%) і запізнілі. Запізнілі нейтрони випускаються продуктами розподілу з періодом напіврозпаду від 0,4 до 55,6 секунд [32].

Детектори починають реєструвати сигнали за 2-3 дні до земних поштовхів. Рівень сигналу виділяється вузьким піком, перевищуючи рівень фону в десятки разів. Після землетрусу сигнали знижуються до нуля [43].

Потік нейтронів і заряджених частинок із земної кори визначається в першу чергу хімічним складом і структурою, і характеризує стан земної кори. Кореляція різкої зміни сигналу може дати інформацію для короткострокового прогнозу, але

не може вказати напрямок місця розташування епіцентру, тому для визначення епіцентру землетрусу необхідно розташувати кілька установок в різних сейсмоактивних регіонах, застосувавши пеленг. Імовірність реєстрації самих радіоактивних газів на далеких відстанях, виділених при деформації дуже мала. Їхня концентрація зменшиться швидше, ніж швидкість поширення (концентрація становить всього 10-16%), а продукт випромінювання (α -частинки) також обмежені вільним пробігом. Не дивлячись на недоліки і очевидні складнощі, автори оцінили досить високо наукові можливості цього методу [43].

Іншим цікавим варіантом є збурення іоносфери напочатку сейсмічної активності. Іоносфера простирається від ~ 80 км. над поверхнею Землі (прошарок D) і закінчується так званою «зовнішньою іоносферою» на висотах $\sim 400-1000$ км. в залежності від добового часу та інших впливаючих факторів. Іонний склад області D, в основному, визначається іонами NO^+ і O_2^+ , у зовнішній іоносфері концентрація часток O^+ стає значно менше, ніж H^+ і He^+ іонів [50].

Саме з висот зовнішньої іоносфери починають простягатися радіаційні пояси Землі, або VAB. Збурення цих поясів вперше було зафіксовано 27.03.1964, коли відбувся Великий Аляскінський землетрус під час польоту штучного супутника Explorer-1. Загалом, викиди частинок характеризуються аномально різкими збільшенням потоку плазми за кількістю на кілька десятків секунд (рис. 1.3.) [11].

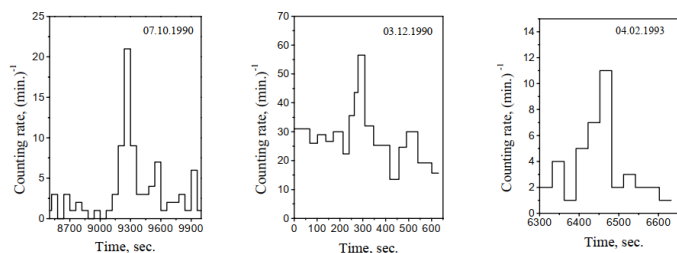


Рис. 1.3 – Приклади швидкості підрахунку електронів по орбіті, записані в експериментах MARIA-2 (а), GAMMA-1 (b) та SAMPEX / PET (c) під час спостереження за викидами частинок [12]

1.5.2 Опис феномену радіаційних поясів Землі

Пояси VAB, умовно, розподіляються на внутрішні ($L < 3R_3$) та зовнішні ($3R_3 < L < 7R_3$). Цей розподіл є досить чітким для протонів та електронів великих енергій (електрони > 100 кеВ, протони > 30 МеВ). Радіація, що захоплена у області внутрішнього радіаційного поясу майже не змінюється з часом. Радіація в області зовнішнього поясу зазнає різних та значних часових варіацій по інтенсивності та розподілу в просторі. Нерівномірний розподіл радіації у різних географічних районах при постійній висоті пов'язаний з структурою реального геомагнітного поля. У районах з аномально слабкою напруженістю геомагнітного поля в порівнянні з дипольним полем частинки радіаційних поясів опускаються найнижче до поверхні Землі. Абсолютний мінімум напруженості геомагнітного поля спостерігається у від'ємній ПАМА в районі бразильського узбережжя Атлантичного океану (рис. 1.4., 1.5.). Положення максимуму зовнішнього радіаційного поясу добре корелює зі збуренням магнітного поля Землі. На початку магнітної бурі пояс, як правило, різко переміщується до центру Землі, потоки частинок даної енергії в ньому зменшуються. Після закінчення магнітної бурі пояс «повертається» на своє попереднє місце. Іноді, відбувається тільки стискання радіаційного поясу без зміни числа частинок у ньому [9].

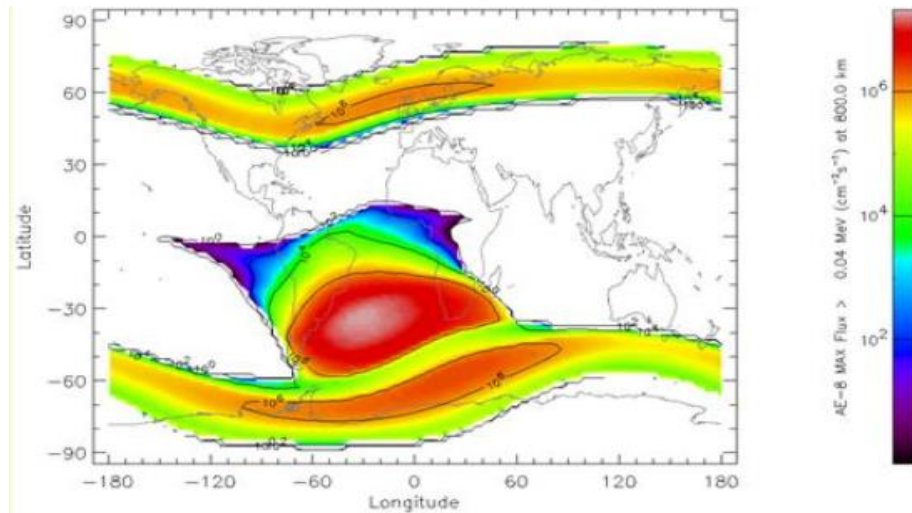


Рис. 1.4 – Інтегральні потоки електронів з $E > 40$ кеВ з вираженою ПАМА
[9]

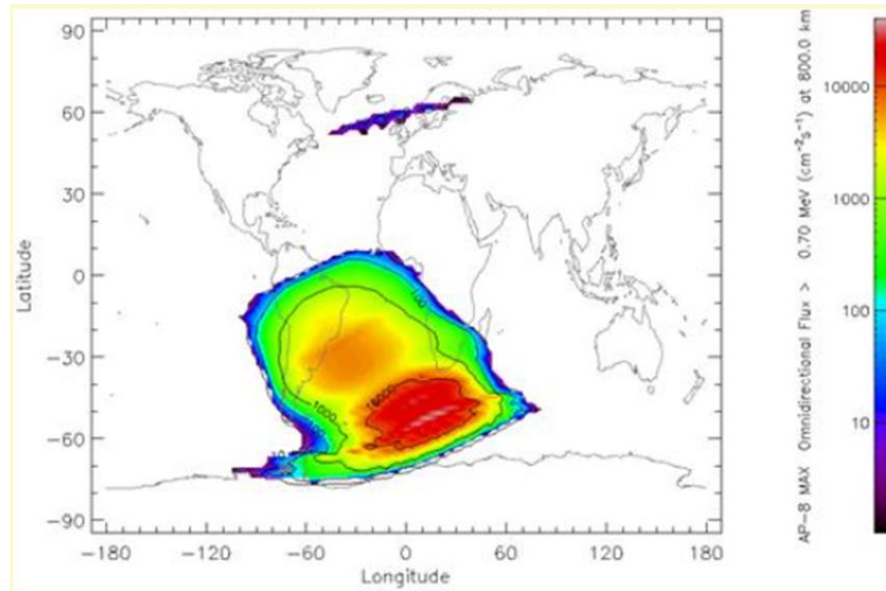


Рис. 1.5 – Інтегральні потоки протонів з $E > 700$ кеВ з з вираженою ПАМА
ПАМА [9]

Тепер потрібно описати механізм, як заряджені частинки, що згенеровані з земної кори, потрапляють у верхні шари іоносфери.

Виходу заряджених частинок з VAB заважає особлива конфігурація силових ліній геомагнітного поля, що створює для заряджених частинок магнітну пастку. Захоплені в магнітну пастку (конфігурації магнітного поля, які здатні

тривалий час утримувати заряджені частинки всередині певного обсягу простору [44]) Землі частки під дією сили Лоренца здійснюють складний рух, який можна уявити, як коливальний рух по спіральній траєкторії вздовж силової лінії магнітного поля з Північної півкулі в Південну і назад з одночасним більш повільним переміщенням (довготних дрейфом) навколо Землі (рис. 1.6.). Коли частинка рухається по спіралі в бік збільшення магнітного поля наближаючись до поверхні Землі, радіус спіралі і її крок зменшуються. Вектор швидкості частинки, залишаючись незмінним за величиною, наближається до площини, перпендикулярної до напрямку поля. Нарешті, в деякій точці, яку називають дзеркальною відбувається «відображення» частинки. Вона починає рухатися в зворотному напрямку до сполученої дзеркальної точки в іншій півкулі. Одне коливання уздовж силової лінії з Північної півкулі в Південну, протон з енергією ~ 100 MeV здійснює за час $\sim 0,3$ сек. Час перебування («життя») такого протона в геомагнітній пастці може досягати 100 років ($\sim 3 \times 10^9$ сек.) і за цей час він може зробити до 10^{10} коливань. В середньому захоплені частинки великої енергії здійснюють до декількох сотень мільйонів коливань з однієї півкулі в іншу. Довготний дрейф відбувається зі значно меншою швидкістю. Залежно від енергії частинки здійснюють повний оборот навколо Землі за час від декількох хвилин до доби. Позитивні іони дрейфують в західному напрямку, електрони - в східному. Рух частинки по спіралі навколо силової лінії магнітного поля можна представити так, що складається з обертання близько так званого миттєвого центру обертання і поступального переміщення цього центру уздовж силової лінії [44].

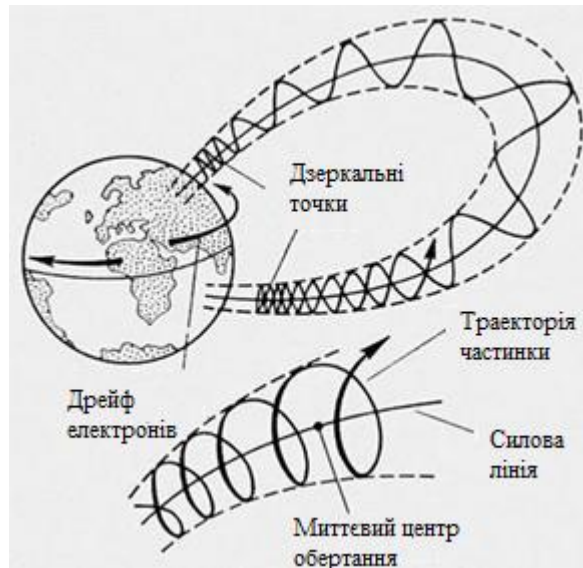


Рис. 1.6 – Рух заряджених частинок, захоплених в геомагнітну пастку. Частинки рухаються по спіралі уздовж силової лінії магнітного поля Землі і одночасно дрейфують по довготі

За даними [11], найкраще для спостережень підходять висоти в 300-500 км (рис. 1.7.).

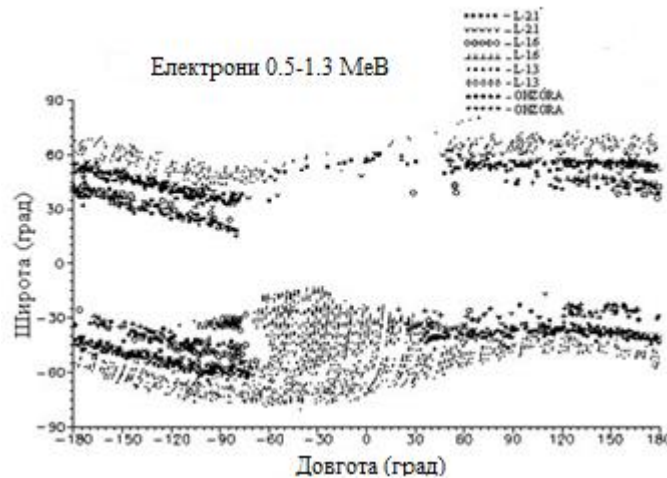


Рис. 1.7 – Карта розподілу потоків різних типів на висоті ~ 500 км за даними АУОС КОРОНАС-І. Дані АУОС ОНЗОРА для $L \sim 1.6$. [36]

1.5.3 Вплив сонячного вітру на структуру радіаційних поясів Землі

Старий підхід до впливу сонячного вітру на VAB свідчить про те, що проникнення частинок сонячного вітру в VAB можливо через особливі точки магнітосфери-це так звані денні полярні Каспи (рис. 1.8.), а також через так званий нейтральний шар в хвості магнітосфери (з її нічного боку). У Каспі захоплення нестійке. В області денного Каспу і в нейтральному шарі хвоста геомагнітне поле різко ослаблене і не є суттєвою перешкодою для заряджених частинок міжпланетної плазми [37].

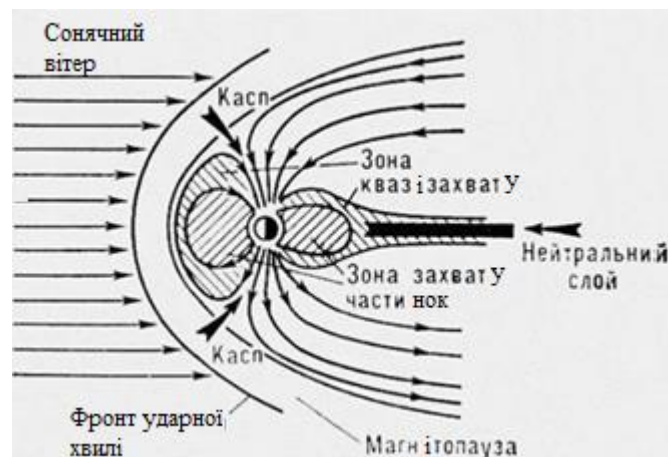


Рис. 1.8 – Розріз магнітосфери Землі по полудневому меридіану для випадку, коли вісь земного магнітного диполя перпендикулярна напрямку на Сонце. Стрілками вказані області, через які частинки сонячного вітру проникають в магнітосферу [37]

Новий підхід відрізняється кардинально, бо Александр Ухорський провідний дослідник з Лабораторії прикладної фізики університету Джона Хопкінса з'явив, що причиною неоднорідності структури внутрішнього радіаційного поясу є повільне обертання Землі, а не вплив сонячного вітру: "Безпрецедентна роздільна здатність експерименту RBSPICE, обладнання якого реєструє високоенергетичні частинки радіаційних поясів Землі, дозволила нам з'ясувати, що електрони, що формують внутрішній пояс, розподілені в просторі

нерівномірно. Розроблена нами математична модель показує, що саме обертання Землі є причиною вищезгаданої нерівномірності, і зроблене нами відкриття є демонстрацією того, як нові дані можуть докорінно змінити наше розуміння фізичних процесів, що відбуваються біля Землі "[14].

Обертання Землі виробляє слабе змінне електричне поле, що пронизує весь обсяг внутрішнього радіаційного поясу. Електрони, з яких складається пояс, під впливом електричного поля, починають коливатися і формують свою "рідину", що володіє слабкою властивістю в'язкості. Вплив неоднорідного електричного поля призводить до появи "хвиль" в цій рідині, які формують структуру з більш щільних і більш розріджених областей, які спостерігаються в обсязі внутрішнього радіаційного поясу Ван Аллена [14].

А в [36] йде мова про те, що концентрація електронів у зовнішніх поясах змінюється завдяки магнітним бурям, хоча немає прямої кореляції з циклами сонячної активності. Також для появи екстремальних потоків електронів з енергіями, що перевищують значення 2 MeV на геосинхронній орбіті необхідні і висока швидкість сонячного вітру, і висока суббурева активність на фазі відновлення бурі.

1.5.4 Досвід попередніх наукових місій, що використовували подібні методи досліджень

Для детального аналізу було розглянуто чотири дослідницькі проекти за схожим напрямком дослідження, що називаються: ITMSAT, Demeter, SAMPEX/PET, NOAA satellite. В таб 1.1 складемо зведену якісну порівняльну характеристику місій.

Таблиця 1.1 – Зведений опис схожих наукових місій

Найменування місії	NOAA	Demeter	ITMSAT	SAMPEX/PET
Характеристика				

Продовження табл. 1.1

Діапазон вимірюваних енергій	30кеВ-200МеВ	Від 40кеВ I > 700кеВ*	1 -100 МеВ	Від 2 МеВ - I > 85МеВ*
Орбіта супутника, км. над поверхнею Землі	807-854	660-710	600-800	520-670
Тип частинок	Протони, електрони	Протони, електрони	Протони, електрони	Протони, електрони
Магнітуди землетрусів**, шкала Ріхтера	≥ 5	≥ 5	≥ 5	≥ 4
Номери поясів VAB	0.9-2.2	≈2....3	1.15-1.75	1-1.8
Передсейсмічний всплеск, (год. до землетрусу)	106	24-48	-	4
Метод фіксації частинок (детектора склад)	8 твердотільних + 1 товстий	Масив твердотільних	Масив пластикових сцинтиляторів	Літійво-кремнієві детектори

де: - дані відсутні, “*” верхні межі вказано, як початок діапазону виміру енергій протонів, як «енергія>X к/МеВ», “***” однакові опорні магнітуди було обрано, можливо, через те, що за таких магнітуд вже можливі руйнування будівель і споруд [11].

Для отримання достовірних результатів передбачень необхідно віднаходити кореляцію на достатньо довгому проміжку (десятки, або й більше сотні днів). Не дивлячись на згаданий раніше вибух частинок протягом десятків секунд [12], [11]. Але у висновках авторами зазначено, що для отримання коректних результатів, потрібно застосувати «виправлення», що є ваговою функцією (1.2), яка нівелює вплив сезонних факторів на викиди частинок та інші фактори [12].

$$W = 1 - 2/3 \sin(\pi * Dy/D) \quad (1.2)$$

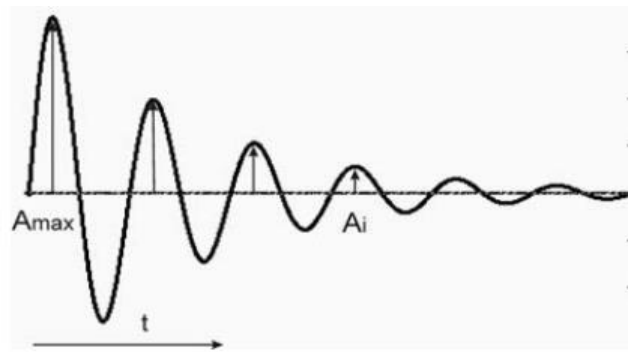
де: $140 \leq D_y \leq 260$ та $W = 1$ не в діапазоні, D_y -це день у році, D -кількість днів у році.

У [6] найкраща кореляція була отримана тільки при реєстрації частинок високої енергії і з пітч-кутом близько конуса втрат, що вказує на те, що відносно тривалий поздовжній дрейф і режим наведення детектора є критичними факторами для виявлення передвіщувачів землетрусів. Автори припустили, що викиди відбуваються тільки на резонансних частотах. Також не висунуто чіткої причини, чому кореляція не спостерігається з низько енергетичними частинками. Серед наукових результатів можна ще відзначити виявлення недовговічного третього радіаційного поясу за межами другого.

Сезонні варіації потоків енергійних електронів зовнішнього поясу спостерігалися за даними вимірів на ШСЗ ГЛОНАСС, Експрес і GOES (Ivanova et al., 1997; Іванова та ін., 2000; Tverskaya et al., 2003a) і SAMPEX (Baker et al., 1999) [36].

Спостережувані сезонні варіації потоків електронів зовнішнього поясу пов'язані, швидше за все, із сезонною залежністю геомагнітних збурень (Russel and McPherron, 1973). Коефіцієнт кореляції між згладженими значеннями флюенсів (інтеграл за часом від щільності потоку частинок [5]) електронів і K_p складає 0.7 [36].

Можливо, така різниця у зафіксованому часі передсейсмічного впливу пов'язана з різними методами підрахунку енергії сейсмічної хвилі та різними за характером землетрусами, що фіксувалися. Адже землетруси можуть породжувати вторинні та розсіяні хвилі (рис. 1.9. б) які тільки схожі на графік $\text{sinc}(x)$, але не є ними. Тобто фіксація пікового значення і надалі лінійно затухаючих амплітуд сейсмічної хвилі не є найімовірнішим випадком (рис. 1.9. а).



а)



б)

Рис. 1.9 – а) Тип сейсмічного сигналу, зафіксований при спадаючому типу землетрусу; б) Тип сейсмічного сигналу, зафіксований при накладеному типу землетрусу [10]

1.6 Постановка мети дослідження

Вище було продемонстровано, що землетруси є дуже руйнівним природним явищем що призводить до людських жертв і величезних матеріальних збитків. Не дивлячись на велике ромайття запропонованих методів та давності намагань з вирішення проблеми передбачення землетрусів суттєвих успіхів досягнуто не було, дослідження все ще тривають.

Враховуючи сучасні можливості, що надає технічний розвиток людства, стає доступнішою можливість скористатися супутниковими інструментами дослідження даного питання.

Але такий варіант проведення досліджень приносить розробникам додатковий обсяг вирішення проблем. Це можуть бути:

- Збої через радіаційний фон напівпровідникових радіоелементів на борту супутника, що потребуватиме спеціалізованих радіокомпонентів категорії «space», чи «military» та дослідження їхньої надійності в умовах сильного опромінення. Свинцевий радіаційний захист не завжди можливо організувати через обмеженість економічних ресурсів проекту, оскільки це збільшує габарити та ставить суворіші вимоги щодо вантажопідйомності ракети-носія.

- Потенційне зіткнення з космічним сміттям та зходження з LEO. Що мотивує розробників до якомога більшого здешевлення апаратури, щоб бути готовими запустити інший модуль на заміну понівеченому.

- Через те, що сигнали-передвісники досі погано вивчені, може з'явитися необхідність запуску нових, модернізованих апаратів для вивчення проблеми передвіщення землетрусів.

Метою дослідження є створити платформу для накопичення статистики передсейсмічних викидів. Щоб провести дослідження з даної тематики, потрібно вирішити завдання:

1. Розробити модель ідентифікації сортів та енергій заряджених частинок.

2. Реалізувати модель на базі модулю ЦОС, який має працювати з вже спрекетованим модулем АОС в минулих стадіях науково-дослідницької роботи, як корисне навантаження супутника.

3. Оцінити вплив на достовірність отриманих результатів шумів у спектрометричному каналі, виокремити основні джерела їхнього походження.

4. Розробити метод заміщення детекторної системи та іонізаційної камери з можливістю додання довільної шумової складової до сигналу.

5. Розробити методику оптимізації співвідношення С/Ш в спектрометричному каналі.

Висновки до першого розділу дисертаційного дослідження

1. Визначено потенційні місця настання сейсмічної активності на планеті та в Україні.
2. Серед існуючих методів передвіщення землетрусів обрано радіаційні методи для подальших досліджень.
3. Оглядом результатів минулих досліджень, щодо знаходження передвіслювачів землетрусів встановлено, що не існує певності як у сигналах-передвіслювачах землетрусів, так і часу їх надходження.
4. Описано явище радіаційних поясів Землі та його зв'язок з сейсмічною активністю, що буде потрібно дослідити.
5. Поставлено мету і задачу наукового дослідження.

2. РОЗРОБКА МОДЕЛІ З ІДЕНТИФІКАЦІЇ СОРТІВ ТА ЕНЕРГІЙ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ЯВИЩА СЕЙСМІЧНО-МАГНІТОСФЕРНОЇ КОРЕЛЯЦІЇ

2.1 Обґрунтування вибору методу реєстрації заряджених частинок

Вибір методу було зроблено на користь методу на основі питомих втрат енергії та повної енергії (скорочено ΔE - E -метод), який є основним у дослідженні реакцій із легкими іонами, що є іонами Гелію та Гідрогену (^1H , ^2H , ^3H , ^3He , ^4He) [3]. Цей метод є традиційним для досліджень у сфері ядерної фізики. Зазвичай, використовують 2-3 детектори, серед яких, є мінімум один прострільний детектор та один детектор повних енергій, що складається часто з того ж матеріалу, що і прострільні детектори, але є набагато товстішим, що відповідає іншим значенням реєстрованих потоків енергій (рис. 2.3.). На (рис. 2.1.) зображена система, складена з трьох детекторів, що використовується у дослідженні, тобто товстого детектора з п-терфенілу та двох тонких сцинтиляційних детекторів, (рис. 2.2.) [23], яка має бути використана у експерименті з реєстрації заряджених частинок.

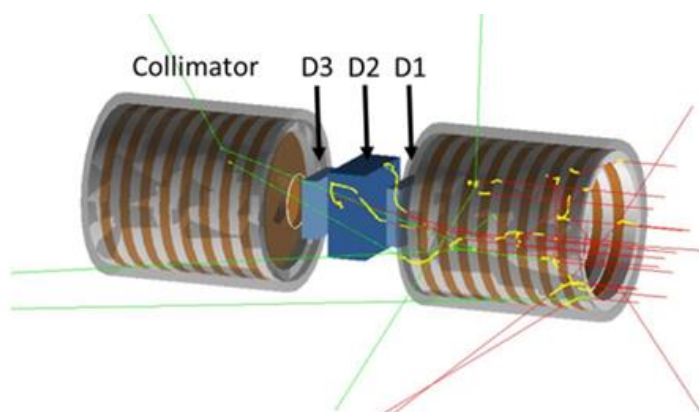


Рис. 2.1 – Схематичне зображення системи захоплення та детектування заряджених частинок [28]

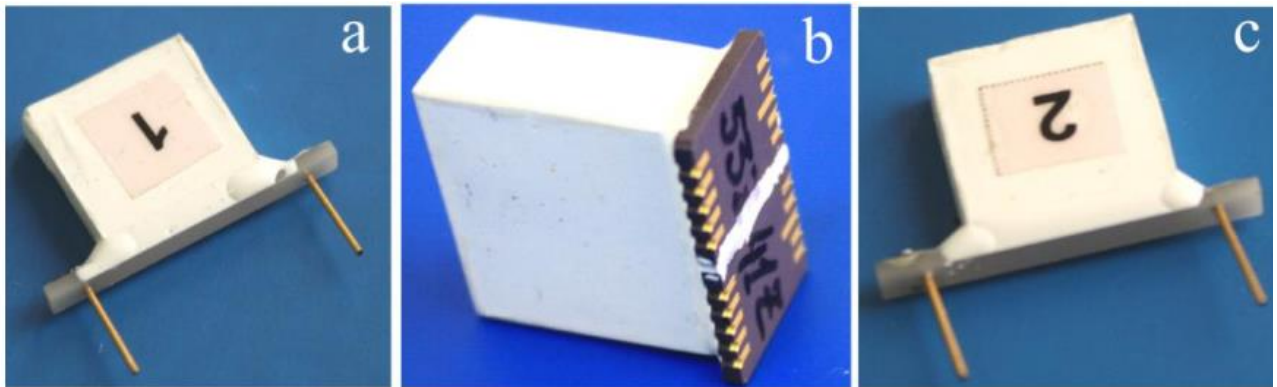


Рис. 2.2 – а) сцинтиляційний детектор з п-терфенілу (D1); б) товстий детектор з пара-терфенілу (D2); с) сцинтиляційний детектор з п-терфенілу (D3) [23];

Появі у експерименті кристалів паратерфенілу сприяли його механічні властивості, а саме: низька твердість, мале значення модуля Юнга, велика схильність до крихкого руйнування, відсутність деформаційного зміцнення, що відрізняє його від кристалів з металевим, ковалентним та іонним зв'язками [49].

Ще однією особливістю є слабкий вандерваальсовий зв'язок між атомами в молекулах п-терфенілу, хоча й наявний ковалентний зв'язок [49].

Таким чином, закладається основа для формування магнітного спектрометра (2.1).

Втрати енергії в ΔE детекторі описуються виразом:

$$\Delta E = \frac{dE}{dx} * d \quad (2.1)$$

де: d -товщина детектора, dE / dx - питомі втрати енергії в простірному детекторі.

Іноді, використовують і набагато більше детекторів, як у [11]. Цим досягається набагато ширший спектр виміру енергій потоків заряджених частинок (від 30 кеВ до 200 МеВ).

Коліматори (рис. 2.1., 2.3.) відповідають за вилов та спрямування частинок для подальшого їх поглинання в детекторах. В органічних сцинтиляторах

порушуються молекулярні рівні, які випромінюють в ультрафіолетовій області спектру.

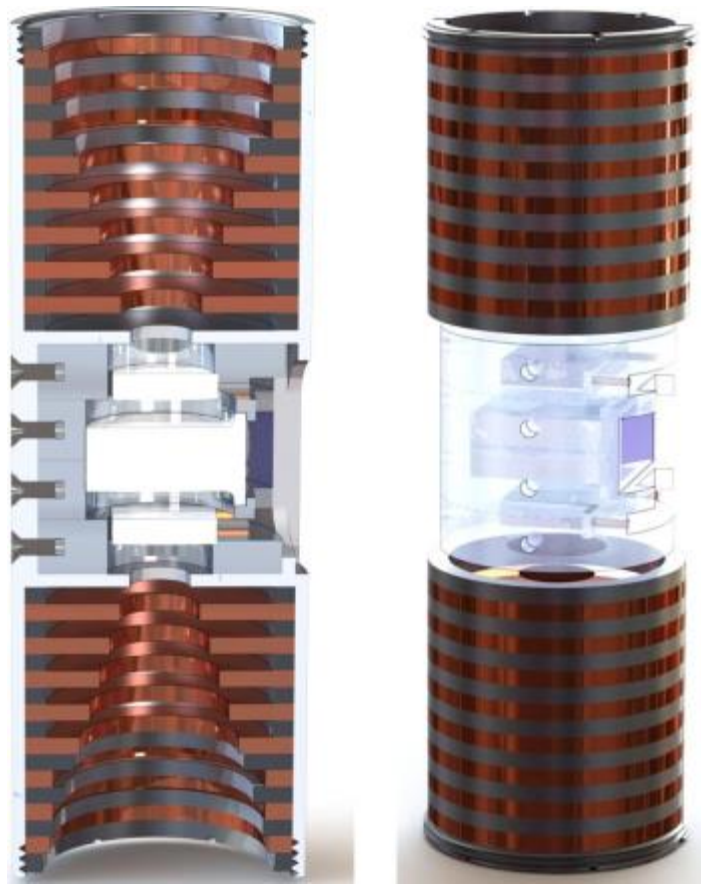


Рис. 2.3 – Вигляд детекторної системи спектрометра у розрізі [23]

Для узгодження зі спектральною чутливістю світлореєструючих пристроїв (фото електронних помножувачів і фотодіодів) використовуються світлоперетворювачі, які поглинають ультрафіолетове випромінювання і перевипромінюють видиме світло. Як фотодіод використано оптично зчленований з напівпровідниковим лічильником оптичних фотонів МРРС (рис. 2.4.) [49]. Такі фотодіоди мають площу декілька мм^2 з кроком пікселя десятки мкм. Перевагою використання такого рішення є невеликий рівень перехресних перешкод та менша кількість темних імпульсів [13]. Світловий вихід - частка енергії реєстрованої частки конвертована в енергію світлового спалаху. Інтенсивність світлового спалаху пропорційна енергії, втраченої часткою, тому

сцинтиляційний детектор може використовуватися, як спектрометр, тобто прилад, що визначає енергію частинки [3]. Товщини детекторів визначають нижню і верхню межі вимірювання енергетичного діапазону для даного нукліда. Якщо енергія мала, то частинки залишають практично всю енергію в прострільному детекторі, сигнал від детектора повного поглинання буде малим і буде маскуватися за рівнем шумів. Якщо енергія велика, то сцинтиляційний імпульс буде великий [3]

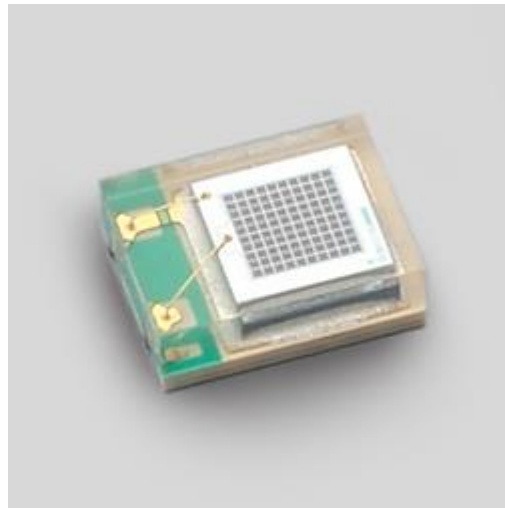


Рис. 2.4 – Багатопіксельний лічильник фотонів великої площі з кроком 50 мкм. [17]

Оскільки амплітуда спектрометричного імпульсу дуже мала (порядку сотень мікрвольт), то такий сигнал має бути узгоджений з динамічним діапазоном АЦП. Часто перші каскади проектують на основі польових транзисторів з міркувань забезпечення низького рівня шуму. На спектрометричний підсилювач покладені функції підсилення слабкого сигналу. В цих вузлах намагаються надати імпульсу квазігаусівської, або трикутної форми так званим підсилювачем-формувавцем. Активні фільтри дозволяють сформувати смугу пропускання без програшу в коефіцієнті підсилення. Одноканальний аналізатор при знаходженні сигналу в певних межах видає на

виході логічну одиницю. В схемі антиспівпадінь для збору статистики виділяється певна група подій, одночасність яких лежить в межах деякого малого інтервалу часу τ (часу дозволу). Схема антизбігів реєструє збіг у часі з точністю τ сигналів від однієї певної групи детекторів за відсутності сигналів в іншій групі детекторів. Якщо хоча б в одному з детекторів другої групи виникає сигнал, то збіг сигналів в першій групі детекторів не реєструється. У схемі співпадінь діє зворотній принцип. Лінійні ворота мають два входи - лінійний та керуючий. На лінійний вхід надходять спектрометричні (лінійні) сигнали, наприклад, від підсилювача, на керуючий - логічні сигнали. Лінійні ворота зазвичай можуть працювати у двох режимах. У нормально закритому режимі лінійні ворота пропускають лінійний сигнал за наявності сигналу на управляючому вході, бо інакше лінійний сигнал блокується. У нормально відкритому режимі все навпаки. Лінійний сигнал блокується за наявності керуючого сигналу. Тривалість керуючого сигналу в лінійних воротах зазвичай може регулюватися. Під блоком «Аналогово-цифровий перетворювач» мається на увазі вся подальша цифрова обробка сигналу з будь-якими програмними та схемотехнічними перетвореннями на розсуд дослідників цифровими засобами. Е та ΔE спектрометричні канали мають бути ідентичними (рис. 2.5.) [3].



Рис. 2.5 – Узагальнена спрощена блок-схема реалізації ΔE - E -методу

Калібрування та відтворення геометрії спектрометра відбувається за допомогою пакету фізичного моделювання проходження елементарних частинок через речовину, таких, як CERN «GEANT» з використанням методу Монте-Карло в широкому діапазоні енергій [23].

Серед недоліків використання даного методу можна виділити такі [3]:

- Статистичні флуктуації втрат в тонких детекторах.
- Неоднорідність товщини прострільного детектора, яка призводить до розкиду втрат енергії в тонких і в товстому детекторі.
- Розкид пробігів і втрати енергії в мертвих шарах детекторів.
- Флуктуації величини заряду іонів. Чим важчий заряд іону, тим більше обмежується застосування даного методу, бо у таких випадках нейтронно надлишкові ізотопи та нейтронно дефіцитні ізотопи зареєстрованого елемента будуть мати ідентичні параметри з якими їх врахує побудована система. Такий недолік долають використанням газових детекторів, але вони мають гірші часові характеристики за твердотільні.

2.2 Використання логіки антизбігів для ідентифікації частинок

Схема збігів/антизбігів застосовується, наприклад, при вивченні елементарних актів ядерних взаємодій, для реєстрації співпадаючих в часі електричних сигналів, які надходять з детекторів ядерного випромінювання, чим і є $\Delta E-E$ -метод. Це, насамперед, логічний метод. При цьому, сигналами, що збігаються називаються такі сигнали, які повністю, або частково перекриваються в часі (рис. 2.6.). Практичне використання цього методу передбачає знання кривої збігів - залежно числа вихідних сигналів схеми збігів від тимчасового зсуву Δt між вхідними електричними сигналами. В ідеальному випадку - для двоканальної схеми збігів з прямокутними вхідними сигналами тривалістю t - крива збігів також має прямокутну форму. В реальних умовах через шуми і вплив різних

статистичних факторів крива збігів може набувати форми кривої, що характеризує нормальний розподіл.

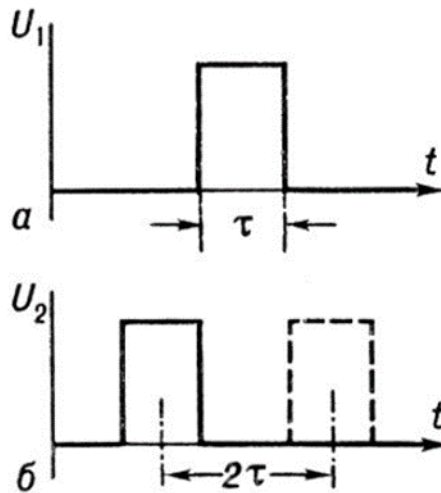


Рис. 2.6 – Імпульси збігу: а - вхідний імпульс в 1-му каналі; б - граничні положення вхідного імпульсу у 2-му каналі, при яких імпульси в обох каналах вважають співпадаючими [26]

де: U - амплітуда імпульсу, τ - тривалість імпульсу, t – час, U_1 та U_2 напруги у першому та другому каналі реєстратора-аналізатора, відповідно.

Ширина кривої на половині її висоти, яка називається часом дозволу T_p , відповідає максимальній величині Δt між двома подіями, що задовольняють умові одночасності, і визначається порогом спрацьовування схеми збігів [26].

Для збору статистики виділяється певна група подій, одночасність яких лежить в межах деякого малого інтервалу часу τ (часу дозволу). Схема антизбігів реєструє збіг у часі (з точністю τ) сигналів від однієї певної групи детекторів за відсутності сигналів в іншій групі детекторів. Якщо хоча б в одному з детекторів другої групи виникає сигнал, то збіг сигналів в першій групі детекторів не реєструється. А в системі збігів-навпаки, якщо в обох групах детекторів виникає сигнал, то лічильник збільшується на одиницю. Роздільна здатність за часом сучасних схем збігів/антизбігів приблизно становить, $t < 10^{-8}$ сек. [38], [26].

Оберемо метод антизбігів, за допомогою якого, легше побудувати алгоритми ідентифікації частинок, про що буде розказано у наступних розділах дослідження.

2.3 Визначення типу зафіксованих детектором часток

Алгоритм ідентифікації сортів та енергій заряджених частинок має встановити відповідність між типом частинки, їхньою енергією та кількістю в період часу. Також він має відповідати вимогам, які, фактично, диктуються наявною детекторною системою, відпрацьованою аналоговою частиною малогабаритного реєстратора-аналізатора, мати можливість бути реалізованим апаратно у цифровій частині пристрою та передачі даних у форматі вихідного кадру наукової інформації для подальшого статистичного аналізу.

Щоб вести підрахунок кількості заряджених частинок, необхідно зафіксувати умови для їхнього розпізнавання, задаючи тим самим енергетичні лінійні ворота та схему антизбігів. Користуючись можливостями сучасних цифрових мікросхем, алгоритм складатимемо для випадку, коли лінійні ворота та схема співпадінь реалізуються після дискретизації сигналу АЦП. Це дозволить уникнути складнощів з переробкою готової аналогової частини та призведе до оптимізації розмірів модулю.

Умовно призначимо для загальної класифікації такі позначення зарядженим частинкам: високоенергетичний протон, високоенергетичний електрон, низькоенергетичний протон, низькоенергетичний електрон з відповідними їм діапазонами енергій. Використовуючи структуру детекторів введемо умовне позначення напрямку руху зарядженої частинки відносно осі детекторної головки. Так напрямом «X» вважатимемо рух частинки від D_1 до D_2 (рис. 2.1.), а напрямом «Y» — від D_3 до D_2 (рис. 2.1.). Також вважатимемо, що якщо детектор зафіксував частинку, то він має значення логічної «1», якщо не зафіксував, то «0». Таким чином можна сформулювати таблицю всіх можливих

станів детекторів і побудувати таблицю істинності, що слугуватиме основою алгоритму, таб 2.1 [28].

Комбінація 100 та 110 відповідають за прихід частки за напрямом «X», а 001 та 011 за — «Y». Варіанти комбінацій 101, 010 та 111 — не дозволяють класифікувати сорт енергетичної частинки через відсутність будь-якого пояснення, який сорт частинки можна поставити у відповідність цим подіям і в розробленому алгоритмі ігноруються [28].

Таблиця 2.1 – Таблиця істинності логіки збігів

№ події	D ₁	D ₂	D ₃	Опис подій
1	0	0	0	На всіх трьох детекторах немає відгуку
2	0	0	1	Спрацював тільки третій детектор
3	0	1	0	Спрацював тільки другий детектор
4	0	1	1	Спрацював другий і третій детектор
5	1	0	0	Спрацював тільки перший детектор
6	1	0	1	Спрацював перший і третій детектор
7	1	1	0	Спрацював перший і другий детектор
8	1	1	1	Спрацювали всі детектори

Також таку таблицю істинності можна представити у вигляді комбінаційної схеми на базових логічних елементах створенням логічної функції трьох змінних для наочної симуляції і перевірки вірності її функціонування (рис. 2.7.).

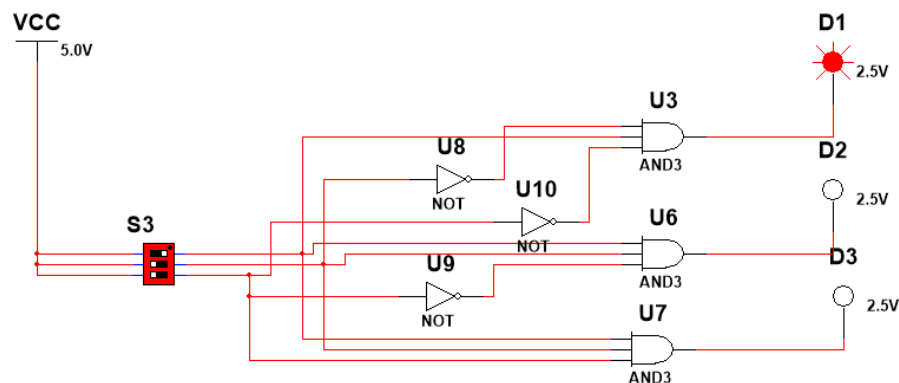


Рис. 2.7 – Симуляція комбінації №5, таб. 2.1 складанням схеми у базисі І-

НІ

При побудові алгоритму та варіантів його продовження підемо від зворотного. Вивчаючи графіки [23], (рис. 2.8.), знайдемо первинну енергію, з якою заряджена частинка була захоплена коліматором, знаючи поглинену (запасену) енергію детектором.

Графік, зображений на (рис. 2.8.), являє собою залежність енергії, поглиненої в детекторі від первинної енергії потоку плазми до захоплення частинок коліматором. Для складання алгоритму були використані тільки ділянки кривих, схожі з залежністю $\ln(x)$. Вважатимемо, що в більшості діапазонів залежність має лінійний характер, що можна допустити для більшості захоплених частинок. Пік кожної кривої означає, що значення енергії вище не реєструються і відповідний детектор для них стає «прозорий», тобто в ньому частинки не залишають якусь долю своєї енергії і їхній проліт через детекторну систему ніяк не фіксується. Ділянки, з формою кривої, схожі залежністю e^{-x} , так звані "хвости" характеризують залишок минулої енергії і не враховуються в структурі алгоритму [23].

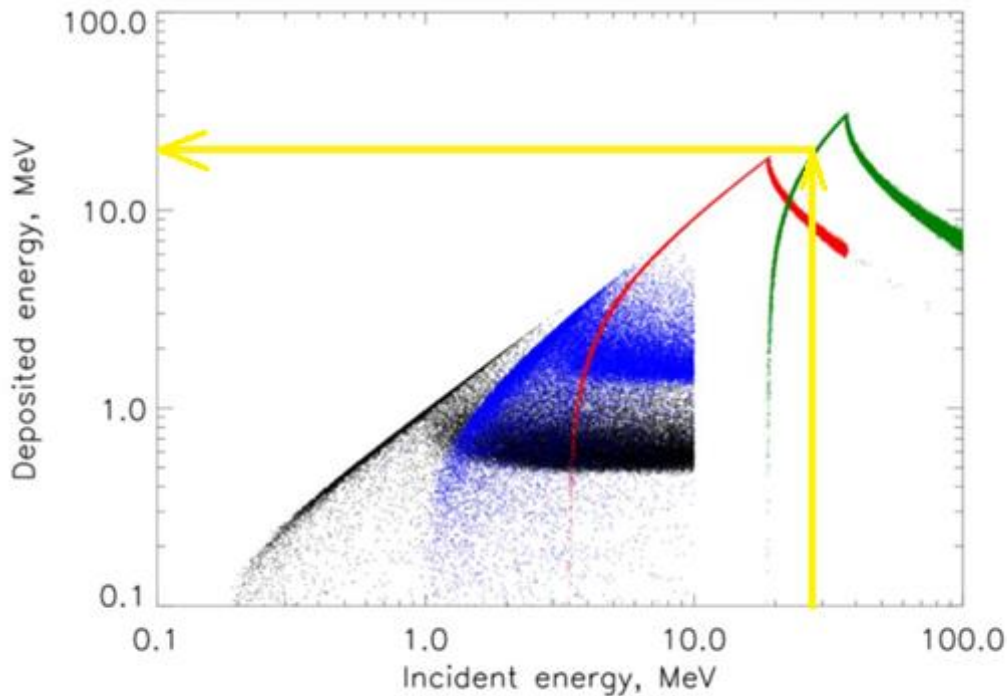


Рис. 2.8 – Залежність енергії, зафіксованої детектором від початкової енергії зарядженої частки [23]

де: чорна крива є кількістю електронів у детекторі D_1 , блакитна – кількістю електронів в детекторі D_2 . Кількість протонів представлена червоною (перший детектор) і зеленою (другий детектори) кривими.

Наприклад: жовтою лінією (рис. 2.8.) позначений хід через проєціювання первинної енергії протонів, коли в масиві зафіксовано значення частини енергії, що була набута при прольоті зарядженої частинки. На (рис. 2.8.) на осі під назвою “Incident energy” (енергія вхідна) частинки з початковою енергією у 28 MeV потрапляють до зеленої кривої, що відповідає енергіям частинок, залишених у детекторі D_2 та відповідає значенню в 22 MeV поглинутої детектором енергії “Deposited energy”.

Отримавши значення поглинутої енергії тепер можемо дізнатися сорт частинки, що було захоплено коліматорною системою. Відкладемо по осі детектора D_2 значення рівне 22 MeV (рис. 2.9.) і потрапимо на синю криву, що

відповідає сорту високоенергетичних протонів та 8 MeV поглинутої енергії детектором D₁.

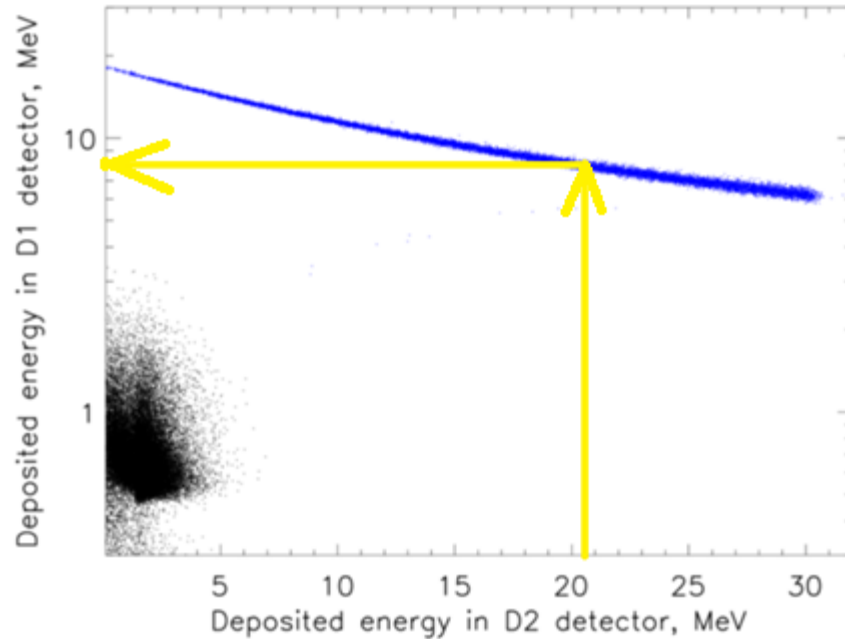


Рис. 2.9 – Залежність енергії поглинутої в детекторі D1 від енергії D2

[24]

Тепер окреслимо принципи розбиття на діапазони енергій для формування алгоритму:

1) Через невелику роздільну здатність детекторів недоцільно розбивати на велику кількість енергетичних діапазонів [28].

2) Враховуючи спадний характер залежності кількості частинок від збільшення їхньої енергії, (рис. 2.10). енергетичний діапазон варто розширювати для уникнення передачі у вихідному кадрі нульових значень і таким чином зменшення об'єму інформації для передавання із супутника [28].

3) При збільшенні кількості енергетичних діапазонів збільшується об'єм вихідного кадру, тож можна не встигнути передати потрібний об'єм

інформації за відведений сеанс зв'язку з регламентованою швидкістю для відповідного діапазону частот за низхідною лінією зв'язку [28].

На жаль, (рис. 2.10.) з такою користю, як (рис. 2.8., 2.9.) використати не вдасться через те, що для випадку моноенергетичних електронів не можна однозначно зробити висновок про поглинуту енергію на фіксований вплив захопленої частинки коліматором. В цьому разі отримуємо складний розподіл можливих значень поглинутої енергії.

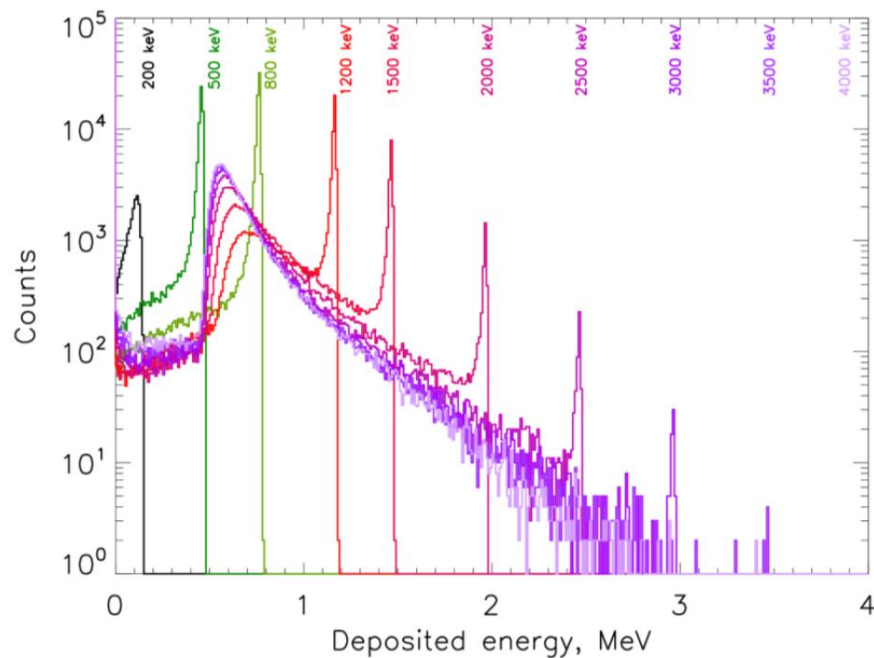


Рис. 2.10 – Відгук в детекторі D1 на падаючі моноенергетичні електрони [23]

2.4 Формування загального алгоритму ідентифікації сортів та енергій заряджених частинок

Для зручності формування алгоритму введемо наступні умовні позначення:

- E_{inc} — первинна енергія зарядженої частинки;
- ΔE_{dep} U_1 , U_3 — відновлене значення енергії в D1 або D3;
- Particle (частинка), el — електрон, prot — протон;

– Range — умовний розподіл на діапазони для кожного виду часток, причому перші п'ять діапазонів відповідають за випадок спрацювання тільки одного детектора;

- Direction — напрям руху частки;
- Graphics color 2.8 — кольори на графіку рис. 2.8
- Graphics color 2.9 — кольори на графіку рис. 2.9

Тепер скористаємось цими позначеннями при окресленні діапазонів енергій частинок у таб 2.2.

Таблица 2.2 – Класифікація часток за енергією

E_{inc}	$\Delta E_{dep} U_1, U_3$	Particle	Range	Direction	Graphics color 2.9	Graphics color 2.8
1.0-1.4	1.05-1.1	el	6	X	Black	Red
1.4-1.8	1.1-1.3	el	7	X	Black	Red
1.8-2.3	1.3-1.05	el	8	X	Black	Red
2.3-3.0	1.05-0.75	el	9	X	Black	Red
3.0-5.0	0.75-0.3	el	10	X	Black	Red
18-21	16.1-10.1	prot	11	X	Blue	Blue
21-24	10.1-9.4	prot	12	X	Blue	Blue
24-28	9.4-8.3	prot	13	X	Blue	Blue
28-32	8.3-8.1	prot	14	X	Blue	Blue
32-36	8.1-6.2	prot	15	X	Blue	Blue
1.0-1.4	1.05-1.1	el	21	Y	Black	Red
1.4-1.8	1.1-1.3	el	22	Y	Black	Red
1.8-2.3	1.3-1.05	el	23	Y	Black	Red
2.3-3.0	1.05-0.75	el	24	Y	Black	Red
3.0-5.0	0.75-0.3	el	25	Y	Black	Red
18-21	16.1-10.1	prot	26	Y	Blue	Blue
21-24	10.1-9.4	prot	27	Y	Blue	Blue
24-28	9.4-8.3	prot	28	Y	Blue	Blue

2.5 Формування підпрограм алгоритму з ідентифікації сортів та енергій заряджених частинок

За результатами роботи алгоритму, приведеного на (рис. 2.11.), можливі шість продовжень роботи для визначення кількості відповідних часток:

- Низькоенергетичних електронів та протонів за напрямом «Y», дод. Д
- Низькоенергетичних електронів та протонів за напрямом «X», дод. Д
- Високоенергетичних електронів за напрямом «X», дод. Д
- Високоенергетичних електронів за напрямом «Y», дод. Д
- Високоенергетичних протонів за напрямом «X», дод. Д
- Високоенергетичних протонів за напрямом «Y», дод. Д

Підпрограми, описані в дод. Д-це майже канонічне представлення алгоритму за назвою «дерево рішень», що настає при спрацюванні відповідної комбінації детекторів та здійснює перевірку, якому енергетичному діапазону збільшити лічильник у зв'язку з енергією, що було поглинуто детекторами. Завершення відпрацювання усіх продовжень алгоритму призводить до виходу в загальний алгоритм та очікування спрацювання наступної з можливих комбінацій.

2.6 Концепція апаратної реалізації алгоритму

При потраплянні зарядженої частинки в детекторну систему (рис. 2.1.), утворюється механічна енергія, що спричиняє світловий витік енергії частинки при прольоті через монокристал органічного сцинтилятора. Використання органічних сцинтиляторів дозволяє уникнути ефекту зворотного розсіяння частинок та має менший час затухання люмінесценції в порівнянні з неорганічними сцинтиляторами. Використаний у дослідженні пара-терфеніл є досить дешевим у виробництві матеріалом.

Щоб перетворити механічну енергію (світловий вихід) на електричний сигнал потрібно встановити високочутливий напівпровідниковий фотоприймач такої площі, щоб була не меншою за площу монокристалу детектора. Так було вибрано кремнієвий фотоелектронний помножувач великої площі (MPPC — Multi Pixel Photon Counter) порядку 6 мм^2 [1], [23].

Оскільки перетворення механічної енергії на електричний сигнал відбувається з невеликим ККД, то амплітуда спектрометричного імпульсу складає мікроВольти, що потребує надалі підсилювача слабкого сигналу, що складається з зарядочутливого та спектрометричного підсилювачів (рис. 2.12). ЗЧПП зроблено на базі польового транзистора, щоб зменшити рівень вихідних шумів, адже шуми першого каскаду набудуть найбільшого підсилення. Активні фільтри формуючого підсилювача зроблено на базі ОП з застосуванням пасивного Т-подібного RC мосту.



Рис. 2.12 – Структура апаратної реалізації алгоритму для одного спектрометричного каналу

Блок активних пікових детекторів, що є модифікованим однонапівперіодним випрямлячем на основі ОП дозволяє виділити найбільше значення сигналу, яке буде вважатися амплітудою напруги частинки, що треба записати у пам'ять модулю ЦОС.

Блоки вихідних перетворювачів уніполярного (несиметричного) сигналу в диференційний (симетричний) модулю АОС та вхідних перетворювачів диференційного сигналу в несиметричний модулю ЦОС необхідні для підвищення завадозахищеності та відсікання негаусових завад при надходженні сигналу з модулю АОС у модуль ЦОС.

У мікроконтролері відбувається квантування аналогового сигналу, вироблення сигналів керування та тестування спектрометричного каналу, запис кількості частинок в пам'ять та взаємодія з бортовим комп'ютером.

Бортовий комп'ютер відповідає за загальне керування наносупутником (систем живлення, визначення висоти польоту, контрольних приладів, навігації) та відправку пакету наукових даних через комунікаційну систему, що складається з мікрохвильового передавача та антенної системи. Таким чином видобута інформація потрапляє на наземний пункт керування.

2.7 Перевірка коректності роботи алгоритму

Після проходження сигналу по всіх ланцюгах схеми постає питання, чи будуть частинки з енергіями, близькими до границь «енергетичних воріт» підраховані, як частинки інших діапазонів енергій та якою мірою. Після вимірювань можна буде укласти достовірність прийнятих відсортованих масивів з певною ймовірністю, або відхиленням від розподілу Гауса. Наприклад, додамо до сигналу випадковий білий Гаусів шум (функція AWGN) із відношенням С/Ш, рівне 5, 10, 30, 50 дБ. Таким чином, ми можемо визначити кількість частинок, які потраплять до інших енергетичних діапазонів, що призведе до накопичення несистематичної похибки вимірювань. Моделювання для співвідношення С/Ш

приблизно 10 дБ і менше, показало, що частинки з енергіями, близькими до середини енергетичного діапазону, також можуть бути інтерпретовані як одиниці інших енергетичних діапазонів (рис. 2.13., 2.14.). Вхідна тестова послідовність (рис. 2.15.), сформована за даними [23] буде сильно спотворена [25].

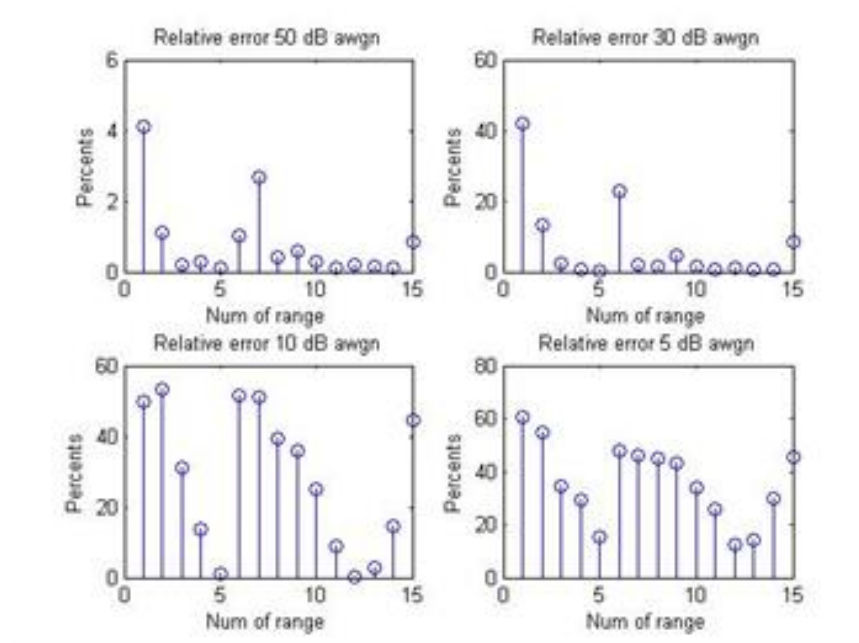


Рис. 2.13 – Відносна зміна кількості підрахованих частинок у діапазонах енергій в одному напрямку (у відсотках) [25]

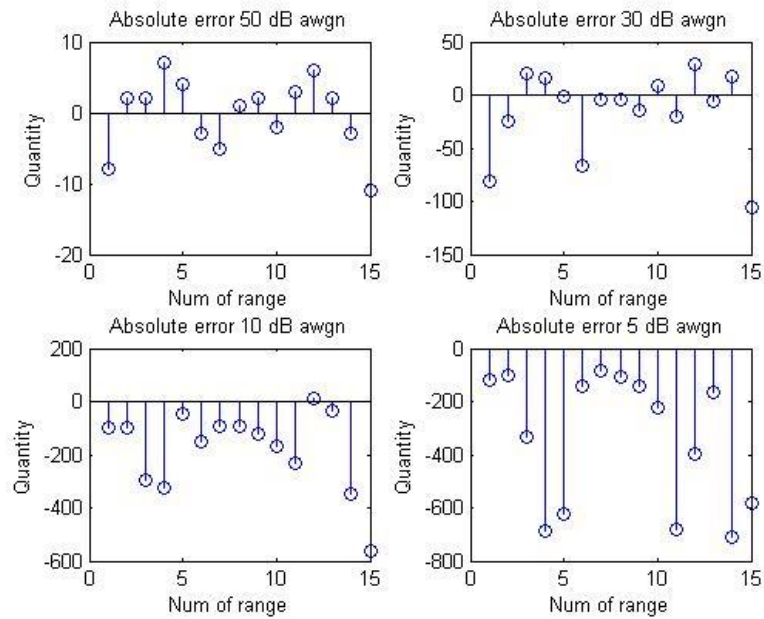


Рис. 2.14 – Абсолютна зміна кількості підрахованих частинок у діапазонах енергій в одному напрямку (у штуках, вибірка становить 25000 частинок) [25]

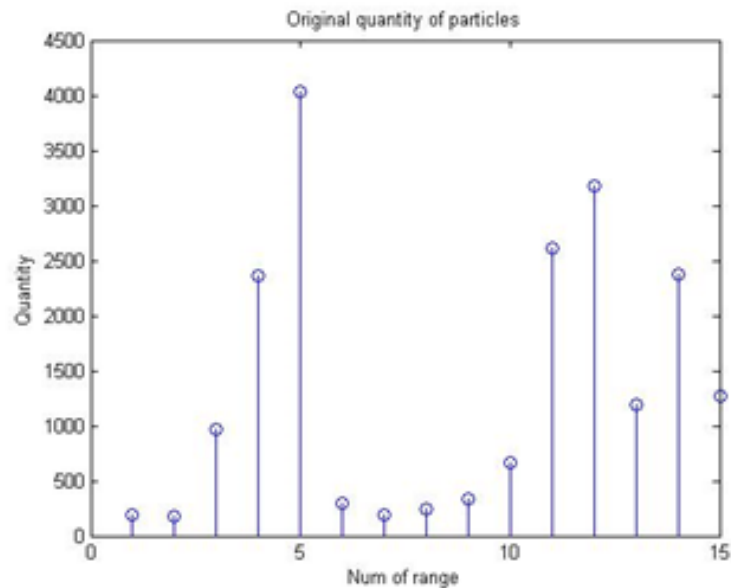


Рис. 2.15 – Кількість заряджених частинок у енергетичних діапазонах без додавання шумів [25]

2.8 Вибір формату розміщення дослідницької апаратури

Оскільки, раніше було обрано метод дослідження запуском на LEO малогабаритного реєстратора-аналізатора субрелятивістських електронів, тож необхідно прийняти рішення, як буде сконфігуровано дослідницьке обладнання при запуску в космос.

Так, як будь-яке дослідження має обмежені ресурси такі, як час та гроші, тож є два варіанта: повністю конструювати штучний супутник самостійно, який буде максимально можливо задовольняти усім вимогам, або скористатися деякими наявними на ринку комерційними рішеннями, що максимально влаштовують команду розробників.

Крім корисного навантаження, спроектованого спеціально для даної наукової місії, на борту мають бути присутні стандартні системи забезпечення роботи супутника: акумулятори, сонячні батареї, бортовий комп'ютер, обладнання каналу зв'язку, системи високочутливих датчиків та інше.

Заплановані вага та об'єм корисного навантаження невелика, тому через відсутність громіздких та габаритних деталей, запускати окрему ракету-носій є недоцільно, через очевидну дороговизну запуску.

Серед широкоживаних серійних моделей команду розробників зацікавив, насамперед, модуль формату CubeSat. Стандарт CubeSat є розробкою Каліфорнійського політехнічного державного університету за допомогою міжнародної співпраці. Габаритні показники системи CubeSat – це куб зі стороною 10 см. та масою до 1,33 кг [20] (рис. 2.16.).

Також регламентована і система для розгортання угруповання таких супутників, яка називається P-POD. Вона здатна переносити три стандартних супутника CubeSat і служить інтерфейсом між CubeSat та Ракетою-Носієм. P-POD - це прямокутна коробка з дверцятами та пружинним механізмом (рис. 2.17.). [20].

Після того, як механізм випуску P-POD запускається сигналом розгортання, що надсилається від ракети-носія, набір торсійних пружин на дверному шарнірі змушує двері відкриватися, а CubeSat розгортається основною пружиною, ковзаючи по її рейках і P-POD. P-POD складається з анодованого алюмінію. CubeSat ковзають по ряду рейок під час викидання на орбіту [20].

Перевагами такого рішення є:

- Дешевизна запуску, бо одна ракета-носіє виводить на орбіту десятки таких супутників одночасно, що неодмінно сильно здешевлює запуск.
- За необхідності, коли розміри 100x100x100 мм. є замалими для корисного навантаження, можливо з'єднати декілька таких модулів між собою, але не більше трьох (хоч і доступний типорозмір 3U+).
- Наявність повної загальнодоступної інформації в мережі Internet, щодо стандарту.

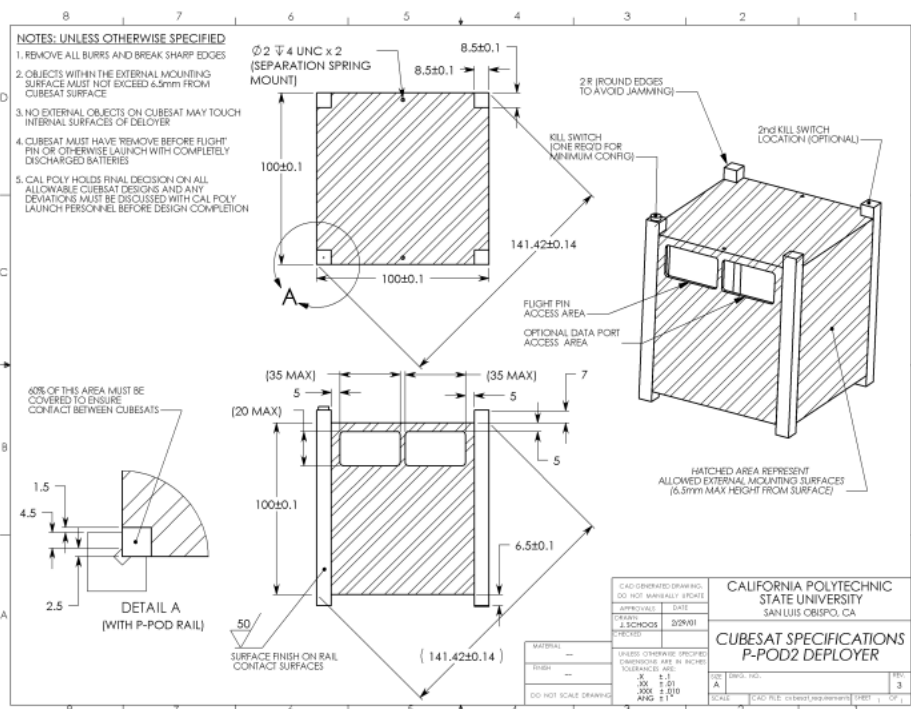


Рис. 2.16 – Кресленник корпусу стандартного модулю CubeSat [20]

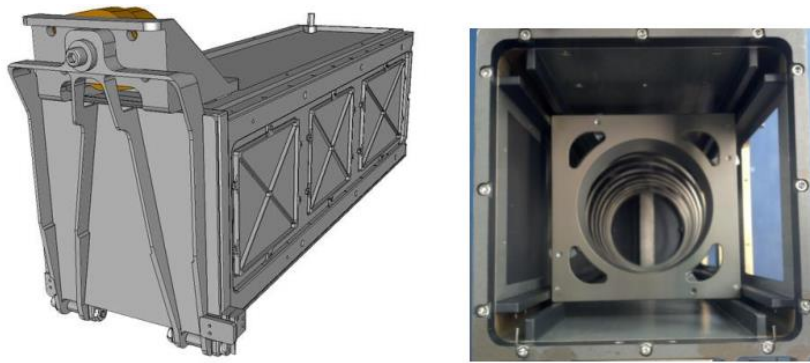


Рис. 2.17 – Зовнішній вигляд системи P-POD та її поперечний переріз
[20]

Висновки до другого розділу дисертаційного дослідження

1. За основу для детектування та спектрометрії субрелятивістських частинок було взято сцинтиляційні детектори, виготовлені з паратерфенілу.
2. Обґрунтовано використання методу збігів/антизбігів для ідентифікації частинок при використанні детекторної системи, складеної з трьох сцинтиляційних детекторів
3. Окреслено базову структуру спектрометричного каналу та принцип його функціонування.
4. На базі розробленої моделі було розроблено алгоритм з ідентифікації сортів та частинок.
5. Дістала апаратної реалізації модель з ідентифікації сортів та енергій заряджених частинок.
6. Було доведено коректність роботи при різних співвідношеннях С/Ш апаратної реалізації розробленого алгоритму за схемою «дерево рішень» запропонованої моделі з ідентифікації сортів та енергій заряджених частинок.
7. Обрано формат розміщення корисного навантаження для виведення супутника на LEO у вигляді наносупутника.

3. РОЗРОБКА МОДУЛЮ ЦОС

3.1 Описання цілей та задач модулю ЦОС

Задачі, які покладаються на модуль ЦОС можна коротко окреслити, як обробка сигналів, які містять інформацію про типи та сорти частинки, що пройшли через детекторну систему та плату АОС і формування керуючих сигналів перевірки модулю АОС.

Загальний процес роботи програми для плати цифрового оброблення сигналів можна поділити на декілька частин:

- Самотестування цифрової та аналогової плати
- Очікування появи сигналів з аналогової плати
- Визначення типу та діапазону енергій зафіксованих детекторами часток
- Формування кадру та передача даних до бортового комп'ютера

Самотестування плати відбувається при першому запуску системи або за командою з бортового комп'ютера і полягає у формуванні тестових сигналів для аналогової плати за допомогою вбудованого ЦАП першого МП. Параметри тестових сигналів надано замовником (рис. 3.1.) [30].

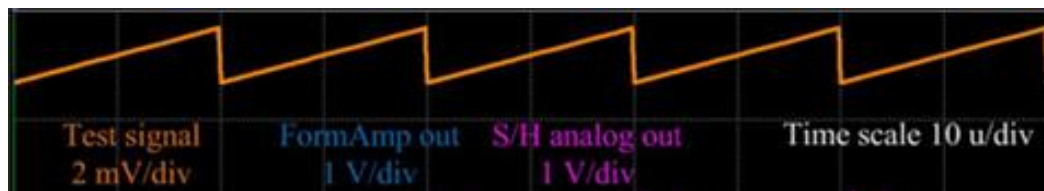


Рис. 3.1 – Осцилограма тестового сигналу для оцінки працездатності спектрометричного каналу [31]

Сигнали (пилкоподібний сигнал можна доповнити іншими формами), сформовані модулем ЦОС подаються на входи модулю АОС, в результаті проходження через усі ланки модулю АОС, на вхід модулю ЦОС поступають

сигнали наявності заряджених часток на детекторах і запускаються алгоритми ідентифікації заряджених часток. Контролюється правильність роботи алгоритму ідентифікації у відповідності до поданих тестових сигналів. Також визначається загальна готовність системи до роботи та формуються відповідні звіти.

Після завершення самотестування, або чергового визначення типів часток програма переводить МП в режим очікування. З режиму очікування МП виходять за зовнішнім перериванням, що спрацьовує при надходженні сигналу з модулю АОС, за командою від бортового комп'ютера для проведення самотестування, або контролю бортових параметрів: температури та напруги живлення.

3.2 Опис роботи наносупутника за його структурою

Наносупутник, який планується до запуску матиме такі складові, як: блок системи живлення (EPS), блок визначення висоти польоту та контрольних приладів (ADCS), комунікаційну систему (COM), бортовий комп'ютер (OBC), декілька плат з корисним навантаженням (Payload 1...N). Опис роботи модулю ЦОС за структурною схемою (рис. 3.2.) [30].

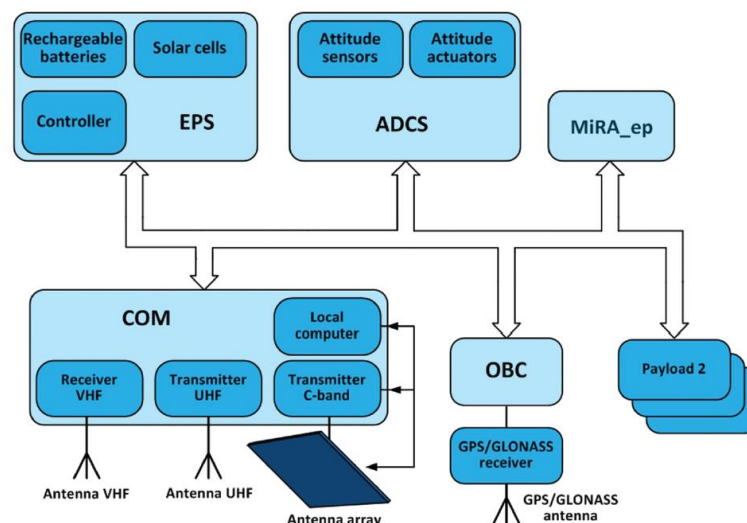


Рис. 3.2 – Узагальнена структурна схема наносупутника у форматі CubeSat [30]

Система електроживлення використовує сонячні та акумуляторні батареї для підтримки постійним всіх систем наносупутника. Контролер живлення дозволяє оптимізувати споживання усіх використовуваних систем [30].

Блок визначення висоти польоту та контрольних приладів забезпечує надійне керування орієнтацією у просторі та направляє антенні системи у потрібному напрямку. Точність контролю положення у просторі закладається менше одного градуса [30].

ОВС забезпечує координовану роботу всіх систем та формує пакет наукових даних.

За допомогою GPS приймача відслідковується швидкість наносупутника у просторі. В системі зв'язку наявні три незалежні канали для прийому команд керування системами наносупутника в трьох різних частотних діапазонах (UHF, VHF, C). Швидкість передачі даних висхідною лінією зв'язку за допомогою ненаправленої антени, що розгортається в діапазоні VHF становить 2,4 кБіт/с. Низхідною лінією зв'язку в діапазоні UHF забезпечується швидкість 96 кБіт/с іншою ненаправленою антеною, що розгортається [30].

Локальний комп'ютер блоку комунікаційної системи формує діаграму спрямованості антен та контролює роботу мікрохвильового передавача наносупутника з функціоналом гіпервізора [30].

Викликами при створенні приймально-передавальної системи наносупутника є: підвищення швидкості передавання пакетів з науковою інформацією до наземного пункту керування, знайдення компромісу з приводу потужності випромінювання передавача, оскільки надмірна потужність може призвести до скорочення сеансу передавання інформації до наземного пункту керування [30].

Алгоритм функціонування приймально-передавального пристрою виглядатиме наступним чином: при появі супутника в зоні видимості наземного пункту керування, подається команда до супутника по VHF лінії зв'язку.

Базуючись на характеристиках орбіти, наземна станція та супутник координують бортовий мікрохвильовий зв'язок, який шукає й уточнює позицію антенної системи наземної станції та точне наведення матрицею передачі за допомогою радару з синтезованою апертурою [30].

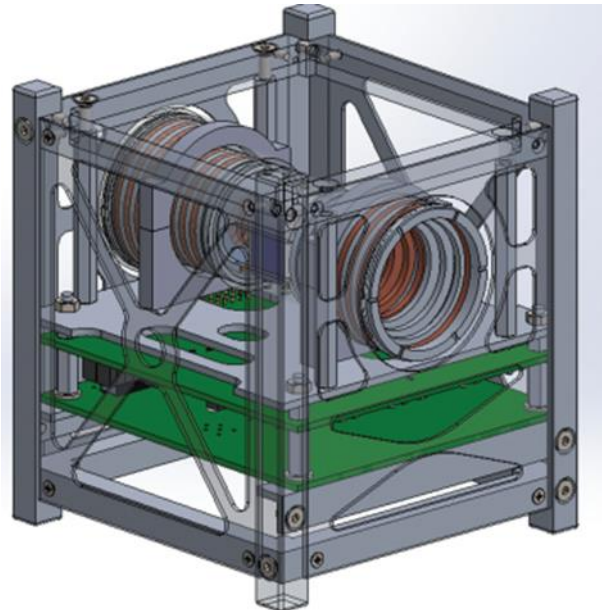


Рис. 3.3 – Загальний вид першого варіанту розміщення корисного навантаження у блоці формату CubeSat 1U [30]

Корисне навантаження наносупутника позначено (рис. 3.2.) як Payload та MIRA_ер. Ці блоки містять детекторну систему з коліматором, фотодіоди, плату АОС та модуль ЦОС (рис. 3.3.).

3.2.1 Опис та призначення сигналів, що протікають по схемі

Таблиця 3.1– Перелік керуючих сигналів модулю ЦОС

№	Назва	Призначення
1	+Ubias	Напруга зміщення +35V сцинтиляційного детектора
2	CSA_TEST1..3	Тестовий сигнал блоку ЗЧПП
3	CSA_DET1..3	Слабкий сигнал, що знімається з катоду фотодіоду
4	PD_HP	PD_HP цифровий вихідний сигнал, по фронту якого, відбувається запуск зовнішнього АЦП для перетворення диференційної пари вихідних сигналів OUT_PD1- та OUT_PD1+ блоку двоканального пікового детектора

Продовження табл. 3.1

5	OUT_PD1..3-	OUT_PD1- перший аналоговий сигнал диференційної пари
6	OUT_PD1..3+	OUT_PD1+ другий аналоговий сигнал диференційної пари
7	PD_RESET	Цифровий вхідний сигнал, по рівню «0» якого, відбувається скидання каналу блоку двоканального пікового детектору.

3.3 Опис схеми електричної принципової

Для вирішення завдань цифрової обробки сигналів пропонується: перший – з використанням ПЛІС, другий – з використанням двох тридцятидвохрозрядних мікроконтролерів загального призначення STM32F407. Використання двох мікроконтролерів підвищує надійність модуля при виході з ладу одного з них. Останнє забезпечується тим, що кожен канал дозволяє перевіряти працездатність попереднього і змінювати його конфігурацію безпосередньо під час сеансу зв'язку під час польоту супутника над наземною станцією управління. Наявність в МП двох ЦАП дозволяє нам перевірити вихідні тестові сигнали для перевірки функціональності аналогового модуля. Другий МП обмінюється даними через послідовний інтерфейс UART, таким чином перевіряючи працездатність першого. Нарешті, працездатність другого мікроконтролера перевіряється бортовим комп'ютером. Таким чином, підвищується надійність системи. Тому модуль ЦОС буде побудовано на основі двох МП STM32F407 [24].

В основу розробленої схеми для плати ЦОС закладена структура, зображена на (рис. 3.4.).

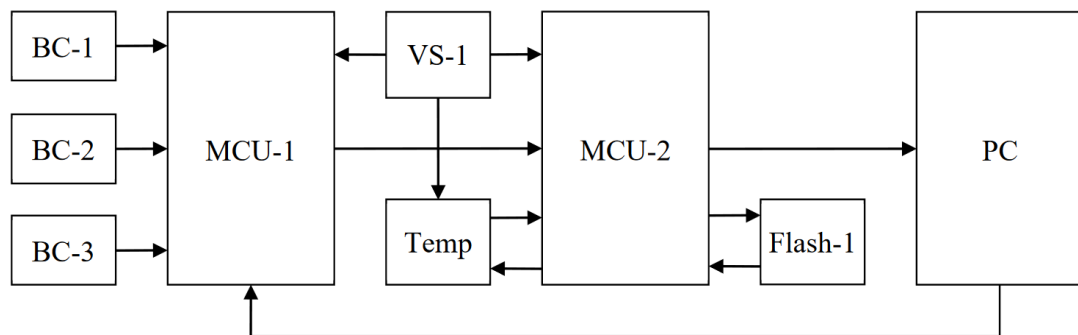


Рис. 3.4 – Спрощена структурна схема модулю ЦОС [24]

де: ВС-буферний каскад, MCU-мікроконтролер, VS-стабілізатор напруги, temp-датчик температури, Flash-мікросхема FLASH пам'яті, PC-персональний комп'ютер.

Використання у схемі одразу двох МП підвищує надійність системи у разі виходу з ладу одного з них. МП виконують такі функції, як: квантування вбудованими в МК з 12-бітними АЦП, тестування наявними ЦАП готовності до роботи оцінкою параметрів тестового сигналу, що має проходити через плати АОС та ЦОС, збереження та сортування за типами та діапазонами енергій масивів у виділених 15 діапазонах енергій за двома напрямками прильоту заряджених частинок, реалізуючи метод антизбігів [24].

Сортування за енергіями здійснюється за присвоєними рівнями АЦП відповідним рівням напруги. Зв'язок з PC і передача до нього даних здійснюється за допомогою інтерфейсу UART та цифровим буфером (DBC) для узгодження логічних рівнів між MCU-2 та PC (3,3В та 5В), (рис. 3.4.). Блоком VS-1 проводиться стабілізація напруги живлення МП, датчик температури надає інформацію про температуру всередині наносупутника, (рис. 3.4.). Старт роботи АЦП відбувається сигналом, що подається з блоків пікових детекторів плати АОС [24].

В комірках масиву зберігається кількість зареєстрованих заряджених частинок і реалізована передача цих даних у FLASH пам'ять, (рис. 3.5.). Вибір типу пам'яті було зроблено з міркувань живучості мікросхеми такого формату (гарантованої виробником кількості циклів запису даних у пам'ять) [24]. Але ці довідкові дані без радіаційних випробувань.

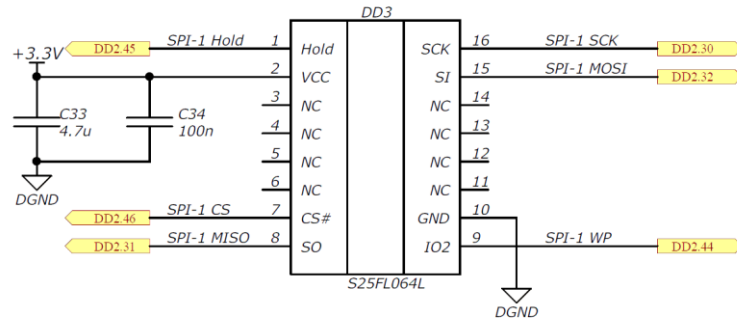


Рис. 3.5 – Схема ввімкнення блоку Flash

Вибірка даних з блоку Flash перетворюється на науковий кадр, який передається на наземний пульт керування.

До того ж нема однозначних даних про виключну перевагу у надійності одного типу пам'яті над іншими в умовах радіаційного впливу. А проблеми з усіма можливими типами пам'яті (EEPROM, FLASH, SRAM), як: перезапис даних за іншими адресами, аномальне збільшення споживання струму після збільшення дози випромінювання (рис. 3.6.) [7], відсутність читання/запису пам'яті, багатобітові помилки.

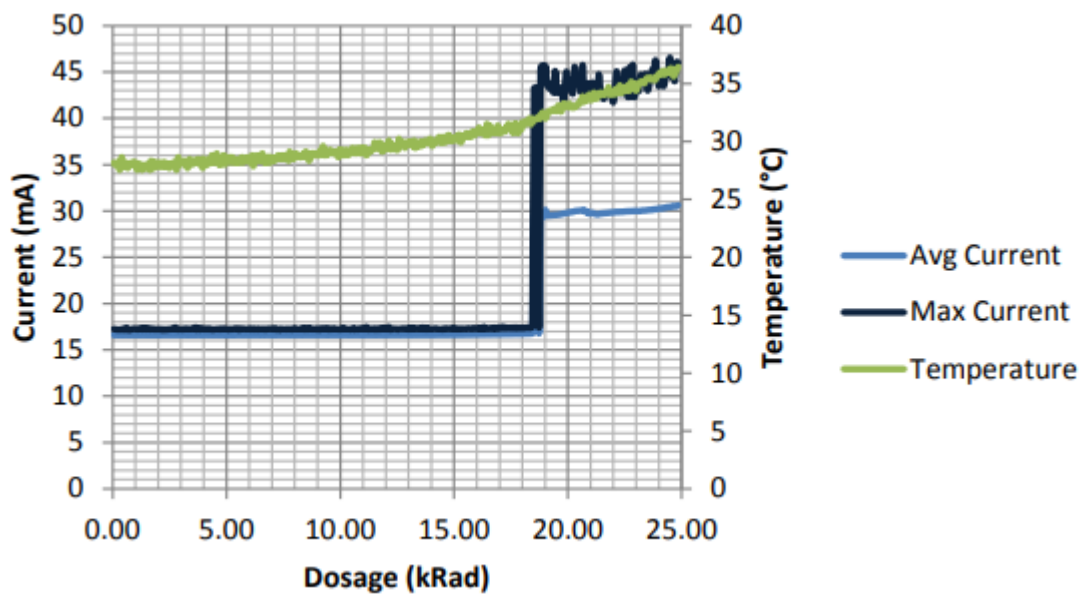


Рис. 3.6 – Збільшення струму споживання у зв'язку з поглинутою дозою опромінення [7]

Тому в проекті було передбачено дублювання не тільки МП, а й мікросхем пам'яті (рис. 3.7.).

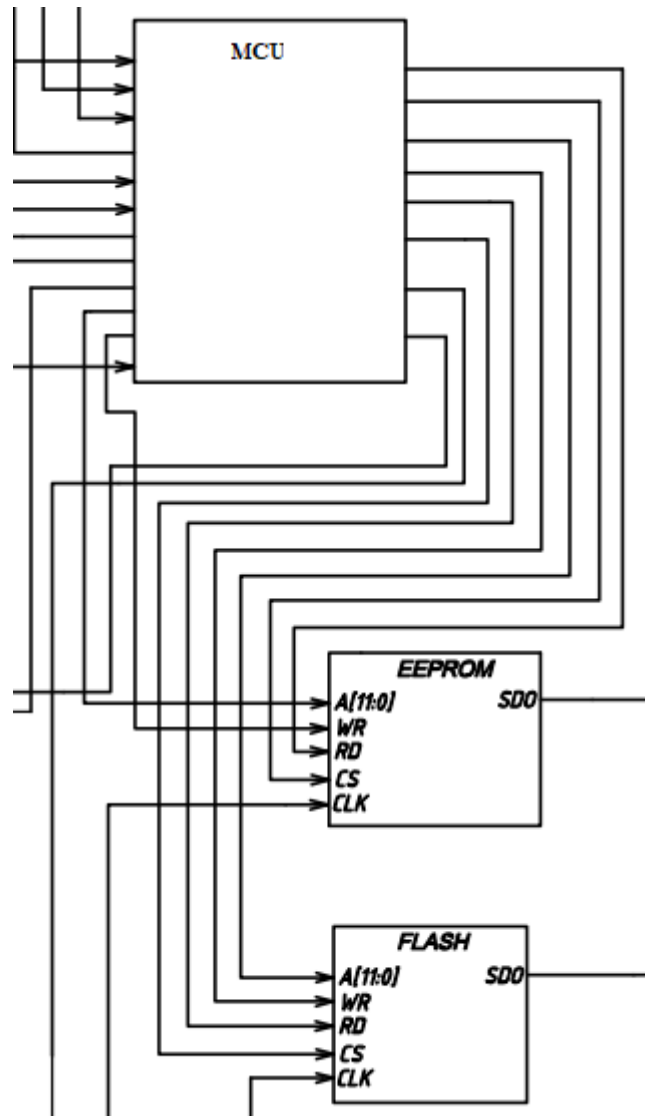


Рис. 3.7 – Частина функційної схеми з двома мікросхемами пам'яті різних типів

3.3.1 Блок перетворювача диференційного сигналу в уніполярний

Після проходження через вузли плати АОС такі, як ЗЧПП, ФП, блок пікових детекторів отримуємо симетричний диференційний сигнал перетворений

з уніполярного, виходячи з міркувань завадостійкості при проходженні сигналу з плати АОС в плату ЦОС. Щоб провести квантування сигналу, потрібно повернути йому уніполярну форму. Для цього в схемі передбачено блоки ВС-1,..ВС-3, (рис. 3.4). Схема електрична принципова блоку ВС зображена на (рис. 3.8).

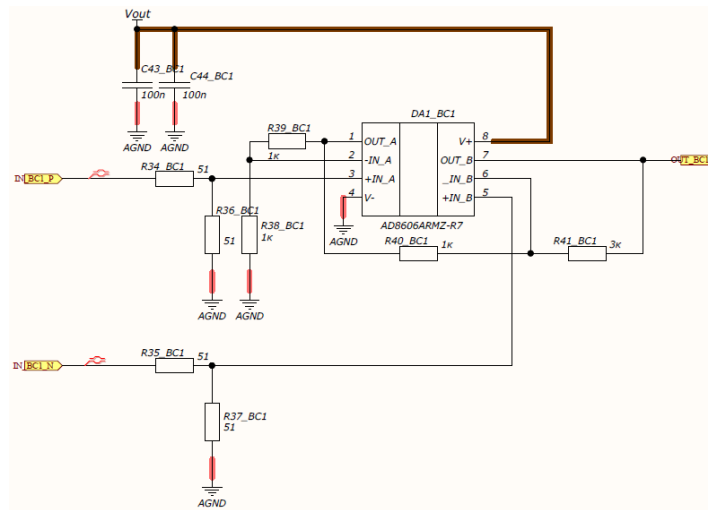


Рис. 3.8 – Схема ввімкнення аналогового буферу (ВС) [30]

Ввімкнення у неінвертуючому включенні операційних підсилювачів у ВС реалізує високий вхідний опір та придушення синфазної завади, яка могла з'явитися в результаті дії зовнішніх завад на диференційну пару.

3.3.2 Включення перетворювача логічних рівнів

На (рис. 3.9.) наведено схему перетворювача логічних рівнів, який забезпечує узгодження логічних рівнів аналогової плати, які складають 5 В для логічної «1» та рівнів цифрової плати, які відповідають напрузі 3,3 В. Така потреба виникла через 3,3В логіку периферії, що застосована у використаних МП.

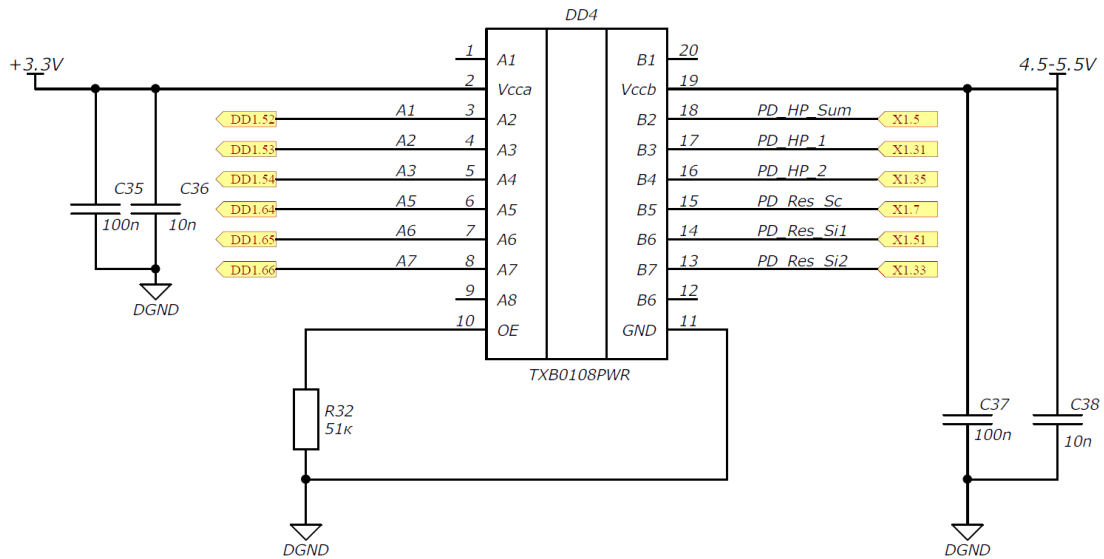


Рис. 3.9 – Перетворювач логічних рівнів між цифровою та аналоговою платами [30]

До таких сигналів відносяться сигнали запуску аналого-цифрового перетворення, скидання фіксації каналів тощо.

Схема перетворювача логічних рівнів реалізована на спеціалізованій мікросхемі TXB0108PWR.

3.3.3 Розв'язка за живленням цифрової та аналогової частини схеми

Для розв'язки за живленням аналогової та цифрової частини плати ЦОС встановлено два малопотужні спеціалізовані DC/DC перетворювачі напруги, потужність розсіювання яких достатня для живлення електронних компонентів, присутніх на схемі. З'єднання плати ЦОС та ОВС відбувається простим штекерним роз'ємом “Male-male”, на платі цьому відповідають роз'єми “female” (рис. 3.10.).

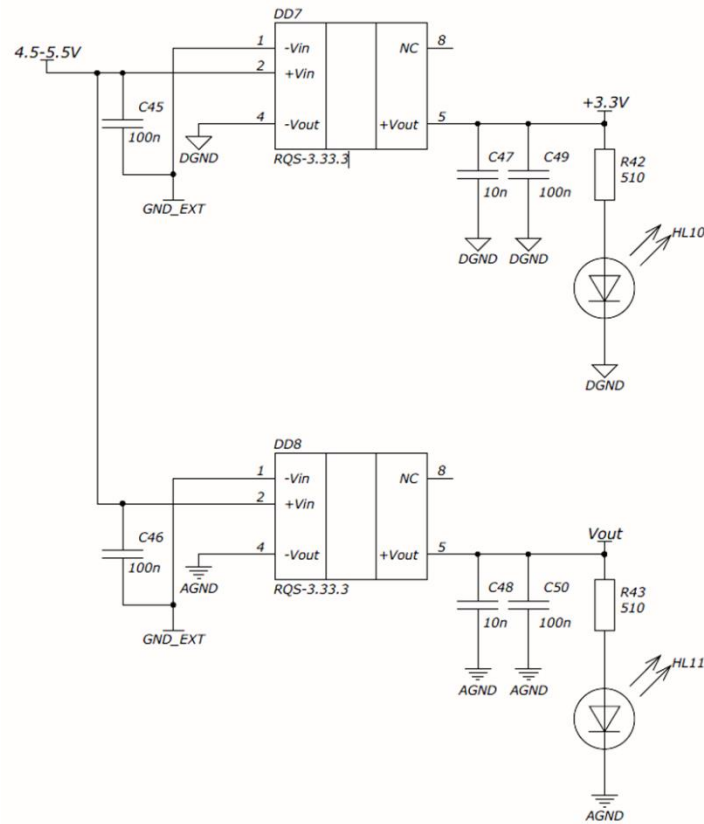


Рис. 3.10 – Схема ввімкнення перетворювачів напруги

Світлодіоди (HL10, HL11) (рис. 3.10) потрібні, здебільшого, в процесі налаштування апаратури перед запуском на орбіту і відповідають за індикацію роботи перетворювачів.

Також при проектуванні приділялася увага трасуванню друкованої плати з поділом на цифрову та аналогову частини (рис. 3.11.). Де в зоні А розташовуються всі цифрові елементи (рис. 3.11), а в зоні Б всі аналогові елементи для уникнення кондуктивного випромінювання між двома частинами схеми. Оскільки обрано шлях односторонньої топології плати, то провідники здебільшого найкоротші для уникнення підвищення опору доріжки, оскільки у схемах присутні елементи з низьким опором і щоб провідник раптом не став джерелом випромінювання. Також розділено аналогове та цифрове заземлення.

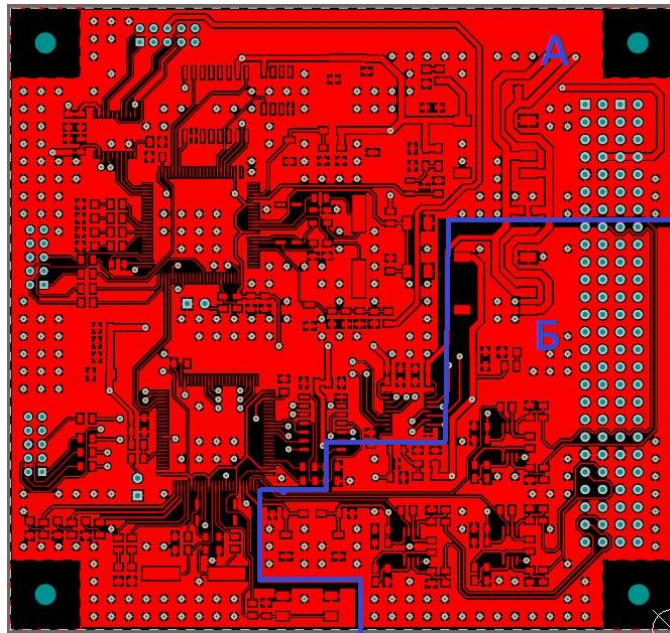


Рис. 3.11 – Верхній шар доріжок друкованої плати

Товщина діелектрика обрана 1,6 мм, для забезпечення механічних властивостей плати в умовах підвищених вібрацій та прискорень, які присутні в процесі виведення наносупутника на орбіту.

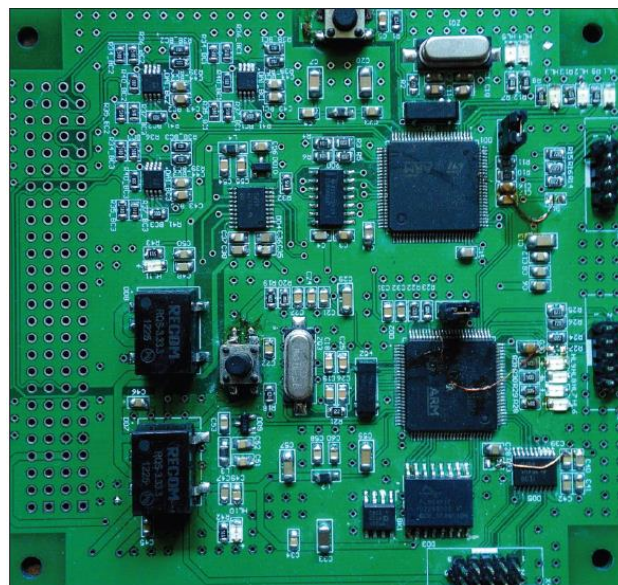


Рис. 3.12 – Фото виготовленого модулю ЦОС з основними компонентами на його поверхні [30]

3.3.4 Вибір варіанту взаємодії модулю ЦОС з бортовим комп'ютером

Інтерфейсів передачі даних між периферією на ринку існує досить багато. З-поміж інших, як за універсальністю підключення конструктивно, так і з широкою програмною підтримкою в різних операційних системах команда розробників зупинилася на виборі віртуального СОМ порту. Таке рішення є традиційним та надійним з вільно доступними драйверами та перехідниками з U(S)ART на широковживаний інтерфейс USB для налаштування прототипу, або наземного макету-прототипу модулю ЦОС. До переваг застосування такого рішення можна віднести швидке підключення та зміна прошивки модулю в разі необхідності внесення змін при налаштуванні.

3.4 Опис роботи модулю ЦОС по програмі

3.4.1 Робота АЦП по програмі

1. Створюються три статичні буфери, що мають заповнитися значеннями після завершення перетворення значення зафіксованого піковим детектором плати АОС.
2. Встановлюється регулярна послідовність перетворень каналів АЦП, що перелічена у відповідному масиві. Ключове слово функції `static` обмежує область видимості функції, роблячи її локальною, ключове слово `inline` використано для автоматичної оптимізації функції.
3. Задається очікування на старт переривання за фронтом імпульсу, що надходить з плати АОС.
4. Викликом відповідної функції починається перетворення у АЦП з використанням регулярних каналів АЦП. Режим `continuous conversion mode` запускає нове перетворення даних після завершення попереднього.
5. Далі окремими функціями вмикається DMA та живлення АЦП, бо при ініціалізації роботи МП у частини периферії живлення має бути вимкнене.
6. Генерується переривання по закінченню перетворення АЦП.

7. Для фільтрації даних після АЦП використовують прості алгоритми, як метод ковзного середнього, що дозволить позбавитися від маскувальних шумів, викликаних порушенням електромагнітної сумісності та особливостями роботи АЦП.

3.4.2 Робота блоку USART

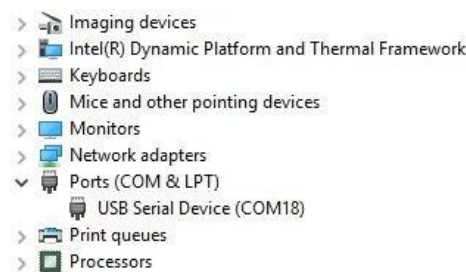
1. Встановлюються базові параметри інтерфейсу USART: бітрейт (115200 біт/сек), кількість бітів даних (8), стопових біт (1), без контролю (встановлення) бітів парності.

2. Дозволяється робота блоку USART на передачу даних.

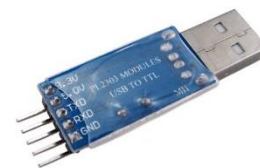
3. Для передавання даних через віртуальний COM-порт (рис. 3.13.) використовується аналог стандартної C-подібної функції `printf`, але у вбудованих системах її доводиться замінити сумішню функцій стандартних бібліотек `putc` та `write` з тимчасовим маскуваням інших переривань на час операцій з потоком стандартного виводу, що фактично тут реалізується.

4. Передаються дані з буферу, доки він не стане порожнім.

5. Генерується переривання по закінченню передачі даних.



а)



б)

Рис. 3.13 – а) відображення COM порту в меню Device manager операційної системи Windows; б) фізичний перетворювач інтерфейсів

3.4.3 Робота блоку DMA

1. Очищуються регістри конфігурації та вимикається канал DMA.
2. Задається розмір буферу пам'яті, та канал, виділений для DMA, сумісний з роботою відповідного каналу АЦП.
3. Обирається ширина машинного слова (8, 16, 32 біт).
4. Встановлюється інкремент поточної адреси пам'яті в залежності від розміру даних, збереженого у машинному слові.
5. Встановлюється дозвіл для роботи DMA у циклічному, безперервному режимі.
6. Вмикається режим негайної передачі із/в пам'ять. При цьому режим FIFO автоматично вимикається.
7. Прописується напрям перетворення з периферії у пам'ять.
8. Визначається адреса, з якої, буде взято дані для передачі через DMA.
9. Обирається розмір буферу для передачі.
10. Генерується переривання після завершення передачі даних після якого, очищується флаг завершення передачі.
11. Після завершення роботи блоку DMA буфер очищується функцією memset.

3.4.4 Робота блоку DAC

1. Обрається GPIO для здійснення генерації сигналу.
2. Припиняється робота DAC на час конфігурування блоку DAC.
3. Вмикається зовнішній тригер, передаючи регістри з буферного у вихідний регістр DAC.
4. Вказується подія, за якою, керується генерація частоти. В проекті обрано переповнення таймера TIM6.

5. Генерується запит на очікування події від блоку DMA. Також вмикається сам DAC з часом встановлення близько 10 мкс.

3.4.5 Програмна ідентифікація частинок

Для встановлення діапазону енергії зарядженої частинки, здійснюється перевірка спрацювання комбінацій, як у таб. 2.1. Надалі повертається діапазон енергій, що призводить до збільшення лічильника відповідного діапазону енергій. Значення очікуваних енергій було конвертовано у коди АЦП обраного МП прямопропорційно значенню можливих діапазонів енергій, таб 3.2. Так, мінімально можливому значенню зареєстрованої енергії детекторною системою, рівному 0,2 MeV відповідатиме код АЦП рівний нулю, а максимально можливому значенню в 36 MeV відповідатиме значення $2^{12}-1$, рівне 4095, оскільки у обраного МП на борту встановлений 12 бітний АЦП послідовного наближення [22].

Коди АЦП вважатимемо еквівалентом максимуму енергії зарядженої частинки, що було апроксимовано функціями Гауса [49].

Таблиця 3.2– Відповідність кодів АЦП діапазонам енергій у MeV

E inc (MeV)	ADC codes	ΔE_{dep} (MeV)	ADC codes	Range	Particle type
0.2-0.5	22-55	0.1-0.48	12-54	1	el+prot
0.5-1.0	56-114	0.48-0.95	55-108	2	el+prot
3.5-5.0	398-570	1.0-3.5	109-398	3	prot
5.0-10.0	570-1137	3.5-9.2	399-1046	4	prot
10.0-20.0	1137-2275	9.2-19	1047-2161	5	prot
1.0-1.4	114-159	0.1-0.85	12-96	6	el
1.4-1.8	159-205	0.85-1.3	97-147	7	el
1.8-2.3	205-261	1.3-1.9	148-216	8	el
2.3-3.0	261-341	1.9-2.7	217-307	9	el
3.0-5.0	341-570	2.7-4.4	308-500	10	el
18-21	2047-2389	0.1-11	12.0-1251	11	prot
21-24	2389-2730	11-19	1252-2161	12	prot
24-28	2730-3185	19-22	2162-2502	13	prot
28-32	3185-3640	22-28	2503-3185	14	prot
32-36	3640-4095	28-31	3186-3526	15	prot

3.5 Вибір частотного діапазону каналу супутникового зв'язку та його оптимізація

При проектуванні космічної апаратури варто подбати про надійний канал передачі зібраних даних з борта супутника на станції стеження, що розташовані на поверхні Землі, або інші об'єкти у космічному просторі [29].

Вибір каналу зв'язку з такими супутниками має ряд обмежень: мала потужність передавача супутника, малий розмір антенної системи супутника, короткий час знаходження супутника над станцією стеження та інше. Також великий вплив має об'єм наукової інформації, що треба передати на станцію стеження [29].

Вибір діапазону робочих частот обмежений діапазонами частот, що починаються від 8.3 кГц, закінчуючи 275 ГГц (вище не розподілено). Тому, через загальновідомі факти про розповсюдження радіохвиль кожного діапазону, діапазони довгих, середніх, інфрачервоних хвиль не підходять для практичного застосування при великих об'ємах передаваних даних. У випадку низьких частот є залежність від часу доби/року та величини антенного обладнання, що призведе до нестабільної передачі даних супутника та конструктивних проблем [29]. У випадку інфрачервоного діапазону є проблема з каналом зв'язку на великі відстані та недостатньо розвинута електронна база в цьому діапазоні.

Розглянемо особливості поширення радіохвиль в атмосфері діапазону УКХ. Ослаблення радіохвиль в атмосфері Землі обумовлено трьома причинами: резонансним поглинанням енергії молекулярним киснем і неконденсованою водяною парою, поглинанням конденсованою водяною парою, вільними електронами в атмосфері. В межах іоносфери заломлення визначається електронною концентрацією, частотою зіткнень електронів з важкими частинками і частотою поширення хвилі. На висотах понад 1800 км. ефект заломлення в іоносфері стає незначним. Заломлення зменшується

вночі на частотах менше 1 ГГц, але залишається постійним на більш високих частотах [29].

Аналізуючи експериментальні результати, можемо зробити висновок, що найменше погонне загасання, яке вносять пари води і повітря має місце в діапазонах частот випромінювання нижче 10 ГГц. Виходячи з цього, відкидаємо діапазон міліметрових хвиль. Мінімальні помилки систем стеження, щодо оптичної осі антени, забезпечуються на частотах від 5 до 10 ГГц при куті місця $\sim 90^\circ$ і частоті > 1 ГГц. Отже, виберемо діапазон частот 5 ГГц (С-band), як компроміс між найменш можливим загасанням у атмосфері при мінімальних потенційних помилках систем стеження, які мають місце при іоносферній рефракції. В цьому діапазоні виділена досить широка смуга 550 МГц, окремо на передачу та на прийом. Слід зауважити, що при цьому зростає складність приймально-передавальної апаратури у порівнянні з більш низькочастотними діапазонами радіохвиль [29].

Оцінимо потенційний вигаш за рахунок вибору цифрової модуляції радіосигналу за потенційної потреби зменшення потужності передавача наносупутника. Теоретичне моделювання інструментом BER tool (рис. 3.14.) при умові проходження сигналу через канал з адитивним Гаусовим шумом (AWGN).

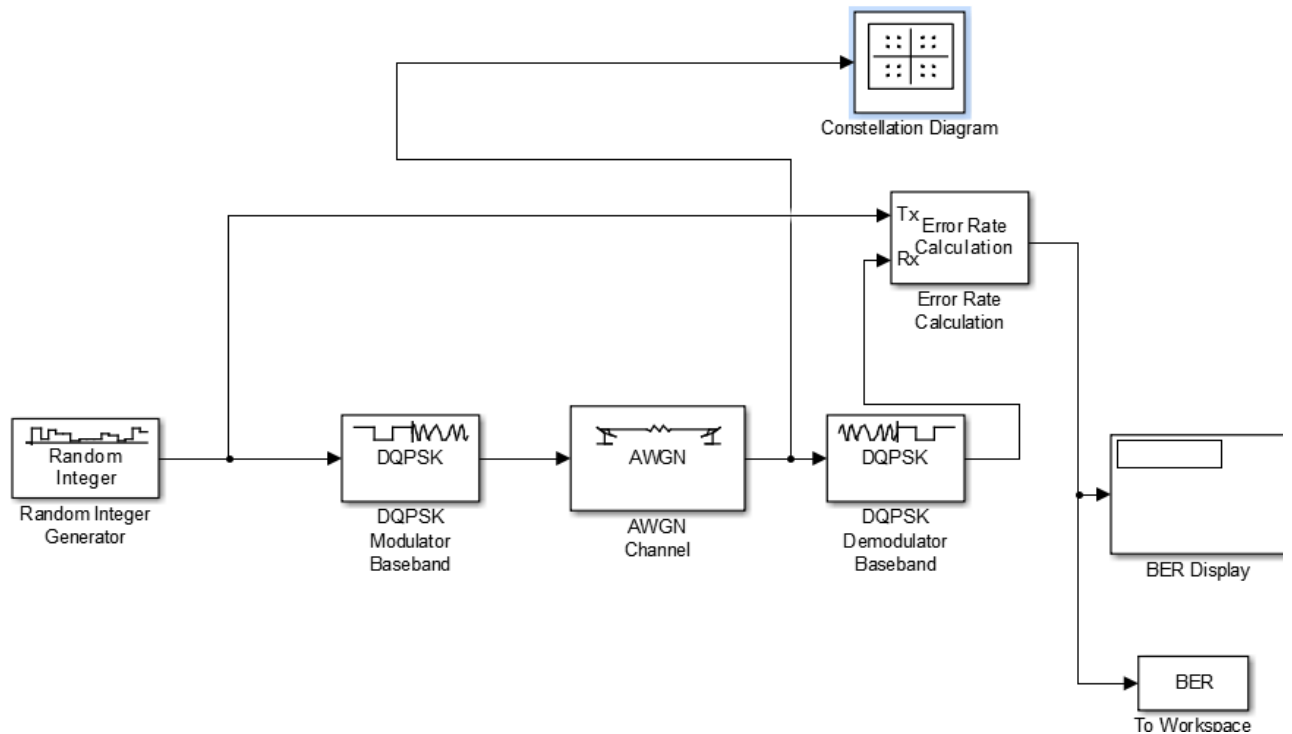


Рис. 3.14 – Блочна модель цифрового каналу для знаходження бітових ПОМИЛОК

Практичне повне співпадіння результатів (рис. 3.15.) використання модуляції PSK, OQPSK та QAM, які дали найгірше співвідношення E_b/N_0 (енергія біту/енергія завади). В результаті можемо зробити висновок, що за сталого значення BER найкраще співвідношення E_b/N_0 відповідає модуляції PAM, хоча суттєвого виграшу вибір модуляції з-поміж другого та четвертого порядку не дає. На практиці використовуються BPSK ($M = 2$) та QPSK ($M = 4$) та ASK [29].

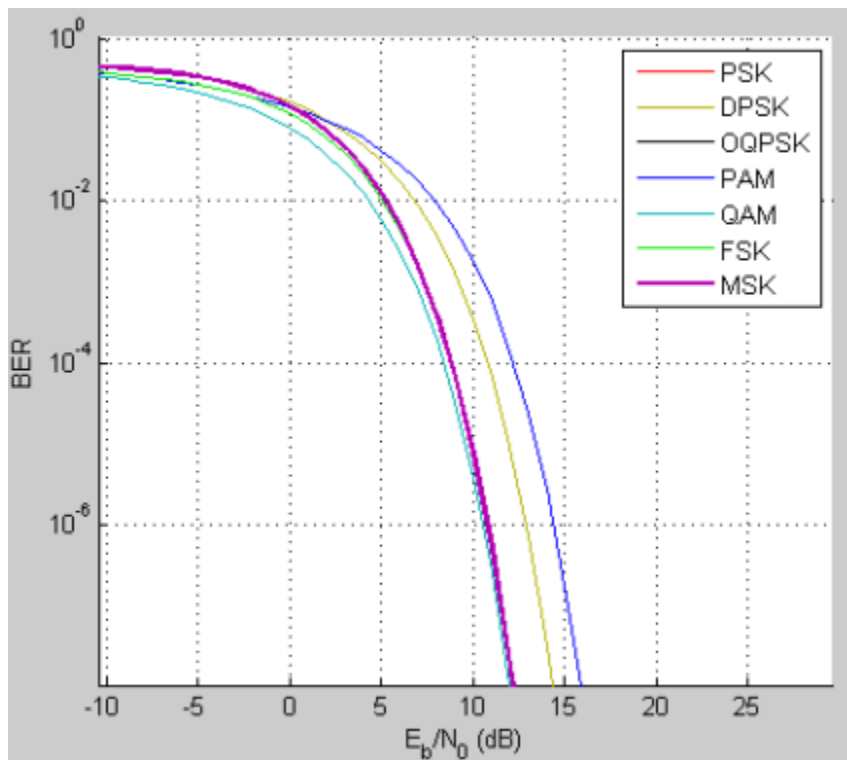


Рис. 3.15 – Залежність частоти бітових помилок від типу модуляції сигналу [29]

Оцінимо можливість забезпечити обмін необхідним об'ємом даних для конкретного приклада. За вимогами замовника об'єм наукових даних має становити 66 Мбайт [23] на добу. Період обертання навколо Землі з швидкістю, рівній третій космічній становить приблизно півтори години [29].

Оцінимо характеристики каналу зв'язку для відправки даних один раз на добу та будемо вважати, що наносупутник буде знаходитися у зоні видимості наземного терміналу на протязі часу, рівного приблизно 15 хвилинам (900 сек.). Прийємо необхідне мінімальне значенням SNR (E_b/N_0), рівним 5дБ. Необхідна смуга пропускання, що задовольняє критерію Найквіста та визначена з теореми Шеннона рівна 0,45 МГц. Звідси, визначимо необхідну пропускну здатність каналу, яка дорівнює 587 Кбіт/сек [29].

Для того, щоб пересвідчитись у коректності отриманих характеристик каналу зв'язку, як приклад, візьмемо деякі характеристики наносупутника PolyITAN-1, де було закладено швидкість обміну даними 500 Кбіт/сек на частоті в 2.4 ГГц, що є величиною одного порядку з розрахованими в цій роботі [29].

Отже, в ході аналізу сучасного стану проблеми для подальшої розробки приймально-передавальної апаратури було визначено наступні характеристики каналу зв'язку таб. 3.3.:

Таблиця 3.3 – Рекомендовані характеристики супутникового каналу зв'язку для мінімальної кількості прийнятих помилок

Діапазон робочих частот	5 ГГц
Смуга пропускання каналу зв'язку	0.454 МГц
Тип модуляції	QAM
Пропускна здатність каналу зв'язку	587 Кбіт/с
Відношення енергії біту до енергетичної спектральної щільності шуму E_b/N_0	5 дБ

Введемо ймовірність помилки, рівну 10^{-4} , щоб оцінити пропускну здатність та смугу пропускання реального, дискретного каналу зв'язку. Згідно результатам розрахунків пропускну здатності дискретного каналу з втратами, зробимо висновок, що зменшення пропускну здатності та, відповідно, смуги пропускання, порівняно з ідеальним каналом склало трохи менше 1,5%: 585 Кбіт/с та 0.453 МГц, відповідно [29].

Висновки до третього розділу дисертаційного дослідження

1. Описано цілі та задачі, які вирішує проектування модулю ЦОС
2. Визначено шляхи взаємодії модулю ЦОС з іншими частинами наносупутника.

3. Складено схему, показано особливості проектування та виготовлено демонстраційний макет модулю ЦОС.
4. Розроблено алгоритм функціонування ПЗ та код для програмування МП модулю ЦОС.
5. Отримано кількісну оцінку перетвореної енергії детектором та поставлено у відповідність із кількістю діапазонів енергій.
6. Знайдено оптимальні характеристики супутникового каналу зв'язку для мінімізації прийнятих помилкових даних.

4. РОЗРОБКА МЕТОДУ ІМІТАЦІЇ СИГНАЛІВ ЗІ СЦИНТИЛЯЦІЙНИХ ДЕТЕКТОРІВ

4.1 Формування цілей та задач імітатора сигналів зі сцинтиляційних детекторів

Для перевірки працездатності модулю ЦОС потрібна серія випробувань, проведена у іонізаційній камері з повним набором котрольно-випробувального обладнання. Сюди входять: калібровані джерела іонізуючого випромінювання з відомими характеристиками, сцинтиляційні детектори, кремнієві фотодіоди великої площі, модуль АОС (рис. 4.1.) [49]. Але через сучасні скрутні економічні умови це може бути недосяжним з-за різноманітних причин. Тому, розробка апаратних модулів при відсутності як давачів, так і перетворювачів слабких аналогових сигналів є оптимальним вирішенням завдання налагодження та тестування цифрового модулю реєстратора-аналізатора частинок. Тож, доцільно провести пошук варіантів для тестування без коштовних процедур заради здешевлення досліджень та спрощення процедури калібрування модулю ЦОС [30].

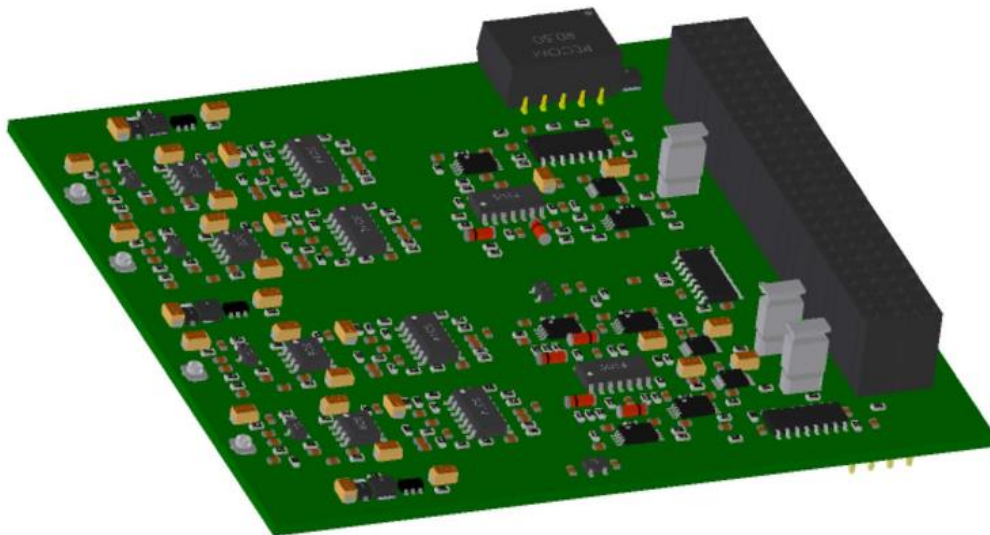


Рис. 4.1 – Загальний вигляд 3-D моделі спроектованого модулю АОС

Заради вирішення такого завдання і запропоновано створення імітатора сигналів зі сцинтиляційних детекторів.

Задачу, що вирішує імітатор окреслюється дуже коротко. Імітатор має виробляти сигнал подібний до сигналів зі сцинтиляційних детекторів, що виробляється контрольно-вимірною апаратурою.

4.2 Вибір конфігурації та опис роботи імітатора сигналів зі сцинтиляційних детекторів за структурною схемою

Враховуючи досвід розробки модулю ЦОС, було вирішено проводити розробку на основі МП STM32F407VG.

Проблемою такого рішення є наявність двох модулів ЦАП на борту (за розрядністю ЦАП є 12-розрядні, роздільної здатності яких, більш ніж достатньо, але при потребі у трьох спектрометричних каналах.

Першим варіантом побудови імітатора є схема з використанням трьох зовнішніх ЦАП, (рис. 4.2.).

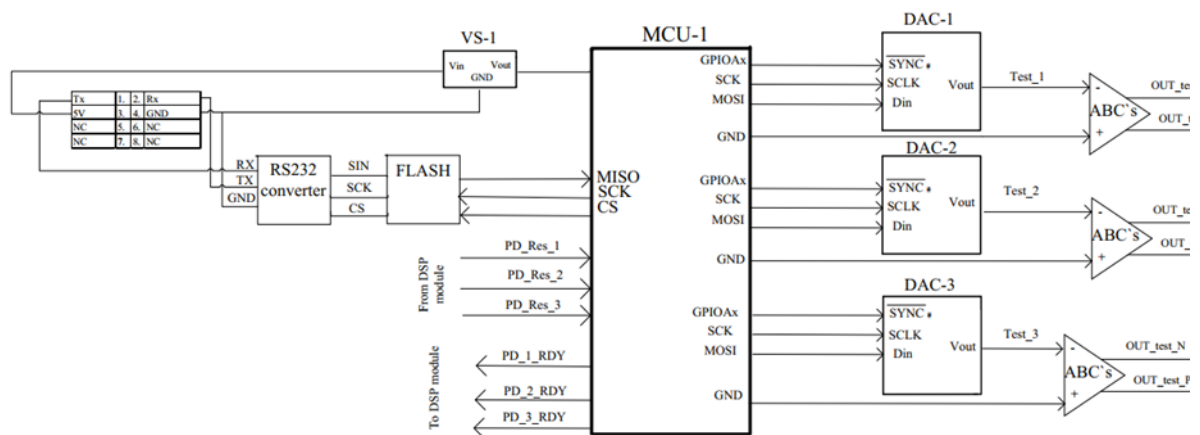


Рис. 4.2 – Спрощена структурна схема імітатора сигналів заряджених частинок з трьома зовнішніми ЦАП [30]

В такому виконанні GPIO МП мали бути сконфігуровано для роботи з інтерфейсом SPI. Недоліком такої реалізації є витрати на час встановлення трьох

ЦАП. Тобто, сумарно, враховуючи ще сигнал готовності, який становить ≈ 2 мкс, отримати загальний час, витрачений на встановлення ЦАП > 15 мкс, при типовому часу встановлення одного ЦАП загального призначення $\approx 4.5-6$ мкс. А період тестового пілкоподібного сигналу становить всього 20 мкс, (рис. 3.1.) [30].

Другим варіантом побудови імітатора є схема з схмотехнічним мультиплексуванням GPIO МП (рис. 4.3.).

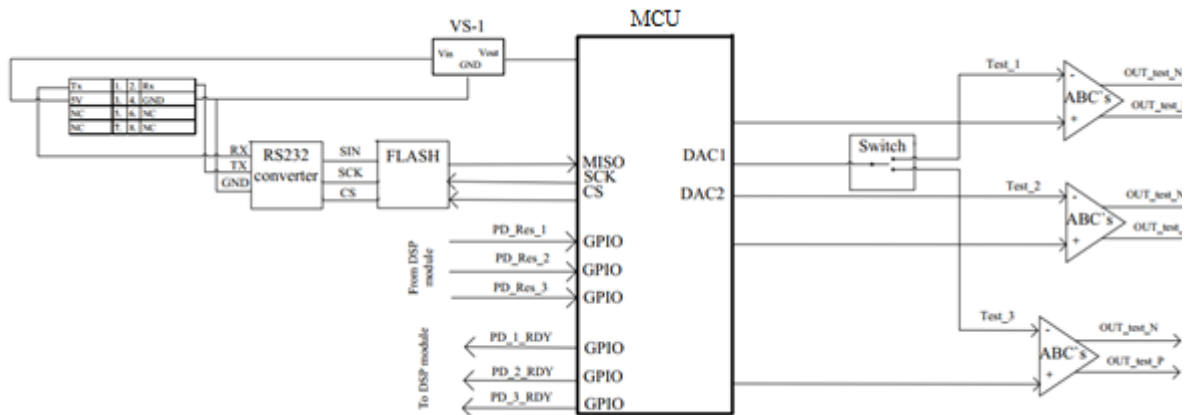


Рис. 4.3 – Спрощена структурна схема імітатора сигналів заряджених частинок з схмотехнічним мультиплексуванням виводів МП [25]

Оскільки, комбінацій, при яких одночасно спрацювають перший і третій канали не розглядається, так як це заборонена комбінація, таб 2.1, то ці канали можна перемикаєти, (рис. 4.3.). Другий канал повинен керуватися одним ЦАП, так, як він може спрацювати, як і з першим, так і з третім детектором. Для типової КМОН мікросхеми-перемикача, як CD4066, час перемикання становить десятки наносекунд, що не вносить суттєвих затримок поширення сигналу, як для поставленого завдання. При цьому відліки масивів для тестування будуть зберігатися в SPI Flash пам'яті [30].

Враховуючи те, що недоліки другого варіанту виконання імітатора не є критичними, порівнюючи з недоліком першого, то вибір за схмотехнічним мультиплексуванням виводів МП.

4.3 Адаптація характеристик спектрометричних каналів для побудови імітатора сигналів

Завданням було встановлено ряд характеристик спектрометричних каналів, за допомогою яких, таб 4.1 можна сформувавши вимоги до електронного імітатора сигналів.

Таблиця 4.1– Характеристики спектрометричних каналів [30]

№ п.п	Характеристика	Значення для каналів Д1 та Д3	Значення для каналу Д2
1.	Напруга живлення, В	± 5	± 5
2.	Споживана потужність каналу, мВт	≤ 80	≤ 100
3.	Чутливість ЗЧПП, мВ/МеВ	88.5	1.44
4.	Ємність детектору, пФ	< 100	< 50
5.	Підсилення формувача	≈ 5	≈ 660
6.	Допустимий шум каналу, мВ (кеВ)	≤ 18 (40)	≤ 67 (70)
7.	Динамічний діапазон каналу, дБ	не гірше 46	не гірше 40
8.	Тривалість імпульсу на рівні 0.1U, мкс	≤ 4	≤ 4
9.	Тривалість імпульсу на рівні 0.5U, мкс	≈ 1.5	≈ 1.5
10.	Максимальний темп рахунку каналу, кГц	200	200
11.	Час вибірки, мкс	≤ 2.5	≤ 2.5
12.	Розрядність АЦП, біт	12	12
13.	Коефіцієнт перетворення, кеВ/біт	≈ 1.4	≈ 0.61

За чутливістю ЗЧПП, таб 4.1. можна отримати вихідну напругу, що відповідає енергії частинки. Тобто значення в МеВ треба помножити на чутливість в мВ, отримаємо значення напруги, придатне для квантування модулем ЦОС. Відповідно, значення напруги при спрацюванні попарно першого і другого, другого та третього будуть різними через різну товщину детекторів. Чутливість ЗЧПП відрізняється у 62 рази (різниця чутливості товстого та тонких детекторів через їхню різну товщину), тому щоб значення напруги не опинилися на рівні шумів, чутливість каналу D₂ помножимо на коефіцієнт пропорційності, встановивши тим самим, нові межі «лінійних воріт» [30].

Також, фактично, задано коефіцієнт шуму каналу у пункті «Допустимий шум каналу». Тож, розрахуємо кількість розрядів АЦП, необхідних для генерації сигналу кожного з каналів:

$$\text{Кількість рівнів АЦП} = \frac{\text{Розмах сигналу}}{\text{Шум каналу}} \quad (4.1)$$

Значення розмаху сигналу беремо рівним напрузі живлення бортової мережі наносупутника, значення максимально допустимого шуму спектрометричного каналу також з таб 4.1 [30].

Підставимо ці значення у вираз (4.1) та отримаємо для каналів D_1 , D_3 :

$$\frac{5000 \text{ мВ}}{18 \text{ мВ}} = 277 \text{ [рівнів]} \approx 8 \text{ біт роздільної здатності ЦАП} \quad (4.2)$$

Для каналу D_2 :

$$\frac{5000 \text{ мВ}}{67 \text{ мВ}} = 74 \text{ [рівнів]} \approx 6 \text{ біт роздільної здатності ЦАП} \quad (4.3)$$

Що підтверджує достатність наявного 12-бітного АЦП на борту обраного МП для квантування сигналів, що надходять від системи давачів.

4.4 Варіанти взаємодії імітатора сигналів з бортовим комп'ютером

Для перевірки вірності роботи програми, спробуємо перерахувати енергію, MeV у напругу, мВ з врахуванням шуму каналу, для детектора D_2 , (рис. 4.4.). Для цього за завданням необхідно створити виконуваний файл з розширенням .exe, за допомогою якого будке вестися перерахунок вхідних енергій заряджених частинок у напругу, яку дискретизує АЦП встановленого в модулі МП [30].

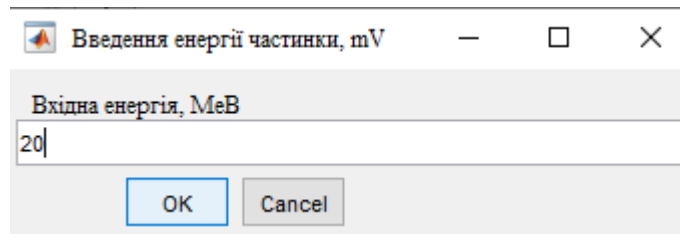


Рис. 4.4 – Стартове вікно виконуваного файлу ПЗ імітатора сигналів зі сцинтиляційних детекторів

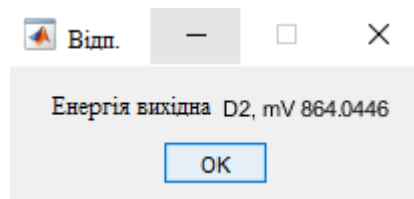
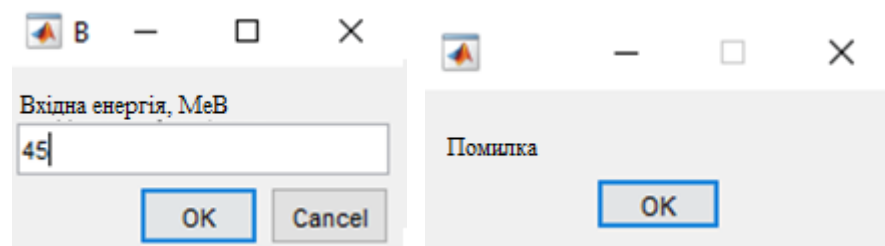


Рис. 4.5 – Кінцеве вікно виконуваного файлу ПЗ імітатора сигналів зі сцинтиляційних детекторів

Значення вихідної енергії отримано множенням чутливості ЗЧПП=1.44 мВ на значення введеної енергії частинки у 20 MeV та коефіцієнту пропорційності, щоб генероване значення не опинилося на рівні шумів. Це значення також вкладається у заданий розмах сигналу, що додає впевненості у вірному спрацюванні генерації напруги, спричиненої перетворенням механічної енергії гальмування зарядженої частинки у сцинтиляційному детекторі, перетвореної у електричний сигнал прилягаючим до детектору фотодіодом великої площі [30].

Тепер спробуємо ввести значення енергії частинки, що перевищує можливості відтворення енергії зарядженої частинки детекторною системою (рис. 4.6.) [30].



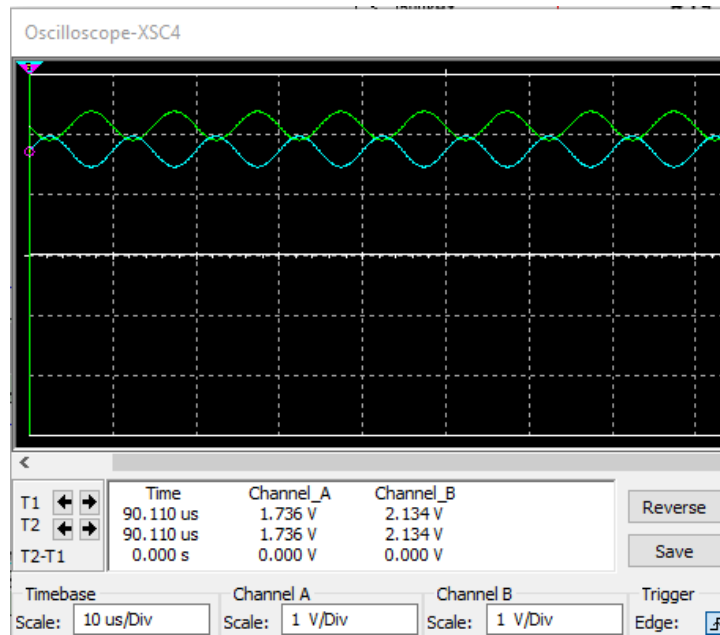


Рис. 4.7 – Осцилограма, як приклад впливу постійної складової на зміщення напруги відносно нуля

Для перетворення сигналу несиметричного в симетричний скористаємося диференціальним підсилювачем з регулюванням рівня синфазної вихідної напруги додатковим виходом ОП V_{ocm} (рис. 4.8) [19].

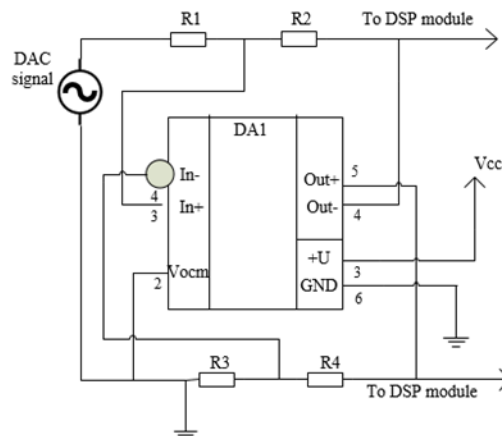


Рис. 4.8 – Схема електрична принципова інструментального перетворювача напруги з уніполярної в диференційну

Тепер перевіримо характеристики перетворювача використовуючи моделювання у САПР (рис. 4.9., 4.10.).

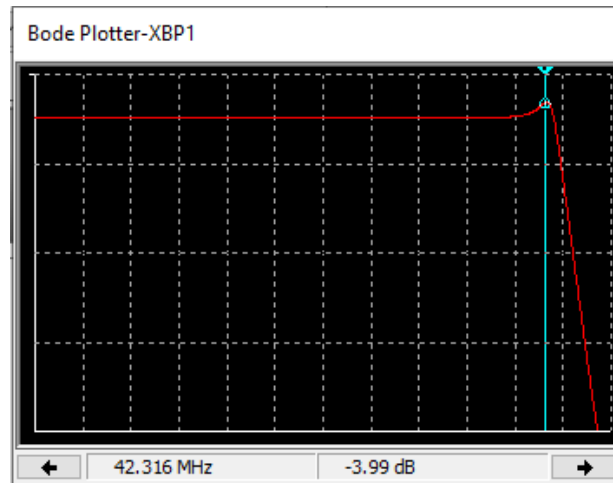


Рис. 4.9 – Амплітудно-частотна характеристика інструментального перетворювача напруги

АЧХ (рис. 4.9.) свідчить про досягнуту смугу пропускання, що багаторазово перевищує потрібну смугу пропускання спектрометричного каналу, вказану у таб. 4.1.

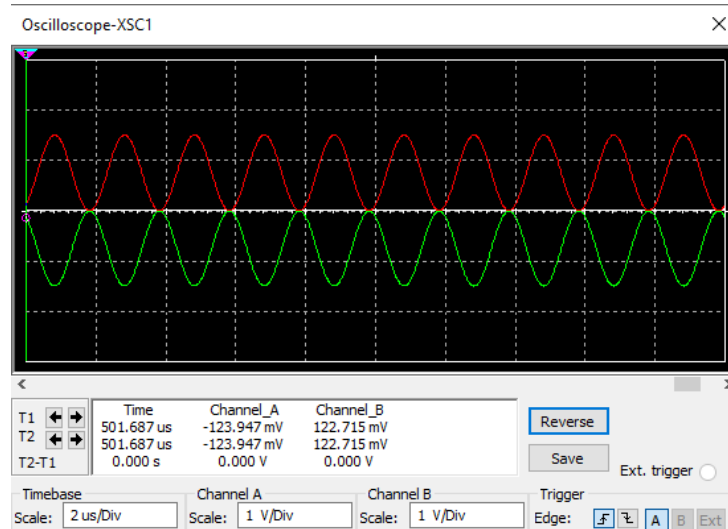


Рис. 4.10 – Осцилограма диференційного вихідного сигналу плати імітатора.

Осцилограма вихідного сигналу (рис. 4.10.) задовільняє вимозі з наявності диференційного вихідного сигналу без постійної складової напруги сигналу на виході модулю АОС.

Як і в модулі ЦОС комунікація між МП та ПК здійснюється реалізацією віртуального СОМ порту (рис. 4.11.).

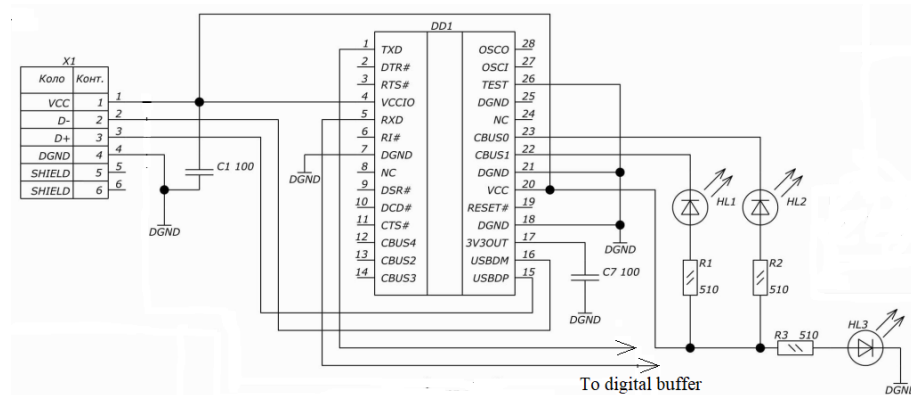


Рис. 4.11 – Схема реалізації перетворювача UART на USB

Перетворювач логічних рівнів забезпечує сумісну роботу 5В та 3.3В логічних рівнів ПК та МП (рис. 4.12.).

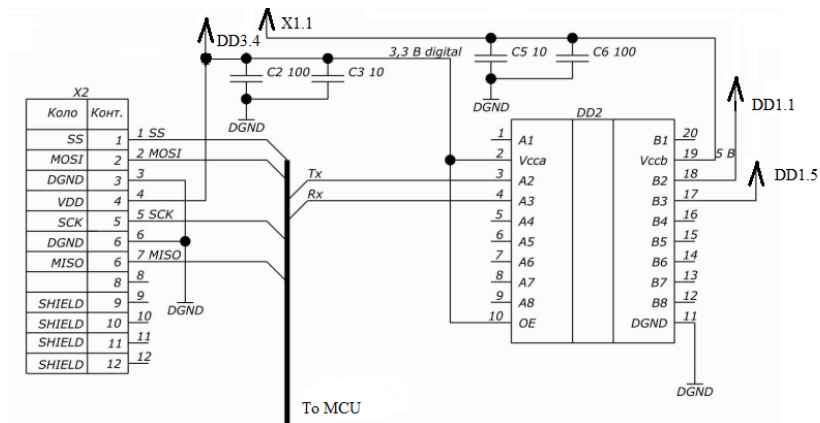


Рис. 4.12 – Схема ввімкнення логічного буферу (перетворювача рівнів) між МП та ПК

4.6 Розробка програмного забезпечення імітатора сигналів зі сцинтиляційних детекторів

Фактично, робота імітатора сигналів зі сцинтиляційних детекторів заключається у передачі відліків синусоїди через ЦАП. З цією метою задається одномірний масив двобайтних значень відліків у кодах АЦП. Це спрощує та пришвидшує як розробку ПЗ, так і схемотехніку, порівнянюючи з модулем ЦОС. Оскільки, запуск імітатора в космос не планується, (рис. 4.13.), то відпадає потреба у окремій мікросхемі флеш пам'яті, оскільки надсилати масиви амплітуд частинок можна безпосередньо з ПК, що бере участь у калібруванні модулю ЦОС. Особливо зручно для таких задач використовувати загальновідоме ПЗ для числового аналізу. Це дозволяє використати добре відпрацьоване схемотехнічне рішення з апаратним перетворювачем USB на UART.

Перевагою такого методу є простота зчитування віртуальним COM-портом даних на будь-якому ПК встановленням номеру порту, бітрейта, розміру вхідного буферу і перетворенням значень у форматі ASCII кодів на інший зручний формат відображення символів.

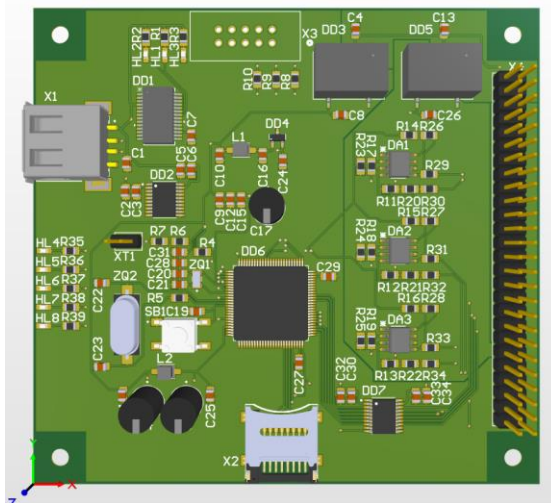


Рис. 4.13 – Модель модулю імітатора сигналів зі сцинтиляційних детекторів [30]

Щоб отримати амплітуду, зазначену на (рис. 4.5), потрібно скористатися наступними співвідношеннями (4.5), зазначеними у документації на МП, використаний у модулі імітатора [22]:

$$\text{Встановлений рівень ЦАП} = V_{ref} * \frac{D_{or}}{4095} \quad (4.5)$$

де: D_{or} -це значення, яке треба передати в масиві відліків синусоїди.

Підставимо ці значення у вираз (4.5) та отримаємо для шуканого значення в 0,864 В:

$$0,864\text{В} = 3,3\text{В} * \frac{1072}{4095} \quad (4.6)$$

Робота блоку DAC

1. Задається масив відліків сигналу, що подається у ролі тестового. Зазвичай, обирається синусоїда через те, що її можна поміряти дешевим мультиметром, якщо нема осцилографа поруч.
2. Обрається DAC для здійснення генерації сигналу, (рис. 4.14.).
3. Вказується подія, за якою, керується генерація частоти. В проекті обрано переповнення таймера TIM4.

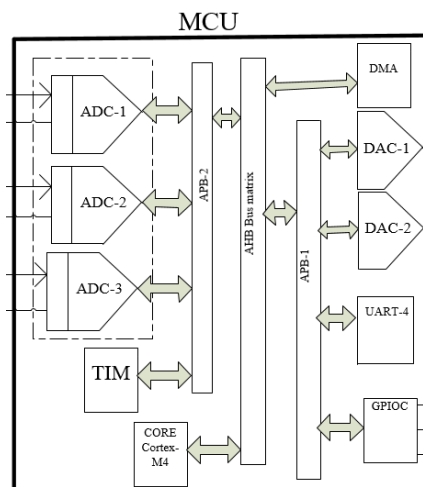


Рис. 4.14 – Спрощена функційна схема блоку МП з периферією, використаною для модулю ЦОС та імітатора сигналів

Шини АНВ та АРВ (рис. 4.14) призначено для внутрішнього високошвидкісного обміну даними між пам'яттю, ядром та іншими апаратними блоками [22].

4. Генерується запит на очікування події від блоку DMA

Робота блоку DMA

1. Очищуються регістри конфігурації та вимикається канал DMA.
2. Задається розмір буферу пам'яті, та канал, виділений для DMA.
3. Обирається ширина машинного слова (8, 16, 32 біт).
4. Вмикається режим негайної передачі із/в пам'ять. При цьому режим FIFO автоматично вимикається.
5. Прописується напрям перетворення з у пам'яті у периферію.
6. Генерується переривання після закінчення передачі даних.

Підсумок відпрацювання програми є дані конфігурації, що зберігаються у структурі, яка поєднує дані з DMA, GPIO, DAC.

Висновки до четвертого розділу дисертаційного дослідження

1. Обґрунтовано доцільність розробки та застосування імітатора сигналів сцинтиляційних детекторів в процедурі калібрування модулю ЦОС без використання іонізаційної камери.
2. Сформовано цілі та задачі імітатора сигналів сцинтиляційних детекторів.
3. Обрано конфігурацію та розроблено структуру імітатора сигналів сцинтиляційних детекторів.

4. Розроблено апаратну реалізацію імітатора сигналів сцинтиляційних детекторів.
5. Запропоновано метод спрощення і здешевлення калібрування модулю ЦОС за допомогою імітатора сигналів.
6. Імітатор сигналів дозволив задавати довільне співвідношення сигнал/шум для перевірки достовірності сортування частинок за типами та сортами.
7. Вперше запропоновано та реалізовано метод заміщення сцинтиляційних детекторів та іонізаційної камери, що імітує не тільки реакцію сцинтиляційних детекторів на заряджені частинки, але й шуми спектрометричного каналу.

5. МЕТОДИКА ОЦІНКИ ТА ЗМЕНШЕННЯ РІВНЯ ШУМІВ АНАЛОГОВОГО СПЕКТРОМЕТРИЧНОГО КАНАЛУ

5.1 Огляд джерел шуму, які потенційно мають вплив на достовірність отриманих результатів

У розділі 2.8 було розглянуто вплив накладання шумів на достовірність видобутих даних, але такі розрахунки стосуються тільки шумів опорного рівня АЦП. З іншого боку, сигнал буде спотворюватись на всьому шляху протікання спектрометричного каналу до АЦП через інші джерела шумів, що перераховані нижче [31]:

- статистичні флуктуації втрат у тонких детекторах;
- неоднорідність товщини ΔE -детектора, що призводить до розкиду втрат енергії в ньому та в E детекторі;
- розкид пробігів та втрати енергії у мертвих шарах детекторів;
- флуктуації величини заряду детекторів;
- невідповідність площі пластини фотодіоду площині детектора;
- щільність прилягання пластин фотодіоду та детектора;
- дробові шуми напівпровідників;
- теплові шуми провідників;
- шуми, обумовлені паразитними параметрами, пов'язані з методом виготовлення електронних вузлів.

Оскільки допустимий шум каналу явно заданий у вимогах до спектрометричного каналу, тож виникає потреба оцінити його теоретично та вжити заходів до його зменшення.

Наразі при проектуванні малошумної апаратури не складено однозначного канонічного алгоритму зменшення прогнозованого рівня шумів. Є лише загальні рекомендації. Така задача зводиться до пошуку максимального співвідношення

сигнал/шум SNR при відомому динамічному діапазоні (доступна розрядність АЦП) [31].

Не дивлячись на те, що основні джерела шумів радіоелектронної апаратури є відомими (флікер-шуми, дробові та теплові, якщо не брати до уваги шуми, що не можуть бути досліджені в рамках даного завдання) та факт, що перші каскади підсилювачів роблять найбільший внесок у загальний рівень шумів, питання побудови схеми за шумовими параметрами залишається дискусійним [31]

При математичному підході до вирішення даної задачі, необхідно скласти багатовимірну функцію оптимізації з коефіцієнтами впливу, де відображено внесок кожного елемента в загальний рівень шумів. Надалі отримана функція в часткових похідних прирівнюється до нуля, та знаходиться її екстремум. Недоліками такого підходу є витрачений час на складання моделі та неможливість застосування у інших випадках [31].

Такий підхід складно імплементувати при спробі зменшення шуму багатокаскадного підсилювача слабкого сигналу. Прикладом такого підсилювача є модуль АОС. У такому модулі АОС присутні три спектрометричні канали по 9 каскадів, здебільшого виконаних на ОП. При цьому рівень шумів впливає на достовірність даних, що призводить отримання невірної кількості заряджених частинок у записі, захоплених коліматором з енергіями в околі границь енергетичних діапазонів [31].

5.2 Детальний розбір обраних джерел шуму, що впливатимуть на достовірність отриманих результатів

Дробові шуми, що виникають при перетині бар'єру, як р-п перехід. Спектральна щільність не залежить від частоти та температури, тобто його середньоквадратичне значення однакове на всіх відрізках. Дробовий шум проявляється у напівпровідниках набагато сильніше, ніж у

провідниках та є відсутнім без протікання струму [19]. Середньоквадратичне значення визначається таким виразом:

$$E_{sh} = k * T * \sqrt{\frac{2B}{q * I_{dc}}} \quad (5.1)$$

де: E_{SH} — середньоквадратична напруга дробового шуму, k — стала Больцмана, T — кімнатна температура [К]; B — смуга частот [Гц], q — заряд електрона [Кл]; I_{DC} — струм через p-n перехід [А].

Теплові шуми, або шуми Джонсона генеруються тепловим рухом електронів у провідниках. Чим сильніше нагрітий провідник, тим більше він шумить. Тепловий шум зникає тільки при температурі, яка дорівнює абсолютному нулю по шкалі Кельвіна. Зменшення температури знижує шум не дуже сильно (поки не йдеться про криогенні температури), а ось зменшення опору резистора дає більш відчутні результати [31].

Скористаємось співвідношеннями Найквіста, що справедливі для частот до 100 МГц:

$$E_{th} = \sqrt{4 * k * T * R * B} \quad (5.2)$$

де: E_{TH} — середньоквадратична напруга теплового шуму [В], R — опір провідника [Ом].

Флікер-шум, або так званий шум «1/f». З'являється через дефекти кристалічної решітки напівпровідників. Йому властиве збільшення рівня при зменшенні частоти та постійний рівень для кожної декади, або октави [19]:

$$E_n = K_e * \sqrt{\ln \frac{F_{max}}{F_{min}}}, \quad I_n = K_i * \sqrt{\ln \frac{F_{max}}{F_{min}}} \quad (5.3)$$

де: K_e та K_i — коефіцієнти пропорційності за напругою [В] та струмом [А] на частоті 1 Гц, F_{max} та F_{min} — максимальна і мінімальна частота [Гц].

В ОП максимальний рівень флікер-шумів лежить нижче частоти 10 Гц, вище 10 Гц у смузі робочих частот має майже постійний рівень.

5.3 Вибір ключових елементів модулю АОС, що потребують оптимізації

У таб 4.1 вказано допустимий рівень шумів для тонких та товстого детекторів. Візьмемо це значення, як орієнтовне для розуміння яке значення шумів може задовольнити завданню.

Оскільки активними елементами в схемах підсилювачів слабких сигналів здебільшого є ОП, то основними джерелами шуму будуть: шуми вхідного каскаду ОП, шуми кола ЗЗ, шуми джерела живлення [31].

Зазвичай, у паспортній документації наводиться спектральна щільність напруги шуму на частоті 1 кГц ($\text{нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$), часто також графік залежності еквівалентної напруги шуму від частоти, але це без врахування схеми включення операційного підсилювача, тобто з розімкненим колом зворотнього зв'язку та є істотно заниженими відносно рівня шумів, отриманих при дослідженні реальної схеми [31].

Розробники симуляторів електроніки повністю не розкривають хід обчислень (якщо взагалі щось пишуть про це), або надають можливість повністю самостійно вводити формули для розрахунку та ймовірною непередбачуваністю результатів прогнозування. Відповідно, є сумніви стосовно вірності функціонування такого програмного забезпечення, особливо базуючись на дивних результатах симуляцій у деяких електронних симуляторах, коли рівень шумів збільшується непропорційно коефіцієнту підсилення каскаду. Тому, спробуємо оцінити рівень шумів підсилювача на базі ОП та створити методику його зменшення [31].

У [15] розглянуто шумову модель каскаду інвертуючого операційного підсилювача, але з джерелом сигналу у вигляді шуму високоомного джерела струму. А у даному випадку досліджуваного підсилювача, (рис. 5.2.) маємо низькоомне джерело напруги шуму (рис. 5.1.), тому треба розробляти алгоритм оптимізації шуму каскаду з іншими параметрами [31].

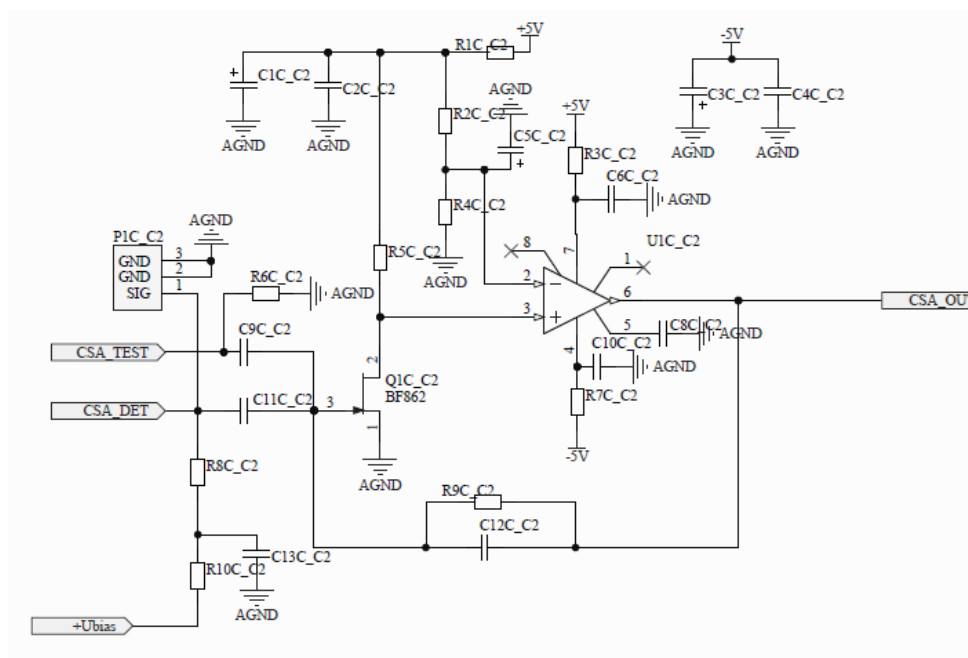


Рис. 5.1 – Схема електрична принципова ЗЧПП

Фактичною метою подальших записів є досягнення такого ж коефіцієнта підсилення сигналу, що й до проведення оптимізації рівня шумів при задовільному коефіцієнті шуму. Найважливішою є оптимізація першого каскаду формуючого підсилювача, оскільки його шуми отримають найбільше підсилення в подальших каскадах до дискретизації [31].

Тому як схему, що потребує аналізу і розглянемо перший каскад формуючого підсилювача на базі ОП U1.2 (рис. 5.2.) [31].

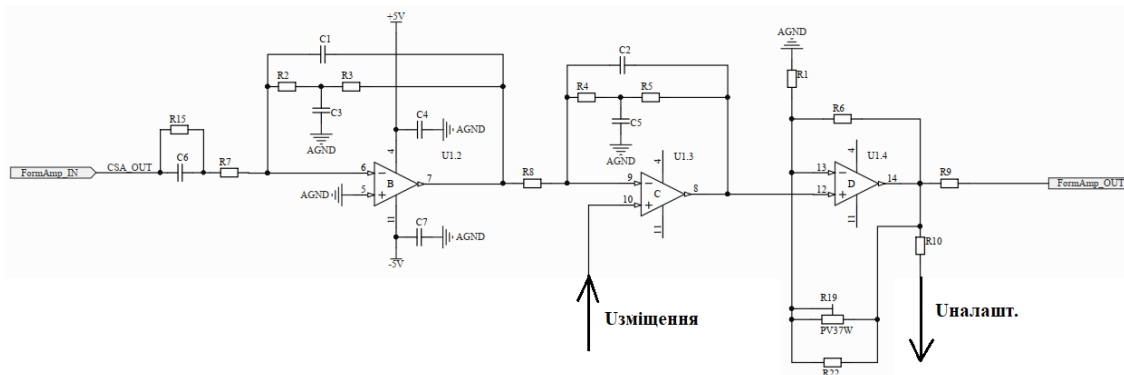


Рис. 5.2 – Схема формуючого підсилювача [31]

Ця схема підсилює слабкий сигнал та формує смугу пропускання аналогового тракту наносупутника. На вході стоїть RC-коло з частотою зрізу 3 кГц. Далі перший каскад формуючого підсилювача (ОП U1.2), який формує підйомом АЧХ у 20 дБ/декаду (рис. 5.7.), за допомогою пасивного Т-подібного RC мосту (рис. 5.2.) у колі зворотного зв'язку. Через застосування такого рішення можна знехтувати фліккер-шумами, оскільки вони матимуть несутєвий вплив на частотах, що перевищують сотні Гц. Мостова схема в колі зворотнього зв'язку дозволяє уникнути використання великих номіналів резисторів та зменшує чутливість схеми до наводок та завад [31].

Напряга регулювання включеного далі по схемі пікового детектору формується шляхом подання зміщення на неінвертуючий вхід другого каскаду підсилювача U1.3 (рис. 5.3.). Ця напряга порівнюється з напрягою зворотнього зв'язку, що регулюється ввімкненням потенціометру в колі зворотнього зв'язку ОП U1.4. Таким чином досягається обмеження напруги коливання, яке буде дискретизувати АЦП [31].

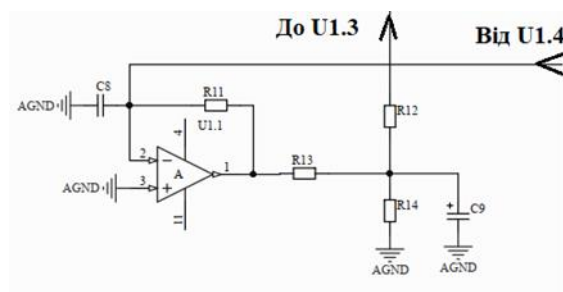


Рис. 5.3 – Схема зміщення ОП U1.3 на базі ОП U1.1 [31]

5.4 Процес приведення шумів каскаду до входу підсилювача

Для оптимізації каскаду з точки зору підвищення співвідношення сигнал/шум побудуємо еквівалентну схему першого каскаду формуючого підсилювача на ОП. Вихідний шум будь-якого підсилювача є функцією шуму створеного джерелом сигналу, і шуму створеного всередині підсилювача. Модель шуму

підсилювача можна отримати за допомогою відображення всіх внутрішніх джерел шуму, приведених на вхід. Щоб відображені джерела були незалежними від імпедансу джерела сигналу, потрібні два джерела шуму - послідовна напруга джерела v_s і джерело шунтованого струму i_n , (рис. 5.4.) [15].

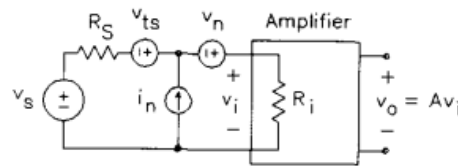


Рис. 5.4 – V_n - I_n , модель шуму підсилювача [31]

де: v_s – миттєва напруга джерела сигналу, R_s – опір джерела сигналу, v_{ts} – миттєва напруга теплового шуму створена R_s .

Для R_s та v_{ts} справедливі співвідношення Найквіста, також-це класична ілюстрація шумової моделі опору і є дійсною для резисторів, виготовлених за будь-якими типами технологій. Значення вихідної напруги такого підсилювача, зображеного (рис. 5.4.) характеризується виразом нижче [15]:

$$v_o = \frac{A * R_i}{R_s + R_i} [v_s + (v_{ts} + v_n + i_n R_s)] \quad (5.4)$$

де: A – коефіцієнт підсилення за напругою, R_i – вхідний опір ОП, v_s – миттєва напруга джерела сигналу, R_s – опір джерела сигналу, v_{ts} – миттєва напруга теплового шуму створена R_s , v_n – напруга шуму каскаду перерахована до входу ОП.

Приведеною до входу напругу шуму можна охарактеризувати еквівалентною вхідною напругою шуму – це напруга, підключена послідовно з входом підсилювача, який створює такий самий шум, як напруга на виході як і всі джерела шуму в колі [31]. Її позначають v_{ni} (5.5), є сумою всіх напруг шумів, приведених до входу, (рис. 5.43) [31].

$$v_n = \sum |U'_{\text{Ш}_{Rf}} + U_{\text{Ш}_{\text{ОП}}}| \quad (5.5)$$

$$v_n = \sum |U'_{\text{Ш}_{Rf}} + U_{\text{Ш}_{\text{ОП}}}| \quad (5.6)$$

де: $U'_{\text{Ш}_{Rf}}$ — це напруга шуму кола ЗЗ приведена до входу, $U_{\text{Ш}_{\text{ОП}}}$ — це еквівалентна вхідна напруга шуму ОП без врахування схеми включення

Тепер візьмемо для прикладу перший каскад формуючого підсилювача, (рис. 5.5).

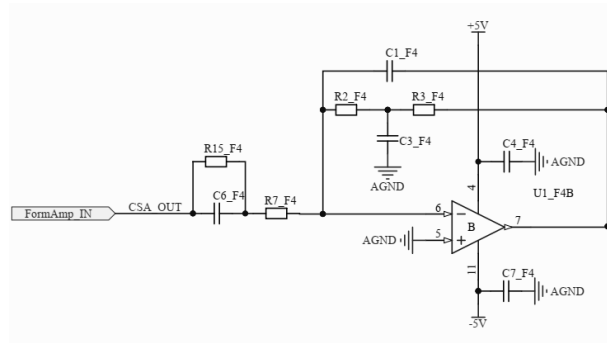


Рис. 5.5 – Перший каскад формуючого підсилювача [31]

Внаслідок перетворень було складено еквівалентну схему для визначення коефіцієнту підсилення шуму без врахування кола живлення (рис. 5.6.) [31].

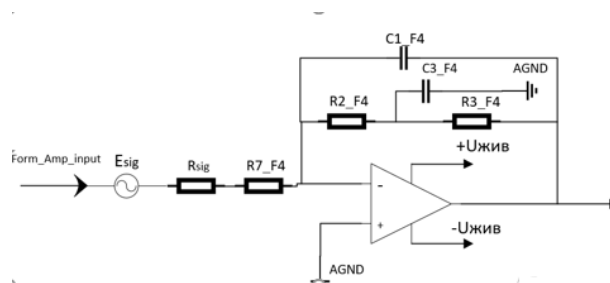
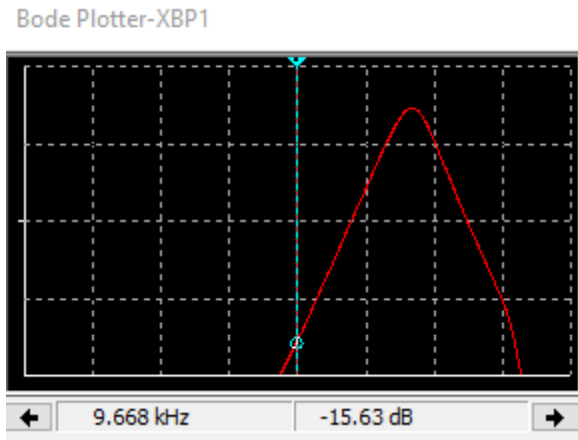


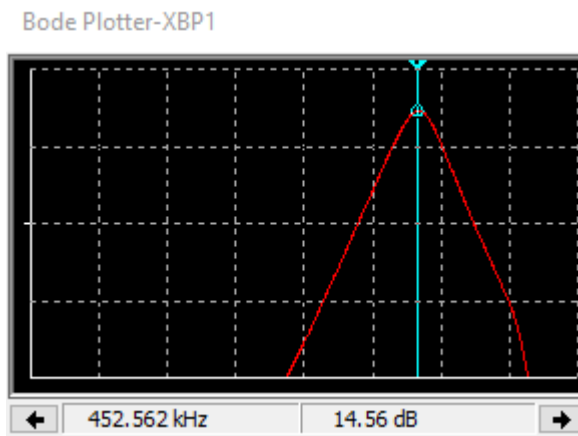
Рис. 5.6 – Еквівалентна схема першого каскаду з врахуванням параметрів джерела сигналу [31]

$U_{\text{Ш}_{R7_F4}}$, $U_{\text{Ш}_{R2_F4}}$ та $U_{\text{Ш}_{R3_F4}}$ приймаємо рівним значенню теплових шумів резисторів, бо флікер шуми вже придушені фільтрацією низьких

частот RC-колом на вході каскаду (рис. 5.7.). Вважаємо, що резистор на вході каскаду R_{15_F4} не вносить суттєвих шумів через його шунтування конденсатором C_{6_F4} , (рис. 5.5.) [31].



а)



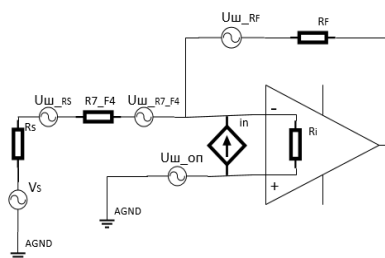
б)

Рис. 5.7 – АЧХ першого каскаду формуючого підсилювача: а) придушення шумів на частоті 10 кГц та нижче; б) підсилення сигналу у робочій смузі підсилювача

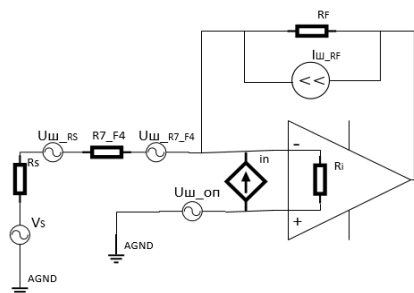
Дробовими шумами нехтуємо через те, що їхній рівень у провідниках на порядок менший за рівень у напівпровідниках через суттєво менший вміст будь-яких домішок та неоднорідностей, які

характерні для напівпровідників [19]. Визначимо еквівалентну вхідну напругу шуму за допомогою наступних перетворень та відобразимо хід перетворень на схемах, (рис. 5.8.) [31]:

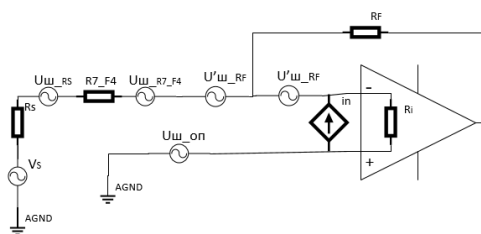
$$I_{\text{ш}_Rf} = \frac{\sqrt{4 * k * T * R_f * B}}{R_f}; \quad U'_{\text{ш}_Rf} = \frac{I_{\text{ш}_Rf}}{2} * R_f \quad (5.7)$$



а)



б)



в)

Рис. 5.8 – Процес приведення до входу всіх джерел шумів зображене без кола живлення: а) початкове відображення джерел ЕРС шуму елементів;

- б) перетворення ЕРС джерела шуму на джерело струму в колі ЗЗ; в)
перенесення джерела шуму через вузол на вхід підсилювача

Визначимо шумову смугу підсилювача: оскільки смуга пропускання спектрометричного каналу за завданням=200 кГц, таб. 4.1, тож шумова смуга є вдвічі меншою. Конденсатори на таких низьких частотах не будуть вносити суттєвих шумів, тому не відображені в схемах та не включені в подальший розрахунок. Вважаємо, що джерела шуму між собою некорельовані, хоча одне або кілька джерел шуму в підсилювачі можуть взаємодіяти як з v_n , так і з i_n . Тобто, надалі скористаємось властивістю адитивності та запишемо вираз, як середньоквадратичне значення напруги шуму. За такого підходу у вираз v_{ni} додається доданок $2 \cdot \rho \cdot i_n \cdot v_n \cdot R_s$, де ρ -це коефіцієнт кореляції між v_n та i_n , що знаходиться так [15]:

$$\rho = \frac{1}{V_n \cdot I_n} \langle v_n \cdot i_n \rangle \quad (5.8)$$

де: $\langle v_n \cdot i_n \rangle$ являє собою середнє значення за часом v_n та i_n . Співвідношення сигнал/шум обчислюється за таким виразом [15]:

$$SNR = 20 \cdot \lg \frac{V_s}{V_n} \quad (5.9)$$

5.5 Методика зменшення рівня шумів

Розробниками було задано коефіцієнт пісилення каскаду при $R_{7_F4}=3.3$ кОм та $R_{3_F4}=R_{2_F4}=16$ кОм рівний 9.7. Отже, намагатимемось досягти його при меншій напрузі шумів, приведеної до входу підсилювача завдяки зміні номіналів елементів кола без врахування трансформації опору між фотодіодом та формуючим підсилювачем на базі ОП [31].

Таким чином сформована перша умова оптимізації. Обмежимося врахуванням впливу вихідного опору зарядо-чутливого підсилювача, який є

джерелом сигналу у обмеженні номіналу вхідного резистора каскаду формуючого підсилювача. Виробник мікросхеми AD829 гарантує досягнення паспортних параметрів при $R_{\text{навантаження}} = 50 \text{ Ом}$ та вище. Це і є другою умовою. Складемо функцію залежності напруги шуму каскаду, яку треба мінімізувати з джерелами шуму, приведеними до входу підсилювача [31]:

$$U_{\text{Ш}} = f(K, R_f, R_{7_F4}) \quad (5.10)$$

Вираз для оптимізації значення SNR набуде такого вигляду:

$$SNR = 20 \lg \left(\frac{V_S}{\sqrt{(i_n * R_S)^2 + (U_{\text{Ш}R_{7_F4}})^2 + (U'_{\text{Ш}RF})^2 + (U_{\text{Ш}R_S})^2 + (U_{\text{Ш}OP})^2}} \right) \quad (5.11)$$

Без зміни номіналів елементів каскаду (рис. 5.5.) розраховане значення шуму каскаду, приведене до входу становить $178 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ ($55,7 \text{ мкВ}$) та SNR в $45,1 \text{ дБ}$ [31].

Процесом приведення шумів до входу ОП, (рис. 5.6) задача мінімізації (5.9) була зведена до однієї функціональної залежності (5.10, 5.11) та з'явилася можливість використати традиційний метод оптимізації для нового застосування. У (5.12) чітко виділена цільова функція коефіцієнта підсилення та обмеження на номінали резисторів [31].

Складемо математичну модель введених обмежень:

$$U_{\text{Ш}} = \begin{cases} R_f/R_{7_F4} \leq 10 \\ R_{7_F4} > 50 \text{ Ом} \\ R_f, R_{7_F4} < 100 \text{ кОм} \end{cases} \quad (5.12)$$

Оптимізацію на мінімізацію рівню шумів за обмеження в коефіцієнті підсилення та номіналах резисторів проведемо методами нелінійного програмування [8].

У загальному випадку в методі узагальненого приведенного градієнта розглядається градієнт, або нахил цільової функції. Розраховані часткові похідні

прирівнюються до нуля та при зміні вхідних значень досягається висновок: чи в точці екстремуму ми перебуваємо на даній ітерації при заданій збіжності [31]?

Скориставшись цим методом отримаємо такі результати: $R_F=485$ Ом; $R_{7_F4}=50$ Ом; $SNR=63,3$ dB. Рівень шуму приведений до входу підсилювача склав 50 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$, або $15,5$ мкВ, що задовільняє умові достатності для достовірної дискретизації сигналу, наведені нижче [31].

Тепер поглянемо, як позначиться достовірність результатів завдяки проведеній оптимізації (рис. 5.9., 5.10). При згенерованій послідовності, як (рис. 2.9) більш інформативним буде (рис. 5.8), завдяки якому, відобразимо кількісно вплив оптимізації на достовірність видобутих даних:

$$\delta_{45dB} = \left(\frac{N_{\text{ч.п.45дБ}}}{N_{\text{п}}} \right) * 100\% = \frac{187}{25000} * 100\% = 0,75\% \quad (5.13)$$

$$\delta_{63dB} = \left(\frac{N_{\text{ч.п.63дБ}}}{N_{\text{п}}} \right) * 100\% = \frac{91}{25000} * 100\% = 0,36\% \quad (5.14)$$

де: $N_{\text{ч.п.45дБ}}$ —це кількість частинок , що була підрахована, як частинки інших діапазонів енергій при співвідношенні С/Ш в 45 дБ, $N_{\text{ч.п.63дБ}}$ —це кількість частинок, що була підрахована, як частинки інших діапазонів енергій при співвідношенні С/Ш в 63 дБ, $N_{\text{п}}$ — загальна кількість частинок, що міститься у 15 енергетичних діапазонах [31].

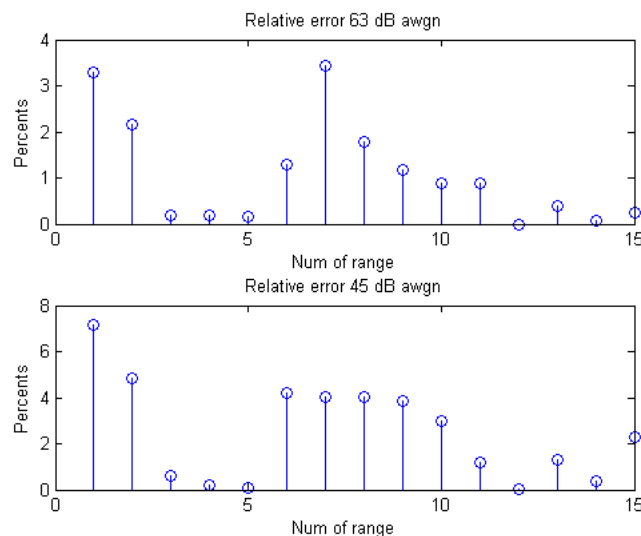


Рис. 5.9 – Відносна прогнозована похибка вимірювань в кожному діапазоні до та після оптимізації [31]

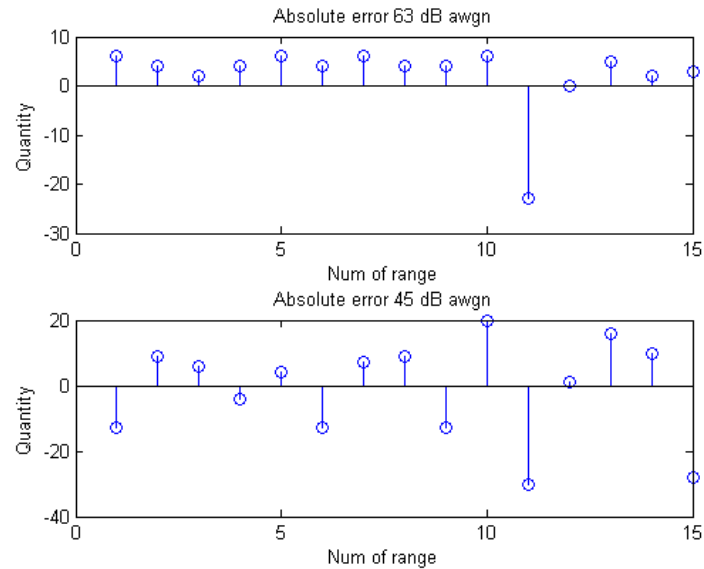


Рис. 5.10 – Абсолютна прогнозована похибка вимірювань в кожному діапазоні до та після оптимізації [31]

На рис. 5.9 можемо побачити, що похибка при співвідношенні С/Ш в 63 дБ не перевищить 4%, що задовільняє задачам дослідження.

Перевіримо отримані значення шумів за допомогою програми для моделювання електронних схем, результати якого, можна побачити на (рис. 5.11, 5.12) [31].

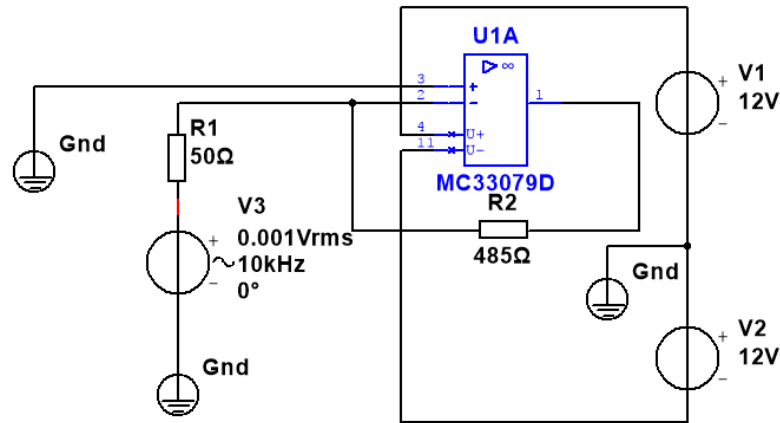


Рис. 5.11 – Схема електрична принципова першого каскаду змодельованого формуючого підсилювача [31]

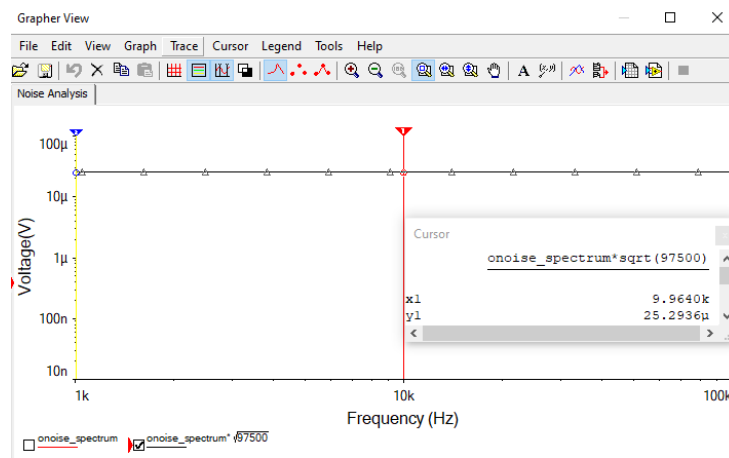


Рис. 5.12 – Графік спектральної щільності шумів у смузі частот отриманий у результаті моделювання [31]

де: червона лінія є результатом у розмірності нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$, а зелена у мкВ.

Порівняємо отримані значення та встановимо похибку розрахованого значення відносно змодельованого:

$$\Delta = \frac{U_{\text{Ш_розраховане}}}{U_{\text{Ш_змодельоване}}} = 100 - \left(\frac{15,5 \text{ мкВ}}{25,3 \text{ мкВ}} * 100 \right) = 39,5\% \quad (5.15)$$

Звісно, похибка у 39,5%-це суттєво, але збіжність результатів в одному порядку мікроВольт є досить непоганим результатом, але нема гарантії, що результат симулятора можна використовувати, як еталонне значення [31].

Також можна спробувати варіант додавання ще одного каскаду до підсилювача заради усереднення рівня шумів по діапазону робочих частот і це буде ФНЧ. Але це таке рішення в рамках дослідження можна відести до зайвих через витрати часу та коштів на інтеграцію каскаду у модуль АОС, рівномірність величини шуму у заданому діапазоні робочих частот (рис. 5.12.) та через зовсім невеликий вплив на прогнозований рівень шумів у області малих опорів резисторів, які й надають можливість зменшити потенційний рівень шумів [31].

5.6 Методика прогнозування допустимого коефіцієнту шуму при наявності епюрів сигналів та інформації про динамічний діапазон

З іншого боку можна підтвердити виконання вимог, щодо допустимості рівня шумів розрахунком коефіцієнту шуму тракту, навіть за відсутності явно вказаного параметру замовником, користуючись відомими другорядними параметрами спектрометричного каналу (рис. 3.1.) [31].

Виходячи з наявності значення амплітуди тестового сигналу, рівної 1 мВ, (рис. 3.1.) визначимо допустимий вхідний рівень шумів за відомого сталого значення динамічного діапазону в 46 дБ=80 разів за напругою таб 4.1, тож [31]:

$$U_{\text{Ш}_\text{вх}} = \frac{U_{\text{Тест}}}{D} = \frac{0,001}{80} = 12,5 \text{ [мкВ]} \quad (5.16)$$

Оскільки відомий допустимий шум каналу у 18 мВ, отримаємо коефіцієнт підсилення, який мають забезпечувати аналогові каскади схеми:

$$G = \frac{U_{\text{Тест}}}{U_{\text{Ш}_\text{вх}}} = \frac{18 \text{ мВ}}{12,5 \text{ мкВ}} = 1440 \text{ [разів]}, \text{ або } 63 \text{ дБ} \quad (5.17)$$

Що збігається зі значеннями сигналу, продемонстрованого на (рис. 5.13.) і становить майже півтори клітини при 1 Вольт на клітину [31].

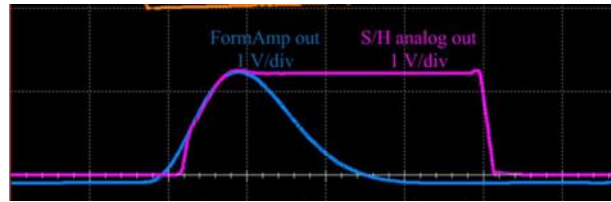


Рис. 5.13 – Форма сигналу після проходження формуючого підсилювача та пікового детектору [31]

Отримаємо загальний коефіцієнт шуму тракту до АЦП за визначенням:

$$U_{\text{Ш}_\text{вх}} = \frac{U_{\text{Тест}}}{K * \frac{U_{\text{Тест}}}{U_{\text{Ш}_\text{доп}}}} = \frac{1\text{мВ}}{10 * \frac{1\text{мВ}}{18\text{мВ}}} = 0,1 \text{ [разів] , або } - 20 \text{ дБ} \quad (5.18)$$

Тобто співвідношення сигнал/шум погіршиться в 10 разів при проходженні сигналу через модуль АОС [31].

5.7 Методика визначення достатностнього рівня шумів для достовірної дискретизації сигналу

Введемо критерій достатності придушення рівня шумів у суміші сигнал+шум у вигляді типової точності АЦП, що складає \pm величину молодшого значущого розряду. Вирахуємо максимальну вхідну шумову напругу каскаду за якої можлива достовірна дискретизація сигналу [31]:

$$U_{\text{Ш}_\text{вхпідс}} \leq \frac{U_{\text{Опорне АЦП}}}{2 * 2^N * G} = \frac{2,54\text{В}}{2 * 1440 * 4096} = 0,2 \text{ [мкВ]} \quad (5.19)$$

де: N-це розрядність АЦП, що дорівнює 12

Тепер вирахуємо максимальну вихідну шумову напругу каскаду за якої можлива достовірна дискретизація сигналу [31]:

$$U_{\text{Ш}_\text{вихпідс}} \leq \frac{U_{\text{Опорне АЦП}}}{2 * 2^N} = \frac{2,54\text{В}}{2 * 4096} = 310 \text{ [мкВ]} \quad (5.20)$$

Подальші каскади, (рис. 5.2.), мають коефіцієнт підсилення 21 та 7, тож перерахуємо, рівень вхідних шумів до виходу підсилювача. Спершу каскаду до оптимізації [31]:

$$U_{\text{Ш}_{\text{вихпідс}}} = U_{\text{Ш}_{\text{вхпідс}}} * K_1 K_2 K_3 = 55,78 * 10^{-6} * 10 * 21 * 7 = 0,04 \text{ [В]} \quad (5.21)$$

Що більше за 18 мВ допустимого рівня шумів і не відповідає вимогам за їхнім рівнем. Перерахуємо рівень вхідних шумів, приведений до виходу підсилювача після оптимізації [31]:

$$U_{\text{Ш}_{\text{вихпідс}}} = U_{\text{Ш}_{\text{вхпідс}}} * K_1 K_2 K_3 = 15,58 * 10^{-6} * 10 * 21 * 7 = 0,011 \text{ [В]} \quad (5.22)$$

Що менше за 18 мВ шумів за вимогою. Простою пропорцією визначимо точність дискретизації вхідного сигналу такої системи [31]:

$$LSB \Rightarrow \frac{U_{\text{Опорне АЦП}}}{2^N} = \frac{U_{\text{Ш}_{\text{вихпідс}}}}{x} \Rightarrow 696 \text{ рівнів квантування} \quad (5.23)$$

Це означає, що АЦП буде дискретизувати дані з похибкою ± 348 рівнів квантування з 4096.

Висновки до п'ятого розділу дисертаційного дослідження

1. Встановлено, що на достовірність отриманих результатів найбільше вплинуть теплові шуми компонентної бази спектрометричного каналу.
2. Виведено критерій, завдяки якому, можна робити висновок про ступінь впливу власних шумів радіоелементів на достовірність результатів.
3. Для вирішення задачі мінімізації рівня шумів каскаду на базі ОП вперше застосовано метод узагальненого приведенного градієнта.
4. Оптимізацією обраного каскаду підсилювача покращено співвідношення С/Ш у 8 разів (на 18 дБ), при зниженні розрахованого рівня шумів у 3,5 рази (на 11 дБ).

5. Доведено результативність розробленої методики мінімізації рівня шумів, оскільки потенційні шуми, що склали ± 348 рівнів квантування з 4096 призводять до похибки дискретизації $\pm 7,5\%$.

6. Застосування розробленого алгоритму з ідентифікації сортів та енергій частинок з оптимізованим за розробленою методикою спектрометричним каналом показало максимальну похибку в 4% від еталонного розподілу, що вклалося в параметр «Допустимий шум каналу».

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

- 1) Серед існуючих методів передвіщення землетрусів обрано радіаційні методи для подальших досліджень. Серед радіаційних методів дослідження обрано метод на основі питомих втрат енергії та повної енергії як такий, що має найменше недоліків.
- 2) На базі розробленої моделі було розроблено алгоритм з ідентифікації сортів та частинок.
- 3) Дістала апаратної реалізації модель з ідентифікації сортів та енергій заряджених частинок.
- 4) Було доведено коректність роботи при різних співвідношеннях С/Ш апаратної реалізації розробленого алгоритму за схемою «дерево рішень» запропонованої моделі з ідентифікації сортів та енергій заряджених частинок.
- 5) Обгрунтовано раціональні характеристики супутникового каналу зв'язку для мінімізації помилкових даних.
- 6) Запропоновано метод спрощення і здешевлення калібрування модулю ЦОС за допомогою імітатора сигналів.
- 7) Імітатор сигналів дозволив задавати довільне співвідношення сигнал/шум для перевірки достовірності сортування частинок за типами та сортами.
- 8) Вперше запропоновано та реалізовано метод заміщення сцинтиляційних детекторів та іонізаційної камери, що імітує не тільки реакцію сцинтиляційних детекторів на заряджені частинки, але й шуми спектрометричного каналу.
- 9) Встановлено, що на достовірність отриманих результатів найбільше вплинуть теплові шуми компонентної бази спектрометричного каналу.
- 10) Виведено критерій, завдяки якому, можна робити висновок про ступінь впливу власних шумів радіоелементів на достовірність результатів.

11) Для вирішення задачі мінімізації рівня шумів каскаду на базі ОП вперше застосовано метод узагальненого приведенного градієнта.

12) Застосування розробленого алгоритму з ідентифікації сортів та енергій частинок з оптимізованим за розробленою методикою спектрометричним каналом показало максимальну похибку в 4% від еталонного розподілу, що вклалося в параметр «Допустимий шум каналу».

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ І ПОСИЛАНЬ

1. Advisability of the axes orientation in p-terphenyl crystal of scintillation detector of the charged particle monitor in ChemiX solar X-ray spectrophotometer / O. Dudnik et al. *Space science and technology*. 2018. Vol. 24, no. 3. –P. 33–39. URL: <https://doi.org/10.15407/knit2018.03.033>.
2. Asendorpf L. Can Cows Predict Earthquakes? Animal Observation Could Serve as an Early Warning System [Electronic resource] / L. Asendorpf // RESET.ORG Digital for Good. – Mode of access: <https://en.reset.org/can-cows-predict-earthquakes-animal-observation-early-warning-system-09082020/>
3. Baitenov A. Technical manual: a survey of scintillating medium for high-energy particle detection [Electronic resource] / A. Baitenov, D. Beznosko, A. Iakovlev // arXiv.org e-Print archive. – Mode of access: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1601/1601.00086.pdf>.
4. Concept of the particle microbursts satellite experiment with the mira_ep compact instrument on the 2U CubeSAT platform / O. Dudnik [et al.] // Space research in Ukraine 2018-2020. – 2021. – P. 32–39.
5. Contributors to Wikimedia projects. Флюенс – Вікіпедія [Електронний ресурс] / Contributors to Wikimedia projects // Вікіпедія – вільна енциклопедія. – Режим доступу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Флюенс>.
6. Correlations between earthquakes and anomalous particle bursts from SAMPEX/PET satellite observations / V. Sgrigna et al. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2005. Vol. 67, no. 15. P. 1448–1462. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.07.008>.
7. CubeSpace. CubeComputer V4.1.Datasheet [Electronic resource] / CubeSpace // CubeSatShop. – Mode of access: <https://www.cubesatshop.com/wp-content/uploads/2016/06/CubeComputer-V4.1-Datasheet-v1.3.pdf>.

8. Семенченко А. Методичний підхід щодо максимізації доходів населення з нестандартними формами зайнятості. *Бізнес інформ.* 2016. С. 137–141.

URL: http://repository.hneu.edu.ua/bitstream/123456789/15977/1/Семенченко_стаття%20Ал.%20В..pdf.

9. DEMETER DATA SERVER. URL: <http://demeter.cnrs-orleans.fr/demeter/idp.jsp>.

10. Extrema of the Sinc Function [Electronic resource] // Intermediate Physics for Medicine and Biology. – Mode of access: <http://hobbieroth.blogspot.com/2018/07/extrema-of-sinc-function.html>.

11. Fidiani C., Battiston R., Burger W. A Study of the Correlation between Earthquakes and NOAA Satellite Energetic Particle Bursts. *Remote Sensing in Seismology.* 2010. Vol. 2, no. 9. –P. 2170–2184. URL: <https://doi.org/10.3390/rs2092170>.

12. High-energy charged particle bursts in the near-Earth space as earthquake precursors / S. Y. Aleksandrin et al. *Annales Geophysicae.* 2003. Vol. 21, no. 2. – P. 597–602. URL: <https://doi.org/10.5194/angeo-21-597-2003>.

13. Hiruma T. MPPC modules | Hamamatsu Photonics [Electronic resource] / Teruo Hiruma // Home | Hamamatsu Photonics. – Mode of access: <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/optical-sensors/mppc/mppc-module.html>.

14. Inner Radiation Belt Surrounding Earth Organized in Zebra Stripe Patterns [Electronic resource] // Science, Space and Robots. – Mode of access: <https://www.sciencespacerobots.com/inner-radiation-belt-surrounding-earth-32220141>.

15. Leach W. Fundamentals of low-noise analog circuit design. *Proceedings of the IEEE.* 1994. Vol. 82, no. 10. P. 1515–1538. URL: <https://doi.org/10.1109/5.326411>.

16. LibreTexts. 11.5: Прогнозування землетрусів та мінімізація збитків та жертв [Електронний ресурс] / LibreTexts // LibreTexts - Ukrayinska. – Режим доступу: <https://ukrayinska.libretexts.org> .

17. MPPCs (SiPMs) / MPPC arrays | Hamamatsu Photonics [Electronic resource] // Home | Hamamatsu Photonics. – Mode of access: https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/optical-sensors/mppc/mppc_array.html .

18. Observations of ULF/ELF anomalies detected by DEMETER satellite prior to earthquakes [Electronic resource] / M. Parrot [et al.] // Indian Journal of Radio and Space Physics. – 2007. – Vol. 36, no. 2. – P. 103–113. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/228723690_Observations_of_ULF_ELF_anomalies_detected_by_DEMETER_satellite_prior_to_earthquakes .

19. Operational amplifiers for everyone : Design Reference / ed. by R. Manchini. Dallas : Texas Instrument, 2002. 464 p.

20. Puig-Suari J. CubeSat Design Specification Rev. 13 [Electronic resource] / J. Puig-Suari, S. Williams // Academia. – Mode of access: https://www.academia.edu/11525487/CubeSat_Design_Specification_Rev_13_The_CubeSat_Program_Cal_Poly_SLO_CubeSat_Design_Specification_CDS_REV_13_Document_Classification_X_Public_Domain_ITAR_Controlled_Internal_Only .

21. Richter C. Frequency of earthquakes in California [Electronic resource] / C. Richter, B. Gutenberg // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1944. – Vol. 34, no. 4. – P. 185–188. – Mode of access: <https://doi.org/10.1785/BSSA0340040185> .

22. RM0090 Reference manual [Electronic resource] // STMicroelectronics. – Mode of access: https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manu

[al/3d/6d/5a/66/b4/99/40/d4/DM00031020.pdf/files/DM00031020.pdf/jcr:content/translations/en.DM00031020.pdf](https://doi.org/10.1117/12.2536748) .

23. Simulation of CubeSat caliber particle detector “MiRA_ep” response to energetic electrons and protons using GEANT4 package / O. Dudnik et al. *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019*, Wilga, 26 November 2019. 2019. –P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2536748> .

24. Yezerskyi N. Concept of implementation the digital signal processing of the miniature particle detector mira_ep in the cubesat format / N. Yezerskyi, A. Movchanuk, O. Dudnik // Radio-technical fields, signals, apparatus and systems: Abstracts International Conference, Kyiv, 18 листоп. 2019 р. – [Б. м.], 2019. – С. 159–161.

25. Yezerskyi N. Electronic simulator of signals derived from scintillation detectors in spectrometric identification of high-energy charged particles / N. Yezerskyi, A. Movchanuk, O. Dudnik // Radio-technical fields, signals, apparatus and systems : Abstracts International Conference, Kyiv, 9 November 2021. – Kyiv, 2021. – P. 75–77.

26. Гармонізація базових ядерних-фізичних констант в методі ядерного датування: стандартні множини нуклідів [Електронний ресурс] / К. Шарохін [та ін.] // *Uzhhorod University Scientific Herald. Series Physics*. – 2018. – Т. 44. – С. 109–118. – Режим

доступу: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/24726/1/109.pdf> .

27. Геологічні процеси, пов’язані з внутрішньою енергією землі. Моніторинг небезпечних геологічних процесів [Електронний ресурс] // Головна | Elib LNTU. – Режим доступу: https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/HTML/page19.html .

28. Єзерський Н. Алгоритм з ідентифікації сортів та енергій заряджених частинок для вивчення явища сейсмічно-магнітосферної кореляції [Електронний

ресурс] / Н. Єзерський, А. Мовчанюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2023. – № 3. – С. 66–71. – Режим доступу: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-168-3-66-71>

29. Єзерський Н. Вибір частотного діапазону та оптимізація каналу зв'язку земля-наносупутник / Н. Єзерський, А. Мовчанюк // Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи : Міжнар. науково-техн. конф., Київ, 17 листоп. 2020 р. – Київ, 2020. – С. 96–99.

30. Єзерський Н. Імітатор спрацювань детекторів заряджених частинок та модуль цифрової обробки сигналу малогабаритного спектрометра елементарних частинок [Електронний ресурс] / Н. Єзерський, А. Мовчанюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2023, № 4. – С. 92–97. – Режим доступу: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-169-4-92-97>.

31. Єзерський Н. Оптимізація аналогового модулю за шумовими характеристиками у бортовому детекторі реєстратора-аналізатора для ідентифікації заряджених частинок / Н. Єзерський, А. Мовчанюк // Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології. – 2023. – Т. 1, № 5. – С. 93–104. Режим доступу: [doi: 10.36994/2788-5518-2023-01-05-12](https://doi.org/10.36994/2788-5518-2023-01-05-12).

32. Землетрус - Profilbaru.Com [Електронний ресурс] // PROFILBARU.COM. – Режим доступу: <https://profilbaru.com/uk/Землетрус>.

33. Землетрус в Індійському океані (2004) – Вікіпедія [Електронний ресурс] / Учасники проєктів Вікімедіа // Вікіпедія. – Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Землетрус_в_Індійському_океані_\(2004\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Землетрус_в_Індійському_океані_(2004)).

34. Землетрус на Гаїті: [Електронний ресурс] // Радіо Свобода. – Режим доступу: <https://www.radiosvoboda.org/a/news-hayiti-zemletrus-zagybli/31412369.html>.

35. Землетруси та сейсмічна безпека: виживання у світі нелінійних загроз | Газета «День» [Електронний ресурс] // Газета «День». – Режим

доступу: <https://day.kyiv.ua/blog/suspilstvo/zemletrusy-ta-seysmichna-bezpeka-vyzyvannya-u-sviti-neliniynykh-zahroz>.

36. Іванчук В. Г. РАДІАЦІЙНІ ПОЯСИ ЗЕМЛІ [Електронний ресурс] / В. Іванчук // Лексика - українські енциклопедії та словники. – Режим доступу: https://leksika.com.ua/18611021/ure/radiatsiyni_poyasi_zemli.

37. Коронас / С. М. Осіпов // Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] / Редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.] ; НАН України, НТШ. – К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2014. – Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-5135>.

38. Левчук С. <http://uiar.org.ua/Dovidnyk.pdf> [Electronic resource] : довідник / С. Левчук. – Київ : UIAR, 2016. – 119 р. – Mode of access: <http://uiar.org.ua/Dovidnyk.pdf>.

39. Лялько В. можливості короткострокового прогнозу землетрусів на основі супутникового моніторингу ліній аномалій хмарності [Електронний ресурс] / В. Лялько, А. Воробйов, В. Шульга // Космічна наука і технології. – 2008. – Т. 14, № 6. – С. 69–72. – Режим доступу: <https://www.mao.kiev.ua/biblio/jscans/knit/2008-14/knit-2008-14-6-05.pdf>.

40. Микуляк С. Блоково-ієрархічна модель сейсмічних процесів [Електронний ресурс] / С. Микуляк // Доповіді Національної академії наук України. – 2018. – С. 55–62. – Режим доступу: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.11.055>.

41. На Гаїті стався землетрус магнітудою 7,2, є руйнування та жертви [Електронний ресурс] // LB.ua. – Режим доступу: https://lb.ua/world/2021/08/14/491680_gaiti_stavsya_zemletrus_magnitudo_yu.html.

42. Основи методів дистанційного зондування [Електронний ресурс] // Навчально-інформаційний портал НУБіП УКРАЇНИ. – Режим доступу: <https://elearn.nubip.edu.ua/mod/book/tool/print/index.php?id=187200>.

43. Пигулевский П. Використання даних моніторингу гідродеформаційних характеристик підземних вод для прогнозування тектонічних процесів в масивах гірських порід [Електронний ресурс] / П. Пигулевский, В. Свистун, А. Толкунов // Наукові праці УкрНДМІ НАН України : Зб. наук. пр., 9 квіт. 2009 р. – Київ, 2009. – С. 122–131. – Режим доступу: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/18082/11-Pigulevskiy.pdf?sequence=1> .

44. Руткевич Б. МАГНІТНІ ПАСТКИ [Електронний ресурс] / Л. Пасічник, Б. Руткевич // Лексика - українські енциклопедії та словники. – Режим доступу: https://leksika.com.ua/13520928/ure/magnitni_pastki .

45. Світалінський М. Сейсмічні пояси Землі🌐 зображення контурній карті • NRV UA [Електронний ресурс] / М. Світалінський // NRV UA. – Режим доступу: <https://nrv.org.ua/sejsmichni-poyasy-zemli/> .

46. Сонце як небесне тіло, прилади нагляду. Реферат [Електронний ресурс] // Освіта.UA. – Режим доступу: <https://osvita.ua/vnz/reports/astronom/25804/> .

47. Учасники проектів Вікімедіа. Спітакський землетрус – Вікіпедія [Електронний ресурс] / Учасники проектів Вікімедіа // Вікіпедія. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Спітакський_землетрус .

48. Учасники проектів Вікімедіа. Шкала Ріхтера – Вікіпедія [Електронний ресурс] / Учасники проектів Вікімедіа // Вікіпедія. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Шкала_Ріхтера .

49. Целесообразность ориентирования осей кристалла п-терфенила в сцинтилляционном детекторе монитора заряженных частиц солнечного рентгеновского спектрофотометра ChemiX [Електронний ресурс] / О. Дудник [та ін.] // Космічна наука і технологія. – 2018. – Т. 24, № 3. – С. 33–39. – Режим доступу: <https://doi.org/10.15407/knit2018.03.033> .

50. Черногор Л. Ф. Іоносфера. *Енциклопедія Сучасної України: онлайн-версія* / редкол.: І. М. Дзюба та ін.; НАН України, НТШ. Київ: Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2011. URL: <https://esu.com.ua/article-12561>.

- ДОДАТОК А

**СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА
ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ**

**Список публікацій здобувача, в яких опубліковані основні наукові
результати дисертації**

1. Єзерський Н. Оптимізація аналогового модулю за шумовими характеристиками у бортовому детекторі реєстратора-аналізатора для ідентифікації заряджених частинок / Н. Єзерський, А. Мовчанюк // Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології. – 2023. – Т. 1, № 5. – С. 93–104. Режим доступу: doi: 10.36994/2788-5518-2023-01-05-12.

2. Єзерський Н. Алгоритм з ідентифікації сортів та енергій заряджених частинок для вивчення явища сейсмічно-магнітосферної кореляції [Електронний ресурс] / Н. Єзерський, А. Мовчанюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2023. – № 3. – С. 66–71. – Режим доступу: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-168-3-66-71>.

3. Єзерський Н. Імітатор спрацювань детекторів заряджених частинок та модуль цифрової обробки сигналу малогабаритного спектрометра елементарних частинок [Електронний ресурс] / Н. Єзерський, А. Мовчанюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2023, № 4. – С. 92–97. – Режим доступу: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-169-4-92-97>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Yezerskyi N. Concept of implementation the digital signal processing of the miniature particle detector mira_ep in the CubeSAT format / N. Yezerskyi, A. Movchanuk, O. Dudnik // Radio-technical fields, signals, apparatus and systems: Abstracts International Conference, Kyiv, 18 listop. 2019 p. – Київ, 2019. – С. 159–161.
2. Єзерський Н. Вибір частотного діапазону та оптимізація каналу зв'язку земля-наносупутник / Н. Єзерський, А. Мовчанюк // Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи : Міжнар. науково-техн. конф., Київ, 17 listop. 2020 p. – Київ, 2020. – С. 96–99.
3. Yezerskyi N. Electronic simulator of signals derived from scintillation detectors in spectrometric identification of high-energy charged particles / N. Yezerskyi, A. Movchanuk, O. Dudnik // Radio-technical fields, signals, apparatus and systems : Abstracts International Conference, Kyiv, 9 November 2021. – Kyiv, 2021. – P. 75–77.
4. Simulation of CubeSat caliber particle detector “MiRA_ep” response to energetic electrons and protons using GEANT4 package [Electronic resource] / N. Yezerskyi [et al.] // Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments. – 2019. – Vol. 11176. – P. 1–10. – Mode of access: <https://doi.org/10.1117/12.2536748> .

- ДОДАТОК Б

**ПРОГРАМА ПЕРЕВІРКИ РОЗПОДІЛУ ЧАСТИНОК ПО ДІАПАЗОНАМ
ДОДАВАННЯМ БІЛОГО ГАУССОВОГО ШУМУ З РІЗНИМ
СПІВВІДНОШЕННЯМ С/Ш**

```

clear all;
clc;
Ranges=[0,55,56,118,119,449,450,1205,1206,2505,0,100,101,160,161,240,241,347,3
48,570,0,1439,1440,2497,2498,2894,2895,3687,3688,4095];
stream=randi([0,4095],25000,1); %energies of particles in adc codes
stream_noise_50=awgn(stream,50,'measured');%energies of particles with white noise
stream_noise_30=awgn(stream,30,'measured');
stream_noise_10=awgn(stream,10,'measured');
stream_noise_5=awgn(stream,5,'measured');
d = randi([1,2],length(stream),1);% detector combinations (2 it is D1&D2 1-only D1)
count1=0;%from stream
count2=0;
count3=0;
count4=0;
count5=0;
count6=0;
count7=0;
count8=0;
count9=0;
count10=0;
count11=0;
count12=0;
count13=0;
count14=0;
count15=0;
count_lost=0;

countn1=0;%from stream_noise_50
countn2=0;
countn3=0;
countn4=0;
countn5=0;
countn6=0;
countn7=0;
countn8=0;
countn9=0;
countn10=0;

```

```
countn11=0;  
countn12=0;  
countn13=0;  
countn14=0;  
countn15=0;  
countn_lost=0;
```

```
countm1=0;%from stream_noise_30  
countm2=0;  
countm3=0;  
countm4=0;  
countm5=0;  
countm6=0;  
countm7=0;  
countm8=0;  
countm9=0;  
countm10=0;  
countm11=0;  
countm12=0;  
countm13=0;  
countm14=0;  
countm15=0;  
countm_lost=0;
```

```
countk1=0;%from stream_noise_10  
countk2=0;  
countk3=0;  
countk4=0;  
countk5=0;  
countk6=0;  
countk7=0;  
countk8=0;  
countk9=0;  
countk10=0;  
countk11=0;  
countk12=0;  
countk13=0;  
countk14=0;
```

```
countk15=0;
countk_lost=0;
```

```
countp1=0;%from stream_noise_5
countp2=0;
countp3=0;
countp4=0;
countp5=0;
countp6=0;
countp7=0;
countp8=0;
countp9=0;
countp10=0;
countp11=0;
countp12=0;
countp13=0;
countp14=0;
countp15=0;
countp_lost=0;
```

```
for i=1:length(stream)
    if (stream(i)>Ranges(1) && stream(i)<Ranges(2) && d(i)==2)
        count1=count1+1;
    elseif (stream(i)>Ranges(3) && stream(i)<Ranges(4) && d(i)==2)
        count2=count2+1;
    elseif (stream(i)>Ranges(5) && stream(i)<Ranges(6) && d(i)==2)
        count3=count3+1;
    elseif (stream(i)>Ranges(7) && stream(i)<Ranges(8) && d(i)==2)
        count4=count4+1;
    elseif (stream(i)>Ranges(9) && stream(i)<Ranges(10) && d(i)==2)
        count5=count5+1;
    elseif (stream(i)>Ranges(11) &&stream(i)<Ranges(12) && d(i)==1)
        count6=count6+1;
    elseif (stream(i)>Ranges(13) && stream(i)<Ranges(14) && d(i)==1)
        count7=count7+1;
    elseif (stream(i)>Ranges(15) && stream(i)<Ranges(16) && d(i)==1)
        count8=count8+1;
    elseif (stream(i)>Ranges(17) &&stream(i)<Ranges(18) && d(i)==1)
```

```

    count9=count9+1;
elseif (stream(i)>Ranges(19) && stream(i)<Ranges(20) && d(i)==1)
    count10=count10+1;
elseif (stream(i)>Ranges(21) && stream(i)<Ranges(22) && d(i)==1)
    count11=count11+1;
elseif (stream(i)>Ranges(23) && stream(i)<Ranges(24) && d(i)==1)
    count12=count12+1;
elseif (stream(i)>Ranges(25) && stream(i)<Ranges(26) && d(i)==1)
    count13=count13+1;
elseif (stream(i)>Ranges(27) && stream(i)<Ranges(28) && d(i)==1)
    count14=count14+1;
elseif (stream(i)>Ranges(29) && stream(i)<Ranges(30) && d(i)==1)
    count15=count15+1;
else
    count_lost=count_lost+1;
end
end

for i=1:length(stream_noise_50)
    if (stream_noise_50(i)>Ranges(1) && stream_noise_50(i)<Ranges(2) && d(i)==2)
        countn1=countn1+1;
    elseif (stream_noise_50(i)>Ranges(3) && stream_noise_50(i)<Ranges(4) &&
d(i)==2)
        countn2=countn2+1;
    elseif (stream_noise_50(i)>Ranges(5) && stream_noise_50(i)<Ranges(6) &&
d(i)==2)
        countn3=countn3+1;
    elseif (stream_noise_50(i)>Ranges(7) && stream_noise_50(i)<Ranges(8) &&
d(i)==2)
        countn4=countn4+1;
    elseif (stream_noise_50(i)>Ranges(9) && stream_noise_50(i)<Ranges(10) &&
d(i)==2)
        countn5=countn5+1;
    elseif (stream_noise_50(i)>Ranges(11) && stream_noise_50(i)<Ranges(12) &&
d(i)==1)
        countn6=countn6+1;
    elseif (stream_noise_50(i)>Ranges(13) && stream_noise_50(i)<Ranges(14) &&
d(i)==1)

```

```

        countn7=countn7+1;
        elseif (stream_noise_50(i)>Ranges(15) && stream_noise_50(i)<Ranges(16) &&
d(i)==1)
            countn8=countn8+1;
            elseif (stream_noise_50(i)>Ranges(17) && stream_noise_50(i)<Ranges(18) &&
d(i)==1)
                countn9=countn9+1;
                elseif (stream_noise_50(i)>Ranges(19) && stream_noise_50(i)<Ranges(20) &&
d(i)==1)
                    countn10=countn10+1;
                    elseif (stream_noise_50(i)>Ranges(21) && stream_noise_50(i)<Ranges(22) &&
d(i)==1)
                        countn11=countn11+1;
                        elseif (stream_noise_50(i)>Ranges(23) && stream_noise_50(i)<Ranges(24) &&
d(i)==1)
                            countn12=countn12+1;
                            elseif (stream_noise_50(i)>Ranges(25) &&stream_noise_50(i)<Ranges(26) &&
d(i)==1)
                                countn13=countn13+1;
                                elseif (stream_noise_50(i)>Ranges(27) && stream_noise_50(i)<Ranges(28) &&
d(i)==1)
                                    countn14=countn14+1;
                                    elseif (stream_noise_50(i)>Ranges(29) && stream_noise_50(i)<Ranges(30) &&
d(i)==1)
                                        countn15=countn15+1;
                                        else
                                            countn_lost=countn_lost+1;
                                        end
                                    end
                                end
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
end

```

```

for i=1:length(stream_noise_30)
    if (stream_noise_30(i)>Ranges(1) && stream_noise_30(i)<Ranges(2) && d(i)==2)
        countm1=countm1+1;
        elseif (stream_noise_30(i)>Ranges(3) && stream_noise_30(i)<Ranges(4) &&
d(i)==2)
            countm2=countm2+1;
            elseif (stream_noise_30(i)>Ranges(5) && stream_noise_30(i)<Ranges(6) &&
d(i)==2)

```

```

    countm3=countm3+1;
    elseif (stream_noise_30(i)>Ranges(7) && stream_noise_30(i)<Ranges(8) &&
d(i)==2)
        countm4=countm4+1;
    elseif (stream_noise_30(i)>Ranges(9) && stream_noise_30(i)<Ranges(10) &&
d(i)==2)
        countm5=countm5+1;
    elseif (stream_noise_30(i)>Ranges(11) &&stream_noise_30(i)<Ranges(12) &&
d(i)==1)
        countm6=countm6+1;
    elseif (stream_noise_30(i)>Ranges(13) && stream_noise_30(i)<Ranges(14) &&
d(i)==1)
        countm7=countm7+1;
    elseif (stream_noise_30(i)>Ranges(15) && stream_noise_30(i)<Ranges(16) &&
d(i)==1)
        countm8=countm8+1;
    elseif (stream_noise_30(i)>Ranges(17) && stream_noise_30(i)<Ranges(18) &&
d(i)==1)
        countm9=countm9+1;
    elseif (stream_noise_30(i)>Ranges(19) && stream_noise_30(i)<Ranges(20) &&
d(i)==1)
        countm10=countm10+1;
    elseif (stream_noise_30(i)>Ranges(21) && stream_noise_30(i)<Ranges(22) &&
d(i)==1)
        countm11=countm11+1;
    elseif (stream_noise_30(i)>Ranges(23) && stream_noise_30(i)<Ranges(24) &&
d(i)==1)
        countm12=countm12+1;
    elseif (stream_noise_30(i)>Ranges(25) &&stream_noise_30(i)<Ranges(26) &&
d(i)==1)
        countm13=countm13+1;
    elseif (stream_noise_30(i)>Ranges(27) && stream_noise_30(i)<Ranges(28) &&
d(i)==1)
        countm14=countm14+1;
    elseif (stream_noise_30(i)>Ranges(29) && stream_noise_30(i)<Ranges(30) &&
d(i)==1)
        countm15=countm15+1;
    else

```

```

    countm_lost=countm_lost+1;
end
end

for i=1:length(stream_noise_10)
    if (stream_noise_10(i)>Ranges(1) && stream_noise_10(i)<Ranges(2) && d(i)==2)
        countk1=countk1+1;
    elseif (stream_noise_10(i)>Ranges(3) && stream_noise_10(i)<Ranges(4) &&
d(i)==2)
        countk2=countk2+1;
    elseif (stream_noise_10(i)>Ranges(5) && stream_noise_10(i)<Ranges(6) &&
d(i)==2)
        countk3=countk3+1;
    elseif (stream_noise_10(i)>Ranges(7) && stream_noise_10(i)<Ranges(8) &&
d(i)==2)
        countk4=countk4+1;
    elseif (stream_noise_10(i)>Ranges(9) && stream_noise_10(i)<Ranges(10) &&
d(i)==2)
        countk5=countk5+1;
    elseif (stream_noise_10(i)>Ranges(11) &&stream_noise_10(i)<Ranges(12) &&
d(i)==1)
        countk6=countk6+1;
    elseif (stream_noise_10(i)>Ranges(13) && stream_noise_10(i)<Ranges(14) &&
d(i)==1)
        countk7=countk7+1;
    elseif (stream_noise_10(i)>Ranges(15) && stream_noise_10(i)<Ranges(16) &&
d(i)==1)
        countk8=countk8+1;
    elseif (stream_noise_10(i)>Ranges(17) && stream_noise_10(i)<Ranges(18) &&
d(i)==1)
        countk9=countk9+1;
    elseif (stream_noise_10(i)>Ranges(19) && stream_noise_10(i)<Ranges(20) &&
d(i)==1)
        countk10=countk10+1;
    elseif (stream_noise_10(i)>Ranges(21) && stream_noise_10(i)<Ranges(22) &&
d(i)==1)
        countk11=countk11+1;

```

```

elseif (stream_noise_10(i)>Ranges(23) && stream_noise_10(i)<Ranges(24) &&
d(i)==1)
    countk12=countk12+1;
elseif (stream_noise_10(i)>Ranges(25) &&stream_noise_10(i)<Ranges(26) &&
d(i)==1)
    countk13=countk13+1;
elseif (stream_noise_10(i)>Ranges(27) && stream_noise_10(i)<Ranges(28) &&
d(i)==1)
    countk14=countk14+1;
elseif (stream_noise_10(i)>Ranges(29) && stream_noise_10(i)<Ranges(30) &&
d(i)==1)
    countk15=countk15+1;
else
    countk_lost=countk_lost+1;
end
end
end

```

```

for i=1:length(stream_noise_5)
    if (stream_noise_5(i)>Ranges(1) && stream_noise_5(i)<Ranges(2) && d(i)==2)
        countp1=countp1+1;
    elseif (stream_noise_5(i)>Ranges(3) && stream_noise_5(i)<Ranges(4) &&
d(i)==2)
        countp2=countp2+1;
    elseif (stream_noise_5(i)>Ranges(5) && stream_noise_5(i)<Ranges(6) &&
d(i)==2)
        countp3=countp3+1;
    elseif (stream_noise_5(i)>Ranges(7) && stream_noise_5(i)<Ranges(8) &&
d(i)==2)
        countp4=countp4+1;
    elseif (stream_noise_5(i)>Ranges(9) && stream_noise_5(i)<Ranges(10) &&
d(i)==2)
        countp5=countp5+1;
    elseif (stream_noise_5(i)>Ranges(11) &&stream_noise_5(i)<Ranges(12) &&
d(i)==1)
        countp6=countp6+1;
    elseif (stream_noise_5(i)>Ranges(13) && stream_noise_5(i)<Ranges(14) &&
d(i)==1)
        countp7=countp7+1;
    end
end
end

```

```

elseif (stream_noise_5(i)>Ranges(15) && stream_noise_5(i)<Ranges(16) &&
d(i)==1)
    countp8=countp8+1;
elseif (stream_noise_5(i)>Ranges(17) && stream_noise_5(i)<Ranges(18) &&
d(i)==1)
    countp9=countp9+1;
elseif (stream_noise_5(i)>Ranges(19) && stream_noise_5(i)<Ranges(20) &&
d(i)==1)
    countp10=countp10+1;
elseif (stream_noise_5(i)>Ranges(21) && stream_noise_5(i)<Ranges(22) &&
d(i)==1)
    countp11=countp11+1;
elseif (stream_noise_5(i)>Ranges(23) && stream_noise_5(i)<Ranges(24) &&
d(i)==1)
    countp12=countp12+1;
elseif (stream_noise_5(i)>Ranges(25) &&stream_noise_5(i)<Ranges(26) &&
d(i)==1)
    countp13=countp13+1;
elseif (stream_noise_5(i)>Ranges(27) && stream_noise_5(i)<Ranges(28) &&
d(i)==1)
    countp14=countp14+1;
elseif (stream_noise_5(i)>Ranges(29) && stream_noise_5(i)<Ranges(30) &&
d(i)==1)
    countp15=countp15+1;
else
    countp_lost=countp_lost+1;
end
end

```

```
Counts_pure=[count1, count2, count3, count4, count5, count6, count7, count8, count9,
count10, count11, count12, count13, count14, count15];
```

```
Counts_noise_50=[countn1, countn2, countn3, countn4, countn5, countn6, countn7,
countn8, countn9, countn10, countn11, countn12, countn13, countn14, countn15];
```

```
Counts_noise_30=[countm1, countm2, countm3, countm4, countm5, countm6,
countm7, countm8, countm9, countm10, countm11, countm12, countm13, countm14,
countm15];
```

```
Counts_noise_10=[countk1, countk2, countk3, countk4, countk5, countk6, countk7,
countk8, countk9, countk10, countk11, countk12, countk13, countk14, countk15];
```

```
Counts_noise_5=[countp1, countp2, countp3, countp4, countp5, countp6, countp7,
countp8, countp9, countp10, countp11, countp12, countp13, countp14, countp15];
```

```
error_rel_50=(Counts_noise_50./Counts_pure)*100;% otnositelnaya pogreshnost in
percents
```

```
error_rel_30=(Counts_noise_30./Counts_pure)*100;
```

```
error_rel_10=(Counts_noise_10./Counts_pure)*100;
```

```
error_rel_5=(Counts_noise_5./Counts_pure)*100;
```

```
err_rel_50=abs(100.-error_rel_50);%here becamas true
```

```
err_rel_30=abs(100.-error_rel_30);
```

```
err_rel_10=abs(100.-error_rel_10);
```

```
err_rel_5=abs(100.-error_rel_5);
```

```
x=1:1:15;
```

```
figure(1);
```

```
subplot(2,2,1);
```

```
err_50=plot(x, err_rel_50);
```

```
stem(err_rel_50);
```

```
xlabel('Num of range');
```

```
ylabel('Percents');
```

```
title('Relative error 50 dB awgn');
```

```
subplot(2,2,2);
```

```
err_30=plot(x, err_rel_30);
```

```
stem(err_rel_30);
```

```
xlabel('Num of range');
```

```
ylabel('Percents');
```

```
title('Relative error 30 dB awgn');
```

```
subplot(2,2,3);
```

```
err_10=plot(x, err_rel_10);
```

```
stem(err_rel_10);
```

```
xlabel('Num of range');
```

```
ylabel('Percents');
```

```
title('Relative error 10 dB awgn');
```

```
subplot(2,2,4);
```

```
err_5=plot(x, err_rel_5);  
stem(err_rel_5);  
xlabel('Num of range');  
ylabel('Percents');  
title('Relative error 5 dB awgn');
```

```
error_abs_50=(Counts_noise_50-Counts_pure);% absolutnaya pogreshnost in shtukas  
error_abs_30=(Counts_noise_30-Counts_pure);  
error_abs_10=(Counts_noise_10-Counts_pure);  
error_abs_5=(Counts_noise_5-Counts_pure);
```

```
figure(2);  
subplot(2,2,1);  
erra_50=plot(x, error_abs_50);  
stem(error_abs_50);  
xlabel('Num of range');  
ylabel('Quantity');  
title('Absolute error 50 dB awgn');
```

```
subplot(2,2,2);  
erra_30=plot(x, error_abs_30);  
stem(error_abs_30);  
xlabel('Num of range');  
ylabel('Quantity');  
title('Absolute error 30 dB awgn');
```

```
subplot(2,2,3);  
erra_10=plot(x, error_abs_10);  
stem(error_abs_10);  
xlabel('Num of range');  
ylabel('Quantity');  
title('Absolute error 10 dB awgn');
```

```
subplot(2,2,4);  
erra_5=plot(x, error_abs_5);  
stem(error_abs_5);  
xlabel('Num of range');  
ylabel('Quantity');
```

```
title('Absolute error 5 dB awgn');
```

```
figure(3);
```

```
Origin=plot(x, Counts_pure);
```

```
Mat_ozh=mean(stream);%мат. очікування
```

```
Dispersiya=var(stream);%дисперсія
```

- ДОДАТОК В
ТЕКСТ ПРОГРАМИ ПЕРЕРАХУНКУ ЕНЕРГІЙ ЗАРЯДЖЕНИХ
ЧАСТИНОК У ВИХІДНІ НАПРУГИ ІМІТАТОРА СИГНАЛІВ ЗІ
СЦИНТИЛЯЦІЙНИХ ДЕТЕКТОРІВ

```
function second_app_exe
clc; clear all;
close all;
name_variable={'Входная энергия, МэВ'};
variable_initial={'0'};
options.Resize='on';
options.WindowStyle='normal';
options.Interpreter='none';
Prm=inputdlg(name_variable,'Ввод энергии частицы,
mV',1,variable_initial,options);

for i=1:length(Prm)
    A(i)=str2num(Prm{i});
    if A(i)>0 && A(i)<36
        A(i)=(A(i)*30*1.44)+wgn(1, 1, -30);
        Answer1=cat(2, 'Энергия выходная, D2, mV ',num2str(A));
        msgbox({Answer1},'Ответ');
    else
        msgbox('Ошибка');
    end
end
end
```

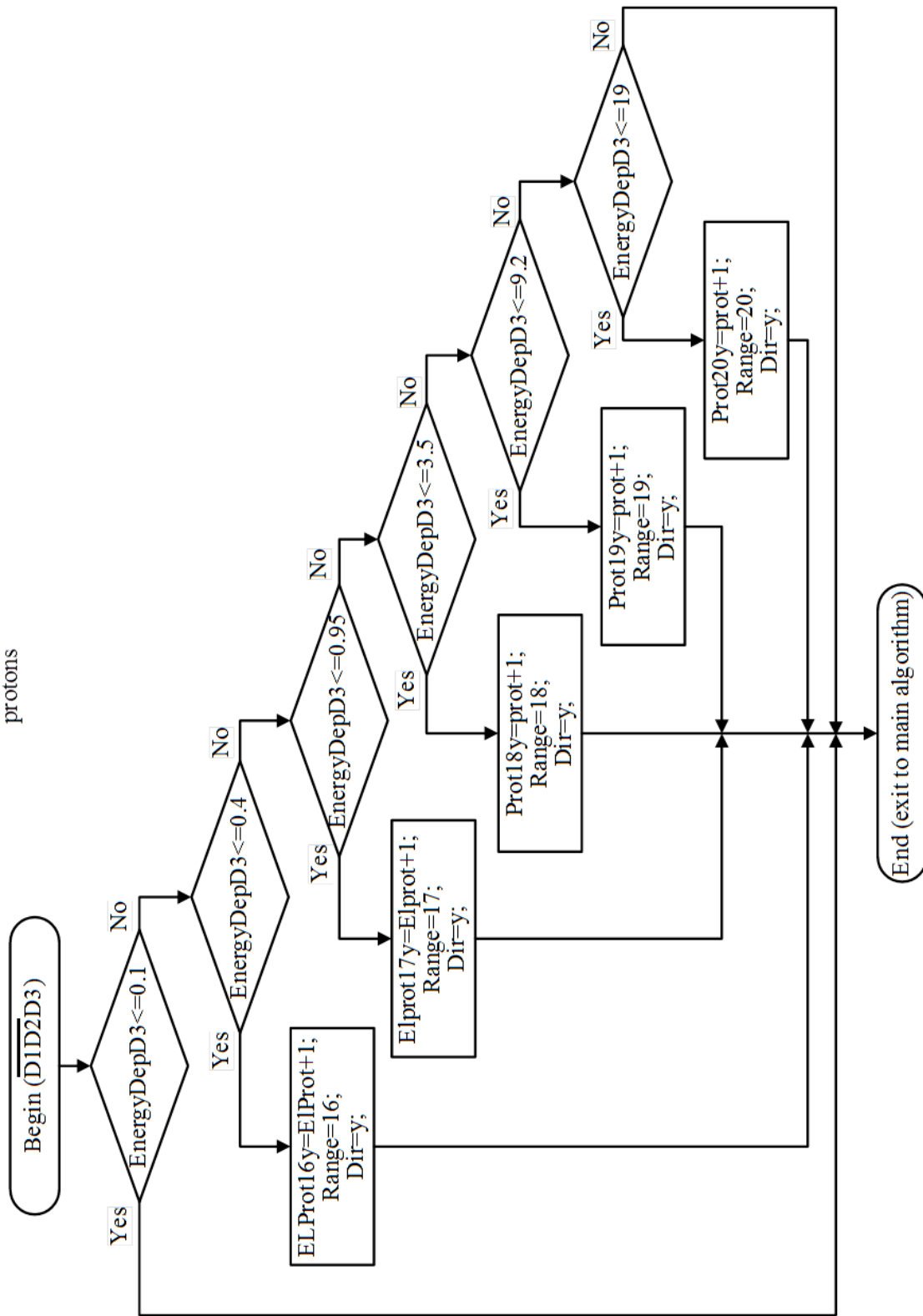
- ДОДАТОК Г
ПРОГРАМА ДЛЯ ЗЧИТУВАННЯ КОДІВ АЦП ЧЕРЕЗ ВІРТУАЛЬНИЙ
СОМ-ПОРТ ПК

```
clc;
clear all;
rate = 38400;
if ispc
    s = serial('COM7', 'BaudRate',rate);
end
% Set the input buffer size to 1,000,000 bytes (default: 512 bytes).
s.InputBufferSize = 100000;
% Open serial port
fopen(s);
% Read all the bytes, version 1
data = fread(s);
% Close the serial port
fclose(s);
data(data==0)=[];% carriage return and remove this character from the array
ch=char(data);
xlswrite('satellite.xls',data);
xlswrite('satellite_char.xls',ch);
```

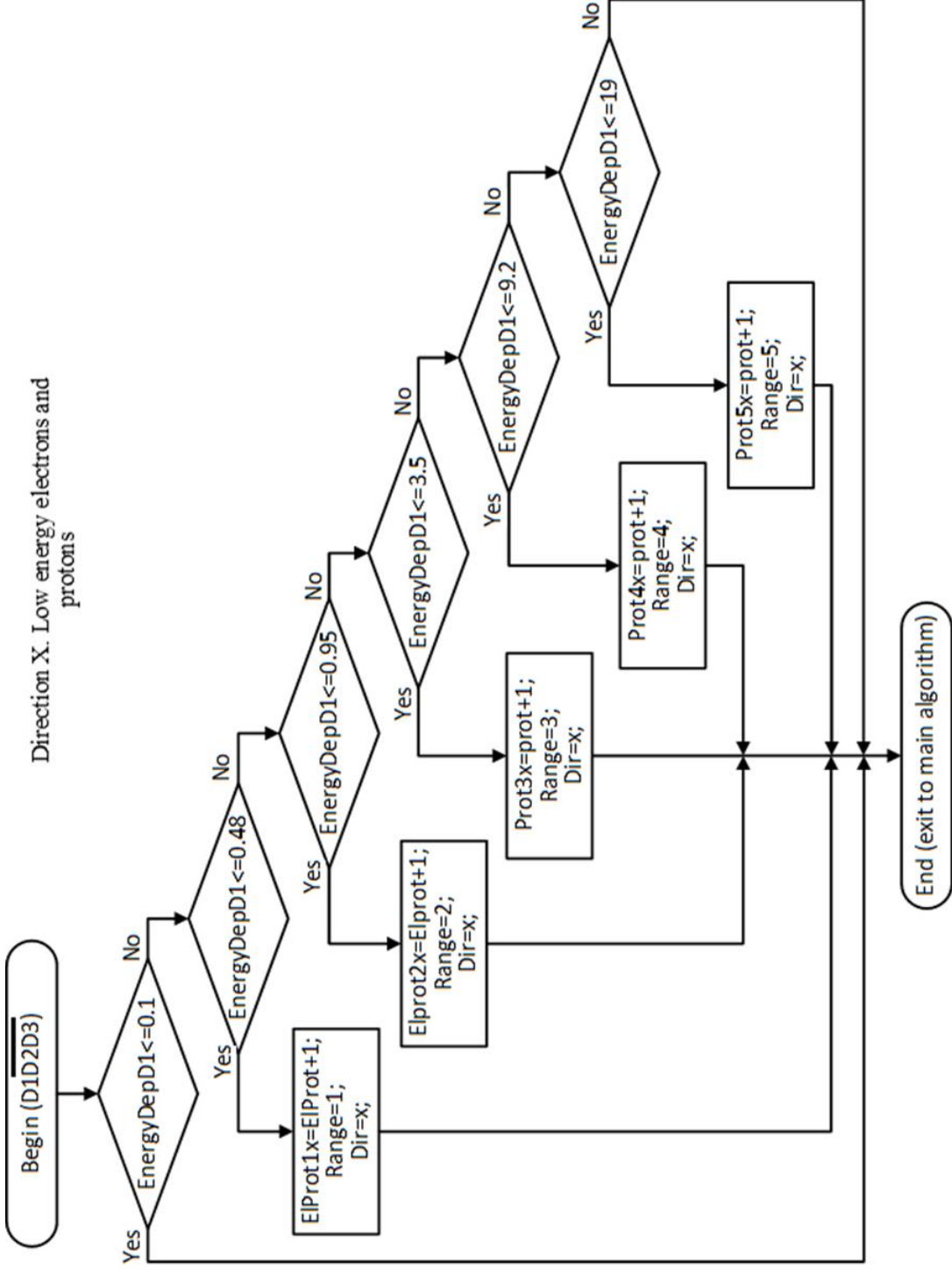
- ДОДАТОК Д

**ПІДПРОГРАМИ ГОЛОВНОГО АЛГОРИТМУ СОРТУВАННЯ
ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК ЗА СОРТАМИ ТА ЕНЕРГІЯМИ**

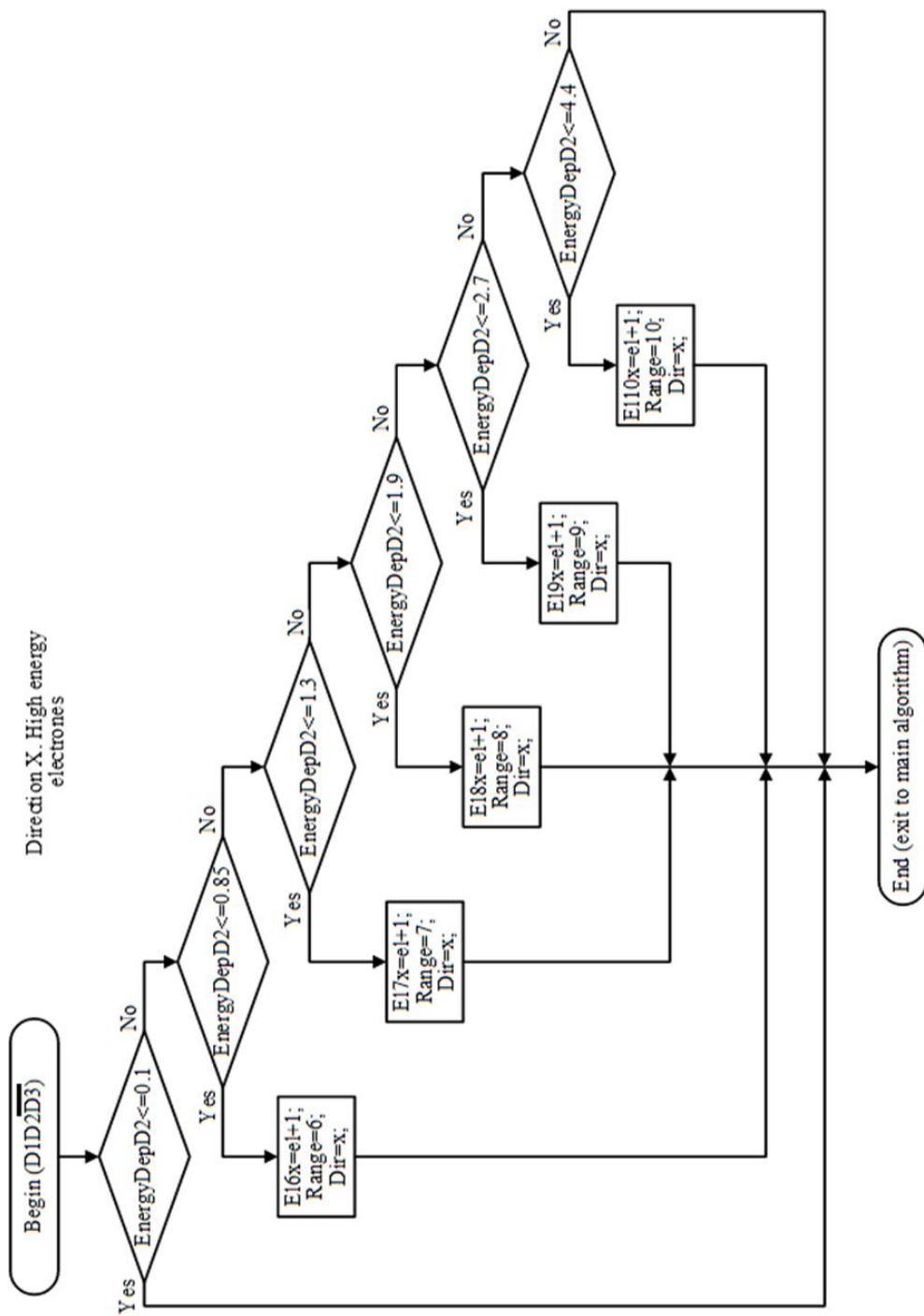
Direction Y. Low energy electrons and protons



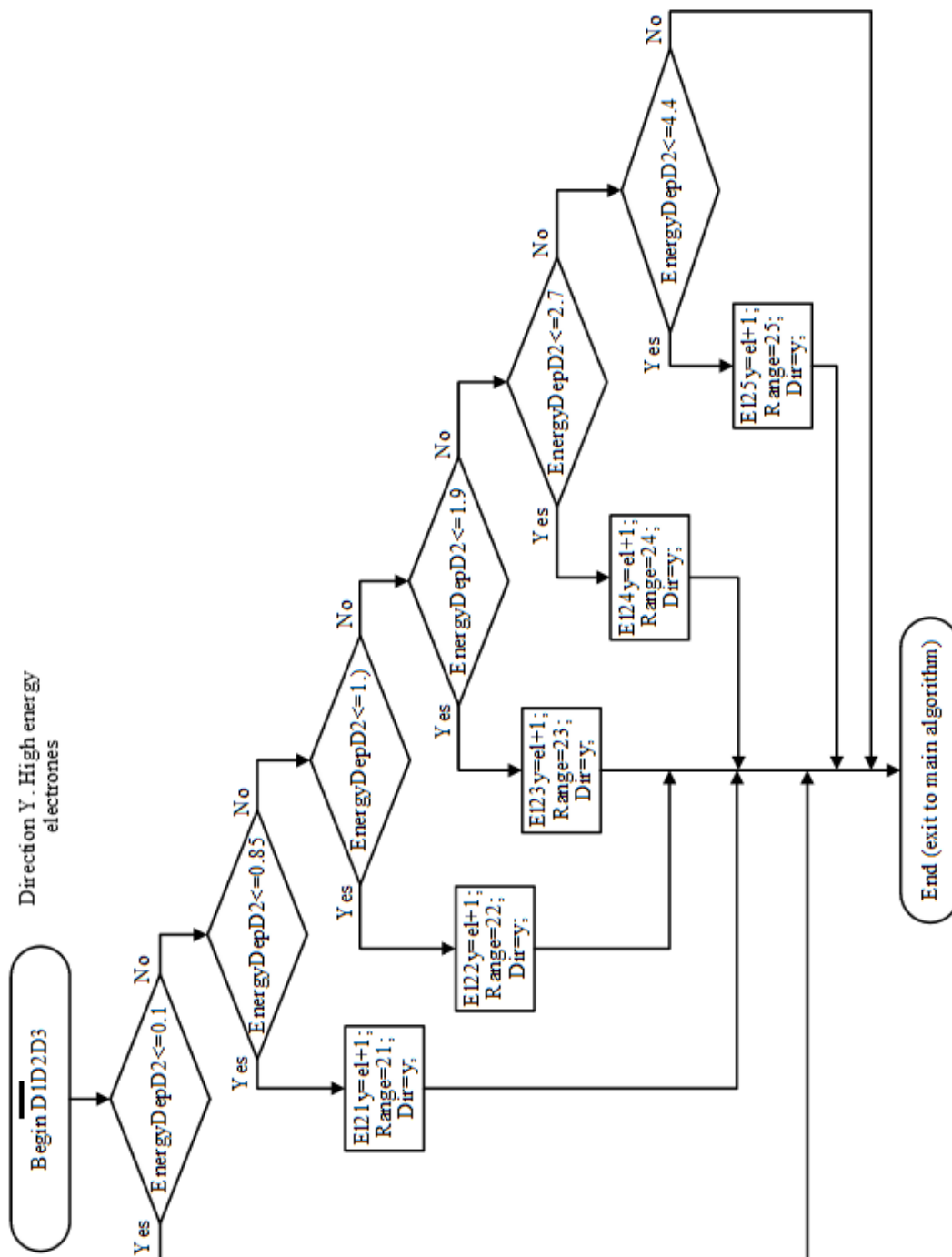
Алгоритм підрахунку низькоенергетичних електронів та протонів за напрямом Y



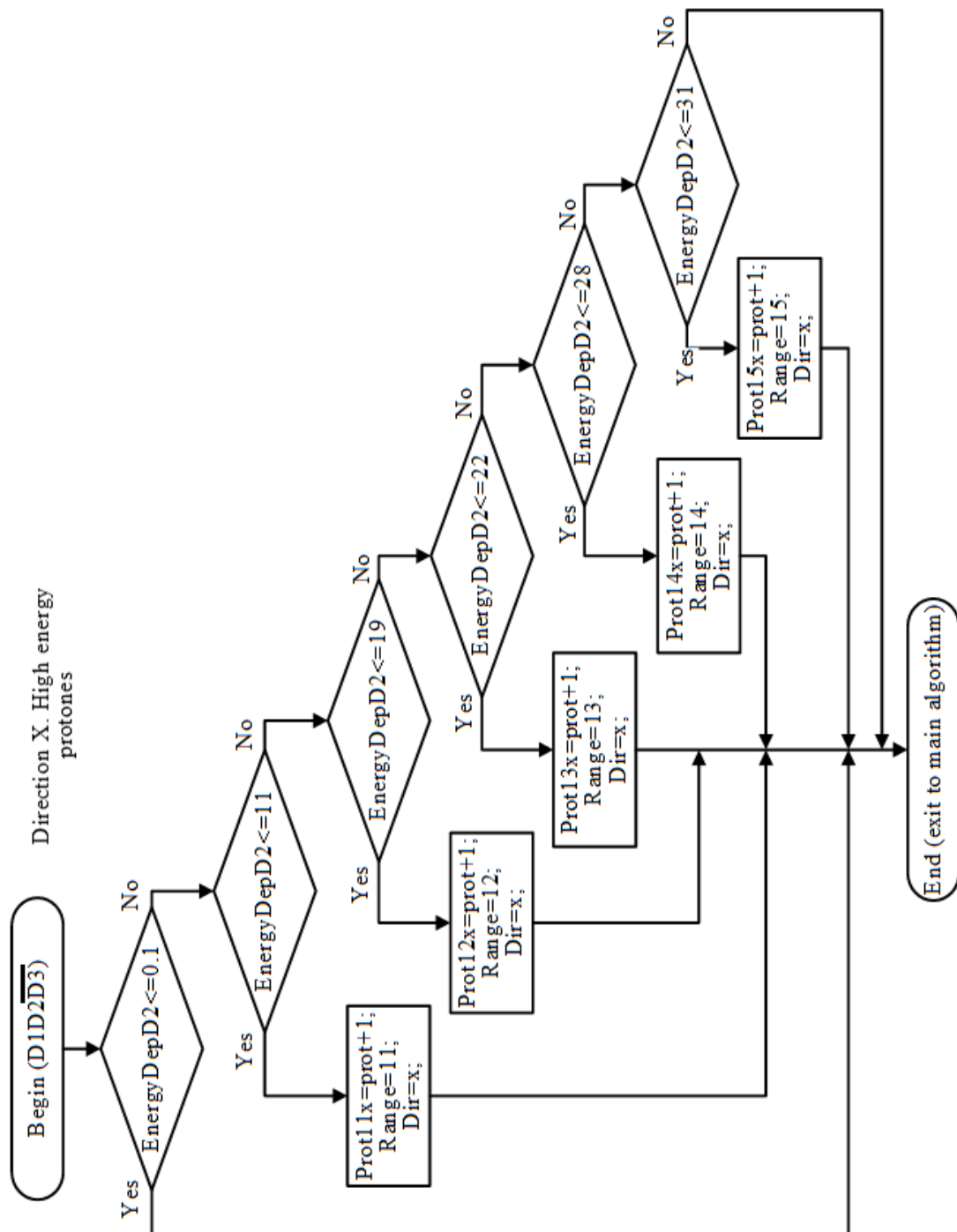
Алгоритм підрахунку низькоенергетичних електронів та протонів за напрямом X



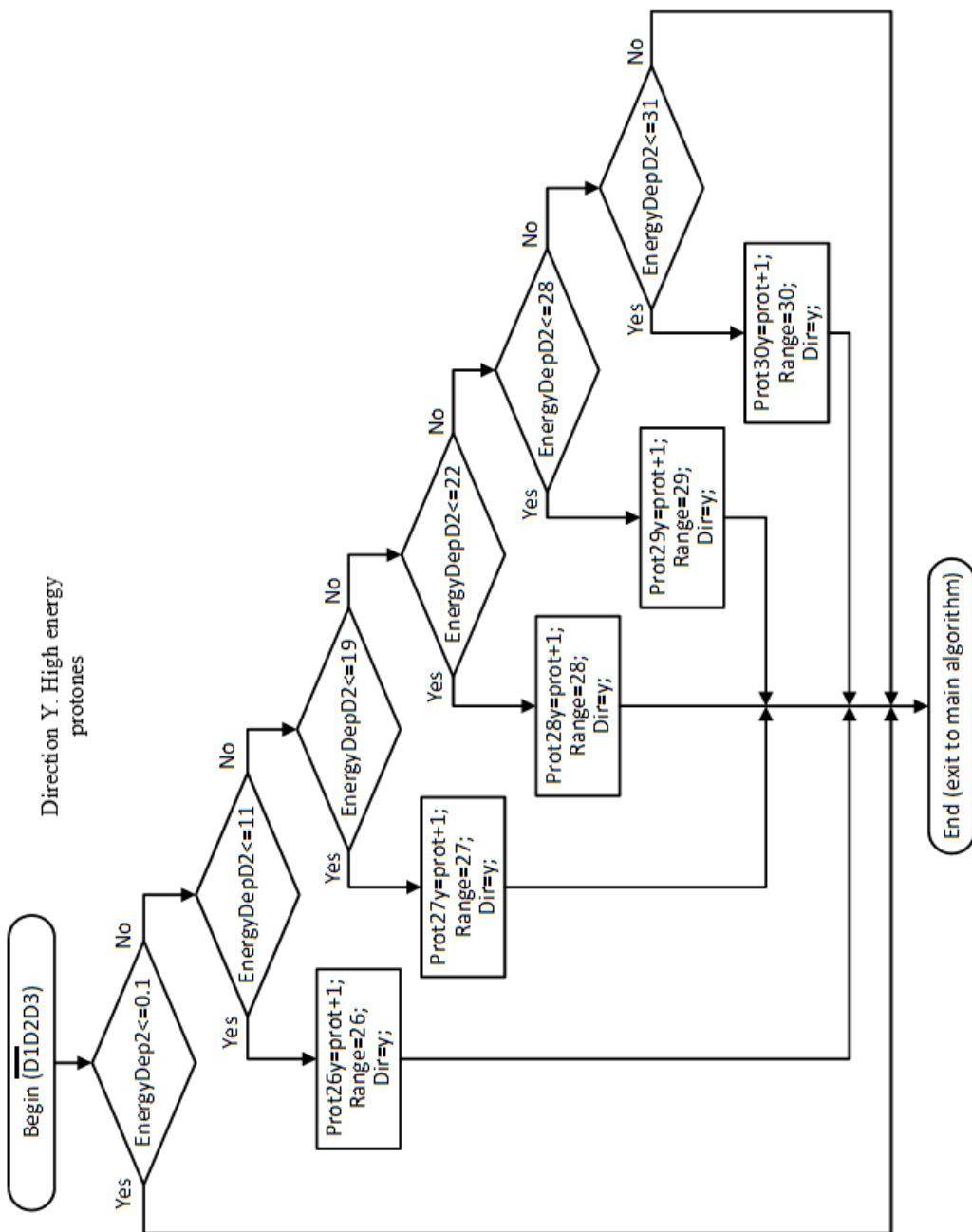
Алгоритм підрахунку високоенергетичних електронів за напрямом X



Алгоритм підрахунку високоенергетичних електронів за напрямом У



Алгоритм підрахунку високоенергетичних протонів за напрямом X



Алгоритм підрахунку високоенергетичних протонів за напрямом У

- ДОДАТОК Е
АКТ

**впровадження результатів дисертаційного
дослідження в навчальний процес**