

Н. В. Єзерський¹
А. В. Мовчанюк¹

ІМІТАТОР СПРАЦЮВАНЬ ДЕТЕКТОРІВ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК ТА МОДУЛЬ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛУ МАЛОГАБАРИТНОГО СПЕКТРОМЕТРА ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Системи реєстраторів-аналізаторів потоків плазми високих енергій, призначені для роботи на низькій навколосезній орбіті, мають чітко сформовані вимоги, але їхня реалізація суттєво залежить від наукових задач та кошторису проєкту. Натомість вимоги до спектрометричних каналів в термінах радіофізики ще треба інтерпретувати в терміни радіотехніки, що вимагає додаткових пошукових зусиль. Також часто доводиться розробляти частини обладнання без взаємодії з іншими підрядниками та за відсутності доступу до контрольного обладнання, чи коштів на його комплексне випробування. Тому ухвалено рішення про розробку варіанта заміщення частини високовартісного обладнання якомога дешевшим імітатором, що допоможе заощадити час та кошти в порцесі тестування та налаштування корисного навантаження. Нагальною проблемою є масштабування кількості імітованих спектрометричних каналів у разі використання одного загальнодоступного мікропроцесора, адже вихідний сигнал має бути аналоговим, а кількість цифро-аналогових перетворювачів, зазвичай, обмежена двома. Імітатор спрацювань детекторів заряджених частинок призначений для тестування розробленого в рамках того ж дослідження модуля ЦОС мініатюрного реєстратора-аналізатора, що планується до запуску на орбіту Землі. Він має виконати дискретизацію даних, отриманих детекторною системою, виготовленою з паратерфенілу та фотодіоду великої площі, які підготовлені до дискретизації попередньо розробленим модулем аналогової обробки сигналів. Ключову роль в реалізації модуля ЦОС відіграє алгоритм сортування заряджених частинок та його робота в умовах дискретизації сигналу з шумами. Вихідними даними для відправки на наземний пульт керування мініатюрним реєстратором-аналізатором має бути кількість заряджених частинок у відповідності до діапазону енергії, яку несе в собі заряджена частинка за виділений проміжок часу. Цей проміжок часу порівняно одному оберту наносупутника навколо Землі. Дослідження проведено з метою вивчення природи мікросплесків субрелятивістських електронів та протонів магнітосферного походження у радіаційних поясах Землі.

Ключові слова: обробка сигналів, оптимізація, CubeSAT, імітатор, модуль ЦОС, потоки плазми.

Вступ

З моменту відкриття (десятьки років тому) явища радіаційних поясів Землі та розвитку методів дослідження потоків плазми, інтерес до аналізу явищ, що становлять космічну погоду поступово зростає. Особливий інтерес викликає потенційне отримання даних, пов'язаних з активністю земної поверхні. Одним з найвідоміших феноменів для вивчення є сейсмічно-магнітосферна кореляція. При цьому феномен поясів Ван-Алена ще є недостатньо вивченим. Існують суперечки щодо їхньої структури, спектру частинок в різних станах, впливу позапоясної активності на поведінку заряджених частинок, та вищезгаданої кореляції із землетрусами [1].

Для отримання новітньої та уточнення відомої інформації про пояси Ван-Алена необхідно запустити космічний апарат з комплектом наукового обладнання для збирання і подальшого аналізу статистики про енергії та типи заряджених частинок в режимі реального часу. В першому наближенні такий апарат складається з детекторів заряджених частинок, накопичувача інформації та каналу передачі результатів на Землю.

З метою зменшення вартості запуску штучних супутників Землі частіше використовується такий формат розміщення корисного навантаження як наносупутник. Відповідно частина обладнання таких наносупутників є стандартизованою: апаратура зв'язку, системи бортового живлення, сонячні панелі, система орієнтації та ін. Розробники в основному зосереджують зусилля на проектуванні апаратури для корисного навантаження та розміщення його в стандартизованих корпусних елементах (рис. 1 [3]).

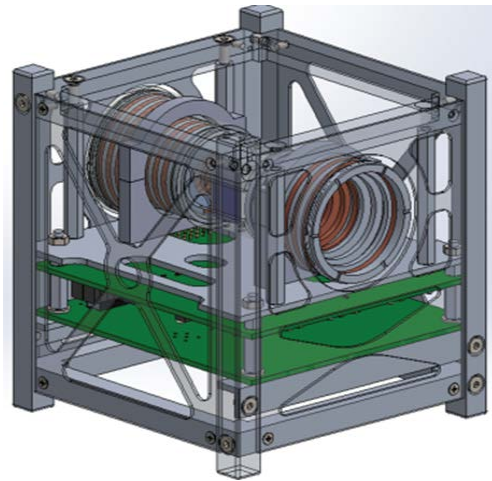


Рис. 1. Загальний вид розміщення корисного навантаження у блоці формату CubeSat 1U

Для вивчення та збору статистики по частинках в поясах Ван-Алена, корисне навантаження повинно складатися з детекторів частинок, вузла пікових детекторів та модуля збору та зберігання статистичної інформації. Авторів статті залучено до розробки модуля цифрової обробки сигналів (ЦОС) для реалізації алгоритму ідентифікації типів та енергій частинок і накопичення статистики для подальшого аналізу та передачі інформації на Землю. Модуль ЦОС квантує сигнали з системи захоплення та детектування заряджених частинок з енергіями, що не перевищують 31 МегаелектронВольт (MeV) [2]. Зі свого боку система захоплення та детектування частинок складається з коліматора, двох сцинтиляційних детекторів та одного, виготовленого з паратерфенілу (рис. 2). Таким чином є змога виявляти напрям, з якого в детектор влучила частинка того чи іншого типу, та яку енергію вона мала.

Також на модуль ЦОС покладено функції сортування частинок за діапазонами енергій та сортами заряджених частинок і формування масивів даних, зібраних модулем за один повний оберт супутника навколо Землі, та передача на бортовий комп'ютер зібраних даних для подальшої відправки радіоканалом на наземний пункт керування.

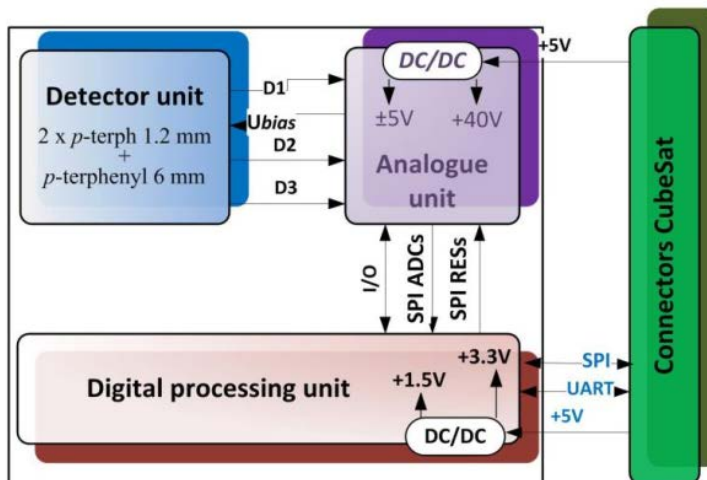


Рис. 2. Спрощена структура реєстратора-аналізатора заряджених частинок [1]

Додатковими функціями модуля ЦОС є: тестування наявними цифро-аналоговими перетворювачами (ЦАП) готовності до роботи оцінкою параметрів тестового сигналу, що має проходити через плати аналогової обробки сигналів (АОС) та ЦОС, а також контроль температури у внутрішньому об'ємі наносупутника.

Сортування в платі ЦОС за виділеними діапазонами енергій здійснюється таким чином (рис. 3). В залежності від напрямку прильоту частинки відбуваються сплески вихідної напруги на виході пікових детекторів плати аналогового оброблення сигналів. В залежності від напрямку прильоту та енергії частинки зміна напруги відбувається на виході одного, двох або усіх трьох детекторів. Величина напруги, що залежить від енергії частинки та співвідношення між напругами на виходах різних детекторів, дозволяють ідентифікувати тип та енергію частинки. Ідентифікація відбувається за пороговими рівнями, встановленими за результатами аналого-цифрового перетворення в модулі ЦОС.

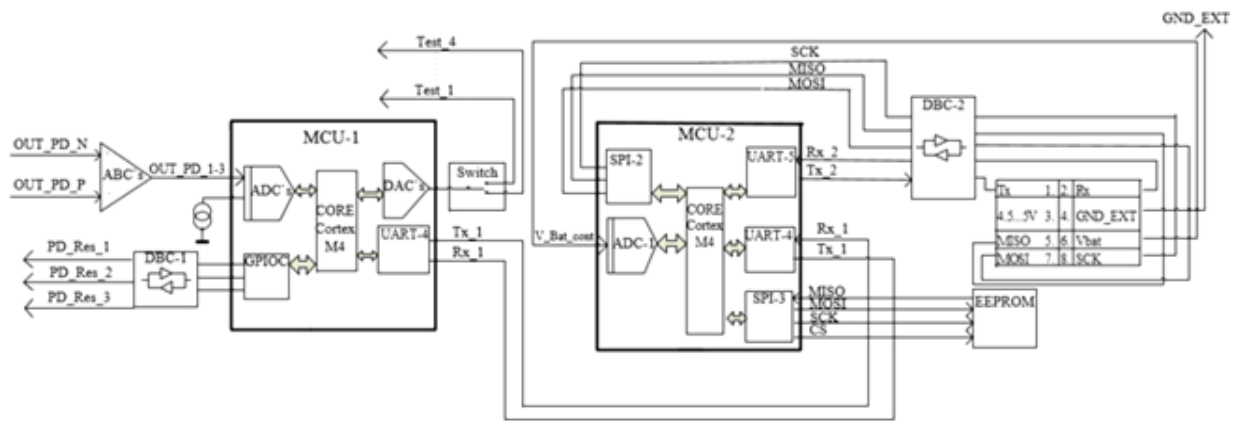


Рис. 3. Спрощена структурна схема модуля ЦОС [1]

Для реалізації описаного алгоритму роботи модуль ЦОС складається з трьох ідентичних підсилювачів з диференційним входом (ABC's, див. рис. 3), мікроконтролера MCU1, що виконує роль АЦП для трьох вхідних сигналів детекторів частинок, та за необхідності формує тестові сигнали для перевірки коректності роботи детекторів. Також по закінченню циклу роботи АЦП формуються сигнали скидання напруги детекторів. Мікроконтролер MCU2 сортує та підраховує кількість частинок та записує накопичену інформацію в зовнішньому EEPROM. По закінченню обертуті інформація передається в модуль зв'язку для передачі інформації на Землю.

Можна припустити, що на достовірність збору статистики будуть впливати шуми, які призведуть до хибного обліку частинок з енергіями, які потрапляють на границю енергетичних діапазонів у інших діапазонах, що спотворить статистичний розподіл. Другою проблемою є те, що для тестування модуля ЦОС потрібно провести його калібрування радіоактивним ізотопом з відомими характеристиками, який подасть вхідні сигнали для налаштування модуля ЦОС.

Постановка задачі

Реалізація та відпрацювання роботи алгоритму з ідентифікації типів та енергій заряджених частинок має свої складнощі. При реєстрації частинок сигнал, видобутий з детекторної системи є досить слабким, близько сотень мікрвольт. Наслідком є складна система для підсилення та надання форми сигналу, придатної для дискретизації модулем ЦОС. У разі проходження будь-яким трактом реєстратора-аналізатора та наявності різноманітних джерел шумів, співвідношення сигнал/шум суттєво погіршиться. Це призводить до погіршення роботи алгоритму з ідентифікації типів та енергій заряджених частинок. Тож, постає питання довіри та коректності роботи створеного алгоритму ідентифікації типів та енергій заряджених частинок за дискретизації суміші сигнал/шум.

В результаті виникло завдання побудови імітатора спрацювань детекторів заряджених частинок для отримання необхідних сигналів для калібрування модуля ЦОС з метою дослідження впливу співвідношення сигнал/шум на статистичний розподіл при сортуванні за визначеною кількістю енергетичних діапазонів частинок у алгоритмі ідентифікації.

Результати дослідження

Задачею імітатора є генерація сигналів, які відповідають енергіям частинок у п'ятнадцяти енергетичних діапазонах та за напрямками, що відповідають детекторній системі. Є як мінімум два підходи до побудови імітатора. Перший може бути реалізований шляхом імітації сигналів сцинтиляційних детекторів. Такий підхід дає змогу одночасно перевірити роботу детекторного тракту. Але великий динамічний діапазон сигналів та достатньо короткий імпульс ускладнюють реалізацію цифровими методами. Також за такого підходу достатньо важко варіювати співвідношенням сигнал шум, так як таке співвідношення може бути завдано тільки для вхідного сигналу. Другий варіант полягає в повній заміні детекторного тракту імітатором. В такому випадку достатньо легко варіювати співвідношенням сигнал/шум але немає можливості відпрацювання та налагодження детекторів. В результаті ухвалено рішення побудови імітатора за другим варіантом. Таке рішення також зумовлено тим, що потенційно аналогові детектори можуть бути модернізовані, а плата ЦОС залишиться незмінною на апаратному рівні. Вибираючи апаратну реалізацію імітатора, ви-

рішено виконати його на базі мікроконтролера з підтримкою DSP.

В реалізаціях схеми (рис. 4), один ЦАП має бути постійно приєднаний до каналу з товстим детектором D_2 , а перший та третій канали ідентичні, тому між ними й можна виконувати перемикання. Цьому сприятиме прийнятний час перемикання КМОН мікросхеми-перемикача CD4066, що становить десятки наносекунд і не вносить суттєвих затримок поширення сигналу. Масиви відліків для тестування зберігаються в SPI Flash пам'яті [3]. Розроблено макет з використанням МК STM32F407VET6 з апаратною підтримкою цифрової обробки сигналів (рис. 4) [3].

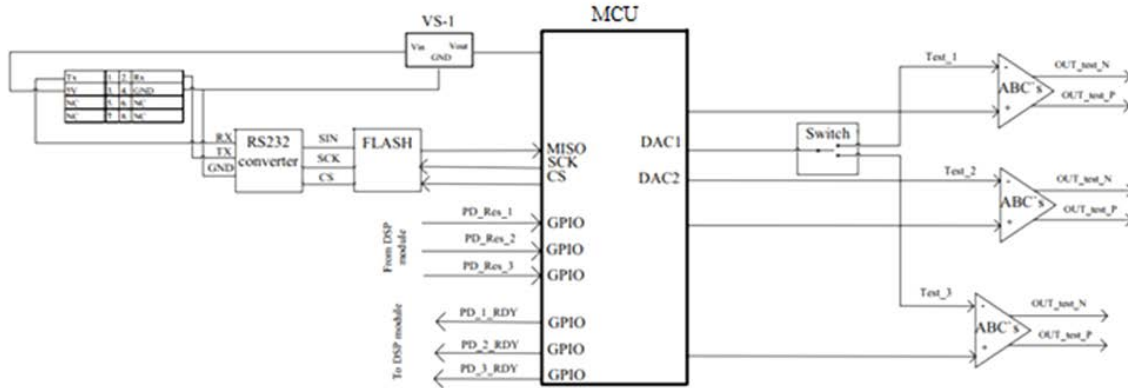


Рис. 4. Спрощена структурна схема розробленого імітатора сигналів заряджених частинок зі схемотехнічним мультиплексуванням виводів МК [2]

Для реалізації алгоритму функціонування проаналізуємо дані про конфігурацію спектрометричних каналів (табл.) [1].

Характеристики спектрометричних каналів

№	Характеристика	Значення D_1, D_3	Значення D_2
1	Напруга живлення, В	± 5	± 5
2	Потужність каналу, мВт	≤ 80	≤ 100
3	Чутливість ЗЧПП, мВ/МеВ	88,5	1,44
4	Ємність детектора, пФ	< 100	< 50
5	Коефіцієнт підсилення формувача	≈ 5	≈ 660
6	Допустимий шум каналу, мВ (кеВ)	≤ 18 (40)	≤ 67 (70)
7	Динамічний діапазон каналу, дБ	> 46	> 40
8	Тривалість імпульсу на рівні 0,1U мкс	≤ 4	≤ 4
9	Тривалість імпульсу на рівні 0,5U мкс	$\approx 1,5$	$\approx 1,5$
10	Максимальний темп підрахунку в каналі, кГц	200	200
11	Час вибірки, мкс	$\leq 2,5$	$\leq 2,5$
12	Розрядність АЦП, біт	12	12
13	Коефіцієнт перетворення, кеВ/біт	$\approx 1,4$	$\approx 0,61$

За чутливістю зарядно-чутливого підсилювача ЗЧПП (табл.) [1] отримаємо вихідну напругу, що відповідає енергії частинки. Тобто значення в МеВ треба помножити на чутливість в мВ, отримаємо значення напруги, придатне для дискретизації модулем ЦОС. Відповідно, значення напруги спрацювання 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), тому для того щоб значення напруги не опинилися на рівні шумів, чутливість каналу D_2 помножимо на коефіцієнт пропорційності, встановивши тим самим, нові межі «лінійних воріт» методу ідентифікації частинок на основі питомих втрат енергії та повної енергії.

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

$$\frac{\text{Розмах сигналу}}{\text{Шум каналу}} = \text{Кількість рівнів аналогового сигналу.} \quad (1)$$

З таблиці беремо значення розмаху сигналу рівним напрузі живлення і значення максимально допустимого шуму каналу.

Для каналів D_1 , D_3 визначимо достатню розрядність АЦП, потрібну для квантування сигналу

$$\frac{5000\text{ мВ}}{18\text{ мВ}} = 277[\text{рівнів}] \approx 8\text{ біт роздільної здатності}. \quad (2)$$

Для каналу D_2

$$\frac{5000\text{ мВ}}{67\text{ мВ}} = 74[\text{рівнів}] \approx 6\text{ біт роздільної здатності}. \quad (3)$$

Це підтверджує достатність наявного 12-бітного АЦП вибраного мікроконтролера для дискретизації сигналів, що надходять.

Програмне забезпечення імітатора дозволяє згенерувати сигнал, що відповідає сорту зарядженої частинки у певному діапазоні енергій, додавати шум детекторної системи до сигналу. Після проходження і дискретизації сигналу модулем ЦОС отриманий статистичний розподіл порівнюється з оригінальною послідовністю кількості заряджених частинок в кожному діапазоні. Таким чином формується вимога допустимого співвідношення сигнал/шум, яке дозволить достовірно відпрацювати алгоритм з ідентифікації частинок.

Завдяки алгоритму оцінки та оптимізації рівня шумів, розробленому в [4], сформовано вимогу до співвідношення С/Ш у 63 дБ, яке має бути у детекторного модуля/імітатора сигналів детекторного модуля, щоб максимальне відхилення від кількості частинок, захоплених коліатором, не перевищила 4% (рис. 5а, б).

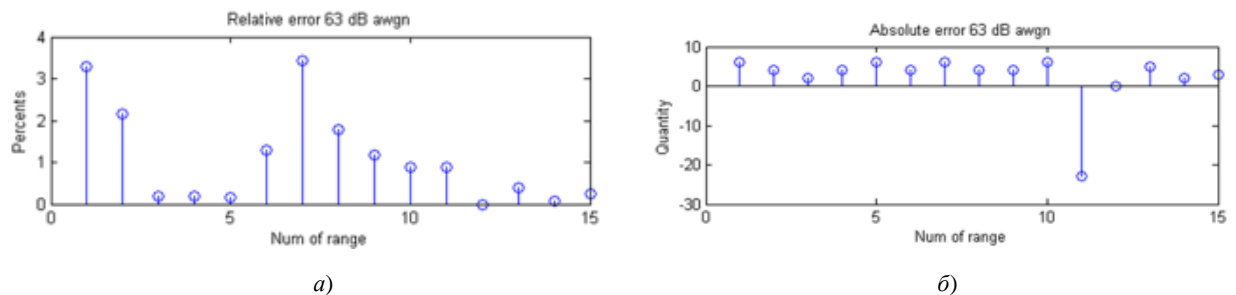


Рис. 5. Прогнозована похибка вимірювань в кожному діапазоні енергій: а — відносна; б — абсолютна зі співвідношенням С/Ш = 63 дБ [4]

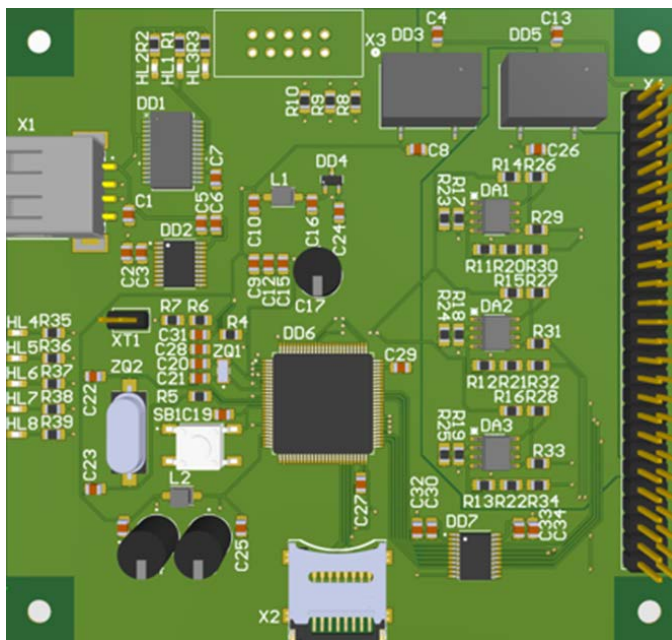


Рис. 6. Модель макета імітатора сигналів зі сцинтиляційних детекторів

сигналів детекторів заряджених частинок для відпрацювання модуля ЦОС, що встановлюватиметься на борту наносупутника для дослідження поясів Ван-Алена. Шляхом критичного аналізу встановлено, що достовірність отриманого статистичного розподілу частинок за енергіями, типами та напрямками найдоцільніше перевіряти шляхом порівняння еталонного розподілу, що заван-

Варто зауважити, що розподіл частинок по діапазонах енергій не є рівномірним через особливості детекторної системи, тому кількісне відхилення у діапазоні № 11 не дало найбільшого відносного відхилення від початкової послідовності.

Оскільки вибрано формат розміщення корисного навантаження у форматі наносупутника, то імітатор сигналів детекторного модуля вирішено виконати конструктивно суміщеним з наносупутником для тестування (рис. 6), щоб в запланованому наносупутнику близько розташовувалися імітований детекторний модуль та модуль ЦОС. Це дозволить у циклі наземних випробувань провести тести з електромагнітної сумісності та завадозахищеності.

Висновки

В результаті виконаного дослідження вдалося розробити концепцію імітатора

тажується в модуль пам'яті імітатора та розподілу, що зчитується з пам'яті модуля ЦОС. Підтверджено гіпотезу, що наявність шумів в тракті детектора впливає на статистичний розподіл частинок по енергіях та типах. Результат статистичного аналізу дозволив сформулювати вимоги до співвідношення сигнал/шум детекторів, зважаючи на допустимі помилки у визначенні енергії та типу частинок. Запропоноване конструктивне виконання імітатора дозволяє провести випробування модуля ЦОС без використання джерела іонізуючого випромінювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] O. Dudnik, and Y. Kurbatov, "The study of high energy particles' microbursts nature in the Earth magnetosphere with nanosatellites: a conception of space experiment," *Space Sci.&Technol.*, issue 2, vol. 24, pp. 36-42, 2018. <https://doi.org/10.15407/knit2018.02.036> (Ukrainian).

[2] O. Dudnik, V. Boiko, R. Antypenko, A. Movchaniuk, and N. Yezerskyi, "Concept of the particle microbursts satellite experiment with the MIRA_ep compact instrument," on *The 2u Cubesat Platform*, Kyiv, Akademperryodyka, pp. 32-39, 2021. ISBN 978-966-360-425-1.

[3] N. Yezerskyi, O. Dudnik, and A. Movchaniuk, "Electronic simulator of signals derived from scintillation detectors in spectrometric identification of high-energy charged particles," in *Radio-technical fields, signals, apparatus, and systems, Abstracts International Conference*. Kyiv, 2021, pp. 75-77. ISSN 2311-4169.

[4] N. Yezerskyi, and A. Movchaniuk, "Optimization of The Analog Module According To Noise Characteristics in the On-Board Detector of the Recorder-Analyzer for The Identification Of Charged Particles," *Information communication and computer technologies*. Issue 1, vol. 5, pp. 93-104, 2023. ISSN 2788-5518, URL: <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2023-01-05-12> .

Рекомендована кафедрою фізики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 27.07. 2023

Єзерський Нікіта Валерійович — аспірант кафедри прикладної радіоелектроніки, e-mail: billytalent7777@gmail.com ;

Мовчанюк Андрій Валерійович — доцент кафедри прикладної радіоелектроніки.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

N. V. Yezerskyi¹
A. V. Movchaniuk¹

Charged Particle Detector Operation Simulator and Digital Processing Module of the Signal of a Small-Dimensional Particle Spectrometer

¹National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Systems of recorders and analyzers of high-energy plasma flows intended for operation in low Earth orbit have clearly defined requirements, but their implementation significantly depends on scientific tasks and the project budget. Instead, the requirements for spectrometric channels in terms of radio physics still need to be interpreted in terms of radio engineering, which requires additional research efforts. It is also often necessary to develop parts of equipment without interaction with other contractors and in the absence of access to control equipment or funds for its comprehensive testing. Therefore, a decision was made to develop an option to replace part of the high-cost equipment with the cheapest possible simulator, which will help save time and money when testing and adjusting the payload. An urgent problem is the scaling of the number of simulated spectrometric channels using one available in stock general purpose microprocessor, because the output signal must be analog, and the number of digital-to-analog converters is usually limited to two. The charged particle detectors simulator is intended for testing the DSP module of the miniature recorder-analyzer which is planned to be launched into Earth orbit and developed within of the same study. It should perform discretization of the data obtained by a detector system consisting of paraterphenyl and a large-area photodiode, prepared for discretization by a previously developed analog signal processing module. The output data to be sent to the ground control panel of the miniature recorder-analyzer are: the number of charged particles in accordance with the range of energy carried by the charged particle during the allocated time period. This period of time was decided to be equal to one rotation of a nanosatellite around the Earth. The study was conducted to study the nature of microbursts of sub-relativistic electrons and protons of magnetosphere origin in the Earth's radiation belts.

Keywords: signal processing, optimization, CubeSAT, simulator, DSP module, plasma flows.

Yezerskyi Nikita V. — Post-Graduate Student the Chair of Applied Radio Electronics, e-mail: billytalent7777@gmail.com ;

Movchaniuk Andriy V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Applied Radio Electronics