УДК 523.2 : 520.6.05 : 520.662

№ держресстрації 0113U000702, 0114U002825, 0115U004087, 0116U002867

Національна академія наук України Радіоастрономічний інститут (РІ НАНУ) 61002, м. Харків, вул. Мистецтв, 4; тел. +38 (057) 315 20 92, факс +38 (057) 315 20 92

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор РІ НАНУ

И Исий Л. М. Литвиненко

2016.12.23

3BIT

ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

КОНЦЕПЦІЯ ПОБУДОВИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВІДПРАЦЮВАННЯ ПРОТОТИПУ КОМПАКТНОГО СУПУТНИКОВОГО ПРИЛАДУ SIDRA З РЕЄСТРАЦІЇ ПОТОКІВ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК ВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ.

Етап 1: Розробка концепції побудови, алгоритмів обробки сигналів, робочої конструкторської документації і принципових електричних схем прототипу компактного супутникового приладу SIDRA.

Етап 2. Експериментальне відпрацювання прототипів модулів аналогової обробки сигналів і вторинного живлення супутникового приладу SIDRA

Етап 3. Розробка і відпрацювання програмного забезпечення прототипу модулю цифрової обробки сигналів супутникового приладу SIDRA

Етап 4. Розробка модулю цифрової обробки сигналів прототипу супутникового приладу SIDRA і спеціалізованого програмного забезпечення для перевірки його дієздатності.

Зав. відділом космічної радіофізики, д-р фіз.-мат. наук

Auce

В.П. Тишковець

Керівник НДР, старший науковий співробітник, д-р. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.

О. Дудник

2016

Рукопис закінчено 23 грудня 2016 р.

ΡΕΦΕΡΑΤ

Звіт про НДР: 137 с., 55 рис., 33 табл., 33 джерела, 2 додатки.

Метою роботи є розробка концепції побудови компактного приладу SIDRA для вимірювань потоків енергійних заряджених частинок в магнітосфері Землі та в міжпланетному просторі; визначення методів реєстрації та типів детекторів елементарних заряджених частинок високих і проміжних енергій, засобів перетворення накопичених в детекторах мікрозарядів в імпульсні аналогові сигнали; експериментальне відпрацювання прототипів модулю аналогової обробки сигналів і блоку вторинного живлення супутникового приладу SIDRA; розробка методик перевірки дієздатності модулів; коригування електричних схем принципових і ескізної конструкторської документації за результатами перевірки електричних параметрів плат; створення тестового проекту для програмованої логічної інтегральної схеми М1АЗРЕ1500 прототипу модулю цифрової обробки інформації приладу SIDRA; доповнення і імплементація на платі ProASIC3 Starter Kit виробника "Microsemi Corp." тестового проекту цифрового модулю функціональними блоками бази даних енергетичних втрат для кожного сорту частинок, блоком контролю роботи систем охолодження детекторів, командними процедурами. Метою розробки є також розробка протоколу узгодження інтерфейсів між приладом ChemiX і детектором частинок фону; технічного завдання на оновлення плати вторинного живлення з додаванням цифрової частини; розробка схеми електричної принципової і топології друкованій платі модулю цифрової обробки даних, загальної схеми міжплатних електричних з'єднань прототипу супутникового приладу SIDRA; розробка спеціалізованого програмного забезпечення для перевірки дієздатності цифрової плати приладу.

Запропонована конфігурація прототипу приладу SIDRA, що побудована за принципом модульної конструкції: детекторний модуль; модуль аналогової обробки сигналів; модуль цифрової обробки сигналів і модуль вторинного живлення. Розроблений ескізний варіант габаритного креслення макету приладу. За допомогою САПР AutoCAD здійснене проектування механічних блоків детекторної головки приладу. Результатом проектування є ескізні креслення блоків детекторного модулю: утримувачів кремнієвих детекторів; утримувачу сцинтиляційного детектору; конічної системи формування куту зору приладу; детекторної голівки. Розроблені функціональна схема каналів аналогової обробки сигналів, схеми принципові електричні попередніх зарядо-чутливих підсилювачів, підсилювачів-формувачів, та пристроїв вибірки і запам'ятовування сформованих аналогових сигналів псевдо Гаусової форми. Розроблені структурна і електрична схема плати вторинного живлення.

За методом Монте-Карло здійснено комп'ютерне моделювання проходження легких ядер крізь детектори телескопічної системи приладу; отримані величини поглинених енергій в матеріалах детекторів для кожного сорту заряджених частинок, що моделювалися. Кут надходження первинних частинок змінювався від 0^0 до 50^0 відносно вісі Z детекторного модулю з кроком по куту надходження у 5^0 . Виконане моделювання проходження електронів з фіксованими первинними енергіями 100, 250 та 500 кеВ та протонів з первинними енергіями 100, 250 та 500 кеВ та протонів з первинними енергіями 1.5, 8 та 15 МеВ крізь телескопічну систему детекторів детекторного модулю.

Розроблена робоча конструкторська документація основних вузлів приладу: утримувачів кремнієвих детекторів, утримувача сцинтиляційного детектору, детекторної головки в цілому, конічного коліматору формування куту зору, корпусу друкованої плати модулю аналогової обробки сигналів, корпусу друкованої плати блоку вторинного живлення.

Згідно розробленої схеми електричної принципової аналогового модулю проведене трасування чотирьох-канальної друкованої плати. Друкована плата аналогового модулю виконана на базі пасивних елементів типорозміру 0603 та на базі мікросхем у корпусах SOIC з метою досягнення мінімального геометричного розміру плати. Розробка дизайну друкованої плати проводилася за допомогою САПР Р-САD 2006. Розроблений РСВ-дизайн друкованої плати вторинного живлення. В процесі розробки дизайну враховані типорозміри, характер та тип монтування обраної елементної бази, також передбачені монтажні отвори для кріплення радіаторів.

У друковані плати аналогової обробки сигналів і вторинного живлення лабораторного прототипу приладу SIDRA напаяні радіо компоненти згідно конструкторській документації. Розроблена методика перевірки дієздатності і основних режимів роботи плати вторинного живлення лабораторного макету приладу SIDRA. Проведене тестування виготовленого блоку вторинного живлення; відпрацьовані команди включення та виключення плати, перемикання навантажень з одного півкомплекту на другий, команди включення та виключення монітору вторинних напруг. Проведений контроль струму споживання та рівнів вихідних напруг.

Розроблена методика перевірки дієздатності функціональних вузлів плати аналогової обробки сигналів до функціонального вузлу цифрування сформованих спектрометричних аналогових сигналів. За допомогою стенду на базі плати вводу/виводу сигналів – ЛА48Д РСІ та розробленої методики проведене тестування всіх вузлів плати аналогової обробки сигналів, а також визначені величини регулювання коефіцієнтів підсилення масштабних підсилювачів, та рівні регулювання порогів спрацювання пікових детекторів.

В якості базового елементу прототипу модулю цифрової обробки сигналів компактного супутникового приладу SIDRA обрана ПЛІС компанії "Microsemi Corporation" Actel

M1A3PE1500. У середі розробника Libero SoC створений і відпрацьований тестовий проект ПЛІС.

Відкоригована робоча конструкторська документація прототипу приладу SIDRA. Зменшення ваги на 262 г досягнуто завдяки перегляду та переробці креслень корпусів друкованих плат, полегшення підставки під детекторну головку, полегшення детекторної головки та заміні кількох DC/DC перетворювачів плати живлення.

Для тестового проекту цифрового модулю приладу розроблений модуль бази даних енергетичних втрат заряджених частинок в матеріалах детекторів. Він складається з трьох функціональних блоків: бази даних (DataBase_of_particles), визначення сорту заряджених частинок (Particle_definer), та блоку APB3 інтерфейсу, завдяки якому встановлюються параметри роботи модулю бази даних. Розроблений і погоджений з головною організацією – Центром космічних досліджень Польської академії наук, "Протокол узгодження електричних інтерфейсів між приладом ChemiX та детектором частинок фону ДЧФ". Узгоджено таблицю програмних зовнішніх команд управління приладом у ході його льотної експлуатації, процедури передавання інформації між приладами.

Розроблений вихідний код процедур відпрацювання зовнішніх команд на мові програмування асемблер для центрального процесору тестового проекту цифрового модулю приладу SIDRA. Оновлений тестовий проект синтезований та імплементований у ПЛІС A3PE1500 у складі плати розробника цифрової апаратури з програмованою логічною інтегральною схемою ProASIC3 Starter Kit. Розроблене технічне завдання на оновлення структурної і електричних схем плати живлення; перелічені зміни до принципової електричної схеми і топології друкованої плати.

Розроблена схема електрична принципова модулю цифрової обробки сигналів прототипу приладу SIDRA; складено перелік електронних компонентів плати цифрової обробки сигналів; оцінена кошторисна вартість електронних компонентів та виготовлення друкованої плати. Розроблена загальна схема міжплатних електричних з'єднань приладу в системі автоматизованого проектування, складений перелік компонентів до загальної схеми. Складено таблиці міжмодульних та зовнішніх з'єднувачів з розшифруванням найменувань і призначень сигналів на контактах. Розроблено програмний додаток для персонального комп'ютеру під управлінням операційної системи Windows, який дозволяє отримувати, дешифрувати та відображати у доступному для аналізу форматі телеметричні дані приладу, а також відправляти командні повідомлення.

СУПУТНИКОВИЙ ПРИЛАД, ЗАРЯДЖЕНІ ЧАСТИНКИ, ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА, СТЕНД, ПЛІС, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, ЕНЕРГЕТИЧНИЙ СПЕКТР, ІНТЕРФЕЙС ЗВ'ЯЗКУ, КРЕМНІЄВИЙ ФОТОЕЛЕКТРОННИЙ ПОМНОЖУВАЧ.

DN /11/	TT
3/1/1	
JIVIIV	

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	9
ВСТУП	10
1. РОЗРОБКА КОНЦЕПЦІЇ ПОБУДОВИ ПРИЛАДУ SIDRA	13
2. МОДЕЛЮВАННЯ ДЕТЕКТОРНОГО МОДУЛЮ МАКЕТУ ПРИЛАДУ SIDE	RA 3A
ДОПОМОГОЮ GEANT4	15
2.1. Розробка конструкції детекторного модулю на мові програмування С++. По	будова
основних класів	15
2.1.1. Збірка аналітичної моделі засобами GEANT4	16
2.2. Вибір типу коліматору для детекторного модулю	17
2.2.1. Порівняння результатів моделювання коліматорів різної геометрії	17
2.2.2. Дослідження кутової чутливості детекторного модулю при використанні	
ступінчатого коліматору	18
2.3. Моделювання проходження заряджених частинок крізь детекторний модуль	19
3. РОЗРОБКА РОБОЧОЇ КОНСТРУКТОРСЬКОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ ОСНОВНИХ В	УЗЛІВ
ПРИЛАДУ	21
3.1. Проектування утримувачів кремнієвих детекторів	21
3.2. Розробка утримувача для сцинтиляційного детектору	23
3.3. Проектування конструкції модуля кремнієвих детекторів	24
3.4. Проектування конічної системи	25
3.5. Складальне креслення детекторного модулю	26
3.6. Розробка конструкції аналогового модулю	26
3.7. Розробка конструкції модуля вторинного живлення	28
3.8. Складальне креслення прототипу приладу SIDRA	29
4. АНАЛОГОВИЙ МОДУЛЬ	29
4.1. Зарядочутливий попередній підсилювач	31
4.2. Підсилювач - формувач	32
4.3. Масштабуючий підсилювач	33
4.4. Відновлювач базової лінії	34
4.5. Пристрій вибірки та запам'ятовування	35
4.6. Комп'ютерне моделювання роботи вузлів аналогового модулю	37
4.7. Структурна схема аналогового модулю	38
4.8. Проектування та виготовлення друкованої плати аналогового модулю	39
5. БЛОК ЖИВЛЕННЯ	39

5.1. Фун	кціональна схема блоку живлення	41
5.1.1.	Структура пів комплектів блоку живлення	41
5.1.2.	Контроль вторинних напруг та перемикання комплектів блоку живлення	43
5.2. Розр	обка та виготовлення друкованої плати	44
5.3. Пере	евірка основних параметрів плати	45
6. ВИГОТ	ОВЛЕННЯ ТА ПЕРЕВІРКА ПЛАТИ АНАЛОГОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ	45
6.1. Вигс	отовлення плати аналогової обробки сигналів та розробка методики перевірки	и її
основних і	тараметрів	45
6.2. Пере	евірка електричних параметрів друкованої плати з вмонтованими ра	діо
компонент	ами	46
6.2.1.	Перевірка струму споживання палати аналогової обробки сигналів	46
6.2.2.	Перевірка діапазону регулювання підсилення масштабуючого підсилювача	47
6.2.3.	Перевірка роботи пікового детектору	48
6.2.4.	Перевірка спектрометричних характеристик	49
7. PO3PO	БКА ТЕСТОВОГО ПРОЕКТУ БЛОКУ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ І	HA
БАЗІ ПЛІС		50
7.1. Розр	обка тестового проекту	51
7.2. Мод	елювання роботи тестового проекту	52
8. ПОЛЕГ	ШЕННЯ КОРПУСІВ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ	55
8.1. Дете	кторна голівка	56
8.2. Збірі	не креслення механічної конструкції приладу SIDRA	57
9. PO3PO	БКА БЛОКУ БАЗИ ДАНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВТРАТ В МАТЕРІАЛ	AX
ДЕТЕКТОРІ	В СПЕЦІАЛЬНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПЛІС АЗРЕ-1500	59
9.1. Блок	: бази даних	59
9.2. Блок	визначення сорту частинок	60
9.2.1.	Блок визначення логіки співпадань	61
9.2.2.	Блок читання кодів АЦП	63
9.3. Блок	: APB3 інтерфейсу	64
10. PO3PO	БКА ПРОТОКОЛУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ МІЖ ПРИЛАДАМ	ΜИ
SIDRA TA C	HEMIX	65
10.1. Осно	овні розділи Протоколу узгодження електричних інтерфейсів	65
10.2. Кома	анди управління Детектором частинок високих енергій	66
10.3. Прог	цедура передавання наукової інформації і командних повідомлень.	67

10.4. Аварійне інформаційне повідомлення для рентгенівського спектрофотометр	oy i
призначення контактів з'єднувачів між приладами.	68
11. РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕДУР ВІДПРАЦЮВАННЯ ЗАВНІШНІХ КОМАНД	68
11.1. Команда оновлення системного часу	71
11.2. Команди встановлення порогів спрацювання пікових детекторів та коефіціє	нтів
підсилення	72
11.3. Процедури зміни режимів детектування	73
11.4. Команда встановлення рівня припустимого радіаційного фону	75
11.5. Команда тестування аналогової та цифрової електроніки	75
12. РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ НА ОНОВЛЕННЯ ПЛАТИ ЖИВЛЕННЯ	77
12.1. Основні розділи технічного завдання на коригування схем плати живлення	77
12.2. Напруження вторинного живлення для приладу SIDRA	77
12.3. Зміни у принциповій електричній схемі плати живлення	78
12.4. Перелік і структура командних повідомлень для підмодулю логіки плати живле	ення
78	
12.5. Структура і порядок передавання інформаційного масиву цифрової частини пл	пати
живлення	79
13. РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ МОДУЛЮ ЦИФРО	BOÏ
13. РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ МОДУЛЮ ЦИФРО ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ПРОТОТИПУ ПРИЛАДУ SIDRA	ВОЇ 80
 13. РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ МОДУЛЮ ЦИФРО ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ПРОТОТИПУ ПРИЛАДУ SIDRA 13.1. Структурна схема цифрового модулю. 	BOÏ 80 80
 13. РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ МОДУЛЮ ЦИФРО ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ПРОТОТИПУ ПРИЛАДУ SIDRA 13.1. Структурна схема цифрового модулю. 13.2. Блок живлення. 	BOÏ 80 80 81
 13. РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ МОДУЛЮ ЦИФРО ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ПРОТОТИПУ ПРИЛАДУ SIDRA 13.1. Структурна схема цифрового модулю. 13.2. Блок живлення. 13.3. Блок електричних з'єднувачів 	BOÏ 80 80 81 82
 13. РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ МОДУЛЮ ЦИФРО ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ПРОТОТИПУ ПРИЛАДУ SIDRA 13.1. Структурна схема цифрового модулю. 13.2. Блок живлення. 13.3. Блок електричних з'єднувачів 13.4. Блок постійного запам'ятовуючого пристрою. 	BOÏ 80 81 82 83
 13. РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ МОДУЛЮ ЦИФРО ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ПРОТОТИПУ ПРИЛАДУ SIDRA 13.1. Структурна схема цифрового модулю. 13.2. Блок живлення. 13.3. Блок електричних з'єднувачів 13.4. Блок постійного запам'ятовуючого пристрою. 13.5. Конфігурація банків введення / виведення ПЛІС ProAsicA3PE1500. 	BOÏ 80 81 82 83 84
 13. РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ МОДУЛЮ ЦИФРО ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ПРОТОТИПУ ПРИЛАДУ SIDRA 13.1. Структурна схема цифрового модулю. 13.2. Блок живлення. 13.3. Блок електричних з'єднувачів 13.4. Блок постійного запам'ятовуючого пристрою. 13.5. Конфігурація банків введення / виведення ПЛІС ProAsicA3PE1500. 13.6. Інтерфейс програмування, схема скидання та блок генерації сигналу синхроніз 	BOÏ 80 81 82 83 84 84
 13. РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ МОДУЛЮ ЦИФРО ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ПРОТОТИПУ ПРИЛАДУ SIDRA 13.1. Структурна схема цифрового модулю. 13.2. Блок живлення. 13.3. Блок електричних з'єднувачів 13.4. Блок постійного запам'ятовуючого пристрою. 13.5. Конфігурація банків введення / виведення ПЛІС ProAsicA3PE1500. 13.6. Інтерфейс програмування, схема скидання та блок генерації сигналу синхроніз ПЛІС. 	BOÏ 80 81 82 83 84 83 84 85
 13. РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ МОДУЛЮ ЦИФРО ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ПРОТОТИПУ ПРИЛАДУ SIDRA 13.1. Структурна схема цифрового модулю. 13.2. Блок живлення. 13.3. Блок електричних з'єднувачів 13.4. Блок постійного запам'ятовуючого пристрою. 13.5. Конфігурація банків введення / виведення ПЛІС ProAsicA3PE1500. 13.6. Інтерфейс програмування, схема скидання та блок генерації сигналу синхроніз ПЛІС. 14. СКЛАДАННЯ ПЕРЕЛІКУ ЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ ПЛАТИЦИФРО 	BOÏ 80 81 82 83 84 84 83 84 85 BOÏ
 13. РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ МОДУЛЮ ЦИФРО ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ПРОТОТИПУ ПРИЛАДУ SIDRA 13.1. Структурна схема цифрового модулю. 13.2. Блок живлення. 13.3. Блок електричних з'єднувачів 13.4. Блок постійного запам'ятовуючого пристрою. 13.5. Конфігурація банків введення / виведення ПЛІС ProAsicA3PE1500. 13.6. Інтерфейс програмування, схема скидання та блок генерації сигналу синхроніз ПЛІС. 14. СКЛАДАННЯ ПЕРЕЛІКУ ЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ ПЛАТИЦИФРО ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ТА ОЦІНКА ВАРТОСТІ РАДІОКОМПОНЕНТІВ 	BOÏ 80 81 82 83 84 83 84 85 BOÏ TA
 13. РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ МОДУЛЮ ЦИФРО ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ПРОТОТИПУ ПРИЛАДУ SIDRA 13.1. Структурна схема цифрового модулю. 13.2. Блок живлення. 13.3. Блок електричних з'єднувачів 13.4. Блок постійного запам'ятовуючого пристрою. 13.5. Конфігурація банків введення / виведення ПЛІС ProAsicA3PE1500. 13.6. Інтерфейс програмування, схема скидання та блок генерації сигналу синхроніз ПЛІС. 14. СКЛАДАННЯ ПЕРЕЛІКУ ЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ ПЛАТИЦИФРО ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ТА ОЦІНКА ВАРТОСТІ РАДІОКОМПОНЕНТІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ПЛАТИ 	BOÏ 80 81 82 83 84 83 84 83 84 85 BOÏ TA 88
 13. РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ МОДУЛЮ ЦИФРО ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ПРОТОТИПУ ПРИЛАДУ SIDRA 13.1. Структурна схема цифрового модулю. 13.2. Блок живлення. 13.3. Блок електричних з'єднувачів 13.4. Блок постійного запам'ятовуючого пристрою. 13.5. Конфігурація банків введення / виведення ПЛІС ProAsicA3PE1500. 13.6. Інтерфейс програмування, схема скидання та блок генерації сигналу синхроніз ПЛІС. 14. СКЛАДАННЯ ПЕРЕЛІКУ ЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ ПЛАТИЦИФРО ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ТА ОЦІНКА ВАРТОСТІ РАДІОКОМПОНЕНТІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ПЛАТИ 14.1. Перелік компонентів прототипу цифрового модулю приладу. 	BOÏ 80 81 82 83 84 83 84 85 BOÏ TA 88 88
 13. РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ МОДУЛЮ ЦИФРО ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ПРОТОТИПУ ПРИЛАДУ SIDRA 13.1. Структурна схема цифрового модулю. 13.2. Блок живлення. 13.3. Блок електричних з'єднувачів 13.4. Блок постійного запам'ятовуючого пристрою. 13.5. Конфігурація банків введення / виведення ПЛІС ProAsicA3PE1500. 13.6. Інтерфейс програмування, схема скидання та блок генерації сигналу синхроніз ПЛІС. 14. СКЛАДАННЯ ПЕРЕЛІКУ ЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ ПЛАТИЦИФРО ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ТА ОЦІНКА ВАРТОСТІ РАДІОКОМПОНЕНТІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ПЛАТИ 14.1. Перелік компонентів прототипу цифрового модулю приладу. 14.2. Оцінка вартості виготовлення електронного модулю цифрового модулю. 	BOÏ 80 81 82 83 84 83 84 83 84 85 BOÏ TA 88 88 90
 13. РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ МОДУЛЮ ЦИФРО ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ПРОТОТИПУ ПРИЛАДУ SIDRA 13.1. Структурна схема цифрового модулю. 13.2. Блок живлення. 13.3. Блок електричних з'єднувачів 13.4. Блок постійного запам'ятовуючого пристрою. 13.5. Конфігурація банків введення / виведення ПЛІС РгоАзісАЗРЕ1500. 13.6. Інтерфейс програмування, схема скидання та блок генерації сигналу синхроніз ПЛІС. 14. СКЛАДАННЯ ПЕРЕЛІКУ ЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ ПЛАТИЦИФРО ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ТА ОЦІНКА ВАРТОСТІ РАДІОКОМПОНЕНТІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ПЛАТИ 14.1. Перелік компонентів прототипу цифрового модулю приладу. 14.2. Оцінка вартості виготовлення електронного модулю цифрового модулю. 15. ТРАСУВАННЯ ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ 	BOÏ 80 81 82 83 84 83 84 83 84 85 BOÏ TA 88 88 90 92
 13. РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ МОДУЛЮ ЦИФРО ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ПРОТОТИПУ ПРИЛАДУ SIDRA 13.1. Структурна схема цифрового модулю. 13.2. Блок живлення. 13.3. Блок електричних з'єднувачів 13.4. Блок постійного запам'ятовуючого пристрою. 13.5. Конфігурація банків введення / виведення ПЛІС ProAsicA3PE1500. 13.6. Інтерфейс програмування, схема скидання та блок генерації сигналу синхроніз ПЛІС. 14. СКЛАДАННЯ ПЕРЕЛІКУ ЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ ПЛАТИЦИФРО ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ТА ОЦІНКА ВАРТОСТІ РАДІОКОМПОНЕНТІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ПЛАТИ 14.1. Перелік компонентів прототипу цифрового модулю приладу. 14.2. Оцінка вартості виготовлення електронного модулю цифрового модулю. 15. ТРАСУВАННЯ ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ 16. РОЗРОБКА ЗАГАЛЬНОЇ СХЕМИ МІЖПЛАТНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ З'ЄДН/ 	BOÏ 80 81 82 83 84 83 84 83 84 85 BOÏ TA 88 88 90 92 AHb

16.1. Загальна схема міжплатних електричних з'єднань. 9) 3
16.2. Найменування ланцюгів і контактів кабельних з'єднувачів.	€4
17. РОЗРОБКА СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛ	Я
ПЕРСОНАЛЬНОГО КОМП'ЮТЕРУ З ДЕШИФРУВАННЯ І ВІЗУАЛІЗАЦ	ΪI,
ТЕЛЕМЕТРИЧНИХ ДАНИХ ТА ВІДПРАВЛЕННЯ КОМАНДНИХ ПОВІДОМЛЕНЬ 10)2
17.1. Розробка графічного інтерфейсу. 10)2
17.2. Програмна реалізація функціоналу спеціалізованого програмного забезпечення . 10)4
17.3. Компіляція спеціалізованого програмного забезпечення та тестування прототиг	ıy
цифрового модулю приладу SIDRA 10)5
ВИСНОВКИ 10)9
ПОСИЛАННЯ 11	14
Додаток 1 11	18
Додаток 2 12	27

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- АЦП аналогового цифровий перетворювач
- АМ аналоговий модуль
- БЖ блок живлення
- БК без коліматору
- ГК гладкий коліматор
- ЗЧПП зарядочутливий попередній підсилювач
- МП масштабний підсилювач
- НДР науково дослідна робота
- ПАОС плата аналогової обробки сигналів
- ПВЗ пристрій вибірки та запам'ятовування
- ПД піковий детектор
- ПЕОМ персональна електронна обчислювальна машина
- ПЛІС програмована логічна інтегральна схема
- ПФ підсилювач-формувач
- САПР система автоматизованого проектування
- СК ступінчатий коліматор
- СПЗ спеціальне програмне забезпечення
- ФЕП фотоелектронний помножувач
- ФС функціональна схема
- ЦМ цифровий модуль
- ЦП центральний процесор
- MPPC Multi Pixel Photon Counter
- PDE Photon detection efficiency

ВСТУП

Дослідження Сонця як зірки і сонячно-земних зв'язків з поверхні Землі і на навколоземних орбітах в недалекому майбутньому будуть доповнені космічними місіями, особливостями яких є вивчення Сонця з близьких відстаней від нього. Крім того, більшість місій будуть спостерігати за найближчою до нас зіркою поза площиною екліптики. Для цього космічні апарати будуть спрямовувати шляхом гравітаційних маневрів біля Венери та Меркурія як в сторону північного полюсу Сонця, так і в сторону південного полюсу. При цьому найвищі геліофізичні широти, що будуть досягати міжпланетні зонди, складатимуть 30-40⁰.

Прикладами подібних проектів є «Solar Orbiter» (Європейське Космічне Агентство), «Solar Probe Plus» (Національне Агентство з аеронавтики, Сполучені Штати Америки), «Solar Polar Orbit Radio Telescope» (Китай), «Solar-C» (Аерокосмічне дослідницьке Агентство Японії JAXA) [1]. Корисне навантаження ще однієї міжпланетної місії – «Інтергеліозонд» [2,3] включатиме в себе апаратуру для дослідження електромагнітних і корпускулярних випромінювань Сонця з великим часовим, просторовим і енергетичним розділенням.

Рентгенівський фотометр ChemiX (Chemical composition in X-rays) корисного навантаження цієї місії призначений для реєстрації мікро- і нано-спалахів, визначення хімічного складу корональної плазми над яскравими точками на диску Сонця, спалаховими і активними областями хромосфери зірки, корональними дірами; для загального дослідження варіацій сонячної активності з високим часовим розділенням в діапазоні енергій м'якого рентгенівського випромінювання, а саме - $\Delta E=0,5\div15$ кеВ [4,5].

Спектрофотометр м'яких рентгенівських променів ChemiX, включає в себе компактний супутниковий спектрометр-телескоп енергійних заряджених частинок високих енергій SIDRA, задачами якого в ході проведення тривалого наукового експерименту є: а) моніторинг радіаційної обстановки на шляху руху космічних апаратів; б) генерування електричних сигналів попередження потенційної небезпеки радіаційного руйнування чутливих напівпровідникових сенсорів фотометру; в) вивчення часової динаміки потоків заряджених частинок, прискорених під час хромосферних спалахів і на фронтах міжпланетних корональних викидів маси [6].

Спектрометр енергійних заряджених частинок у складі польсько-українського приладу ChemiX розроблюється у відповідності до довгострокового Договору про науково-технічне співробітництво між Радіоастрономічним Інститутом НАН України і Центром космічних досліджень Польської Академії наук. В ході поточної розробки автори використовували підходи і технічні рішення, які були застосовані під час попередніх робіт зі створення лабораторного зразку приладу SIDRA [7-11].

Основними елементами спектрометричних систем, що використовуються для обстановки навколишнього моніторингу радіаційної середовища, € детектори випромінювань, системи обробки сигналів, накопичення даних та алгоритми їхнього аналізу. Останнім часом з'явилися нові типи детекторів на основі сцинтиляційних матеріалів, які можуть використовуватись в приладах для вимірювання характеристик іонізуючих випромінювань [12]. Поява нових сцинтиляційних матеріалів і якісне поліпшення вже існуючих дозволили істотно розширити ряд детекторів електронів і ядерних випромінювань високих енергій, які вже використовуються в спектрометрах і можливість використання яких в радіаційних моніторах ще належить дослідити. Вони охоплюють основні технічні характеристики детектора - енергетичне розділення, ефективність реєстрації, можливість і зручність обробки, доступність і вартість [13, 14]. Разом з тим, з появою нових типів фотоприймачів - лавинних фотодіодів великої площі і кремнієвих фотопомножувачів повертається інтерес до використання таких традиційних сцинтиляторів, як стильбен, CsI (Na), CsI(Tl), паратерфеніл (п-терфеніл), пластмасові сцинтилятори на основі полістиролу і полівінілтолуолу.

У складі телескопічної системи детекторів заряджених частинок високих енергій супутникового приладу SIDRA буде використовуватись детектор на основі монокристалу активованого паратерфенілу і кремнієвого фотоелектронного помножувача [15]. Вибір цього типу детекторів обумовлений кількома причинами. Органічні сцинтилятори мають високу швидкодію, лінійний відгук на збудження електронами з енергіями E > 125 кеВ, низьку густину і атомну масу, спектр люмінесценції знаходиться у блакитній області світіння [16]. Кремнієві фотоелектронні помножувачі, що працюють в режимі обмеженого гейгерівського розряду, вирішуватимуть задачі мініатюризації детекторів, зменшення енергоспоживання і тепловиділення вузлів приладу [17-19]. Але вони мають низку особливостей, які треба враховувати під час конкретних умов застосування. Зокрема, напруження перенапруження необхідно встановлювати в залежності від сорту частинок, що мають бути зареєстровані, діапазону енергій, температурного режиму, тощо.

Важливим вузлом лабораторного прототипу супутникового приладу SIDRA є модуль цифрової обробки сигналів, в якому буде відбуватись ідентифікація сорту і енергії частинок, накопичення енергетичних спектрів і статусної інформаціє про дієздатність приладу, формування телеметричних вихідних кадрів, тощо. Звичайно ці задачі вирішуються за допомогою ПЛІС. Так, ПЛІС приладу RPS (Relativistic Proton Spectrometer) навколоземної місії RBSP (Radiation Belt Storm Probe) містить масштабувач детекторів, логіку співпадань, командний і телеметричний інтерфейси з космічним апаратом; створює пакети даних, в яких присутня інформація про амплітуди імпульсів, напруги і струми, температури і радіаційні дози всередині приладу [20]. Подібним способом налаштований цифровий модуль інший прилад цієї ж місії – REPT (Relativistic Electron-Proton Telescope) [21]. Тому створення, відпрацювання і імплементація спеціального програмного забезпечення мають дуже важливе значення під час розробки супутникового спектрометра-телескопа SIDRA.

У приладі СТЕП-Ф космічного апарату "КОРОНАС-Фотон" [22-28] просторова чутливість була досягнута на основі застосування позиційно-чутливих кремнієвих детекторів, кожен з яких потребував свій канал аналогової обробки сигналів. Остання обставина зробила блок детектування приладу великих розмірів, значної ваги і значного енергоспоживання, що позначилось на підвищеній температурі в усередині блоку. З-за цього прилад треба було вимикати під час знаходження супутника на безтіньових орбітах. У новій розробці детекторної головки [29-33] передбачається уникнути всіх недоробок та незручностей, що виникли чи з'явились під час виготовлення СТЕП-Ф.

Метою роботи є розробка концепції побудови компактного супутникового приладу SIDRA, призначеного для досліджень та вимірювань потоків енергійних заряджених частинок в навколоземному космічному просторі; визначення методів реєстрації та типів детекторів елементарних заряджених частинок високих і проміжних енергій, засобів перетворення накопичених в детекторах мікрозарядів в імпульсні аналогові сигнали; експериментальне відпрацювання прототипів модулів; розробка методик перевірки дієздатності модулів; створення тестового проекту для програмованої логічної інтегральної схеми M1A3PE1500 прототипу модулю цифрової обробки інформації приладу SIDRA; доповнення і імплементація на платі ProASIC3 Starter Kit виробника "Microsemi Corp." тестового проекту цифрового модулю функціональними блоками бази даних енергетичних втрат для кожного сорту частинок, блоком контролю роботи систем охолодження детекторів, командними процедурами. Метою розробки є також розробка протоколу узгодження інтерфейсів між приладом ChemiX і детектором частинок фону; технічного завдання на оновлення плати вторинного живлення з додаванням цифрової частини; розробка схеми електричної принципової і топології друкованій платі модулю цифрової обробки даних, загальної схеми міжплатних електричних з'єднань прототипу супутникового приладу SIDRA: розробка спеціалізованого програмного забезпечення для перевірки дієздатності цифрової плати приладу.

1. РОЗРОБКА КОНЦЕПЦІЇ ПОБУДОВИ ПРИЛАДУ SIDRA

Прилад SIDRA призначений для детектування потоків електронів та інших заряджених частинок у космічному просторі та для накопичення даних про сорти та енергії зареєстрованих частинок. Він побудований за принципами модульною конструкції, а саме: кожен функціональний модуль приладу виконаний окремим схемним рішенням та міститься у своєму окремому корпусі. Між кожним з модулів передбачені механічні та електричні інтерфейси для з'єднання їх між собою у єдину конструкцію.

Прилад SIDRA складається з чотирьох модулів:

- 1) детекторний модуль.
- 2) модуль аналогової обробки сигналів (аналоговий модуль).
- 3) модуль цифрової обробки сигналів (цифровий модуль).
- 4) модуль живлення (блок живлення).

Детекторний модуль включає себе телескопічну систему з чотирьох детекторів. Три перші детектори – кремнієві PIN детектори різної товщини (100, 1000 та 1500 мкм) з активною площею 100 мм² кожен. Четвертий детектор побудований із легкого органічного сцинтилятору з малою величиною заряду Z на базі паратерфенілу та кремнієвого фотоелектронного помножувача (ФЕП) в якості фотоприймача. Всі чотири детектори містяться в корпусі детекторного модулю, окрема частина якого – коліматор, формує кут зору приладу.

Сигнали від кремнієвих та сцинтиляційного детекторів детекторного модулю потрапляють до блоку аналогової обробки, де перетворюються у придатний до обробки цифровим модулем вигляд. Аналоговий модуль складається з трьох спектрометричних для кремнієвих детекторів та одного підсилювального для сцинтиляційного детектору електронних каналів, що виконані на одній друкованій платі. Кожен спектрометричний канал складається з зарядочутливого попереднього підсилювача, підсилювача-формувача, масштабного підсилювача та пристрою вибірки та запам'ятовування (ПВЗ). Аналоговий канал сцинтиляційного детектору складається з підсилювача формувача та ПВЗ. Для регулювання чутливості та режимів роботи АМ у кожному каналі передбачені можливості регулювання коефіцієнту підсилення масштабного підсилювача та регулювання порогу спрацювання ПВЗ з боку ЦМ. Друкована плата аналогового модулю розміщується в окремий механічний корпус, в якому передбачені механічні з'єднання з детекторним модулем та модулем цифрової обробки. Виходи детекторів з'єднані зі входами відповідних аналогових каналів за допомогою мініатюрних високочастотних коаксіальних кабелів з хвильовим опором 75 Ом.. На друкованій платі АМ передбачені електричні інтерфейси з'єднання з ЦМ.

Цифровий модуль являє собою окрему друковану плату, що розміщується в окремому корпусі. На корпусі ЦМ передбачені механічні інтерфейси для з'єднання його з АМ та блоком живлення. Задачею ЦМ є обробка сигналів від АМ, накопичення наукової інформації про зареєстровані заряджені частинки, генерування керуючих сигналів для АМ, таких як встановлення коефіцієнтів підсилення та порогів спрацювання ПВЗ, та реалізацію інтерфейсу обміну даними та відпрацювання зовнішніх команд від космічного апарату.

Блок живлення призначений для формування всіх необхідних приладу напруг вторинного живлення від первинних +27 В космічного апарату. БЖ генерує двох полярне живлення ±5 В для AM, одно полярне +5 В для ЦМ та напруги зміщення для кремнієвих детекторів та кремнієвого ФЕП. Друкована плата БЖ складається з двох ідентичних півкомплектів, один з яких підключається для живлення приладу, а другий вимкнений і призначений для «холодного резервування». У випадку виходу з ладу одного з півкомплектів БЖ, можна перемкнутися на другий, таким чином подовжити термін роботи приладу в цілому. Структурна схема приладу SIDRA наведена на рис. 1.1.



Рис. 1.1 Структурна схема приладу SIDRA

2. МОДЕЛЮВАННЯ ДЕТЕКТОРНОГО МОДУЛЮ МАКЕТУ ПРИЛАДУ SIDRA ЗА ДОПОМОГОЮ GEANT4

В якості інструменту моделювання аналітичної моделі детекторного модулю макету приладу SIDRA обраний програмний пакет Geant4-9.6.2, що є інструментом для моделювання проходження елементарних частинок через речовину з використанням ймовірнісних методів Монте-Карло. Програмний продукт Geant розроблено в CERN на об'єктно-орієнтованій мові програмування С++.

Вхідними даними для Geant4 є набір C++ файлів, в яких описується конструкція моделі, характер взаємодії частин моделі між собою, простором та частинками, сорт та енергія заряджених частинок та інші параметри за допомогою типів та бібліотек Geant.

2.1. Розробка конструкції детекторного модулю на мові програмування С++. Побудова основних класів

В процесі виконання НДР розроблені класи на мові програмування С++, необхідні для повноцінного моделювання аналітичної моделі детекторного модулю макету приладу SIDRA за допомогою засобів Geant4-9.6.2. Основні розроблені класи та їх призначення наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Назва класу	Призначення	
B1DetectorConstruction	Опис конструкції детекторного модуля, з урахуванням матеріалів	
	та геометричних розмірів.	
B1EventAction	Опис послідовності дій при виникненні події, ініційованої	
	зарядженою частинкою у матеріалах детекторів аналітичної	
	моделі детекторного модулю.	
B1PrimaryGeneratorAction	Опис характеристик генератору заряджених частинок а саме:	
	тип, енергія та напрямок надходження частинки.	

Перелік основних розроблених класів

Кожен клас представлений у вигляді окремого С++ файлу, що компілюються за допомогою компілятору Unix платформ GCC. При цьому використовуються бібліотеки G4VPhysicalVolume, G4LogicalVolume, G4Material, G4UserLimits програмного пакету Geant4-9.6.2.

2.1.1. Збірка аналітичної моделі засобами GEANT4

Після розробки архітектури та методів реалізації класів, що описують конструкцію детекторного модулю, характер реєструємих подій, порядок збереження необхідної інформації та методи генерації заряджених частинок, ці класи компілюються за допомогою C++ компілятору Unix-платформи GCC з використанням бібліотек та стандартних типів GEANT4. В результаті збірки проекту отримана математична модель детекторного модулю макету приладу SIDRA у середі моделювання Geant 4-9.6.2, яка придатна для моделювання проходження заряджених частинок крізь телескопічну систему детекторів.

Аналітична модель детекторного модулю виконана в трьох конфігураціях, які можна оперативно перемикати при моделюванні без суттєвих змін ресурсних файлів проекту. Перший варіант конфігурації детекторного модулю включає в себе наступні елементи детекторного модулю: три кремнієві детектори у своїх стандартних упаковках та спеціально спроектованих утримувачах, упакований у плівку сцинтилятор та його теплоізоляційний корпус, захисна фольга, корпус детекторного модулю, корпус сцинтиляційного детектору та тепловий міст. До складу цієї конфігурації не включений жоден коліматор – далі конфігурація БК. Друга конфігурація включає конфігурацію БК з додаванням гладкого коліматору – далі конфігурація ГК. І нарешті, третій варіант конфігурації (далі конфігурація СК) включає конфігурацію БК з додаванням до її складу біметалічного ступінчатого коліматору. Загальний вид різних конфігурацій детекторного модулю наведений на рис. 2.1.



Рис. 2.1 Загальний вид різних конфігурацій детекторного модулю БК а), СК б) та ГК в).

З метою вибору найоптимальнішої конфігурації детекторного модулю макету приладу SIDRA був проведений порівняльний аналіз результатів математичного моделювання трьох конфігурації конічної системи.

2.2.1. Порівняння результатів моделювання коліматорів різної геометрії

Для порівняння характеристик трьох конфігурацій детекторного модулю (БК, ГК та СК) виконане моделювання проходження електронів крізь детекторний модуль за допомогою програмного пакету Geant 4-9.6.1. Потік електронів був направлений нормально до поверхні детекторів, діаметр зрізу якого дорівнював 59 мм, що покриває зовнішній габарит детекторного модулю. Енергія електронів змінювалася від E_{min} до E_{max} з кроком $E_{step} = 50$ кеВ. На кожному кроці моделювалося по 10000 частинок на всю площину зрізу потоку електронів, що в перерахунку до площини першого детектору дорівнює 365,8 частинок/детектор. Тобто кількість первинних частинок прямого детектування P_{d} буде 365,8 помножити на кількість кроків по енергії. Дані моделювання наведені у таблиці 2.2.

Як видно з таблиці 2.2 для енергій первинних електронів від 50 кеВ до 500 кеВ найбільш ефективним виявився ступінчатий коліматор, який дав 2,62% хибних реєстрацій відносно конфігурації БК, в той час, як гладкий коліматор дав 18,43% хибних реєстрацій. У випадку з енергіями первинних електронів в діапазоні від 500 кеВ до 2 МеВ також ефективним виявився ступінчатий коліматор, який дав 8,01 % хибних реєстрації у противагу 17,8%, що дав гладкий коліматор, відносно конфігурації БК.

Таблиця 2.2

$E_{min}=0.05 \text{ MeB}, E_{max}=0.5 \text{ MeB}, P_{D}=3658$		$E_{min}=0,5 \text{ MeB}, E_{max}=2 \text{ MeB}, P_{\mathcal{I}}=11340$			
Конфігурація	N^*	K ^{**} , %	Конфігурація	N^*	K**, %
БК	3568	-2,46	БК	16702	+47,3
ГК	4242	+15,97	ГК	18721	+65,1
СК	3664	+0,16	СК	17612	+55,31

Данні моделювання

*Кількість зареєстрованих частинок по чотирьох детекторних шарах

^{**}Коефіцієнт хибної реєстрації К=((N – Р_д)/ Р_д)×100%, знак «+» означає реєстрацію хибних частинок, знак «-» означає втрати первинних частинок.

В результаті проведених досліджень для подальшої розробки детекторного модулю обраний ступінчатий коліматор.

2.2.2. Дослідження кутової чутливості детекторного модулю при використанні ступінчатого коліматору

Проведене комп'ютерне моделювання проходження електронів і протонів різних енергій крізь модель детекторного модулю під різними кутами надходження. Моделювання проводилося у за допомогою програми Geant 4-9.6.1 та з використанням розробленої на попередніх етапах математичної моделі детекторного модулю. В якості коліматорної системи моделювалася конфігурація детекторного модулю, що включає в себе ступінчатий коліматор. При моделювання проходження електронів та протонів крізь детекторний модуль під різними кутами діаметр зрізу потоку первинних частинок дорівнював 80 мм. Кут надходження частинок змінювався від 0^0 до 50^0 відносно вісі Z детекторного модулю з кроком по куту надходження у 5^0 . На кожному куті виконане моделювання проходження електронів з фіксованими первинними енергіями 100, 250 та 500 кеВ та протонів з первинними енергіями 1.5, 8 та 15 МеВ крізь телескопічну систему детекторів детекторного модулю. Кількість частинок кожної фіксованої енергії первинних частинок становила 10^6 на весь діаметр зрізу потоку первинних заряджених частинок у матеріалах кожного з детекторів. В результаті обробки даних моделювання з метою визначення кутової



Рис. 2.2 Залежності кількості зареєстрованих електронів з первинними енергіями 100, 250 та 500 кеВ від куту їх надходження.

чутливості детекторного модулю від частинок різних енергій та сортів, були побудовані залежності коефіцієнту реєстрації частинок від куту їх надходження та визначена фактична кутова чутливість детекторного модулю. На рис. 2.2 та рис. 2.3приведені залежності кількості зареєстрованих електронів та протонів від куту надходження первинних заряджених частинок.

У межах кутів надходження від 0^0 до 35^0 спостерігається 100% реєстрування первинних електронів та





Рис. 2.3 Залежності кількості зареєстрованих протонів з первинними енергіями 1.5, 8 та 15 МеВ від куту їх надходження.

протонів з енергіями до 500 кеВ та 15 МеВ, відповідно.

. Це відповідає повному куту зору у 70⁰. При кутах надходження первинних частинок відносно вісі Z детекторного модулю перевищуючих 35⁰ спостерігається значне падіння кількості зареєстрованих частинок. Так, при куті надходження частинок 45⁰ реєструється менше ніж 50% первинних частинок, а при куті 50⁰ – не більше 10% первинних частинок.

2.3. Моделювання проходження заряджених частинок крізь детекторний модуль

Моделювання проходження заряджених частинок різних сортів та енергій крізь детекторний модуль малогабаритного приладу SIDRA виконано у пакеті програм Geant4-9.6.1.

Таблиця 2	2.3
-----------	-----

-		араметри при моделнов		
Тип частинки	Діапазон первинних	Кількість первинних	Кут надходження	
	частинок, МеВ	частинок	первинних частинок	
Електрон	0.06 10			
Позитрон	0.06 10			
Протон	0.5 20			
Дейтрон	0.5 40			
Гелій-3	5 110			
Гелій-4	5 150	10 ⁶	+42 ⁰ вілносно О 7	
Літій	5 250	10		
Берилій	5 350			
Бор	15 470			
Вуглець	20 580			
Азот	20 720			
Кисень	20 880			

Моделювалася конфігурація детекторного модулю без будь-якого коліматору. Кут надходження первинних частинок змінювався випадково в діапазоні $\pm 42^0$ відносно вісі OZ детекторного модулю. Проведене моделювання для електронів, позитронів, протонів, дейтронів, ядер гелію, літію, бору, берилію, вуглецю, азоту та ядер кисню. Первинні енергії для кожного сорту та кількість додаткові параметри, що враховувалися при моделювання приведені у таблиці № 2.3. В результаті моделювання та обробки даних проходження заряджених частинок під випадковим кутом надходження відносно вісі OZ детекторного модулю крізь матеріал детекторів були отримані значення енергетичних втрат первинних частинок у всіх детекторних шарах. Отримані залежності енергетичних втрат від енергії частинки у кожному з детекторних шарів детекторного модулю. Деякі з цих залежностей наведені на рис. 2.4 - 2.5.



Рис. 2.4 Залежність енергетичних втрат електронів детекторах від первинної енергії



Рис. 2.5 Залежність енергетичних втрат протонів і дейтронів в детекторах від первинної енергії.

3. РОЗРОБКА РОБОЧОЇ КОНСТРУКТОРСЬКОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ ОСНОВНИХ ВУЗЛІВ ПРИЛАДУ

Здійснене проектування механічних блоків детекторного модулю. Результатом проектування є креслення блоків детекторного модулю.

3.1. Проектування утримувачів кремнієвих детекторів

Розроблені індивідуальні механічні конструкції утримання детекторів у тілі детекторного модулю – утримувачі детекторів. Конструкційне рішення утримувача першого детекторного шару зображений на рис. 3.1.



Рис. 3.1 Креслення утримувача для першого детекторного шару Д1:1 – корпус утримувача; 2- кремнієвий детектор Д1; 3 – кришка

Як видно з рис. 3.1, утримувач детекторного шару Д1 складається з двох складових частин – корпусу та кришки. Детектор Д1 (2) встановлюється у спеціальне заглиблення у корпусі утримувача (1) та надійно фіксується кришкою (3) за допомогою чотирьох гвинтиків. У корпусі утримувача та в кришці Д1 передбачені квадратні отвори навпроти активної площі детектору, які не створюють перешкоди проходженню заряджених частинок крізь конструкцію утримувача. Також для виводу сигнальних виходів першого кремнієвого детектору у корпусі утримувача передбачені круглі отвори. Утримувач першого детекторного шару Д1 надійно фіксується у тілі детекторного модулю за допомогою двох отворів під гвинти М2. Для максимального зменшення ваги детекторного модулю всі елементи виконані з матеріалу – сплав ФЦ-ХХ, який є доволі легким матеріалом та володіє достатнім запасом міцності. Метод виготовлення – фрезування складових деталей

утримувача з цільних заготовок. На кінцевій стадії планується покриття конструкції утримувача нікелем шляхом напилення.

Керуючись тими самими вимогами до виконання, матеріалів та методами виготовлення, був спроектований утримувач для наступної групи детекторів – другого Д2 та третього Д3 кремнієвих детекторів. Креслення утримувача другої детекторної групи наведене на рис. 3.2.



Рис. 3.2 Креслення утримувача для другого Д2 та третього Д3 кремнієвих детекторів (а) та складальне креслення утримувача (б)

Як видно з рис. 3.1 та рис. 3.2а настановні розміри утримувачів збережені однаковими. На рис. 3.26 зображене складальне креслення утримувача для другої групи детекторів, з якого видно, що в корпус утримувача встановлені два кремнієвих детектори. Фіксування детекторів Д2 (3) і Д3 (4) у корпусі утримувача (2) здійснюється за допомогою кришки (1). Кришка 1 фіксується до корпусу утримувача чотирма мініатюрними гвинтиками. У кришці та корпусі утримувача передбачені отвори, що повторюють форму активної площі детекторів, які не становлять перешкоди для прольоту заряджених частинок, та отвори для виведення сигнальних виходів детекторів. Сам утримувач товстих кремнієвих детекторів надійно закріплюється всередині детекторого модулю за допомогою двох гвинтів, для яких в корпусі утримувача передбачені два отвори. Для надійного теплового контакту корпусів утримувачів кремнієвих детекторів розроблена конструкція теплового мосту. Складальне креслення кремнієвих детекторів у корпусах утримувачів та теплового мосту зображене на рис. 3.3.



Рис. 3.3 Складальне креслення кремнієвих детекторів у корпусах утримувачів та тепловим мостом.

3.2. Розробка утримувача для сцинтиляційного детектору

Утримувач сцинтиляційного детектору (рис. 3.4) являє собою окремий модуль детекторного модулю, в товщині якого розміщується сцинтилятор з фотоприймачем. Матеріал для виготовлення утримувача сцинтиляційного детектору – сплав Ñ_. Метод виготовлення – фрезування з цільної заготовки. Складальне креслення утримувача сцинтиляційного детектору зображене на рис. 3.5.

На рис. 3.5 зображене складальне креслення утримувача сцинтиляційного детектору. Як видно з рис. 3.5 сцинтилятор 2 з фотоприймачем 4 розміщується у теплоізоляційному корпусі 5 спеціальному заглибленні корпусу утримувача 1. Сцинтилятор з фотоприймачем надійно фіксується за допомогою прижимного кільця 3, яке у свою чергу закріплюється гвинтами до корпусу утримувача. Між фотоприймачем та корпусом утримувача розміщується термоелектричний модуль 6. У корпусі утримувача передбачені отвори для з'єднання утримувача з детекторним модулем та отвори для з'єднання детекторного модулю з корпусом приладу.



Рис. 3.4 Креслення утримувача сцинтиляційного детектору



Рис. 3.5 Складальне креслення утримувача сцинтиляційного детектору.

3.3. Проектування конструкції модуля кремнієвих детекторів

На рис. 3.6 зображене креслення корпусу модуля кремнієвих детекторів, в об'єм якого поміщуються утримувачі кремнієвих детекторів та до якого кріпиться утримувач сцинтиляційного детектору. Корпус являє собою циліндр з крізним отвором, на стінках якого передбачені кріплення утримувачів кремнієвих детекторів та утримувача сцинтиляційного детектору.



Рис. 3.6 Креслення корпусу модуля кремнієвих детекторів

3.4. Проектування конічної системи

Для детекторного модулю була розроблена конічна система формування куту зору. Креслення конічної системи формування куту зору приладу зображене на рис. 3.7. Як видно з рис. 3.7, система формування куту зору приладу являє собою циліндр з конічним отвором, який і формує кут зору 63^{0} . Система формування куту зору надійно кріпиться до детекторного модулю за допомогою різьбового з'єднання. Матеріал, з якого планується виготовлення деталі – \tilde{N} .



Рис. 3.7 Конічна система формування куту зору



Рис. 3.8 Складальне креслення детекторного модулю

На рис. 3.8 зображене складальне креслення детекторного модулю.

1-Захисна кришка;

2-Конічна система формування куту зору;

3-Корпус модуля кремнієвих детекторів;

4-Утримувач сцинтиляційного детектору;

5-Утримувач першого кремнієвого детектору Д1;

6- Утримувач другого Д2 та третього Д3

кремнієвих детекторів;

7- Сцинтиляційний детектор з фотоприймачем.

3.6. Розробка конструкції аналогового модулю

Конструктивно аналоговий модуль уявляє собою фрезований корпус, всередині якого розміщена друкована плата аналогової обробки сигналів. Друкована плата виконана з двостороннім монтажем і двостороннім розташуванням елементів на базі пасивних компонентів типорозміром 0603 та на базі мікросхем у корпусах SOIC.

Розроблене креслення корпусу модуля аналогової обробки сигналів (рис. 3.9). Габаритний розмір корпусу визначається розміром друкованої плати та вільним місцем для розміщення кабелів у вигляді джгута, за допомогою яких виконуються електричні з'єднання між окремими модулями. Всередині корпусу передбачені чотири виступи з різьбовими отворами для кріплення друкованої плати за допомогою гвинтів. В зв'язку з тим, що детекторний модуль механічно кріпиться зверху до корпуса аналогового модуля, на верхній стінці передбачені чотири отвори під кріплення гвинтами, а також три монтажні отвори для здійснення електричних з,єднань за допомогою дротів між детекторним модулем та друкованою платою аналогової обробки сигналів. На бокових стінках корпусу розташовані отвори для з'єднання окремих модулів між собою за допомогою гвинтів та посадкові місця під розташування зовнішніх роз'ємів.



Рис. 3.9 Корпус модуля аналогової обробки сигналів.

Складальне креслення модуля аналогової обробки сигналів зображено на рис. 3.10. На цьому рисунку показано фрезований корпус (поз.1), всередині якого розміщена друкована плата аналогової обробки сигналів (поз.2). На боковій стінці розташовані вісім роз'ємів для зовнішніх підключень при тестуванні та налагоджуванні модуля аналогової обробки сигналів і приладу в цілому.



Рис. 3.10 Складальне креслення модуля аналогової обробки сигналів

3.7. Розробка конструкції модуля вторинного живлення

Конструктивно модуль вторинного живлення являє собою корпус, всередині якого розміщена друкована плата живлення (рис. 3.11). Корпус складається з трьох фрезованих деталей: безпосередньо з корпусу (поз.1), до якого з боків за допомогою гвинтів кріпляться дві панелі (поз.5, поз.6). Фрезовані корпус та панелі виготовляються з матеріалу – Ñ_. Габаритний розмір корпусу визначається розміром друкованої плати.



Рис. 3.11 Ескізне креслення корпусу модуля вторинного живлення

Всередині корпусу передбачені чотири виступи з різьбовими отворами для кріплення друкованої плати за допомогою гвинтів. Для зменшення ваги на стінках та дні корпусу, а також на панелях виконані фрезовані заглиблення з урахуванням збереження механічної міцності. На стінках корпусу розташовані різьбові втулки для з,єднання окремих модулів між собою за допомогою гвинтів. Встановлення таких же різьбових втулок передбачено і на двох панелях. На панелях також виконані посадкові місця під встановлення роз'ємів типу D-./////. Для підтримування теплового режиму передбачено розміщення двох радіаторів для відводу тепла від конверторів. Радіатори кріпляться до корпусу за допомогою гвинтів. Для цього на стінках корпусу зроблені шість отворів – два для кріплення радіатора 1 (поз.3), чотири для кріплення радіатора 2 (поз.4). На панелях виконані посадкові місця з'єднань.

3.8. Складальне креслення прототипу приладу SIDRA

Концепція побудови механічної частини приладу включає в себе корпус з 3-х фрезерованих складових частин, які механічно кріпляться між собою за допомогою гвинтів. Усередині складових частин корпусу, відповідно, розташовані плати аналогової та цифрової обробки сигналів, а також плата вторинного живлення. Конструкція приладу передбачає вільний простір для розміщення стрічкових кабелів і кабелів у вигляді джгутів, що дозволяють виконати електричні з'єднання між окремими модулями. Із зовнішнього сторони верхньої частини корпусу механічно кріпиться детекторний модуль, що включає в себе сенсорну частину, яка складається з напівпровідникових і сцинтиляційного детекторів. Розроблене складальне креслення супутникового приладу SIDRA. На кресленні (рис. 3.12) зображений прилад в трьох проекціях, вказані габаритні і настановні розміри приладу.



Рис. 3.12 Складальне креслення супутникового приладу SIDRA

4. АНАЛОГОВИЙ МОДУЛЬ

Розроблені схеми електричні принципові всіх функціональних одиниць аналогового модулю компактного супутникового приладу SIDRA. Окремою функціональною одиницею аналогового модулю є спектрометричний канал для кожного детекторного шару.

Основні задачі, що виконує аналоговий модуль:

- 1. Перетворення сигналів з детекторних шарів у напругу.
- 2. Формування спектрометричних імпульсів з сигналів детекторів.
- 3. Пікове детектування.
- 4. Перетворення аналогового значення енергетичних втрат первинних частинок у матеріалах детекторів у цифровий код.
- 5. Формування цифрових статусних сигналів.
- Реалізація інтерфейсу передачі інформації до блоку цифрової обробки даних у режимі реального часу.
- 7. Реалізація інтерфейсів керування та встановлення робочих режимів аналогового модулю блоком цифрової обробки.

Аналоговий модуль (AM) є окремою складовою супутникового приладу SIDRA і складається з чотирьох незалежних каналів обробки сигналів з детекторів, розташованих у детекторному модулі. Функціональними одиницями AM є спектрометричні канали обробки сигналів з кремнієвих детекторів із них:

- три канали аналогового модулю призначені для обробки сигналів з кремнієвих детекторів різної товщини 100 мкм (Д1), 1000 мкм (Д2) та 1500 мкм (Д3);
- один канал Д4, призначений для обробки сигналів з багатопіксельного лічильника фотонів, наклеєного на сцинтиляційний детектор на базі паратерфенілу.

Спектрометричні канали обробки сигналів з детекторів Д1, Д2 та Д3 функціонально не відрізняються один від одного і складаються з таких блоків:

- Зарядочутливий попередній підсилювач (ЗЧПП) призначений для перетворення поглиненої енергії в кремнієвому детекторі у сходинку напруги, пропорційну величині поглиненої енергії;
- Підсилювач-формувач (ПФ) призначений для формування спектрометричного імпульсу з вихідного сигналу ЗЧПП;
- Масштабний підсилювач (МП) призначений для зміни коефіцієнту підсилення спектрометричного імпульсу, тим самим забезпечує переключення режимів детектування заряджених частинок;
- Пристрій вибірки та запам'ятовування (ПВЗ) перетворює сформований на підсилений імпульс у цифровий код, придатний до обробки цифровим модулем, а також приймає участь у логіці визначення сорту частинки.

На відміну від каналів Д1, Д2 та Д3 канал Д4, не є спектрометричною одиницею AM, а призначений для реєстрації частинок високих енергій та вторинних гама-квантів низьких енергій. Канал Д4 оброблює сигнали з лічильника фотонів та функціонально значно

простіший за спектрометричні канали Д1, Д2 та Д3 – замість ЗЧПП схема включення



Рис. 4.1 Функціональна схема аналогового модулю компактного супутникового приладу SIDRA.

лічильника фотонів, що являє собою дільник напруги, ПФ, відсутній МП, а замість ПВЗ – дискримінатор за рівнем (ДР).

Функціональна схема аналогового модулю приведена на рис. 4.1.

Аналоговий модуль виконаний на базі пасивних елементів типорозміром 0603 та на базі мікросхем у корпусах SOIC, що дозволило максимально мінімізувати геометричний розмір друкованої плати, яка є кінцевим продуктом розробки.

4.1. Зарядочутливий попередній підсилювач

Функцією ЗЧПП є перетворення заряду, що виникає у кремнієвому детекторі при проходженні крізь нього зарядженої частинки, у сходинку напруги пропорційну величині заряду.

ЗЧПП складається з польового транзистору, на який через роздільний конденсатор подається сигнал з кремнієвого детектору, та диференціального підсилювача на основі широкосмугового операційного підсилювача, охоплених загальним зворотнім зв'язком. Параметри елементів у зворотному зв'язку, а саме: з'єднані паралельно резистор та формуючий конденсатор, визначають чутливість ЗЧПП до заряду, і як наслідок до поглиненої кремнієвим детектором енергії, та час спаду сходинки напруги. Чутливість ЗЧПП до заряду визначає яке значення напруги буде на виході ЗЧПП при поглиненні детектором одиниці заряду. Резистор у схемі зворотному зв'язку необхідний для розряду формуючої ємності для запобігання насичення ЗЧПП.

Виходячи з розрахунку поглинених енергій у матеріалах детекторів, був проведений розрахунок величин формуючої ємності С_ф для кожного ЗЧПП спектрометричних каналів аналогової обробки сигналів з детекторів Д1, Д2 і Д3. При проведенні розрахунку чутливості кожного ЗЧПП до енергії було враховано, що максимальна можлива енергія, що може поглинути кожен детектор, відповідає ядрам кисню, а амплітуда на виході ЗЧПП при цьому повинна дорівнювати 3 В. Результат розрахунку наведений у таблиці 4.1.

гаолици т.г	Γ	аблиця	4.1
-------------	---	--------	-----

N⁰	Детекторний шар	Товщина	∆Emax, що	C_{ϕ} , пФ
П.П.		детекторного шару,	відповідає ядру	
		МКМ	кисню, МеВ	
1.	Д1	100	108	1,5
2.	Д2	1000	420	6,2
3.	Д3	1600	542	8

Розрахункові значення величини формуючої ємності Сф

4.2. Підсилювач - формувач

Функцією ПФ є перетворення сходинки напруги з виходу ЗЧПП у спектрометричний імпульс квазігаусової форми. Коефіцієнт передачі ПФ дорівнює 1. ПФ являє собою активний смуговий фільтр 3-го порядку. Сигнал з виходу ЗЧПП потрапляє на ланцюг пасивного диференціатора, тим самим відсікаючи з сигналу низькочастотну складову шуму. Смуга зрізу $f_{3p} = 20$ кГц. Далі сигнал проходить двократне активне та однократне пасивне інтегрування з частотою зрізу $f_{3p} = 1$ МГц. Активні інтегратори побудовані на базі широкосмугових мало шумливих операційних підсилювачів, пасивний інтегратор – RC-ланцюга. Часові параметри вихідного сигналу можна описати наступними виразами:

$$\tau_0 = \tau \times \sqrt{2 \times N - 1} \tag{4.1}$$

$$\Pi \blacksquare \Pi B = 2,2 \times \tau_0 \tag{4.2}$$

$$\Pi \amalg = 5.6 \times \tau_0 \tag{4.3}$$

де τ – час формування ПФ;

 τ_0 – проміжний коефіцієнт;

N – кількість порядків фільтру;

ПШПВ – повна ширина на половині висоти імпульсу;

ПШ – повна ширина імпульсу.

Для спроектованого ПФ характеристики вихідного імпульсу представлені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

№ п.п.	Найменування характеристики	Значення характеристики
1.	Час формування $ au$, мкс	0,2
2.	Кількість порядків фільтру, N	3

Характеристики вихідного імпульсу ПФ

3.	$ au_0$, мкс	0,45
4.	ПШПВ, мкс	0,98
5.	ПШ, мкс	2,52

Форма вихідного імпульсу розробленого ПФ наведена на рис. 4.2.



Рис. 4.2 Форма вихідного імпульсу ПФ

4.3. Масштабуючий підсилювач

Виходячи с того, що детекторний модуль охоплює дуже широкий діапазон енергій, від десятків кеВ до сотен MeB, заряджених частинок, виникає необхідність змінювати коефіцієнт підсилення сформованого сигналу для максимально точної оцінки енергій, затриманих у детекторних шарах.

МП виконаний на базі операційного підсилювача, включеного за схемою не інверсного підсилювача, у зворотному зв'язку якого підключений цифровий потенціометр типу ADXXX, який забезпечує 256 значень опору від 60 Ом до 20 кОм та напряму задає коефіцієнт підсилення МП. Керування цифровим потенціометром здійснюється з боку цифрового модулю за допомогою SPI- інтерфейсу.

Значення коефіцієнту підсилення К_П МП визначається за формулою 4.5.

$$K_{\Pi} = 1 + R_{\Pi}/R_{BX} \tag{4.4}$$

де *R*_{ЦП} – значення опору цифрового потенціометру;

 $R_{\rm BX}$ – значення опору вхідного резистору.

Величина $R_{\text{ЦП}}$ складає 20 кОм (обумовлена вибором типу цифрового резистору), а ве личина $R_{\text{вх}}$ для кожного спектрометричного каналу обирається в залежності від необхідного максимального коефіцієнту підсилення, виходячи з формули 4.5.

Діапазон значень коефіцієнту підсилення розраховується зі значень мінімальної і максимальної зареєстрованої енергії у детекторних шарах Д1, Д2 та Д3. Значення максимальної енергії наведені у таблиці 3.1, а мінімальна енергія 50 кеВ повинна відповідати 50 мВ на виході МП. На основі цих даних проведений розрахунок значень коефіцієнту підсилення для МП детекторних шарів Д1, Д2 та Д3, результат наведений у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

№ п.п.	Детекторний	${ m K_{\Pi}}_{ m max}^{ m min}$	Е на рівні 50 мВ,	Е на рівні 3 В, МеВ
	шар		MeB	
1.	Д1	1 36	0,05 1,8	3 108
2.	Д2	1 140	0,05 7	3 420
3.	Д3	1 181	0,05 9,03	3 542

Значення К_П МП

4.4. Відновлювач базової лінії

При високих темпах рахунку виникає необхідність відновлювати рівень базової лінії для запобігання заниженого представлення амплітуди сигналу на виході системи ЗЧПУ-ПФ-МП. Необхідність відновлення базової лінії обумовлюється несиметричністю вихідного сигналу відносно нульового потенціалу, при цьому система намагається відновити симетричність шляхом зміщення рівня базової лінії нижче нульового потенціалу. Для запобігання цього ефекту розроблена схема відновлювача базової лінії ВБЛ, який компенсує зміщення базової лінії при великих темпах рахунку.

ВБЛ складається з швидкодіючого компаратору, виконаного на основі мало шумливого операційного підсилювача, який порівнює усереднений сигнал на виході МП з нульовим потенціалом. На виході компаратору формується імпульсний сигнал від позитивного рівня напруги живлення до негативного. Тривалість імпульсів залежить від того, як довго рівень базовою лінії зміщався від нульового потенціалу. Далі послідовність імпульсів потрапляє на пасивний інтегратор, оснований на RC-ланцюзі, де послідовність імпульсів перетворюється у постійну напругу, еквівалентну зміщенню від базової лінії. Далі напруга зсуву потрапляє на вхід ПФ і компенсує зсув від нульового потенціалу.

ВБЛ ефективно працює при темпах рахунку до 250 кГц при перевищенні цього значення базова лінія буде зміщатися до негативного полюсу живлення.

4.5. Пристрій вибірки та запам'ятовування

ПВЗ - це складова спектрометричних каналів Д1, Д2 та Д3, що призначена для детектування корисної події та перетворення сформованого та підсиленого сигналу у цифровий сигнал з метою передачі даних по кожному каналу до цифрового модулю.

ПВЗ складається з активного пікового детектору ПД на базі двох операційних підсилювачів, двох швидкодіючих компараторів К1 та К2 типу ADXXXX, двох модулів формування статусних сигналів ФСС1та ФСС2 на базі логічних одно вібраторів, схеми утримання і скидання СУС на базі двох без корпусних біполярних транзисторів та модулю перетворення значення амплітуди у цифровий код АЦП на базі аналогово-цифрового перетворювача фірми "Analog Devices". Схема функціональна ПВЗ наведена на рис. 4.3, діаграми роботи наведені на рис. 4.4.

Опис роботи ПВЗ.

Сигнал з виходу МП (граф 1 на рис. 4.4) потрапляє на вхід ПВЗ, при цьому сигнал з виходу МП одночасно потрапляє на входи двох компараторів К1 і К2 та до входу активного пікового детектору ПД. У момент Т1 (рис. 4.4) корисний спектрометричний імпульс (суцільна лінія рис. 4.4-1)) перевищує рівень спрацювання К1 (пунктирна лінія рис. 4.4-1)). В цей момент К1 ініціює спрацювання ФСС1 та видачу статусного сигналу PD_OUT_DN (сигнал наявності корисної події рис. 4.4-2)), а також за допомогою схеми утримання та скидання СУС переводить піковий детектор у режим утримання максимальної амплітуди сигналу (проміжок часу від Т1 до Т3 – рис. 4.4-4)).

Компаратор К2 необхідний для детектування максимуму спектрометричного імпульсу та видачі відповідного статусного сигналу. Він слідкує за відмінністю сигналів з виходу



Рис. 4.3 Функціональна схема ПВЗ

масштабного підсилювача (пунктирна лінія рис. 4.4-4)) та виходом ПД (суцільна лінія рис. 4.4.-4)), і якщо ПД знаходиться у режимі утримання, то В момент Т2 (рис 4.4-4)) сигнали відрізнятися. будуть Шe призведе до формування статусного сигналу PD HP DN (сигнал детектування максимуму рис. 4.4-3)) за ФСС2. Сигнал допомогою

PD_HP_DN призначений для переводу АЦП у стан перетворення амплітуди у цифровий код та запуску затримки перед читанням кодів АЦП з боку цифрового модулю.

У момент Т3 перетворення АЦП вже завершено і з цифрового модулю подається сигнал читання значення амплітуди спектрометричного імпульсу(рис. 4.4-5) – сигнал читання АЦП, 6) – шина даних АЦП) та одночасно з ним приходить сигнал скидання ПВЗ (рис. 4.4-7)). ПВЗ четвертого детекторного шару Д4 складається лише з двох функціональних блоків, а саме: К1 та ФСС1, які фактично являють собою дискримінатор за рівнем, з відповідними сигналами - PD_OUT_D4 для визначення корисної події та PD_Reset для скидання ПВЗ.

Основні характеристики ПВЗ Д1, Д2 та Д3 наведені у таблиці 4.4.



Рис. 4.4 Діаграми роботи ПВЗ

Таблиця 4.4

Основні характеристики ПВЗ Д1, Д2 та Д3

Nº.	Найменування характеристики	Значення	Примітка
1	Діапазон вхідних амплітуд, В	0,0253,6	
2	Форма вхідних сигналів	Будь-яка	
3	Динамічний діапазон, дБ	43	
4	Темп рахунку, кГц	До 1000	При мінімальному часі
			утримання
5	Час утримання вершини, мкс	0,12,5	Максимальне значення
	j -pp,		встановлюється при
			налагодженні
-----	---	-----	---
6	Саморозряд, мВ/мкс	4,7	
7	Коефіцієнт підсилення	1	
Ста	гусні сигнали, що видає ПВЗ		
8	Сигнал присутності корисної події (логічний) PD_OUT_DN	0/1	Передбачений самостійне скидання при відсутності зовнішнього скидання
9	Сигнал фіксування максимуму сигналу (логічний) PD_HP_DN	0/1	Передбачений самостійне скидання при відсутності зовнішнього скидання

4.6. Комп'ютерне моделювання роботи вузлів аналогового модулю

Розробка схеми електричної принципової аналогового модулю виконана у пакеті САПР Multisim 11.0.2 від National Instruments.

В пакеті програм Multisim 11.0.2 проведене комп'ютерне моделювання роботи всіх функціональних вузлів спектрометричних каналів аналогового модулю та каналів в цілому. При моделюванні схеми враховувалися такі фактори:

- Час формування підсилювача-формувача дорівнював 0,2 мкс;
- Чутливість ЗЧПП кожного детекторного шару до заряду;
- Необхідний коефіцієнт підсилення для кожного сорту частинки, що моделювалась;
- Моделювання проводилося без втручання цифрового модулю у керування ПВЗ.

При проведенні моделювання були перевірені наступні розраховані величини:

- Можливість регулювання коефіцієнта підсилення МП в необхідних межах підтверджена;
- Максимальний темп рахунку без заниження амплітуди вихідного сигналу МП склав 200 кГц завдяки схемі відновлення базової лінії;
- Стабільність видачі статусних сигналів з боку ПВЗ підтверджена, а також підтверджена можливість автономного скидання ПВЗ і збереження правильної роботи при збоях цифрового модулю.

В процесі комп'ютерного моделювання в якості джерела сигналів від детекторів використовувався генератор сигналів Function Generator з набору інструментів програми, що імітував сигнал від зарядженої частинки, яка потрапила до детектору. Для відображення роботи функціональних вузлів спектрометричних каналів використовувався інструмент 4 Channel Oscilloscope-XSC1.

На рис. 4.5 зображений результат комп'ютерного моделювання у Multisim 11.0.2 роботи одного зі спектрометричних каналів кремнієвих детекторів. На верхньому графіку рис. 4.5 зображена форма вихідного імпульсу масштабного підсилювача, нижче зображена форма сигналу з виходу пікового детектору у режимі утримання, далі два статусних цифрових сигнали – сигнал наявності корисної події та сигнал детектування максимуму (з веху вниз відповідно). Як вже оговорювалося, моделювання проводилося без втручання цифрового модулю у керування ПВЗ, скидання ПВЗ і його статусних сигналів проходить автономно і тому не одночасно, як приведено на епюрі рис.4.4 момент ТЗ.



В результаті комп'ютерного кожного моделювання детекторного каналу у пакеті програм Multisim 11.0.2 отримані конкретні значення коефіцієнтів підсилення масштабних підсилювачів для правильного детектування сорту частинок, визначені параметри елементів, шо відповідають чутливість за ЗЧПП та всього

```
Рис. 4.5 Діаграми роботи спектрометричного каналу Д1
спектрометричного каналу до
енергії частинки поглиненої у детекторі, визначені часові параметри формуючого
підсилювача та таймінги роботи пристрою вибірки та запам'ятовування.
```

4.7. Структурна схема аналогового модулю

Після моделювання роботи окремих функціональних вузлів аналогового модулю за допомогою програми САПР Multisim 11.0.2 та визначення оптимальних режимів роботи кожного спектрометричного каналу аналогового модулю була розроблена кінцева схема електрична принципова аналогового модулю приладу SIDRA.

Структурна схема аналогового модулю приведена на рис. 4.6. Як видно з рис.4.6, аналоговий модуль складається з чотирьох ієрархічних блоки HB1, HB2, HB3 та HB4 зі своїми лініями вводу/виводу та з двох LC-фільтрів для кожного з полюсів живлення. Ієрархічні блоки HB1, HB2 та HB3 відповідають спектрометричним каналам кремнієвих детекторів Д1, Д2 та Д3, блок HB4 – канал на базі кремнієвого ФЕП та сцинтилятору.

4.8. Проектування та виготовлення друкованої плати аналогового модулю

Згідно розробленої схеми електричної принципової аналогового модулю супутникового приладу SIDRA, виконане трасування ланцюгів зв'язку і доріжок чотирьох канальної друкованої плати. Друкована плата аналогового модулю виконана на базі пасивних елементів типорозміру 0603 та на базі мікросхем у корпусах SOIC з метою досягнення мінімального геометричного розміру плати. Розробка дизайну друкованої плати проводилася за допомогою програмного забезпечення САПР Р-САD 2006. Зовнішній вигляд виготовленої друкованої плати аналогової обробки сигналів показаний на рис. 4.7. Зовнішній вигляд плати з встановленими радіо компонентами показаний на рис. 4.8.

5. БЛОК ЖИВЛЕННЯ

Для забезпечення усіх електричних схем та модулів супутникового приладу SIDRA необхідними рівнями напруг розроблена реалізація плати вторинного живлення.

Плата вторинного живлення (далі блок живлення, або БЖ) генерує усі необхідні рівні напруг для аналогового та цифрового модулів, а також усі необхідні напруги зміщення для кремнієвих детекторів від бортової напруги +27В. Рівні напруг, що генерує БЖ, та їх безпосереднє призначення наведені у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Значення питаючої	Максимальна	Призначення
напруги, В	потужність каналу,	
	Вт	
±5 B	1	Живлення операційних підсилювачів,
		компараторів та цифрових компонентів
		аналогового модулю приладу.
+5	2	Живлення цифрових компонентів модулю
		цифрової обробки даних.
+35	>0,001	Напруга зміщення першого кремнієвого
		детектору.
+165	>0,001	Напруга зміщення другого кремнієвого
		детектору та кремнієвого ФЕП.
+250	>0,001	Напруга зміщення третього кремнієвого
		детектору.

Рівні напруги БЖ



Рис. 4.6 Структурна схема аналогового модулю приладу SIDRA.



Рис. 4.7 Вигляд сторони ТОР виготовленої друкованої плати аналогового модулю.

Рис. 4.8 Вигляд сторони ТОР виготовленої друкованої плати аналогового модулю з встановленими радіо компонентами.

5.1. Функціональна схема блоку живлення

Схемне рішення блоку живлення виконане за принципом «холодного резервування», тобто, фактично, на одній платі БЖ розташовано два ідентичних канали, що забезпечують всі необхідні напруги живлення, але тільки один канал постійно ввімкнений і навантажений. Перемикання між каналами блоку живлення здійснюється за при подачі спеціальної команди ззовні, схемна реалізація відпрацювання якої також реалізована на платі БЖ. Принцип «холодного резервування» значно підвищує надійність роботи найбільш навантаженого блоку приладу SIDRA – плати вторинного живлення.

Блок живлення приладу SIDRA передбачає ланцюги контролю для всіх вторинних напруг. Контроль здійснюється по команді, що генерує бортова електроніка космічного апарату або інша схема управління.

Схема БЖ передбачає захисні ланцюги від перепадів та завад по первинних ланцюгах живлення. Передбачені само відновлювальні запобіжні ланцюги від короткого замикання первинних ланцюгів живлення.

Функціональна схема БЖ приладу SIDRA наведена на рис. 5.1.

5.1.1. Структура пів комплектів блоку живлення

Кожен з двох пів комплектів блоку живлення складається з п'яти незалежних каналів, а саме: один канал, що генерує живлення для аналогового модулю, один – для модулю цифрової обробки даних та три канали, що генерують напруги зміщення для кремнієвих детекторів детекторного модулю приладу SIDRA.

Канали живлення AM та ЦМ побудовані на базі DC/DC перетворювачів первинної напруги +27 В, що надходить від космічного апарату, у необхідні ± 5 В та +5 В, відповідно. В розробленій схемі передбачені індуктивно-ємкісні та ємкісні фільтри по первинних та вторинних ланцюгах живлення каналів ± 5 В та +5 В. DC/DC перетворювачі мають гальванічне розділення між первинними та вторинними ланцюгами, що значно підвищує завадостійкість каналів живлення AM та ЦМ від перепадів напруги бортової системи живлення.

Канали живлення AM та ЦМ побудовані на базі DC/DC перетворювачів з необхідним рівнем потужності для кожного каналу. Діапазон допустимих вхідних напруг обраних перетворювачів коливається від 18 до 36 В, що значно розширює діапазон первинних питаючих напруг та забезпечує надійне функціонування приладу SIDRA в цілому при великих величинах відхилення величини напруги живлення приладу від +27В.



Рис. 5.1 Функціональна схема блоку живлення приладу SIDRA

Канали, що генерують напруги зміщення для кремнієвих детекторів, побудовані на базі лінійних DC/DC перетворювачів. Ці DC/DC перетворювачі мають окремий ввід для керування величиною вихідної напруги. Величина вихідної напруги змінюється від 0 до максимального значення за лінійним законом від величини напруги на керуючому вході. Величина керуючої напруги лежить в межах від 0 до 10 В. У зв'язку з тим, що в процесі роботи приладу SIDRA зовсім не потрібно змінювати величини напруг зміщення кремнієвих детекторів, то схема регулювання вихідної напруги реалізована і вигляді звичайного дільника напруги, на базі потенціометру. На етапі налаштування детекторного модулю цим потенціометром встановлюється оптимальне значення напруги зміщення для кожного кремнієвого детектору і фіксується.

У зв'язку з тип, що напруга живлення DC /DC перетворювачів становить +12 B, був використаний DC / DC перетворювач для перетворення первинної напруги +27 B у +12 B, придатних для живлення DC / DC перетворювачів виробництва УУУУУ. Діапазон вхідних напруг DC / DC перетворювача +27/+12 знаходиться в межах від 18 ... 36 B, також цей перетворювач має гальванічний розділ первинних та вторинних ланцюгів живлення. Для кожного каналу зміщення кремнієвих детекторів передбачені ємкісні фільтри по вторинним ланцюгам.

5.1.2. Контроль вторинних напруг та перемикання комплектів блоку живлення

Схемна реалізація плати БЖ передбачає реалізацію відпрацювання зовнішніх команд, а саме: є можливість вмикати ти вимикати БЖ, проконтролювати значення всіх вторинних напруг та перемикати полу комплекти БЖ.

Зовнішні команди подаються у позитивній логіці шляхом подання короткотривалого імпульсу амплітудою +27 В на відповідний адресний вхід. Схема відпрацювання команд побудована на базі оптопар та поляризованих реле. Для запобігання руйнування p-n переходів оптопар при виникненні ЕДС самоіндукції у момент протікання струму крізь обмотку реле, паралельно кожній робочій обмотці підключені захисні діоди.

Як видно з функціональної схеми, що наведена на рис. 5.1, контактна група № 1 вмикає або вимикає БЖ, а контактна група №2 здійснює перемикання активного полу комплекту. Контактні групи 3 – 7, при поданні відповідної команди, комутують виходи каналів живлення АМ, ЦМ та зміщення кремнієвих детекторів до ланцюгів контролю вторинних напруг. Ланцюги контролю вторинних напруг представляють собою високоомні дільники напруги. З виходу кожного дільника знімається напруга, величина якої пропорційна величині відповідного каналу живлення.

5.2. Розробка та виготовлення друкованої плати

Згідно розробленої схеми електричної принципової плати вторинного живлення малогабаритного супутникового приладу SIDRA розроблений РСВ-дизайн друкованої плати. В процесі розробки дизайну враховані типорозміри, характер та тип монтування обраної елементної бази, також передбачені монтажні отвори для кріплення радіаторів.

Передбачені отвори для механічного кріплення сигнальних кабелів. Обрані типи роз'ємів, що використовуються при з'єднанні каналів живлення БЖ з користувачем. На рис. 5.2 і 5.3 представлені вигляд сторони ТОР і сторони ВОТТОМ, відповідно, виготовленої друкованої плати вторинного живлення. На рис. 5.4 представлений вигляд сторони ТОР блоку живлення з встановленими радіо компонентами.





Рис. 5.2 Вигляд сторони ТОР виготовленої друкованої плати БЖ

Рис. 5.3 Вигляд сторони ВОТТОМ виготовленої друкованої плати БЖ



Рис. 5.4 Вигляд сторони ТОР друкованої плати вторинного живлення з встановленими радіо компонентами.

5.3. Перевірка основних параметрів плати

Для виготовленої друкованої плати з метою перевірки усіх ключових параметрів та робочих режимів розроблена «Програма-методика вхідного контролю плати живлення приладу SIDRA».

Розроблена програма-методики передбачає контроль всіх ключових електричних параметрів друкованої плати живлення в двох режимах: у режимі без навантаження вторинних ланцюгів живлення, тобто в режимі «холостого ходу», та в режимі максимального навантаження вторинних ланцюгів живлення. Методика передбачає перевірку відпрацювання всіх зовнішніх функціональних команд, таких, як включення та виключення плати, зміни пів комплектів та команди монітору рівнів напруг плати живлення. Також методика описує порядок дій при перевірці усіх рівнів вторинних напруг, що генерує плата.

Згідно розробленої «Програми-методики вхідного контролю плати живлення приладу SIDRA» була проведена перевірка характеристик виготовленої плати вторинного живлення, в результаті якої була підтверджена її функціональність та відповідність технічним вимогам.

6. ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ПЕРЕВІРКА ПЛАТИ АНАЛОГОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

6.1. Виготовлення плати аналогової обробки сигналів та розробка методики перевірки її основних параметрів

Проведено трасування доріжок друкованої плати аналогової обробки сигналів, перевірка ланцюгів і розташування радіоелектронних компонентів з використанням САПР Р-САД-2006. Встановлені радіо компоненти на платі аналогової обробки. На рис. 6.1 показаний вигляд аналогової плати з прямої (сторона *Top*) та зворотної сторін (сторона *Bottom*) після напаювання мікросхем, пасивних резисторів, ємностей, роз'ємів та інших необхідних компонентів.

Для виготовленої друкованої плати з метою перевірки електричних параметрів та робочих режимів плати була розроблена «Програма-методика вхідного контролю плати аналогової обробки сигналів приладу SIDRA». Методика перевірки описує порядок попереднього візуального контролю якості виготовлення друкованої плати, якості пайки радіокомпонентів, пошуку пошкоджень тощо. Методика описує порядок попереднього електричного контролю ПАОС, а саме відсутність короткого замикання по ланцюгах живлення та перевірку струму споживання. Методика охоплює контроль роботи всіх функціональних вузлів ПАОС: зарядочутливих попередніх підсилювачів, підсилювачів-формувачів, масштабних підсилювачів та пікових детекторів.



Рис. 6.1. Вигляд основної частини друкованої плати аналогової обробки сигналів зі сторони *Top* (верхня частина рисунку) і зі сторони *Bottom* (нижня частина рисунку)

6.2. Перевірка електричних параметрів друкованої плати з вмонтованими радіо компонентами

Після візуального контролю виготовленої плати аналогової обробки сигналів були проведені наступні перевірки функціональних вузлів:

- Перевірка струму споживання та порівняння з розрахованим струмом;
- Перевірка діапазону регулювання підсилення МП;
- Перевірка діапазону регулювання компаратору ПД;
- Перевірка правильності роботи ПД.

6.2.1. Перевірка струму споживання палати аналогової обробки сигналів

Для перевірки струму споживання плати аналогової обробки сигналів в першу чергу був проведений розрахунок струму споживання згідно технічної документації на використані у принциповій електричній схемі і друкованій платі мікросхеми операційних підсилювачів, компараторів та інших. Дані про розрахований струм споживання наведені у таблиці 6.1.

Таблиця	6.	1
	<u>.</u>	-

N⁰	Мікросхема	Кількість	Допустимий струм споживання, мА		Загальний струм споживання, мА	
П.П.	1		+5 B	-5B	+5 B	-5 B
1	Операційний підсилювач	24	6,5	6,5	156	156
2	Аналоговий компаратор	7	6	0	42	0
3	Логічний одновибратор	3	7	0	21	0
4	АЦП	3	0,4	0	1,2	0
5	Цифровий потенціометр	3	0,06	0	0,18	0
6	Розрахований максимальний струм споживання ПАОС				220,38	156

Дані про струм споживання мікросхем згідно технічної документації

Згідно даних, наведених у таблиці 6.1 припустимий струм ПАОС по позитивному полюсі живлення склав 221 мА, а по негативному – 156 мА. Проміряний струм споживання ПАОС склав по позитивному полюсу живлення склав 170 мА, по негативному – 150 мА, що свідчить про правильну та стабільну роботу ПАОС.

6.2.2. Перевірка діапазону регулювання підсилення масштабуючого підсилювача

Згідно розробленої програми-методики перевірки плати аналогової обробки сигналів був проведений контроль роботи масштабуючого підсилювача, а саме: для кожного спектрометричного каналу, що має у своєму складі масштабуючий підсилювач (Д1, Д2 та Д3) було перевірено діапазон зміни підсилення. На рис. 6.2 наведені залежності коефіцієнтів підсилення каналів аналогової обробки сигналів від значень кодів цифрових потенціометрів. Для електронного детекторного каналу Д1 коефіцієнт підсилення знаходиться в межах від 1,38 до 41,5, що відповідає максимальній зміні підсилення масштабуючого підсилювача у 30,1 рази. Для детекторного каналу коефіцієнт підсилення змінюється у діапазоні від 1,15 до 34,83, а зміна підсилення МП – 30,3 рази.



Код цифрового потенціометру

Коефіцієнт підсилення МП+ПФ

Для детекторного каналу Д3: підсилення тракту від 0,88 до 26,08, зміна підсилення масштабую чого підсилювача – 30,9 разів. Для детекторного каналу Д4 не передбачена зміна підсилення і там відсутній масштабуючий підсилювач. Детекторний канал Д4 має постійне підсилення, що дорівнюється 8.

Рис. 6.2. Залежність коефіцієнтів підсилення масштабуючих підсилювачів і підсилювачівформувачів від коду цифрового потенціометру для трьох електронних каналів аналогової обробки сигналів. 6.2.3. Перевірка роботи пікового детектору

Останнім етапом перевірки працездатності друкованої плати аналогової обробки сигналів є перевірка

роботи пристрою вибірки і зберігання амплітуди аналогового сигналу - пікового детектору. Порядок перевірки роботи пікового детектору описаний у пункті 3.3 «Програми-методики вхідного контролю плати аналогової обробки сигналів приладу SIDRA». Перевірка передбачає контроль роботи вхідного компаратору пікового детектору та якість детектування пристрою вибірки і зберігання аналогових сигналів.

Результат перевірки вхідного компаратору представлений на рис. 6.3. 3 рис. 6.3 видно, що діапазон регулювання покриває лінійний діапазон сигналів з виходу МП, що 0÷3.6 B. складає Також лінійний спостерігається закон залежності рівня компаратору від необхідного встановленого рівня компаратору, що гарантує прозорий регулювання. Для всіх механізм детекторних каналів чутливість компаратору порогу до коду цифрового потенціометру склав 14,5



Рис. 6.3 Результат перевірки роботи вхідного компаратору пікового детектору

мВ/одиниця коду. Мінімальній рівень компаратору склав 19 мВ, що відповідає коду ЦП «0».

Якість пікового детектування оцінюється за фіксуванням максимуму вихідного сигналу, якістю утримання зафіксованого максимуму, генеруванням відповідних цифрових сигналів та автономному скиданню утриманої амплітуди та цифрових сигналів.

На рис. 6.4 зображені виміряні сигнали детекторного каналу Д2, що ілюструють правильну роботу пікового детектору. Верхній (жовтий) сигнал відповідає сигналу з виходу масштабуючого підсилювача.

Нижче (блакитний колір) розташований сигнал 3 виходу пікового детектору. Чітко видно надійність фіксування максимум та утримання на період біля 2 мкс, після чого йде нормальне скидання до рівня шумів. Ще нижче приведені цифрові сигнали фіксування максимуму (червоний колір) та сигнал наявності події (зелений колір), відповідно. Сигнал наявності події генерується В момент перевищення сигналом з виходу МП



Рис. 6.4 Осцилограми роботи пікового детектору

рівня вхідного компаратору ПД і сигналізує про потрапляння зарядженої частинки у детектор. Сигнал фіксування максиму генерується в момент пікового детектування і запускає процес перетворення амплітуди у цифровий код за допомогою АЦП. Як видно з рис. 2.4, цифрові сигнали генеруються вчасно та через 2 мкс самостійно скидаються, що свідчить про стабільну та правильну роботу пікового детектору в цілому.

6.2.4. Перевірка спектрометричних характеристик

Перевірка спектрометричних характеристик ПАОС проведена за допомогою лабораторного устаткування та радіоактивного джерела бета-частинок ²⁰⁷Ві. Це джерело конверсійних електронів з енергіями 482, 554, 976 та 1048 кеВ. До входу електронного детекторного каналу Д2 був під'єднаний кремнієвий детектор товщиною 1000 мкм та подана напруга зворотного зміщення +165 В. Сигнал з виходу пікового детектору подавався на вхід осцилографу та лабораторного 12-бітного АЦП, який записував енергетичні спектри. Дослідження якості спектрометричного траку ПАОС проводилося при двох значеннях

формуючої ємності ЗЧПП 0,47 та 1 пФ, що визначають чутливість ЗЧПП у 94 і 44,25 мВ/МеВ. Для ємності 1 пФ знімалися енергетичні спектри у випадках повного пікового детектування (мінімально можливий рівень компаратору ПД) та при відсутності пікового детектування (сигнал з виходу МП нижче рівня компаратору ПД). Енергетичні спектри записувались при значенні посилення детекторного каналу 35. Результати дослідження спектрометричних характеристик детекторного каналу Д2 наведені на рис. 6.5.

Як видно з рис. 6.5 у випадку з ємністю 1 пФ детекторний канал Д2 має лінійний енергетичний спектр від радіоактивного джерела з величиною енергетичного розподілення 36 кеВ. При використанні формуючої ємності 0,47 пФ енергетичне розподілення стало значно краще і дорівнює 26 кеВ, але при цьому значенні формуючої ємності динамічний діапазон детекторного каналу значно вужчий 3600мВ/94мВ=38 МеВ при мінімальному значенні посилення каналу. Цей факт суттєво ускладнює детектування заряджених частинок високих енергій.

В результаті дослідження спектрометричних характеристик ПАОС було встановлено, що всі детекторні канали працюють правильно та стабільно.



Рис. 6.5. Енергетичні спектри детекторного каналу Д2

РОЗРОБКА ТЕСТОВОГО ПРОЕКТУ БЛОКУ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ НА БАЗІ ПЛІС

В якості базового елементу прототипу модулю цифрової обробки сигналів компактного супутникового приладу SIDRA була обрана ПЛІС компанії "Microsemi Corporation"

М1АЗРЕ1500. Основні критерії вибору – це мінімальна споживча потужність, можливість бгаторазового перепрограмування, стійкість до атмосферних нейтронів та можливість використання в екстремальних температурних режимах. Також ця ПЛІС має окрім індустріального стандарту, ще й стандарт для аерокосмічного використання.

7.1. Розробка тестового проекту

У середі розробки Libero SoC, що розповсюджується безкоштовно для цього сімейства ПЛІС, був створений тестовий проект прототипу цифрового модулю. Тестовий проект побудований за ієрархічним принципом, тобто кожен блок може мати у своєму составі кілька інших блоків. На рис. 7.1 зображений перший (вищий) рівень ієрархії проекту. Цей рівень тестового проекту складається з центрального процесору (ЦП), оперативної пам'яті ЦП, блоку SPI інтерфейсу, детекторного блоку та шини APB3, до якої підключені всі перераховані блоки. Майстром на шині APB3 виступає ЦП, який читає або записує дані до підключених блоків.

ЦП побудований на базі готового модулю середи розробки COREABC з наступними параметрами: розрядність 32 біти, кількість пристроїв на шині APB3 – 3, об'єм внутрішньої оперативної пам'яті 256х32 з них під стек виділено 16 слів, адресний простір зовнішньої оперативної пам'яті дорівнює 1024х32, кількість ліній вводу 1, кількість ліній виводу 32. На мові програмування асемблер була написана програма для ЦП, що реалізує функції формування інформаційного кадру та передачі даних до персонального комп'ютеру або до іншого зовнішнього приладу за допомогою блоку SPI-інтерфейсу, функції відпрацювання зовнішніх команд та функцій управління детекторним блоком.

Детекторний блок – це повністю самостійно розроблений функціональний блок проекту, що був написаний на мові опису логічних схем VHDL. Детекторний блок призначений для детектування заряджених частинок, обробки логіки співпадань, читання кодів АЦП та управління параметрами аналогового блоку. На рис. 7.2 показані всі рівні ієрархії тестового проекту, з якого видно, що детекторний блок складається з кількох блоків нижчого рівня ієрархії, а саме: нижче на один рівень знаходиться блок PD_ARCH, що описує архітектуру детекторного блоку та блоку, що реалізує інтерфейс шини APB3. В свою чергу, ARCH складається з блоків таймера, генератора частинок та блоку буферів. Блок буферів МЕМ_BLOCK складається з буферу та модулю, що призначений для детектування та запису частинок.



Рис. 7.1 Верхній рівень ієрархії тестового проекту

Детекторний блок керується центральним процесором за допомогою шини APB3. У блоку оперативної пам'яті зберігається інформаційний кадр до моменту, поки він не повністю сформується. Інформаційний кадр складається з 10 підкадрів тривалістю 10 с, тобто весь кадр накопичується за проміжок часу у 100 с. Кожні 10 с ЦП читає дані про заряджені частинки з буферної частини детекторного блоку та записує дані у відповідний адресний простір інформаційного кадру, що розташований в оперативній пам'яті ЦП.

Кожні 100 с до інформаційного кадру заноситься інформація про мітку часу, підраховуються та записуються контрольні суми та телеметрична інформація – цим завершується процес формування кадру. Одразу після формування кадр передається за SPIінтерфейсом. SPI-інтерфейс побудований на базі модулю CORESPI з наступними параметрами: коефіцієнт дільника частоти синхронізації 0, довжина кадру 32 біти, довжина буферу відправки 4 кадри.

7.2. Моделювання роботи тестового проекту

Для моделювання засобами ПЛІС був створений окремий блок – генератор частинок, функцією якого є генерування тестових сигналів заряджених частинок, які детекторний блок детектує та зберігає у буферній частині. В результаті проведене моделювання роботи тестового проекту прототипу цифрового модулю на базі ПЛІС компанії "Microsemi Corporation" M1A3PE1500, що реалізує алгоритм формування інформаційного кадру у пам'яті та процес формування пакетів даних для передачі за стандартним протоколом і безпосередню їх передачу. Протокол обміну даних був обраний послідовний інтерфейс SPI в силу того, що саме за цим протоколом планується обмін даними між приладами SIDRA та Chemix. Моделювання проводилося програмі ModelISim Micrisemi 10.2c. Рис. 7.3 ілюструє результати моделювання.

Лінія IO_OUT ілюструє сформовані пакети даних довжиною 32 біти. Сигнал SUB_FRAME_READY переходить з 0 до рівня 1 в момент, коли є готові дані у буферній частині детекторного блоку за період у 10 с і їх необхідно зчитувати. З рівня логічної 1 до рівня 0 сигнал SUB_FRAME_READY переходить, коли дані були зчитані центральним процесором і збережені у інформаційний кадр. Сигнал SUB_FRAME_NUM_out показує номер підкадру. Сигнали SPISS (SPI Slave Select – вибір пристрою), SPICLKO (SPI CLK Out - синхронізація), SPIOEN (SPI Output Enable – дозвіл передачі даних) та SPISDO (SPI Serial Data Output – лінія даних) – це сигнали стандартного послідовного інтерфейсу обміну даними SPI. Курсор на рис. 7.3 встановлений на перший сформований пакет даних(FFFFFFD). Передача даних за протоколом SPI проводиться тоді,



ModelSim Microsemi 10.2c		
<u>File Edit View Compile Simulate Ado</u>	d W <u>a</u> ve T <u>o</u> ols Layo <u>u</u> t Boo <u>k</u> marks <u>W</u> indow <u>H</u> elp	
🕹 🕮 🛺 💐 党 📘 🕟 🖬 🗿 🔟	III BD G + + ** IF 100 ps + I II	El 🕅 🐽 🐘 🚺
	1	
SUB FRAME READY 0		
E- SUB_FRAME_NUM_out [3:0] 9	<u>(9)(0)(1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)(0)(1)(2)(3)(4 </u>)5)6)7)8)9)
SPISS 0		
SPISCLKO 0		
SPISDO 1		
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		
▲■● Now 2.3751 us	00 us 20000 us	4000C us
Cursor 7 -88728 us		40658.488728 us
🔢 Wave 🗶 🖳 Transcript 🗶 条 Objects 🗶	🛺 sim 🗶	< >
Now: 43,392,375,100 ps Delta: 3 sim:/pro	oc_mem_test/IO_OUT [31:0] 0	ps to 45561993855 ps //
ModelSim Microsemi 10.2c	The second second second second	
ModelSim Microsemi 10.2c File Edit View Compile Simulate Add	d W <u>a</u> ve T <u>o</u> ols Layo <u>u</u> t Boo <u>k</u> marks <u>W</u> indow <u>H</u> elp	
ModelSim Microsemi 10.2c Eile Edit View Compile Simulate Address of the second seco	d Wave Tools Layout Bookmarks Window Help ∃∐: █▷ ♀ ★ ★ ➡ 100 ps ♣ ₪	
ModelSim Microsemi 10.2c <u>Eile Edit View Compile Simulate Adc</u>	d Wave Tools Layout Bookmarks Window Help	
ModelSim Microsemi 10.2c File Edit View Compile Simulate Add With the second	d Wave Tools Layout Bookmarks Window Help <u>∃1</u> : <mark>B</mark> ▷ <u>G</u> ↑ ← ⇒ EF 100 ps	
ModelSim Microsemi 10.2c File Edit Yiew Compile Simulate Add Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system Image: Simulation of the system I	d Wave Tools Layout Bookmarks Window Help	
ModelSim Microsemi 10.2c File Edit View Compile Simulate Add Wave - Default Wave - Default Mage 	d Wave Tools Layout Bookmarks Window Help ∃ ☐ ☐ ☐ FDFFFFF)FFFFFFD /0000008F)2002D02D /02D021	
ModelSim Microsemi 10.2c File Edit View Compile Simulate Add Wave - Default Wave - Default Muse - Default	d Wave Tools Layout Bookmarks Window Help ∃1: ■ ↓ ● ↑ ← → EF 100 ps → EL EL FDFFFFFF)FFFFFFD (0000008F)2002D02D (02D02 9	
ModelSim Microsemi 10.2c File Edit View Compile Simulate Add Wave - Default Wave - Default Gravet Sub-FRAME_READY Sub-FRAME_NUM_out [3:0] SPISS SPISCLKO 0	d Wave Tools Layout Bookmarks Window Help 31: ■	
ModelSim Microsemi 10.2c File Edit View Compile Simulate Adot Image: Simulate View Compile Simulate Adot Image: Simulate Image: Simulate Image: Simulate Adot Image: Simulate Image: Simulate Mage Image: Sub-Frame_Num_out 0 0 Image: Spission 0 0 Image: Spisciko 0 0 Image: Spisciko 0 1	d Wave Tools Layout Bookmarks Window Help 31: ■ ↓ ● ↑ ← → EF 100 ps → El El FDFFFFFF)FFFFFFD 0000008F)2002D02D 02D02 9	
ModelSim Microsemi 10.2c File Edit View Compile Simulate Add Wave - Default Vave - Default SUB_FRAME_READY SUB_FRAME_NUM_out [3:0] SPISS SPISCLKO SPISCLKO SPISCO 1	d Wave Tools Layout Bookmarks Window Help	
ModelSim Microsemi 10.2c File Edit View Compile Simulate Add Wave - Default Vave - Default SUB_FRAME_READY SUB_FRAME_REA	d Wave Tools Layout Bookmarks Window Help	
ModelSim Microsemi 10.2c	d Wave Tools Layout Bookmarks Window Help III ■ ↓ ● ↓ ● 100 ps → EL EL FDFFFFFF)FFFFFFF 0 0000008F)2002D02D 02D02 9 0000008F)2002D02D 02D02D	
ModelSim Microsemi 10.2c File Edit View Compile Simulate Add Wave - Default SUB_FRAME_READY SUB_FRAME_READY SUB_FRAME_NUM_out [3:0] SPISS SPISCLKO SPISO Monv 2:3751 up	d Wave Tools Layout Bookmarks Window Help III ■ ↓ ↓ ■ ↓ ■ ■ 100 ps → ■ ↓ ■ FDFFFFFF)FFFFFFD)0000008F)2002D02D (02D02 9 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	
ModelSim Microsemi 10.2c File Edit View Compile Simulate Add Image: Simulate Image: Simulate Add Image: Simulate Add Image: Simulate Image: Simulate Image: Simulate Add Image: Simulate Add Image: Simulate Image: Simulate Image: Simulate Add Image: Simulate Add Image: Simulate Image: Simulate Image: Simulate Image: Simulate Add Image: Simulate Add Image: Simulate I	d Wave Tools Layout Bookmarks Window Help III ■ ↓ ● ● ● ● ● ● ● 100 ps → ■ ■ ■ FDFFFFFF >FFFFFFFD >00000008F >2002D02D >02D020 9 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	
ModelSim Microsemi 10.2c File Edit View Compile Simulate Add Image: Simulate Image: Simulate Add Image: Simulate Add Image: Simulate Image: Simulate Image: Simulate Add Image: Simulate Add Image: Simulate Image: Simulate Image: Simulate Image: Simulate Add Image: Simulate Image: Simulate Image: Simulate Image: Simulate Add Image: Simulate Image: Simulate Image: Simulate Image: Simulate Add Image: Simulate I	d Wave Tools Layout Bookmarks Window Help III ■ ↓ ● ● ● ● ● ● ● ● 100 ps → ■ ■ ■ FDFFFFFF)FFFFFFD 00000008F 2002D02D 02D02 9 00000008F 2002D02D 02D02 9 00000008F 2002D02D 02D02 00000008F 0000008F 00000008F 00000008F 0000008F 0000008F 0000008F 0000008F 0000008F 0000008F 0000008F 0000008F 0000008F 00000008F 0000008F 0000008F 00000008F 0000008F 0000008F 0000008F 0000008F 00000008F 0000008F 00000008F 00000000	
ModelSim Microsemi 10.2c File Edit View Compile Simulate Add Image: State of the state of t	d Wave Tools Layout Bookmarks Window Help	

Рис. 7.3 Результат моделювання тестового проекту.

коли лінія SPISS = «0», лінія SPIOEN = «1» та по лінії SPICLKO йдуть імпульси синхронізації.

8. ПОЛЕГШЕННЯ КОРПУСІВ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ

В результат виконання робіт по перегляду механічної конструкції лабораторного прототипу приладу SIDRA з метою зменшення вагових характеристик вдалося зменшити вагу приладу на 262 грами. Зменшення ваги було досягнуто завдяки перегляду та переробці креслень корпусів друкованих плат, полегшення підставки під детекторну головку, полегшення детекторної головки та заміні деяких DC/DC перетворювачів плати живлення на такі, що мають меншу вагу. Детальна інформація по зміні вагових характеристик по кожному

модулю окремо наведена у таблиці № 8.1. Зовнішній вигляд приладу SIDRA з полегшеними корпусами та оновленими підставкою під детекторну головку та саму детекторну головку наведений на рис. 8.1.

Таблиця 8.1

No	Drmore	Стара	Зміна	Нова вага,	Панціяна	
3/П	Вузол	вага, г	ага, г ваги, г г		Примітка	
1.	Модуль вторинного живлення (плата + корпус)	520	А) -58.3; Б) -90.6; В) -7.8.	363.3	 А) Облегшення корпусу; Б) Заміна DC/DC Matsusada (19 г.) на ЕМСО (4.9 г.). В) заміна DC/DC Aimtec (16.9 г.) на Traco (TEN6N 2412-13 г.) 	
2.	Модуль аналогової обробки (плата + корпус)	270	-65.1	204.9	Облегшення корпусу	
3.	Підставка детекторної головки	170	-114.7	55.3	Переробка конструкції	
4.	Детекторна головка	100	+3.9	103.9	Прорисовка конструкції	
5.	Модуль цифрової обробки (плата + корпус)	100	+70.6	70.6+100* = 170.6	Вага полегшеного корпусу + *очікувана вага цифрової плати	
6.	Кабелі та з'єднувачі	200	0	200	Без змін	
	Всього	1360	-262	1098		

Зміна вагових характеристик модулів приладу SIDRA

8.1. Детекторна голівка

У зв'язку з необхідністю зменшення ваги приладу в цілому була переглянута механічна конструкція детекторної головки та її складових частин, в тому числі утримувачів кремнієвих детекторів та коліматору. Також до конструкції детекторної головки були додані два термоелектричних модулі, що призначені для задавання температурних режимів детекторів. В результаті отримали конструкцію детекторної головки вагою 103 грами. На

рис. 8.2 зображене збірне креслення детекторної головки зі ступінчатим біметалічним коліматором.



Рис. 8.1. Зовнішній вигляд приладу SIDRA у вікні програми SolidWorks2012

8.2. Збірне креслення механічної конструкції приладу SIDRA

В результаті робіт по зменшенню вагових характеристик лабораторного прототипу супутникового приладу SIDRA були перероблені креслення механічних корпусів всіх друкованих плат та перероблені креслення детекторної головки та її підставки. В результаті вага механічних корпусів та детекторної головки разом з підставкою склали 490 грамів. Збірне креслення механічної конструкції приладу SIDRA приведене на рис. 8.3.



Рис. 8.2. Збірне креслення полегшеної детекторної головки.



Рис. 8.3. Збірне креслення механічної конструкції приладу SIDRA

9. РОЗРОБКА БЛОКУ БАЗИ ДАНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВТРАТ В МАТЕРІАЛАХ ДЕТЕКТОРІВ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПЛІС АЗРЕ-1500

Розроблений модуль бази даних енергетичних втрат заряджених частинок в матеріалах детекторів складається з трьох основних функціональних блоків: блок бази даних (DataBase_of_particles), блок визначення сорту заряджених частинок (Particle_definer) та блоку APB3 інтерфейсу, завдяки якому встановлюються параметри роботи модулю бази даних. Модуль бази даних містить в собі дані по енергетичним втратам для трьох режимів детектування заряджених частинок. На кожному з режимів детектування блок бази даних дозволяє розрізнити чотири сорти заряджених частинок та розподілити кожен сорт на 50 енергетичних каналів.

9.1. Блок бази даних

Блок бази даних уявляє собою набір статичних одномірних матриць, в яких порядковий номер елементу є адресом для зчитування вираженим у кодах АЦП. Для одного режиму детектування мається 13 логічних векторів: один вектор, що містить значення енергетичних каналів у вихідному кадрі, що відповідають поглиненій енергії в першому детекторі та по три вектори для кожного з чотирьох сортів заряджених частинок, що містять мінімальні та максимальні енергетичні втрати у другому детекторі та відповідний енергетичний канал вихідного кадру для визначеного сорту. При цьому адресом для першої матриці та матриць, що містять мінімальні та максимальні значення енергетичних втрат у другому детекторі виступає код АЦП першого спектрометричного каналу, а для адресування по матриці, що містить значення енергетичних каналів. використовується код ΑЦΠ другого спектрометричного каналу. DataBase of particles peanisyє паралельний інтерфейс читання та виводу даних, яким з'єднаний з блоком визначення сорту Particle definer.

Блок бази даних енергетичних втрат частинок приладу SIDRA DataBase_of_particles був оптимізований шляхом зменшення використовуваних логічних комірок у 47 разів. В ході аналізу даних симуляцій проходження заряджених частинок крізь матеріали детекторів приладу та спектрометричних характеристик спектрометричних каналів аналогового блоку було виявлено, що для впевненої реєстрації з заявленою точністю сортів та первинних енергій заряджених частинок для кожного режиму роботи приладу SIDRA достатньо 8 старших біт АЦП, а для реєстрації та визначення первинної енергії електронів – перших 8 біт АЦП. Тому замість 13 логічних векторів довжиною 4096 позицій по 12 біт для кожного режиму детектування приладу SIDRA, що містять енергетичні втрати в матеріалах

детекторів, були використані 13 логічних векторів довжиною 256 позицій по 8 біт. Згідно цього було скориговане ядро бази даних, а саме: змінені типи та розміри логічних векторів (M0_D1_logic_Ein, M0_S0_ADC_min, M0_S1_ADC_min, M0_S2_ADC_min, M0_S3_ADC_min, M0_S0_ADC_max, M0_S1_ADC_max, M0_S2_ADC_max, M0_S3_ADC_max, M0_S0_Ein_ADC, M0_S1_Ein_ADC, M0_S2_Ein_ADC, M0_S3_Ein_ADC), зменшені шини адресування по векторах, та відкоригований блок читання бази даних Particle_definer.

9.2. Блок визначення сорту частинок

Блок визначення сорту заряджених частинок Particle_definer в свою чергу складається з наступних блоків:

- Блок, що реалізує логіку визначення сорту на базі кінцевого автомату побудованого за архітектурою Мілі;
- 2) Блок визначення логіки співпадань;
- 3) Блоки читання кодів АЦП_Д1 та АЦП_Д2;
- 4) Блок АРВЗ інтерфейсу.

Блок Particle_definer згідно значень командних регістрів визначає логіку співпадань, отримує коди АЦП детекторних каналів аналогового модулю, визначає сорт та енергію зарядженої частинки, та записує код частинки до блоку збору інформації.

Блок, що реалізує логіку визначення сорту на базі кінцевого автомату має наступні стани:

- 1) Waiting стан очікування події. Це початковий стан автомату в момент включення і в цей стан автомат повертається після завершення всіх запрограмованих кроків;
- 2) Processing CW стан визначення типу співпадань. До цього стану автомат переходить у разі наявності хоча б одного статусного сигналу аналогового модулю (HP1, HP2, HP3);
- Sort_detection стан визначення сорту частинки. До цього стану автомат переходить після визначення типу співпадань. Визначення сорту проводиться шляхом порівняння кодів АЦП_Д1 та АЦП_Д2 з відповідними комірками векторів M0(1,2)_S0(1,2,3)_ADC_min та M0(1,2)_S0(1,2,3)_ADC_max.;
- Reading_DB читання бази даних. До цього стану автомат переходить після визначення сорту частинки та у разі логіки співпадань Д1 читає дані з вектору M0(1,2)_D1_logic_Ein та переходить у стан Write_particle;
- 5) Check_DB читання вектору M0(1,2)_S0(1,2,3)_Ein_ADC згідно визначеного сорту;
- 6) Write_particle запис частинки до зовнішнього буферного блоку;
- 7) Reseting_PD скидання пікових детекторів;

8) HP_end - очікування завершення статусних сигналів аналогового модулю.

Детальний граф переходів кінцевого автомату блоку визначення сорту частинок приведений на рис. 9.1.

9.2.1. Блок визначення логіки співпадань

Блок визначення логіки співпадань аналізує статусні сигнали аналогового модулю (HP1, HP2 та HP3) та формує код типу співпадань: «001» - логіка Д1, «011» - логіка Д1Д2 та «111» - логіка Д1Д2Д3. Цей код сигналізує в яких детекторних шарах був відгук при проходженні зарядженої частинки крізь телескопічну систему детекторів. Тобто код «001» говорить, що заряджена частинка зупинилася у першому детекторному шарі, код «011» описує ситуацію, коли частинка пройшла перший детектор та зупинилася у другому детекторі, код «111» говорить про те, що заряджена частинка пройшла крізь всю телескопічну систему детекторів.



Рис. 9.1. Граф переходів кінцевого автомату блоку визначення сорту частинок.

Блок визначення логіки співпадань CW_Logic написаний на мові програмування VHDL, як окреме ядро, що додається до тестового проекту цифрового модулю. Нижче наведений інтерфейс блоку CW_Logic (рис. 9.2). Як видно з рис. 9.2 блок CW_Logic має сім входів та два виходи. Вхід RESETn призначений для асинхронного скидання блоку, вхід CLear_CL призначений для скидання коду логіки співпадань після зчитування, вхід CLK призначений для подачі синхроімпульсів, входи HP_D1, HP_D2 та HP_D3 призначенні для подання статусних сигналів аналогового модулю, вхідний вектор CW_Length визначає тривалість часового вікна, по закінченні якого визначається код співпадань.

```
entity CW Logic is
port (
    RESETn
                : in std logic;
    CLear CL
                  : in std logic;
                : in std logic;
    CLK
    HP D1
                   : in std logic;
    HP D2
                   : in std logic;
                   : in std logic;
    PD D3
    CW Length : in std logic vector(7 downto 0);
                : out std logic vector(2 downto 0);
    CL state
    BUSY
                : out std logic
);
end CW_Logic;
```

Рис. 9.2. Інтерфейс блоку визначення логіки співпадань CW_Logic.

Вихідний вектор CL_state містить код логіки співпадань. Статусний вихідний сигнал BUSY сигналізує про стан роботи блоку: «0» - йде визначення логіки співпадань, «1» - код логіки співпадань визначений.

Логіка роботи блоку визначення типу співпадань наступна:

1) Очікується активний рівень будь-якого статусного сигналу аналогового модулю (HP1, HP2 або HP3).

2) Після виявлення будь-якого статусного сигналу блок переходить у режим визначення типу співпадань. При цьому з входу CW_Length зчитується значення тривалості вікна спів падань, вираженого у кількості синхроімпульсів і запускається лічильник синхроімпульсів з максимумом рахунку CW_Length. Сигнал BUSY переходить у значення «0». Значення CW_Length лежать в межах 0 ... 255, що при частоті синхронізації 15 МГц відповідає 0 ... 17 мкс.

3) Коли лічильник доходить до максимуму рахунку сигнал BUSY переходить у значення «1», при цьому фронтом цього сигналу стан статусних сигналів HP1, HP2 та HP3 записується до вихідного вектору CL_state.

4) Після зчитування коду співпадань проходить скидання блоку шляхом подачі логічного нуля на вхід RESETn або CLear_CL.

9.2.2. Блок читання кодів АЦП

Мікросхеми АЦП, що встановлені у спектрометричних каналах аналогового модулю (канали Д1 та Д2) реалізують інтерфейс обміну даними SPI. Тому для коректного зчитування необхідно реалізувати блок SPI інтерфейсу зчитування кодів АЦП для тестового проекту цифрового модулю. Можна було б використати готове ядро з бібліотеки компонентів середи розробки Libero, але це ядро потребує прямої участі центрального процесору, як на етапі налаштування так і на етапі читання і, як наслідок потребує додавання окремого ядра процесору для обслуговування ядра SPI інтерфейсу. Все це значно б ускладнило архітектуру тестового проекту та виникла б необхідність синхронізувати роботу двох процесорної системи. Тому, щоб уникнути цих проблем та зробити процес зчитування даних з АЦП максимально автономним було розроблене окреме ядро читання кодів АЦП ADC SPI. Ядро АDC SPI має п'ять входів та чотири виходи. Входи RESETn та CLEAR призначені для асинхронного скидання логіки ядра, вхід СLК призначений для подачі сигналу синхронізації, вхід НР іп призначений для подання статусного сигналу НР, що відповідає старту цифрування даних АЦП, вхід MISO – це лінія SPI інтерфейсу, що відповідає за читання даних з АЦП. Вихід MCLKO - синхронізація SPI інтерфейсу, вихід SSEL - лінія вибору АЦП, вихідний вектор DATA містить зчитане значення коду АЦП та сигнал READY сигналізує про готовність даних.

Логіка роботи ядра ADC_SPI наступна:

- 1) Очікування сигналу НР_іп.
- 2) Після приходу HP_in запускається лічильник, що формує затримку, необхідну для перетворення сигналу на вході АЦП у цифровий код.
- 3) Після перетворення сигналу у цифровий код запускається послідовність, що реалізує логіку SPI інтерфейсу, а саме генерується сигнал синхронізації (MCLKO) та сигнал вибору АЦП (SSEL). С кожним позитивним фронтом синхронізації оновлюються біти вихідного вектору DATA зчитаними з АЦП даними.
- 4) Після завершення зчитування сигнал READY переводиться в активний стан, що свідчить про завершення зчитування та готовність даних до аналізу.

5) Після зчитування даних з вихідного вектору DATA логіка ядра ADC_SPI скидається шляхом подачі активного сигналу на вхід RESETn або CLEAR.

В даному випадку зчитування вихідного вектору DATA проводиться на етапі визначення сорту частинок логікою модулю визначення сорту (кінцевий автомат Мілі), що є абсолютно автономним процесом тестового проекту цифрового модулю. Тому розробка та внесення ядра ADC_SPI до блоку бази даних дозволило вирішити задачу зчитування кодів АЦП при мінімальному ускладненні архітектури та вихідного коду тестового проекту. Також такий підхід дозволив відв'язати центральний процесор від обробки кожної події. Центральний процесор отримує дані про зареєстровані частинки від буферного блоку вже оброблені та готові до занесення до вихідного телеметричного кадру.

В блоці бази даних в модулі визначення сорту частинок мається два ядра ADC_SPI, по одному на кожен з АЦП аналогового модулю. Блок ADC_SPI працює на частоті центрального процесору (15 МГц) і, як наслідок, частота роботи SPI інтерфейсу дорівнює 7.5 МГц. При цьому тривалість зчитування даних з АЦП дорівнює 1.6 мкс. Виходячи з цього можна вирахувати максимальний час однієї вибірки:

1) Час перетворення АЦП дорівнює 0.65 мкс, час зчитування 1.6 мкс, максимальний час скидання пікових детекторів 1 мкс, тривалість фронту сигналу до моменту видачі статусного сигналу НР 0.7 мкс.

2) Склавши всі часові параметри отримуємо максимальний час вибірки 3.95 мкс, що відповідає максимальному завантаженню по каналу 250 кГц.

9.3. Блок АРВЗ інтерфейсу

Блок APB3 інтерфейсу – це невід'ємна складова блоку бази даних, що відповідає за канал зв'язку з центральним процесором тестового проекту цифрового модулю. Завдяки цьому інтерфейсу конфігурується блок бази даних на конкретний режим детектування заряджених частинок шляхом запису конкретних значень до командних регістрів. APB3 інтерфейс – це паралельний канал зв'язку, що працює на частоті центрального процесору. Запис або читання даних займає п'ять синхроімпульсів.

Блок бази даних має два командних та три статусних регістри. Детальна інформація про регістри блоку бази даних наведена у таблиці 9.1.

Таблиця 9.1

п ·	•	•		~	
llenem	к пегісі	rnir Ma	ллипю	DA3M	ланих
riepesii	n per ier		одулю	ousn	данил

№ п.п.	Адреса (HEX)	Найменування регістру	Тип доступу	Розрядність, біт	Допустимі значення (НЕХ)	Призначення
1.	00	MODE	Читання запис	32	52454731, 52454732, 52454733	Поточний режим детектування. Впливає на вибір статичних векторів блоку бази даних при визначенні сорту та енергії заряджених частинок.
2.	01	ADC_D1	Читання	12	0 FFF	Код АЦП першого детектора останньої частинки
3.	02	ADC_D2	Читання	12	0 FFF	Код АЦП другого детектора останньої частинки
4.	03	Particle CODE	Читання	8	0 DD	Код останньої частинки
5.	04	CW_Length	Читання запис	8	0 FF	Довжина вікна співпадань. Визначає часовий інтервал починаючи від фронту першого статусного сигналу аналогового модулю, по закінченні якого визначається тип логіки співпадань.

10. РОЗРОБКА ПРОТОКОЛУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ МІЖ ПРИЛАДАМИ SIDRA TA CHEMIX

10.1. Основні розділи Протоколу узгодження електричних інтерфейсів

В Протоколі узгодження електричних інтерфейсів між детектором енергійних заряджених частинок і рентгенівським спектрофотометром ChemiX відображені розділи з опису електроживлення, високошвидкісного інтерфейсу обміну науковими даними і передачі

команд, схеми з'єднань між приладами ChemiX і детектором частинок, з'єднувачі інтерфейсів живлення і обміну науковими даними (Додаток 1).

Детектор частинок високих енергій під'єднується безпосередньо до основного і резервного роз'ємів приладу ChemiX, ланцюги яких детально представлені в Додатку до Протоколу. Споживання приладу детектору частинок не перевищуватиме 7 Ват.

В Протоколі представлена детальна функціональна схема приладу ChemiX і детектору частинок високих енергій як складової рентгенівського спектрофотометру (Додаток 1). Функціональна схема включає в себе уявлення про основні модулі обох приладів, таких, як Channel_Multiplexer, Processor_A, Processor_B, Detector Multiplexer, Power Multiplexer, CCD_MOD_X, CCD_X, CCD_MOD_11, CCD_11 приладу ChemiX; Power Supply Unit, Digital Processing Unit, Analog Processing Unit, Detector Head детектору частинок фону.

Розділ що описує високошвидкісний інтерфейс обміну науковими даними і передачі команд, включає дані про інформативність ДЧФ, кількість команд управління приладом, протокол обміну даними між двома приладами, швидкість обміну, тип синхронізації, використання коду бортового часу, вміст командних повідомлень для ДЧФ, детальну розшифровку командних повідомлень, епюри обміну інформацією і передачі команд, процедуру отримання наукової інформації від ДЧФ і приймання командних повідомлень від приладу ChemiX, генерування аварійного повідомлення в разі підвищеної рівня зарядженої радіації.

В Протоколі представлена таблиця вмісту командних повідомлень від приладу ChemiX до детектору частинок фону (Додаток 1). Командні повідомлення передаються від приладу ChemiX у вигляді 3-х пакетів по 32 біти за один сеанс передавання. Пакет № 0 (біти від 0 до 31) є заголовком з 4-літерним позначенням; пакет № 1 (біти від 32 до 63) є власне команда також з 4-літерним позначенням; пакет № 2 є контрольні суми для кожної команди, представлені у шістнадцятковій системи числення НЕХ.

10.2. Команди управління Детектором частинок високих енергій

Таблиця програмних зовнішніх команд управління приладом у ході його льотної експлуатації включає в себе 12 команд, серед яких команди включення і вимкнення аналогової і цифрової плат і плати живлення; включення першого або другого півкомплектів плати живлення; включення монітору усіх вторинних і первинних напруг живлення плати живлення; переходу на детектування першого (легкі ядра та електрони), другого (середні ядра), або третього (важкі ядра) режимів роботи детектування частинок; встановлення/зміни опорного рівня радіаційної обстановки, при якому відбувається видача аварійного

повідомлення; регулювання рівня спрацювання пікових детекторів аналогового модуля; регулювання коефіцієнту підсилення масштабуючи підсилювачів (Додаток 1).

В Протоколі представлені часові епюри обміну науковою інформацією і передавання командних повідомлень між приладом ChemiX і детектором частинок фону. Часові епюри відображають процес передавання від приладу ChemiX (master) до детектору частинок фону (slave) за один акт коду бортового часу за лінією CLKA (CLKB) і командних повідомлень у вигляді трьох пакетів по 32 біти кожний за лінією MOSIA (MOSIB), а також процес отримання даних від модулю ДЧФ (slave) до приладу ChemiX (master) за лінією MOSIA (MOSIB).

Розроблена структурна схеми з'єднання приладів ChemiX і ДЧФ за високошвидкісним протоколом обміну SPI з вказівкою назви і призначення ланцюгів роз'єму Місго D SUB. Детальна структурна схема оформлена у вигляді Додатку А до Протоколу. Вона включає в себе такі основні модулі приладу ChemiX, як канальний мультіплексер, процесори А і Б, детекторний мультіплексер, блоки ПЗЗ матриць. Основні модулі детектору частинок фону, що відображені на структурній схемі – детекторна голівка, модулі аналогової і цифрової обробки сигналів, блок живлення. Крім того, на структурній схемі відображені з'єднувачі приладу з бортовою системою збору наукової інформації і бортовою системою живлення.

10.3. Процедура передавання наукової інформації і командних повідомлень.

У підрозділі Протоколу, що описує процес отримання наукової інформації від детектору частинок фону, і приймання командних повідомлень від приладу ChemiX вказано, що прилад ChemiX здійснює перевірку правильності команд по заголовках і контрольним сумам, після ідентифікації типу повідомлення видаляє перший байт, формує з масиву байтів командного повідомлення пакети довжиною по 32 біти для відправки в детектор частинок фону (Додаток 1). Кожний пакет вміщує по 4 байти командного повідомлення або код бортового часу.

Описано часову процедуру передавання наукової інформації від детектору заряджених частинок до рентгенівського спектрофотометру ChemiX (Додаток 1). В момент, коли модуль деткетора сформував інформаційний кадр наукових даних, в буфер відправки SPI протоколу вміщується статусне повідомлення, що складається з одного пакету (32 біти). Це повідомлення включає в себе константу, яка відповідає статусу «дані готові». Далі йдуть пакети, що включають кількість пакетів з науковими даними, порядковий номер інформаційного кадру, пакети з наукової інформацією (Пакет №3, Пакет №4, …, Пакет № (N+1), Пакет № (N+2)), контрольна сума пакетів №3 ÷ №(N+2).

10.4. Аварійне інформаційне повідомлення для рентгенівського спектрофотометру і призначення контактів з'єднувачів між приладами.

Розроблено принципи побудови аварійного інформаційного повідомлення для рентгенівського сонячного фотометру у разі попадання супутника у зону підвищеної радіації. Аварійне повідомлення уявляє собою один пакет даних довжиною 32 біти і включає в себе константу «ALMS», яка в HEX- уявленні відповідає 0х414с4d53. Пакет з аварійним повідомленням вміщується в буфер відправки SPI протоколу ДЧФ відразу ж після детектування аварійної ситуації і очікує прийому з боку приладу ChemiX.

У Протоколі представлено таблицю розпіновки основного і резервного з'єднувача живлення типу Місго D-SUB (9 контактів) з боку детектору заряджених частинок фону і PC7AE (7 контактів) з боку спектрофотометру ChemiX. Складено таблицю розпіновки основного і резервного з'єднувача високошвидкісного інтерфейсу типів Місго D-SUB (21 контакт) з обох боків – детектору частинок і приладу ChemiX. В Протоколі вказані номери ланцюгів і номери контактів на кожному із з'єднувачів (Додаток 1).

Текст розробленого Протоколу погоджено з головною організацією з розробки приладу ChemiX – Відділенням фізики Сонця Центру космічних досліджень Польської академії наук.

11. РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕДУР ВІДПРАЦЮВАННЯ ЗАВНІШНІХ КОМАНД

У розділі 10 описаний перелік командних повідомлень для управління приладом SIDRA та описана їх семантика. Командні повідомлення, що призначені для цифрового модулю приладу SIDRA, мають заголовки BPDD або BPDT. Таких командних повідомлень вісім і відрізняються вони тілом командного повідомлення. Перелік командних повідомлень, що призначені для виконання цифровим модулем детектору частинок, наведений в Таблиці 11.1.

Таблиця 11.1

№ п.п.	Тіло команди	Призначення
1.	REG1	Перейти на перший режим детектування частинок (легкі ядра + електрони).
2.	REG2	Перейти на другий режим детектування частинок (ядра середньої ваги).
3.	REG3	Перейти на третій режим детектування частинок (важкі ядра).

Перелік команд цифрового модулю приладу SIDRA.

4.	TEST	Виконати тест аналогової та цифрової електроніки приладу
5.	SA + value	Установка/зміна опорного рівня радіаційного фону, при якому видається аварійне повідомлення.
6.	CL + value	Регулювання рівнів спрацювання пікових детекторів аналогового модулю.
7.	CG + value	Регулювання підсилення масштабних підсилювачів аналогового модулю.
8.	TIME	Оновити системний час кодом бортового часу.

Процедури прийняття командних повідомлень реалізовані як окремі процедури центрального процесору на мові програмування асемблер. Процес виконання командних процедур починається після отримання командного повідомлення, його перевірки та визначення типу команди. Командні повідомлення приймаються по SPI-інтерфейсу за допомогою налаштованого SPI-ядра. У Таблиці 11.2 наведений лістинг процедур прийому, перевірки та визначення типу командного повідомлення.

Таблиця 11.2

Лістинг процедур прийому, перевірки та визначення типу командного повідомлення

\$Get_Commands_SPI	// Точка входу у процедуру отримання команд.
RETURN IFNOT INPUT1	// Перевірка FIFO SPI_core. Вихід, якщо пусто.
APBREAD ChemixSPI SPI_RX	// Читання FIFO SPI_core.
CMP DAT 0	// Перевірка заголовку.
RETURN IF zero	// Вихід, якщо 0.
CMP DAT BPDT	// Час?
JUMP IF ZERO \$TitleSave	// Якщо час – зберігаємо заголовок.
CMP DAT BPDD	// Команда для цифрового модулю?
JUMP IF ZERO \$TitleSave	// Якщо команда – зберігаємо заголовок.
RETURN	// Інакше виходимо.
\$TitleSave	//Збереження заголовку.
RAMWRT CMD0	// Записуємо заголовок до пам'яті ЦП.
WAIT UNTIL INPUT1	// Очікуємо наступний пакет командного повідомлення
\$CommandSave	// Збереження тіла команди.
APBREAD ChemixSPI SPI_RX	// Читання тіла команди з FIFO SPI_core.

// Записуємо тіло команди до пам'яті ЦП. RAMWRT CMD1 WAIT UNTIL INPUT1 // Очікуємо наступний пакет командного повідомлення. \$CsSave // Отримання контрольної суми. APBREAD ChemixSPI SPI RX // Читання контрольної суми з FIFO SPI core. RAMWRT CMD2 // Збереження контрольної суми. \$CheckCMD // Перевірка контрольної суми. RAMREAD CMD0 // Підрахунок контрол. суми отриманих пакетів ADD RAM CMD1 // Порівняння підрахованої КС з отриманою. CMP RAM CMD2 // Переходимо до виконання, якщо однакові. JUMP IF ZERO \$saveCMDforDo //Інакше вихід. RFTURN // Виклик команд. //Читаємо заголовок \$saveCMDforDo RAMREAD CMD0 // Порівнюємо з BPDT CMP DAT BPDT // Якщо час, то викликаємо оновлення сист. часу jump if zero \$SET TIME // Порівнюємо з BPDD. CMP DAT BPDD // Якщо команда, то переходимо до визначення типу. jump if zero // Інакше вихід. *** \$ProcessPDcommands RETURN //Виконання команд. *** // Читаємо тіло команди. \$ProcessPDcommands // Режим1? RAMREAD CMD1 //Якщо режим1. Встановлення режиму1. CMP DAT REG1 // Режим2? jump if zero \$SET REG1 //Якщо режим1. Встановлення режиму2. CMP DAT REG2 // Режим3? jump if zero \$SET REG2 //Якщо режим1. Встановлення режиму3. CMP DAT REG3 //Визначення CG або CL. jump if zero \$SET REG3 // CG ? AND DAT 0xFFFF0000 // Сигналізація виконання команди CG. CMP DAT CG // Якщо CG, переходимо до регулювання підсилення. **IOWRT 32** // CL ? jump if zero \$Prepare to Send GAIN or CMP to // Сигналізація виконання команди CL.

_RES	// Якщо CL. Регулювання порогів.
CMP DAT CL	
IOWRT 64	
jump if zero	// SA ?
<pre>\$Prepare_to_Send_GAIN_or_CMP_to</pre>	// Якщо SA. Оновлення порогу радіаційн. фону.
_RES	// Сигналізація помилки (невірна команда)
CMP DAT SA	// Інакше вихід
jump if zero \$SET_ALARM	
IOWRT 189	
RETURN	

11.1. Команда оновлення системного часу

Для підпису телеметричних кадрів значеннями реального часу та визначення абсолютного значення часу на кожному етапі роботи приладу SIDRA виникла необхідність оновлювати системний час зі стабільного джерела, яким є бортовий комп'ютер космічного апарату, що надає можливість отримувати код бортового часу. Оновлення системного часу приладу SIDRA виконується шляхом прийняття командного повідомлення із заголовком ВРDT, що в тілі команди містить значення коду бортового часу. В Таблиці 11.3 наведений лістинг процедури оновлення системного часу.

Таблиця 11.3

Лістинг процедури оновлення системного часу цифрового модулю.

\$SET_TIME	// Точка входу до процедури.
IOWRT 1	// Сигналізація виконання.
RAMREAD CMD1	//Читання тіла команди.
RAMWRT extTIME	// Запис коду часу до пам'яті центр. процесору.
RETURN	//Вихід з процедури

Як видно з Таблиці 11.3, процедура оновлення системного часу має дуже мало кроків виконання, що обумовлює моментальне виконання після отримання. Результатом роботи процедури є оновлення комірки пам'яті ЦП extTIME, що зберігає поточний системний час. Далі значення цієї комірки використовується центральним процесором для підпису

телеметричних кадрів та визначення абсолютного часу. Інструкція IOWRT, що викликається першою виводить значення на вихідний порт центрального процесору. Біти 0 – 7 вихідного процесору під'єднані до світлодіодів на платі ProAsic StarterKit. Завдяки цьому можна визначити команда виконалася або ні.

11.2. Команди встановлення порогів спрацювання пікових детекторів та коефіцієнтів підсилення

Процедури встановлення порогів і підсилення запускаються при прийнятті коректного командного повідомлення з заголовком BPDD та тілом команди CL та CG відповідно. Також в тілі команди передається адреса цифрового потенціометра (старші 8 біт) та значення (молодші 8), що необхідно встановити. Значення підсилення може приймати величини від 0 до 255, що відповідає фактичному підсиленню від 1 до 35, тобто мінімальний крок регулювання дорівнює 0,137 од./біт. Значення величини порогу змінюється також від 0 до 255, що фактично відповідає 0 – 3.6 В, при цьому крок регулювання порогу дорівнює 14 мВ/біт.

В Таблиці 11.4 наведений лістинг процедур встановлення порогів та підсилення каналів аналогового модулю.

Таблиця 11.4

Лістинг процедур встановлення порогів та підсилення каналів аналогового модуля

<pre>\$Prepare_to_Send_GAIN_or_CMP</pre>	// Точка входу до процедури підготовки даних до
_to_RES	// відправлення.
RAMREAD CMD1	// Читання тіла команди.
RAMWRT SPI_TX_temp	// Запис тіла команди до змінної ТХ FIFO SPI_core.
\$Send_GAIN_or_CMP_to_RES	//Процедури визначення адреси потенціометру.
RAMREAD SPI_TX_temp	
BITTST 9	// Читання змінної TX FIFO SPI_core.
JUMP IF ZERO \$Select_RES1	// Визначення каналу Д1 або Д2.
RAMWRT SPI_CS_temp RES_2	// Якщо 0–канал Д1. Відправлення коду потенціом.
JUMP \$Send_Data_to_RES	// Запис до змінної адреси другого потенціометру Д2.
\$Select_RES1	// Інакше – канал Д2
RAMWRT SPI_CS_temp RES_1	// Запис до змінної адреси другого потенціометру Д2.
\$Send Data to RES //Процедура відправки даних до потенціометрів. //Очікування вивільнення TX FIFO SPI core. WAIT UNTIL INPUT4 // Читання значення зі змінної. RAMREAD SPI TX temp APBWRT ACC ResSPI SPI TX // Запис значення до TX FIFO SPI core. // Читання адреси потенціометру зі змінної. RAMREAD SPI CS temp APBWRT ACC ResSPI SPI CS // Запис адреси потенціометру до SPI core. LOADZ 230 // Завантаження часу затримки. CALL \$Delay // Виклик процедури затримки. APBWRT DAT ResSPI SPI CS 0 // Занулення адреси потенціометрів. RETURN

// Вихід.

11.3. Процедури зміни режимів детектування

Процедури встановлення різних режимів детектування заряджених частинок уявляють собою послідовність встановлення відповідних константних значень до цифрових потенціометрів, що відповідають за підсилення та рівні спрацювання пікових детекторів аналогового модулю, конфігурування модулю бази даних та рівня радіаційного фону.

Усі три процедури функціонально ідентичні, але винесені в окремі модулі вихідного коду для зручності редагування окремого режиму без необхідності внесення змін для інших режимів. Лістинг процедури переходу на перший режим детектування наведений в Таблиці 11.5.

Таблиця 11.5

Лістинг процедури переходу на перший режим детектування.

		// Блок констант режиму1.
def MODE1_D1_Gain	50	// Значення підсилення каналу Д1.
def MODE1_D1_CMP	256+15	// Значення порогу каналу Д1.
def MODE1_D2_Gain	512 + 50	// Значення підсилення каналу Д2.
def MODE1_D2_CMP	512 + 256+10	// Значення порогу каналу Д2.
def MODE1_AlarmLVL	0xFF1	
def MODE1_CW_L	10	// Рівень допустимого радіаційного фону.
//	-	// Довжина вікна співпадань.

- def MODE2_D1_Gain
 150

 def MODE2_D1_CMP
 256+10

 def MODE2_D2_Gain
 512 + 200

 def MODE2_D2_CMP
 512 + 256+10

 def MODE2_AlarmLVL
 0xFF3

 def MODE2_CW_L
 15
- def MODE3_D1_Gain
 240

 def MODE3_D1_CMP
 256+5

 def MODE3_D2_Gain
 512 + 240

 def MODE3_D2_CMP
 512 + 256+10

 def MODE3_AlarmLVL
 0xFF5

 def MODE3_CW_L
 25

APBWRT DAT DataBase DB MODE REG

RAMWRT SPI TX temp MODE1 D1 Gain

RAMWRT SPI TX temp MODE1 D1 CMP

RAMWRT SPI TX temp MODE1 D2 Gain

RAMWRT SPI TX temp MODE1 D2 CMP

CALL \$Send_GAIN_or_CMP_to_RES

CALL \$Send GAIN or CMP to RES

CALL \$Send GAIN or CMP to RES

CALL \$Send GAIN or CMP to RES

RAMWRT AlarmLvl MODE1 AlarmLVL

APBWRT DAT DataBase DB CW REG

// Блок констант режиму2.

// Значення підсилення каналу Д1.

// Значення порогу каналу Д1.

// Значення підсилення каналу Д2.

// Значення порогу каналу Д2.

// Рівень допустимого радіаційного фону.

// Довжина вікна співпадань.

// Блок констант режиму3.

// Значення підсилення каналу Д1.

// Значення порогу каналу Д1.

// Значення підсилення каналу Д2.

// Значення порогу каналу Д2.

// Рівень допустимого радіаційного фону.

// Довжина вікна співпадань.

// Точка входу встановлення режиму1.

// Сигналізація виконання.

//Запис значення режиму до ядра бази даних.
//Встановлення підсилення каналу Д1.

//Встановлення порогу ПД каналу Д1.

//Встановлення підсилення каналу Д2.

//Встановлення порогу ПД каналу Д2.

// Встановлення рівня радіаційного фону.

// Встановлення довжини вікна співпадань.

// Вихід.

RETURN

MODE1 CW L

\$SET REG1

IOWRT 2

MODE1

Процедури переходу на режим 2 та режим 3 абсолютно ідентичні окрім того, що передають встановлюють константні значення зі своїх блоків.

Як видно з Таблиці 11.5, процедура встановлення режиму детектування заряджених частинок – це макрокоманда, яка викликає почергове виконання процедур встановлення значень цифрових резисторів та конфігурування ядра бази даних.

11.4. Команда встановлення рівня припустимого радіаційного фону

Прилад SIDRA окрім визначення параметрів потоків заряджених частинок також виконує аналіз радіаційного фону оточуючого середовища. Аналіз радіаційного фону проводиться для того, щоб попередити про небезпечний рівень потоків заряджених частинок для детекторів приладу ChemiX, шляхом генерування відповідного аварійного повідомлення.

Командне повідомлення встановлення припустимого рівня радіаційного фону містить заголовок BPDD та назву команди SA + рівень радіаційного фону (16 біт). Рівень радіаційного фону представляється у вигляді мантиси (8 біт) та показника ступеню (4 біти). Старші 4 біти з 16 не використовуються і повинні мітити нульові значення. Лістинг процедури встановлення допустимого рівня радіаційного фону наведений в Таблиці 11.6.

Таблиця 11.6

Лістинг процедури встановлення допустимого рівня радіаційного фону.

\$SET_ALARM	// Точка входу до процедури.
IOWRT 16	// Сигналізація виконання.
RAMREAD CMD1	// Читання тіла команди.
RAMWRT AlarmLvl	// Встановлення допустимого рівню рад. фону.
RETURN	// Вихід.

Як видно з Таблиці 11.6, процедура встановлення допустимого рівня радіаційного фону не є складною і, фактично, записує до відповідної комірки пам'яті нове значення. Це значення центральний процесор порівнює з накопиченою інформацією і, в залежності від результату, видає аварійне повідомлення або переходить до своїх наступних задач.

11.5. Команда тестування аналогової та цифрової електроніки

Процес тестування аналогової та цифрової електроніки приладу SIDRA передбачає відпрацювання всього алгоритму детектування сортів заряджених частинах. А саме:

- Процес формування аналогових імпульсів у спектрометричних каналах аналогового модулю;
- 2) Перевірка правильності цифрування аналогових імпульсів;
- 3) Перевірка алгоритму визначення сорту та енергії заряджених частинок;
- 4) Перевірка процедури формування вихідного телеметричного кадру.

Для реалізації всіх пунктів, що зазначені вище, необхідно подавати на вхід детекторних каналів аналогового модулю послідовність тестових імпульсів конкретної сигнатури, а саме: відомою амплітудою, частотою та кількістю імпульсів. Так як цифровий модуль побудований на базі ПЛІС, то амплітуда імпульсів може бути лише TTL-рівнів. Це вирішується шляхом введення резистивного дільника на тестовому вході детекторних каналів аналогового модулю.

Щодо часових та кількісних характеристик послідовності тестових імпульсів – це реалізовано шляхом розробленого на мові VHDL окремого ядра TEST_core з інтерфейсом APB3 та двома pericтрами Pulses_count (кількість тестових імпульсів) та MODE (режим: test_on/test_off). TEST_core після запису до pericтру MODE значення test_on генерує послідовність тестових імпульсів з частотою 10 кГц. Послідовність імпульсів імітує всі вірні комбінації логіки співпадань, при цьому кількість імпульсів для кожної комбінації дорівнює значенню pericтра Pulses_count. Тестові імпульси потрапляють на тестові входи аналогового модулю та викликають у відповідних каналах імітацію проходження зарядженої частинки. Запуск тестової послідовності TEST_core проводиться центральним процесором шляхом виклику процедури тестування аналогової та цифрової електроніки. Процедура тестування електроніки викликається з тіла головної програми автоматично кожні 24 години. Лістинг процедури тестування аналогової та цифрової електроніки наведений в таблиці 11.7.

Таблиця 11.7

Лістинг процедури встановлення допустимого рівня радіаційного фону.

\$TEST_SIDRA	// Точка входу до процедури.
RETURN IF NOT INPUT8	// Перевірка таймеру.
IOWRT 115	// Сигналізація виконання.
APBWRT DAT TestCore Pulses_count 1000	// Запис кількості тестових імпульсів до TestCore.
APBWRT DAT TestCore test_on	// Запис режиму тесту до TestCore.

LOADZ 10	//Генерування затримки.
CALL \$Delay	
APBWRT DAT TestCore test_off	// Запис режиму завершення тесту.
CALL \$SetTestTimer	// Виклик процедури оновлення таймеру.
RETURN	// Вихід.

12. РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ НА ОНОВЛЕННЯ ПЛАТИ ЖИВЛЕННЯ

12.1. Основні розділи технічного завдання на коригування схем плати живлення

Технічне Завдання містить розділи, що відображають загальні вимоги, опис каналів вторинних напружень, вимоги до доробки принципової схеми електричної і топології існуючої версії плати вторинного живлення, семантику команд цифрової частини плати живлення (Додаток 2). Крім того, є Розділи, що описують структуру і порядок передачі інформаційного масиву цифрової частини вторинного живлення, протокол обміну інформаційними масивами цифрової частини плати живлення з зовнішніми пристроями. В окремому Розділі представлений опис відпрацювання команд і опитування термодатчиків; послідовність включення плати живлення, а також дії при виникненні аварійних ситуацій (Додаток 2).

Загальні вимоги до модулю вторинного живлення містять таке: плата вторинного живлення складається з двох ідентичних півкомплектів, які працюють почергово; живлення плати підключене до первинної мережі +27 В; цифрова частина плати живлення є загальною для обох пів комплектів. Інформаційний масив про стан приладу містить в собі дані про значення первинного і вторинних напружень, та дані, отримані з термодатчиків, що встановлені в різних точках приладу, а також інформацію про останню відпрацьовану команду, та наявність або відсутність аварійної ситуації.

12.2. Напруження вторинного живлення для приладу SIDRA

В Технічному Завданні представлена таблиця з переліком напружень вторинного живлення у розділі, що описує канали вторинного живлення. В таблиці 2.1 (Додаток 2) дано призначення каналів, вихідні напруження і максимальний вихідний струм по кожному з вторинних напружень. Канали зворотного зміщення детекторів частинок повинні передбачати плавне регулювання вторинних напружень на етапі настроювання і паралельні

77

посадкові місця під пайку SMD резисторів. При цьому діапазон регулювання не гірше, ніж 20-120 % від значень вихідного напруження.

12.3. Зміни у принциповій електричній схемі плати живлення

В технічному завданні перелічені зміни до принципової електричної схеми і топології друкованої плати живлення (Додаток 2). Визначена необхідність пере компоновки розташування елементів з метою мінімізації геометричних розмірів. В електричній схемі принциповій і топології плати замінити DC/DC перетворювачі A1, A2, A3, A4, A5, A6 виробництва в каналах генерування напружень зміщення кремнієвих детекторів на перетворювачі EMCO. Треба додати також до схеми додатковий термодатчик поблизу DC/DC конвертерів A1, A2, A3, A4, A5, A6.

Під час трасування друкованої плати необхідно передбачити встановлення двох додаткових роз'ємів для підключення зовнішніх температурних датчиків: одного з'єднувача WF-8 для прийому сигналів від 4-х термодатчиків, встановлених на аналоговій платі, і одного з'єднувача WF-4 для прийому сигналів від 2-х термодатчиків, встановлених на цифровій платі. В електричній схемі також треба передбачити схему перетворення показів зовнішніх термодатчиків в цифровий код. У якості термодатчиків використовувати термістори при температурі 25⁰ C.

В схемі електричній треба замінити DC/DC конвертери в каналах живлення плати цифрової обробки сигналів (+5 В, I=600 мА) A10, A11 на перетворювачі з вихідним напруженням 3.3 В і максимальним струмом I=1200 мА. Треба замінити конденсатори C13 і C14 на конденсатори, які допускаються для використання у відкритому космосі, з списку дозволених компонентів Європейського Космічного Агентства. Нарешті, треба переробити реалізацію відпрацювання команд в схемі електричній з огляду доповнення цифровою частиною плати живлення і заміни реле і оптопар на оновлену елементну базу.

12.4. Перелік і структура командних повідомлень для підмодулю логіки плати живлення

В Таблицях 4.1 і 4.2 Технічного завдання на коригування функціональної і принципової електричних схем плати вторинного живлення дано опис переліку, вмісту і структури командних повідомлень, що надходять від рентгенівського спектрофотометру ChemiX до логічного підмодулю плати вторинного живлення прототипу приладу SIDRA (Додаток 2). Серед командних повідомлень є такі:

+ 1) і 2) включити і вимкнути прилад (символьні позначення ONPS та OFPS, відповідно);

- 3) і 4) увімкнути перший або другий півкомплекти плати живлення (символьні позначення SLP1 та SLP2, відповідно);
- + 5) включити монітор вторинних і первинного напружень плати живлення (MVON);
- + 6), 7) і 8) перейти на перший, другий або третій режими детектування частинок легкі ядра + електрони, середні ядра або важкі ядра (символьні позначення REG1, REG2 і REG3, відповідно);
- + 9) зробити тестування аналогової і цифрової частин приладу SIDRA (TEST);
- + 10) встановити або змінити опорний рівень радіаційної обстановки, при якій відбувається видавання аварійного повідомлення (SA + value);
- + 11) відрегулювати рівень спрацювання пікових детекторів аналогового модулю (CL + value);
- 12) відрегулювати коефіцієнт підсилення масштабуючих підсилювачів аналогових модулів (CG + value);
- + 13) прийняти код бортового часу у розмірі 4 байти від системи збирання наукової інформації ССНИ (ТІМЕ).

12.5. Структура і порядок передавання інформаційного масиву цифрової частини плати живлення

В таблиці 5.1 Технічного завдання представлена розшифровка інформаційного масиву, який передається платою живлення (Додаток 2). Масив складається з пакетів даних об'ємом по 32 біти. Першим передається заголовок, далі:

- + поточний код бортового часу;
- + пакети даних з інформацією про наявність або відсутність аварійної ситуації в приладі;
- + пакет, що відбиває номер активного на даний момент півкомплекта;
- + пакети, що містять дані про вторинні напруги після відпрацювання команди «MVON»;
- + пакети, що містять інформацію про значення термодатчиків;
- + пакет даних про останню відпрацьовану команду;
- + пакет даних, в якому розміщується значення контрольної суми.

Протокол обміну цифрової частини плати живлення з зовнішніми пристроями – послідовний SPI інтерфейс. Ця частина повинна бути побудована з двох блоків: один працює тільки на прийом команд, другий блок здійснює вигризку кадру. На рисунках 6.1-6.3 Технічного завдання наведена структурна схема приладу і епюри обміну за послідовним інтерфейсом зв'язку SPI (Додаток 2).

В сьомому розділі дається опис відпрацювання команд і опитування термодатчиків. Вказується, що команда повинна пройти перевірку на відповідність одній зі списку дозволених команд для плати живлення. В разі надходження команди, що адресована не для плати живлення або ж некоректного командного слова, прийняті дані видалються з буферу прийому і продовжується нормальна робота плати живлення згідно попереднім уставленням.

РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ МОДУЛЮ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ПРОТОТИПУ ПРИЛАДУ SIDRA

В системі автоматизованого проектування Altium Designer 14 була розроблена схема електрична принципова прототипу цифрового модулю приладу SIDRA на базі мікросхеми ПЛІС ProAsic A3PE1500 у корпусі PQ-208.

13.1. Структурна схема цифрового модулю.

Розроблена структурна схема модулю цифрової обробки сигналів прототипу приладу SIDRA приведена на рис. 13.1. Вона включає в себе чотири функціональних блоки: підсистему живлення, блок електричних з'єднувачів; блок енергонезалежного постійного запам'ятовуючого пристрою для збереження початкових конфігураційних параметрів, та блок програмованої логічної інтегральної схеми (ПЛІС) ProAsic 3E A3PE1500-1PQ208.



Рис. 13.1 Структурна схема модулю цифрової обробки сигналів прототипу приладу SIDRA.

Підсистема живлення генерує необхідні напруги для роботи ПЛІС та плати цифрової обробки сигналів в цілому. Блок електричних з'єднувачів виконує функції зв'язку внутрішніх сигналів цифрового модулю з його зовнішніми інтерфейсами. Зокрема, через блок з'єднувачів до модулю аналогової обробки сигналів надсилаються сигнали тестування електроніки, управління цифровими потенціометрами, управління системами термостабілізації детекторів, управління піковими детекторами. В свою чергу, від модулю обробки з'єднувачів аналогової сигналів до блоку надсилаються сигнали віл спектрометричних аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), а також статусні сигнали пікових детекторів. До блоку з'єднувачів також надходять командні повідомлення для налаштування необхідного режиму роботи приладу в цілому. Через блок з'єднувачів також вивантаження накопиченої телеметричної інформації до зовнішнього здійснюється пристрою.

Блок ПЛІС ProAsic 3E A3PE1500-1PQ208 виконує функції обробки сигналів пікових детекторів та кодів АЦП, управління режимами роботи модулю аналогової обробки сигналів та систем термостабілізації детекторів частинок, формування телеметричних кадрів і відпрацювання зовнішніх команд. Блок енергонезалежного постійного запам'ятовуючого пристрою призначений для збереження початкових налаштувань цифрового модулю та табульованих даних з енергетичних втрат заряджених частинок різних сортів і енергій.

13.2. Блок живлення.

Для живлення модулю цифрової обробки сигналів необхідні наступні рівні напруг: +3.3 В та +1.5 В. Напруга +1.5 В використовується для живлення ядра ПЛІС ProAsic 3E A3PE1500-1PQ208; напруга +3.3 В призначена для живлення банків введення-виведення ПЛІС та плати модулю цифрової обробки сигналів в цілому. Розроблена принципова електрична схема підсистеми живлення модулю цифрової обробки сигналів передбачає генерування напруги +1.5 В. Напруга +3.3 В надходить з плати вторинного живлення приладу та проходить в розробленій схемі крізь ємнісний фільтр.

Вторинна напруга +1.5 В генерується від первинної напруги +3.3 В за допомогою DC-DC перетворювача типу TPS75 виробництва "Texas Instruments". Особливістю обраного перетворювача є високий коефіцієнт корисної дії (до 95%), висока стабільність рівня вихідної напруги завдяки інтегрованим в мікросхемі ланцюгам зворотного зв'язку, захист від високої температури. Падіння вихідної напруги перетворювача не більше 200 мВ при максимальному робочому струмі.

Максимальний струм ланцюгів вихідної напруги +1.5 В може складати 2 А. Максимальний струм ланцюгів фільтрованої напруги +3.3 В обмежений вихідним струмом каналу +3.3 В плати вторинного живлення. Принципова електрична схема блоку живлення представлена на рис. 13.2.



Рис.13.2. Схема електрична принципова блоку живлення.

13.3. Блок електричних з'єднувачів

Принципова електрична схема з'єднань цифрового блоку, що приведена на рис. 13.3, містить в собі найменування електричних ланцюгів та з'єднувачі з модулями аналогової оброби сигналів і вторинного живлення. Для зв'язку з модулем аналогової обробки сигналів є два з'єднувачі типу IDC-40: P1_D та P2_D. Через з'єднувач P1_D надсилаються сигнали тестування електроніки: Test_D1, Test_D2, Test_D3, Test_D4; сигнали протоколу SPI для управління цифровими потенціометрами; сигнали управління другим каналом системи термостабілізації детекторів частинок. До з'єднувача P2_D від аналогового модулю надходять статусні сигнали пікових детекторів; цифровані значення амплітуд від АЦП кожного спектрометричного каналу (коди АЦП). Крім того, Через з'єднувач P2_C надсилаються сигнали управління першим каналом системи термостабілізації детекторів частинок.

Для зв'язку з зовнішніми пристроями управління та прийому накопиченої приладом телеметричної інформації передбачені з'єднувачі Р4_D та P8_D. До з'єднувача Р4_D надходять сигнали, що реалізують послідовний SPI-протокол зв'язку: CLKA(B), SSELA(B),

MISOA(B), MOSIA(B). До з'єднувача Р8_D надходять сигнали, що реалізують послідовний UART-протокол зв'язку: UART1(2)_TX, UART1(2)_RX.

Для зв'язку з цифровою частиною модулю вторинного живлення приладу використовується з'єднувач Р7_D. Через з'єднувач Р7_D до модулю вторинного живлення надходять сигнали, що реалізують послідовний SPI-протокол зв'язку: PU_MCLKO, PU_MSSEL, PU_MISO, PU_MOSI, Додаткова лінія PU_IS_DATA сигналізує наявність готової телеметричної інформації цифрової частини плати вторинного живлення.



Рис. 13.3 Схема електрична принципова модулю електричних з'єднувачів.

13.4. Блок постійного запам'ятовуючого пристрою.

Розроблена принципова електрична енергонезалежного постійного схема запам'ятовуючого (ПЗП) рис. 13.4) збереження пристрою (див. для початкових ПЗП конфігураційних параметрів. Блок призначений збереження для початкових

налаштувань модулю цифрової обробки сигналів та табульованих даних з енергетичних втрат елементарних заряджених частинок різних сортів та енергій.

В якості ПЗП обрана мікросхема флеш - пам'яті серії SST26 виробництва "Місгосһір Technology Inc.". ПЗП цієї серії має такі ключові характеристики: об'єм пам'яті – 8 Мбайт; мінімальна кількість циклів перезапису інформації – 100 000; напруга живлення – 2.3 ... 3.6 В; максимальна частота синхронізації – 104 МГц; енергоспоживання – 15 мА (читання, для частоти синхронізації 104 МГц), 15 мкА (очікування); інтерфейс читання-запису інформації – послідовний SPI з можливістю розширення шини даних Serial Quad I/O. Процедуру читання та запису даних до блоку ПЗП виконує програмована логічна інтегральна схема (ПЛІС) ProAsic 3E A3PE1500-1PQ208 за допомогою SPI-протоколу.



Рис. 13.4 Принципова електрична схема енергонезалежного постійного запам'ятовуючого пристрою цифрового модулю.

13.5. Конфігурація банків введення / виведення ПЛІС ProAsicA3PE1500.

Програмована логічна інтегральна схема (ПЛІС) ProAsic 3E A3PE1500-1PQ208 має 147 ліній введення-виведення сигналів, функції яких можуть бути визначені розробником (рис. 13.5). Всі лінії розподілені на вісім незалежних банків. Кожному банку може бути заданий окремий логічний рівень (1.5, 1.8, 2.5 і 3.3 В). Ланцюгам банку № ВАNКО за номерами від IO08NDB(PDB)0V1 до IO27NDB(PDB)0V3 відповідають вихідні сигнали: тестування спектрометричних аналогових каналів детекторів від D1 до D4 (4 сигнали) ; управління цифровими потенціометрами аналогового модулю (6 сигналів); управління другого каналу

термостабілізації (3 сигнали). Ланцюгам цього банку № GAB1/IO01PDB0V0 і GAC1/IO02PDB0V0 відповідають сигнали UART-інтерфейсу.

Банки № ВАNК1 і № ВАNК4 незадіяні. Ланцюгам банку № ВАNК2 за номерами IO73NDB2V2, IO81PSB2V3, IO83NDB2V3 і IO83PDB2V3 відповідають сигнальні лінії послідовного SPI-протоколу обміну даними з бортовим комп'ютером. Ланцюгам банку № ВАNКЗ за номерами IO88NDB3V0, IO101NDB3V1, IO101PDB3V1 IO105NDB3V2 і IO105PDB3V2 відповідають сигнальні лінії послідовного SPI-інтерфейсу обміну даними з цифровою частиною модулю вторинного живлення.

Ланцюгам банку № ВАNК5 за номерами IO135NDB5V0, IO135PDB5V0, IO137NDB5V0 і IO137PDB5V0 відповідають сигнальні лінії послідовного SPI-інтерфейсу обміну даними з енергонезалежним постійним запам'ятовуючим пристроєм. До лінії GEC2/IO164PDB5V3 надходить сигнал системного перезавантаження ПЛІС.

Ланцюгам банку № ВАNК6 за номерами від ІО176РDB6V1 до ІО189NDB6V2 відповідають статусні сигнали пікових детекторів каналів D3 і D4 та сигнали SPI-інтерфейсу читання кодів аналого-цифрового перетворювача (АЦП) каналу D3. До ланцюгу GFA0/IO190NPB6V2 цього ж банку надходить сигнал тактування ПЛІС. Ланцюгам банку № ВАNК7 за номерами від IO196PSB7V0 до IO221NDB7V3 відповідають статусні сигнали пікових детекторів каналів D1 і D2, сигнали SPI-інтерфейсу читання кодів АЦП каналів D1 і D2, та сигнали управління першим каналом системи термостабілізації детекторів частинок.

13.6. Інтерфейс програмування, схема скидання та блок генерації сигналу синхронізації ПЛІС.

Розроблена принципова електрична схема інтерфейсу програмування JTAG ПЛІС ProAsic 3E A3PE1500-1PQ208 приведена на рис. 13.6. Вона включає в себе 4-канальний цифровий буфер (U3_D1) з наявністю сигнальних виходів з 3-им станом, з'єднувач IDC10 (P1_D1) для підключення програматору FlashPro4. В схемі врахована відповідність сигнальних ліній програматора, буферу та виводів TDI, TDO, TCK, TMS та TRST ПЛІС ProAsic 3E A3PE1500-1PQ208.

Розроблена принципова електрична схема генерування сигналу синхронізації ПЛІС ProAsic 3E A3PE1500-1PQ208. Вона базується на високо стабільному кварцовому генераторі серії M581L40002IT з частотою 40 МГц. Температурна стабільність генератору складає не більше 100 ppm/град С. Рівень вихідного сигналу генератору – HCMOS.

Електрична схема примусового перезавантаження ПЛІС ProAsic 3E A3PE1500-1PQ208 "Manual System RESET" базується на мікросхемі двоканального цифрового одновібратору серії 74LV123AFP, перемикачі примусового перезавантаження та блоці індикації. Один з двох каналів одновібратору відповідає за світову індикацію, в той час, як другий канал генерує імпульс перезавантаження ПЛІС. Схема приведена на рис. 13.7



Рис. 13.5 Схема електрична принципова відповідності ліній введення/виведення ПЛІС ProAsicA3PE1500 сигналам блоку електричних з'єднувачів.



Рис. 13.6 Принципова електрична схема інтерфейсу програмування JTAG ПЛІС ProAsic 3E A3PE1500-1PQ208.



Рис. 13.7 Електрична схема примусового перезавантаження ПЛІС ProAsic 3E A3PE1500-1PQ208.

14. СКЛАДАННЯ ПЕРЕЛІКУ ЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ ПЛАТИЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ТА ОЦІНКА ВАРТОСТІ РАДІОКОМПОНЕНТІВ ТА ВИГОТОВЛЕННЯ ПЛАТИ

14.1. Перелік компонентів прототипу цифрового модулю приладу.

Складений перелік електронних компонентів прототипу цифрового модулю приладу SIDRA. Цифровий модуль складається з двох однакових полу комплектів електроніки. Вибір комплектів реалізований шляхом подачі питаючої напруги на живильний з'єднувач. У таблиці 14.1 приведений перелік елементів одного з комплектів електроніки.

Таблиця №14.1

No e e	Порионалия	Have commonly	Кількіст
JN≌ 11.11.	позначення	паименування	Ь
1	C1_D1, C2_D1, C3_D1,	SMT конденсатор, розмір 0603,	28
	C4_D1, C5_D1, C6_D1,	10 нФ, 50В, 10%	
	C7_D1, C8_D1, C9_D1,		
	C10_D1, C11_D1, C12_D1,		
	C13_D1, C14_D1, C15_D1,		
	C16_D1, C20_D1, C21_D1,		
	C23_D1, C24_D1, C25_D1,		
	C26_D1, C27_D1, C28_D1,		
	C30_D1, C32_D1, C33_D1,		
	C37_D1		
2	C1_E	SMT конденсатор, розмір 0603,	1
		0.1 мкФ, 50В, 10%	
3	C1_P, C4_P	SMT конденсатор, розмір 0603,	2
		0.22 мкФ, 50В, 10%	
4	C2_P, C3_P, C5_P, C6_P	SMT танталовий конденсатор	4
		194D476X0015H2, розмір Н, 47 мкФ,	
		15B, 20%	
5	C17_D1, C18_D1	SMT танталовий конденсатор	2
		194D106X0015E2, розмір Е, 10 мкФ,	
		20B, 20%	
6	C19_D1, C22_D1	SMT конденсатор, розмір 0603,	2
		0.1 мкФ, 50В, 10%	

Перелік елементів першого комплекту електроніки плати цифрового модулю приладу SIDRA

7	C29_D1	SMT конденсатор, розмір 0603,	1
		0.1 мкФ, 16В, 10%	
8	C31_D1	SMT конденсатор, розмір 0603,	1
		0.33 мкФ, 16В, 10%	
9	C34_D1, C35_D1	SMT конденсатор, розмір 0603,	2
		1 мкФ, 16В, 10%	
10	C36_D1	SMT конденсатор, розмір 0603, 1 нФ,	1
		50B, 10%	
11	D1_C, D1_E, D2_C, D2_E	SMT діод Шоткі	4
		MBR0520, SOD123, 0.5A, 20B	
12	D1_D1	Світлодіод	1
13	K1_P	Поляризоване реле TLSS5P, TO-5, 28	1
		V, 1 A	
14	P1_C, P2_C	З'єднувач ВН-40	2
15	P1_D1	З'єднувач ВН-10	1
16	P1_P	З'єднувач WF-6	1
17	P3_C	З'єднувач ВН-10	1
18	P4_C	З'єднувач ВН-12	1
19	P5_C	З'єднувач ВН-8	1
20	P6_C	З'єднувач WF-3	1
21	Q1_D1	NPN транзистор MMBT2222A,	1
		SOT23	
22	R1_C, R2_C, R3_C, R4_C,	SMT резистор, розмір 0603, 270 Ом, 5	57
	R4_D1, R5_C, R6_C, R7_C,	%	
	R7_D1, R8_C, R9_C, R10_C,		
	R11_C, R12_C, R13_C, R14_C,		
	R15_C, R16_C, R17_C, R18_C,		
	R19_C, R20_C, R21_C, R22_C,		
	R23_C, R24_C, R25_C, R26_C,		
	R27_C, R28_C, R29_C, R30_C,		
	R31_C, R32_C, R33_C, R34_C,		
	R35_C, R36_C, R37_C, R38_C,		
	R39_C, R40_C, R41_C, R42_C,		
	R43_C, R44_C, R45_C, R46_C,		
	R47_C, R48_C, R49_C, R50_C,		
	R51_C, R52_C, R53_C, R54_C,		
	R55_C		
23	R1_D1, R2_D1, R12_D1,	SMT резистор, розмір 0603, 10 кОм, 5	4
	R13_D1	%	
		SMT nonversion nonvin 0602 100 kOv	4

		5 %	
25	R2_E, R3_E, R4_E, R5_E,	SMT резистор, розмір 0603, 300 Ом, 5	8
	R6_E, R7_E, R8_E, R9_E	%	
26	R2_P, R5_P	SMT резистор, розмір 0603, 4.99 kOм,	2
		1 %	
27	R3_D1	SMT резистор, розмір 0603, 18.2 kOм,	1
		1 %	
28	R3_P, R4_P	SMT резистор, розмір 0603, 1 кОм, 5	2
		%	
29	R5_D1	SMT резистор, розмір 0603, 150 Ом, 5	1
		%	
30	R6_D1	SMT резистор, розмір 0603, 3.3 kOм,	1
		5 %	
31	R8_D1, R9_D1, R10_D1	SMT резистор, розмір 0603, 2 kOм, 5	3
		%	
32	R11_D1	SMT резистор, розмір 0603, 221 kOм,	1
		5 %	
33	R56_C, R57_C, R58_C, R59_C,	SMT резистор, розмір 0603, 100 kOм,	23
	R60_C, R61_C, R62_C, R63_C,	5 %	
	R64_C, R65_C, R66_C, R67_C,		
	R68_C, R69_C, R70_C, R71_C,		
	R72_C, R73_C, R74_C, R75_C,		
	R76_C, R77_C, R78_C		
34	S1_D1	SPST-2 перемикач	1
35	U1_D1	Мікросхема ProASIC3E A3PE1500 -	1
		PQ208	
36	U1_E	Мікросхема пам'яті 25АА1024Т-	1
		I/SM, SOIC-8	
37	U1_P, U2_P	Мікросхема TPS75215, HTSSOP-20	2
38	U2_D1	Мікросхема HD74LV123AFP, SOP-16	1
39	U3_D1	Мікросхема SN74LVC125APWLE,	1
		TSOP-14	
40	Y1_D1	Кварцовий осцилятор M581L40002IT	1

14.2. Оцінка вартості виготовлення електронного модулю цифрового модулю.

В таблиці 14.2 приведена інформація для оцінки вартості виготовлення прототипу цифрового модулю приладу SIDRA. Оцінена вартість виготовлення цифрового модулю без врахування робіт з розробки принципової електронної схеми та трасування друкованої плати

склала 12 383 грн. (476 доларів США). Враховані вартості електронних компонентів, виготовлення друкованої плати та монтажних робіт. Монтажні роботи оцінені згідно прасу компанії ООО «СК-Техно». Також в якості цільової мікросхеми ПЛІС обраний промисловий зразок типу АЗРЕ1500 вартістю 152 долари, який поставляється від одного екземпляру. Для виготовлення льотного зразку цифрового модулю необхідний зразок М1 АЗРЕ1500, що має воєнну прийомку.

Таблиця № 14.2

Мопп	Найменурания	Kin rich	Ціна за од.,	Піна грн	
JN≌ 11.11.			грн.	1 , 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,	
1	SMT конденсатор, розмір 0603	76	0.25	19	
2	SMT танталовий конденсатор	12	18.25	219	
3	SMT резистор, розмір 0603	214	0.06	12.84	
4	SMT діод Шоткі	8	1	8	
5	Світлодіод	2	6	12	
6	З'єднувач ВН-40	2	6.5	13	
7	З'єднувач ВН-10	2	5	5	
8	З'єднувач WF-6	1	1.7	1.7	
9	З'єднувач ВН-12	1	5	5	
10	З'єднувач ВН-8	1	5	5	
11	З'єднувач WF-3	1	0.8	0.8	
12	NPN транзистор MMBT2222A	2	1.25	2.5	
13	SPST-2 перемикач	2	10	20	
14	Мікросхема ProASIC3E A3PE1500 -	2	3982	7964	
11	PQ208	2	5702	7704	
15	Мікросхема пам'яті 25АА1024Т-І/SM,	1	78	78	
_	SOIC-8				
16	Мікросхема TPS75215, HTSSOP-20	2	215	430	
17	Мікросхема HD74LV123AFP, SOP-16	2	12	24	
18	Мікросхема SN74LVC125APWLE, TSOP-	2	6	12	
	14	_			
19	Кварцовий осцилятор M581L40002IT	2	72	144	
20	Виготовлення друкованої плати	1	3286.44	3286.44	
21	Монтажні роботи	416	0.29	120.64	
	Всього			12382.92	

Оцінка вартості виготовлення плати цифрового модулю приладу SIDRA

15. ТРАСУВАННЯ ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

У середі автоматизованого проектування Altium Designer 14.1 проведене трасування друкованої плати модулю цифрової обробки сигналів приладу SIDRA згідно розробленої схеми електричної принципової. Топологія друкованої плати та загальній вигляд плати цифрового модулю приведений на рис. 15.1.



Рис. 15.1 Топологія (зверху) та загальній вигляд (знизу) друкованої плати цифрового модулю.

Загальний розмір друкованої плати складає 163 х 100 мм. По краях плати маються чотири монтажні отвори діаметром 3 мм, за допомогою яких плата кріпиться в середині свого механічного корпусу.

Всі резистори та конденсатори, за виключенням конденсаторів великої ємності, використані у топології друкованій плати, мають розміри SMT компонентів 0603. Мікросхема ПЛІС АЗРЕ1500, використана у цифровому модулі, має планарний 208-виввідий корпус PQ208, з кроком виводів 0.5 мм. Інші мікросхеми, такі як мікросхема енергонезалежної пам'яті, мікросхема перетворювача напруги, мікросхема цифрового буферу та мікросхема цифрового одновібратора, мають мініатюрні корпуси SOIC таTSSOP.

Для з'єднання з модулем аналогової обробки сигналів використані два 40-вивідних з'єднувачі типу ВН-40. Для інтерфейсу перепрограмування матриці ПЛІС використовується 10-вивідний з'єднувач типу ВН-10. Для електричних інтерфейсів з'єднання з цифровою частиною модулю живлення передбачені посадочні місця для з'єднувачів типу ВН-8 та ВН-12. Живлення плати цифрового модулю подається на чотирьох контактний з'єднувач типу HU-4.

Сигнальні лінії виконані друкованими провідниками товщиною 0.3 мм, лінії живлення – товщиною 1 мм, всі земляні контакти схеми з'єднані загальними полігонами на обох сторонах друкованої плати. Всі перехідні отвори мають внутрішній діаметр 0.4 мм та діаметр контактної площадки 0.8 м.

16. РОЗРОБКА ЗАГАЛЬНОЇ СХЕМИ МІЖПЛАТНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ З'ЄДНАНЬ ПРИЛАДУ

16.1. Загальна схема міжплатних електричних з'єднань.

Розроблена загальна схема міжплатних електричних з'єднань приладу SIDRA, яка включає в себе перелік всіх модулів приладу, електричні інтерфейси між ними та найменування електричних кабелів і з'єднувачів. На рис. 16.1 представлена загальна схема приладу SIDRA.

Схема включає в себе плати модулів аналогової (А3) та цифрової (А4) обробки сигналів, модулю живлення (А2), детекторний модуль (А1), з'єднувачі та кабелі. Також приведені з'єднання за допомогою коаксіальних кабелів (J38, J40, J42, J48, J52) аналогового модулю з детекторним модулем та вивід на передню панель контрольних точок плати аналогового модулю (J23, J24, J33, J36, J54, J56, J57). Кабелі з позначками К1 – К4 з'єднують плати модуля живлення та модуля аналогової обробки сигналів. Кабелі К5 та К6 з'єднують плати

модулів аналогової та цифрової обробки сигналів. Кабелі К7, К8 та К9 з'єднують плати модуля живлення та цифрової обробки сигналів. Кабелі К10 та К11 виводять на приборну панель приладу швидкісні цифрові інтерфейси приладу SIDRA. І, нарешті, по кабелю К12 до плати вторинного живлення потрапляє питаюча напруга +27В.

16.2. Найменування ланцюгів і контактів кабельних з'єднувачів.

Розкриття найменувань сигнальних ланцюгів та відповідність контактів з'єднувачів кожного з кабелів приведені у таблицях № 16.1 – № 16.12.



Рис. 16.1 Загальна схема міжплатних електричних з'єднань приладу SIDRA.

Найменування	Номер	TT V	Номер	Найменування
з'єднувача (тип)	контакту	паименування ланцюга	контакту	з'єднувача (тип)
	1	-5B	1	
	2	-5B	2	
XS7	3	«ЗЕМЛЯ»	3	XS1
(HU-6)	4	«ЗЕМЛЯ»	4	(HU-6)
	5	+5B	5	
	6	+5B	6	

Найменування сигналів та контактів з'єднувачів кабелю К1

Таблиця № 16.2

Найменування сигналів та контактів з'єднувачів кабелю К2

Найменування	Номер	11. v	Номер	Найменування
з'єднувача (тип)	контакту	наименування ланцюга	контакту	з'єднувача (тип)
XS1	1	«ЗЕМЛЯ»	1	XS2
(HU-2)	2	+35B	2	(HU-2)

Таблиця № 16.3

Найменування сигналів та контактів з'єднувачів кабелю КЗ

Найменування	Номер		Номер	Найменування
з'єднувача (тип)	контакту	наименування ланцюга	контакту	з'єднувача (тип)
	1	«ЗЕМЛЯ»	1	XS3
XS2	2	+200B	2	(HU-2)
(HU-2)	1	«ЗЕМЛЯ»	1	XS4
	2	+200B	2	(HU-2)

Таблиця № 16.4

Найменування	Номер	Цайнонирания данного	Номер	Найменування
з'єднувача (тип)	контакту	паименування ланцюга	контакту	з'єднувача (тип)
XS3	1	«ЗЕМЛЯ»	2	XS5
(HU-2)	2	+70B	1	(HU-2)

Найменування	Номер		Номер	Найменування
з'єднувача (тип)	контакту	наименування ланцюга	контакту	з'єднувача (тип)
	1	«ЗЕМЛЯ»	40	
	2	TEMSTAB_2_SHDN	39	
	3	«ЗЕМЛЯ»	38	
	4	TEMSTAB_2_OT	37	
	5	«ЗЕМЛЯ»	36	
	6	TEMSTAB_2_UT	35	
	7	«ЗЕМЛЯ»	34	
	8	Не задіяний	33	
	9	«ЗЕМЛЯ»	32	
	10	Не задіяний	31	
	11	«ЗЕМЛЯ»	30	-
	12	Не задіяний	29	
	13	«ЗЕМЛЯ»	28	-
	14	Не задіяний	27	-
XS7	15	«ЗЕМЛЯ»	26	S1_C
(IDC-40F)	16	Не задіяний	25	(IDC-40F)
	17	«ЗЕМЛЯ»	24	
	18	Не задіяний	23	
	19	«ЗЕМЛЯ»	22	
	20	Не задіяний	21	
	21	«ЗЕМЛЯ»	20	
	22	Res_CS_1	19	
	23	«ЗЕМЛЯ»	18	-
	24	Res_CS_2	17	
	25	«ЗЕМЛЯ»	16	
	26	Res_CS_3	15	
	27	«ЗЕМЛЯ»	14	1
	28	Res_SDI	13	1
	29	«ЗЕМЛЯ»	12	
	30	Res_CLK	11	1

31	«ЗЕМЛЯ»	10	
32	Res_SDO	9	
33	«ЗЕМЛЯ»	8	
34	Test_D1	7	
35	«ЗЕМЛЯ»	6	
36	Test_D2	5	
37	«ЗЕМЛЯ»	4	
38	Test_D3	3	
39	«ЗЕМЛЯ»	2	
40	Test_D4	1	

Найменування	Номер	Ш. <u>ж</u>	Номер	Найменування
з'єднувача (тип)	контакту	наименування ланцюга	контакту	з'єднувача (тип)
	1	«ЗЕМЛЯ»	40	
	2	TEMSTAB_1_SHDN	39	-
	3	«ЗЕМЛЯ»	38	-
	4	TEMSTAB_1_OT	37	-
	5	«ЗЕМЛЯ»	36	
	6	TEMSTAB_1_UT	35	-
	7	«ЗЕМЛЯ»	34	S2_C (IDC-40F)
	8	CS_ADC_D1	33	
VSQ	9	«ЗЕМЛЯ»	32	
(IDC 40E)	10	CLK_ADC_D1	31	
(1DC-4017)	11	«ЗЕМЛЯ»	30	
	12	SDO_ADC_D1	29	
	13	«ЗЕМЛЯ»	28	
	14	PD_OUT_D1	27	
	15	«ЗЕМЛЯ»	26	
	16	PD_hold_peak_D1	25	
	17	«ЗЕМЛЯ»	24	
	18	Reset_PD	23	
	19	«ЗЕМЛЯ»	22	1

20	CS_ADC_D2	21	
21	«ЗЕМЛЯ»	20	
22	CLK_ADC_D2	19	
23	«ЗЕМЛЯ»	18	
24	SDO_ADC_D2	17	
25	«ЗЕМЛЯ»	16	
26	PD_OUT_D2	15	
27	«ЗЕМЛЯ»	14	
28	PD_hold_peak_D2	13	
29	«ЗЕМЛЯ»	12	
30	CS_ADC_D3	11	
31	«ЗЕМЛЯ»	10	
32	CLK_ADC_D3	9	
33	«ЗЕМЛЯ»	8	
34	SDO_ADC_D3	7	
35	«ЗЕМЛЯ»	6	
36	PD_OUT_D3	5	
37	«ЗЕМЛЯ»	4	
38	PD_hold_peak_D3	3	
39	«ЗЕМЛЯ»	2	
40	PD_OUT_D4	1	
•	•		

Найменування сигналів та контактів з'єднувачів кабелю К7

Найменування	Номер	II	Номер	Найменування
з'єднувача (тип)	контакту	наименування ланцюга	контакту	з'єднувача (тип)
	1	+3.3B	4	
XS8	2	+3.3B	3	S1_P
(HU-4)	3	«ЗЕМЛЯ»	2	(HU-4)
	4	«ЗЕМЛЯ»	1	

Таблиця № 16.8

з'єднувача (тип)	контакту		контакту	з'єднувача (тип)
	1	PU_IS_DATA	1	
	2	PU_IS_DATA	2	
	3	PU_MSSEL	3	
	4	PU_MSSEL	4	
	5	PU_MCLKO	5	
XS4	6	PU_MCLKO	6	S4_C
(IDC-12F)	7	PU_MISO	7	(IDC-12F)
	8	PU_MISO	8	
	9	PU_MOSI	9	
	10	PU_MOSI	10	
	11	«ЗЕМЛЯ»	11	
	12	«ЗЕМЛЯ»	12	

Найменування сигналів та контактів з'єднувачів кабелю К9

Найменування	Номер	11	Номер	Найменування
з'єднувача (тип)	контакту	наименування ланцюга	контакту	з'єднувача (тип)
	1	MOSIA	4	
	2	MOSIB	3	
	3	BPDSSA	2	
XS5	4	BPDSSB	1	S5_C
(IDC-8F)	5	CLKA		(IDC-8F)
	6	CLKB		
	7	«ЗЕМЛЯ»		
	8	«ЗЕМЛЯ»		

Таблиця № 16.10

Розкриття найменувань сигналів та контактів з'єднувачів кабелю К10

Найменування	Номер	11 ×	Номер	Найменування
з'єднувача (тип)	контакту	наименування ланцюга	контакту	з'єднувача (тип)
S6 C	1	UART_TX	2	XP3
(HU-3)	2	UART_RX	3	(D-SUB 9)
(110 3)	3	«ЗЕМЛЯ»	5	

Найменування	Номер	Have a second a second	Номер	Найменування
з'єднувача (тип)	контакту	паименування ланцюга	контакту	з'єднувача (тип)
	1	CLKA	3, 4	
	2	CLKB	12, 14	
	3	BPDSSA	1, 2	
	4	BPDSSB	11, 12	
S3_C	5	MISOA	5, 6	XP2
(IDC-10F)	6	MISOB	15, 16	(MDM21S)
	7	MOSIA	7, 8	
	8	MOSIB	17, 18	
	9	DGNDA	9, 10	
	10	DGNDB	19, 20	

Розкриття найменувань сигналів та контактів з'єднувачів кабелю К11

Таблиця № 16.12

Розкриття найменувань сигналів та контактів з'єднувачів кабелю К12

Найменування	Номер	Hoži componing pomiono	Номер	Найменування
з'єднувача (тип)	контакту	наименування ланцюга	контакту	з'єднувача (тип)
	1	-27B	3, 4	
XS_10	2	-27B	8, 9	XP1
(HU-4)	3	+27B	1, 2	(MDM9S)
	4	+27B	6, 7	

Був складений перелік елементів до загальної схеми між модульних з'єднань приладу SIDRA, який також включає перелік всіх кабельних з'єднувачів. Перелік компонентів приведений в повному обсязі у таблиці № 16.13.

Таблиця № 16.13

Перелік елементів до загальної схеми міжмодульних з'єднань приладу SIDRA

№ п.п.	Найменування	Тип	Кількість, шт.
1	А1 (Детекторний модуль)	Збірна одиниця	1
2	А2 (Плата модулю живлення)	Друкована плата	1

3	АЗ (Плата модулю аналогової обробки сигналів)	Друкована плата	1	
4	А4 (Плата модулю цифрової обробки сигналів)	Друкована плата	1	
5	K1:	Кабель	1	
5	З'єднувачі	HU-6	2	
6	K2:	Кабель	1	
0	З'єднувачі	HU-2	2	
7	K3:	Кабель	1	
	З'єднувачі	HU2	3	
0	K4:	Кабель	1	
8	З'єднувачі	HU-2	2	
	K5:	Кабель	1	
9	З'єднувачі	IDC-40F	2	
10	K6:	Кабель	1	
10	З'єднувачі	IDC-40F	2	
11	K7:	Кабель	1	
11	З'єднувачі	HU-4	2	
	K8:	Кабель	1	
12	З'єднувачі	IDC-12F	2	
10	К9:	Кабель	1	
15	З'єднувачі	IDC-8F	2	
	K10:	Кабель	1	
14	З'єднувачі	HU-3	1	
		D-SUB 9	1	
	K11:	Кабель	1	
15	З'єднувачі	IDC-10F	1	
		MDM21S	1	
16	K12:	Кабель	1	
	З'єднувачі	HU-4	1	
		MDM21S	1	
17	123 124 133 136 138 140 142 148 152 154 156	Коаксіальний		
	157	кабель 100Ом,	12	
	<i>JJ1</i>	Ø1.2 мм, 250мм		
18	XP4 – XP10	СР-50-267ФВ	7	

17. РОЗРОБКА СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПЕРСОНАЛЬНОГО КОМП'ЮТЕРУ З ДЕШИФРУВАННЯ І ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ТЕЛЕМЕТРИЧНИХ ДАНИХ ТА ВІДПРАВЛЕННЯ КОМАНДНИХ ПОВІДОМЛЕНЬ

Для тестування програмного забезпечення прототипу цифрового модулю приладу SIDRA, а також відпрацювання основних режимів роботи приладу в цілому необхідно реалізувати інструмент, який й би імітував поведінку зовнішнього пристрою отримання телеметричної інформації та надсилання командних повідомлень. З цією метою було розроблене спеціалізоване програмне забезпечення для персонального комп'ютеру. Розробка складалася з трьох основних етапів: розробка графічного інтерфейсу, який визначає можливості користувача впливати на хід тестування приладу; розробка програмних методів реалізації функціоналу програмного додатку; компілювання вихідного коду та проведення тестових випробувань програмного додатку та прототипу цифрового модулю.

17.1. Розробка графічного інтерфейсу.

В ході робіт по виконанню НДР був розроблений графічний інтерфейс програмного додатку для перевірки дієздатності модулю цифрової обробки сигналів. Програмний додаток написаний на мові програмування C# та призначений для персонального комп'ютера під управлінням операційної системи «Windows». Графічний інтерфейс поділений на кілька областей, де містяться окремі органи керування додатком і приладом SIDRA, а також секція відображення накопиченої інформації (див. рис. 17.1).

Область керування цифровим протоколом з'єднання з цифровим блоком приладу SIDRA знаходиться у лівому верхньому куті головного вікна програмного додатку та містить поля для вибору імені послідовного порту та його налаштувань, а також кнопки «З'єднати» та «Роз'єднати». Блок цифрового інтерфейсу побудований на базі СОМ-порту (RS-232). В якості програмної моделі використовується базовий клас System.IO.Ports.SerialPort з наступними параметрами: швидкість обміну 115200 бод/сек (12.5 кБайт/сек), данні 8 біт та 1 стоп біт без контролю парності. Це налаштування за замовчанням, які можна змінити у відповідній області графічного інтерфейсу при необхідності. Також є можливість прийняття пакету байтів обмеженої кількості, яка вводиться у відповідне поле секції налаштувань порту.

	Программа обм	ена данными п	o RS-232	 ← 	□ ×
Настройки порта Порт Скорость СОМ1 V 115200 V Стоп бит, четность Один два Четность Размер пакета приема 3436 байт	Секция команд Введите сообщение Техt Отправить сообщение Полученные данные	● REG1 ○ CI ○ REG2 ○ CC ○ REG3 ○ SJ	L 10 G 100 A 02 1	Отправить собще команду	ние или
Соединиться					
Отключиться	Удатить данные с диска	Сохранять получе	нные данные		
Время старт стоп	Очистить окно с данными	Получать данные по СОМ-порту	Остановить данных по С	получение Пр СОМ-порту гра	осмотр афиков
Время: 0 сек.					

Рис. 17.1 Загальний вид головного вікна користувача програмного додатку для перевірки працездатності прототипу цифрового модулю приладу SIDRA.

В правому верхньому куті графічного вікна додатку знаходиться блок відправлення команд, який містить перелік всіх команд цифрового модулю SIDRA (REG1, REG2, REG3, CG, CL, SA), окреме текстове поле для введення повідомлення або нової команди (що не передбачена у переліку команд додатку, але присутня у переліку команд цифрового модулю SIDRA і відповідає параметрам типового командного повідомлення) та кнопка «Відправити», яка додає обрану команду або повідомлення до буферу відправки цифрового протоколу зв'язку з приладом SIDRA.

Нижче блоку відправлення команд знаходиться текстове поле, призначене для відображення отриманих даних від цифрового модулю SIDRA у шістнадцятирічному форматі. Кожен отриманий кадр підписується поточним часом та часом, який був зчитаний з отриманого кадру. Нижче маються органи керування, які дозволяють виконати автоматичне збереження кожного отриманого кадру в окремий файл для подальшого аналізу.

В лівому нижньому куті графічного вікна додатку розміщений блок генерації коду бортового часу з кнопками старту та скидання таймеру. Також величина поточного коду бортового часу відображається у відповідному текстовому полі. Блок генерації коду бортового часу побудований на базі класу System. Timers. Timer. Після натискання кнопки «Старт» у відповідній області графічного інтерфейсу додатку таймер починає працювати і з інтервалом в 1 секунду інкрементує лічильник часу та відправляє його значення до цифрового модулю приладу SIDRA у вигляді командного повідомлення. 17.2. Програмна реалізація функціоналу спеціалізованого програмного забезпечення.

Для спеціалізованого програмного забезпечення були розроблені п'ять програмних модулів на мові програмування С#: блок генерації командних повідомлень, блок отримання даних від цифрового модулю SIDRA, блок відображення отриманих даних, блок декодування даних та блок збереження отриманих даних.

Для реалізації блоку генерації командних повідомлень у базовому класі головного вікна програмного додатку були створені константні значення командних повідомлень (REG1, REG2, REG3) у вигляді масивів байтів. Кожне командне повідомлення мало заголовок (4 байти), тіло команди (4 байти) та контрольну суму (4 байти). Також реалізований приватний метод головного класу програмного додатку, який прив'язаний на подію кліку на кнопку «Відправити» у секції відправки командних повідомлень графічного інтерфейсу. Перелік команд лабораторного прототипу приладу SIDRA містить не тільки константні командні повідомлення, а ще й параметризовані, де тіло команди містить в собі окрім самої команди ще й змінне значення. До таких повідомлень відносяться команди зміни підсилення (CG), зміни порогів компараторів (CL) та зміни рівня радіаційного оточення (SA). Тому в залежності від типу обраної команди метод відправки командних повідомлень або додає безпосередню до буферу відправки COM-порту масив байтів відповідний до команди, або формує параметризовану команду, в залежності від введених даних у тілі графічного інтерфейсу, і вже потім додає сформований масив байтів до буферу відправки COM-порту.

Після ввімкнення та конфігурування цифрового модулю приладу SIDRA, він періодично починає відправку телеметричного кадру фіксованого розміру по цифровому протоколу. Для отримання цих даних був реалізований програмний блок для спеціалізованого програмного забезпечення. Блок отримання даних включає дві складові. Перша – це контейнер для збереження даних, що реалізований приватним полем головного класу програмного додатку і представляє собою масив байтів, розмір якого залежить від інформації введеної у секції налаштувань СОМ-порту графічного інтерфейсу. Тобто може бути змінений при необхідності. Другою складовою є приватний метод отримання даних від цифрового модулю SIDRA, який викликається при досягненні кількості байт у буфері прийому СОМ-порту кількості байт телеметричного кадру. Далі масив байтів телеметричного кадру записується до контейнеру збереження даних для подальшої експлуатації.

Наступним кроком розробки програмного забезпечення було створення блоку відображення отриманих від цифрового модулю приладу SIDRA телеметричних даних. Блок відображення даних побудований на основі класу System.Windows.Forms.ListBox. При заповненні глобального контейнеру телеметричним кадром викликається функція перетворення масиву байтів у шістнадцятирічний формат. Далі телеметричний кадр у шістнадцятирічному вигляді додається окремим елементом до ListBox. Передбачена можливість скопіювати телеметричний кадр з окремого поля ListBox. Кожен телеметричний кадр підписується поточним часом та кодом бортового часу, зчитаного з телеметричного кадру.

Для переведення бінарного представлення телеметричного кадру до числового, був розроблений окремий клас FrameDecoder, до конструктору якого передається масив байтів телеметричного кадру. Базовий метод ToString() класу FrameDecoder був перевизначений таким чином, що в результаті виклику він повертав строку, яка містить повністю декодований згідно структури телеметричний кадр. Для перегляду кадру у декодованому вигляді необхідно в тілі ListBox вибрати кадр та натиснувши праву кнопку миші у меню вибрати пункт «Переглянути». В результаті відкриється окреме вікно, яке містить результат виконання методу FrameDecoder. ToString().

Для реалізації можливості збереження та подальшого аналізу накопичених за сеанс зв'язку з приладом SIDRA телеметричних кадрів була реалізована функція автоматичного збереження кадрів. Дана функція активізується після натискання відповідного CheckBox в тілі графічного інтерфейсу програмного додатку. При цьому кожен отриманий кадр іменується порядковим номером та кодом бортового часу та зберігається у поточну директорію.

17.3. Компіляція спеціалізованого програмного забезпечення та тестування прототипу цифрового модулю приладу SIDRA

Розробка, тестування, компіляція та побудування вихідного коду спеціалізованого програмного забезпечення для тестування прототипу цифрового модулю приладу SIDRA проводилася у середі Microsoft Visual Studio Express 2012 на мові програмування С#. В результаті отриманий програмний додаток призначений для запуску на персональному комп'ютері під управлінням операційної системи Windows та встановленим .Net Framework 4.0 або пізнішої версії.

Після того, як спеціалізоване програмне забезпечення було протестоване та побудоване у програмний додаток, було проведене тестування прототипу цифрового модулю. Загальний вигляд робочого місця приведений на рис. 17.2. В якості прототипу цифрового модулю виступала плата ProAsic Starter Kit зі встановленою ПЛІС A3PE1500PQ208, яка була запрограмована останньою версією програмного забезпечення цифрового модулю. Персональний комп'ютер зі встановленим розробленим спеціалізованим програмним

забезпеченням підключався до прототипу цифрового модулю за допомогою COM-порту на відповідні лінії введення/виведення плати ProAsic Starter Kit. Стан всіх задіяних ліній введення/виведення плати ProAsic Starter Kit контролювався за допомогою логічного аналізатору ULogic Plus.

Після ввімкнення прототипу цифрового модулю за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення були відпрацьовані наступні процедури: оновлення значення системного часу приладу, передача командних повідомлень та отримання телеметричної інформації. Як видно з рис. 17.2 на лівому моніторі знаходиться активне вікно програмного спеціалізованого програмного забезпечення (детальний вид вікна приведений на рис. 17.3).



Рис. 17.2 Загальний вид робочого місця для тестування прототипу цифрового модулю за допомогою розробленого спеціалізованого програмного забезпечення.

Рис. 17.3 ілюструє робочий процес тестування програмного забезпечення прототипу цифрового модулю. Як видно з рис. 17.3 йде успішне відправлення коду бортового часу та отримання телеметричної інформації. Правий монітор (рис. 17.3) містить активне вікно програмного забезпечення логічного аналізатору ULogic Plus. За допомогою логічного аналізатору проводився контроль вірності відправлення командних повідомлень. Детальний вид вікна програмного забезпечення логічного аналізатору ULogic Plus приведений на рис. 17.4. На цьому рисунку приведений процес контролю відправлення команди зміни режиму роботи (REG1) прототипу цифрового модулю. Червоним відмічена лінія передачі СОМ-

порту, по якій команда транслюється до плати ProAsic Starter Kit, зеленим відмічена лінія прийому СОМ-порту, по якій надсилається прийнята та перевірена команда («луна»).



Рис. 17.3 Загальний вид спеціалізованого програмного забезпечення на етапі тестування прототипу цифрового модулю приладу SIDRA.

Оскільки основним інтерфейсом обміну даними прототипу цифрового модулю є послідовний SPI- протокол, то на ПЛІС було реалізоване спеціальне інтерфейсне ядро перетворення RS-232 → SPI. Синім кольором на рис. 17.4 помічені дані, які передаються до прототипу цифрового модулю по інтерфейсу SPI, після перетворення інтерфейсним ядром RS-232 → SPI командного повідомлення. Як видно з рис. 17.4 відправлене командне повідомлення (червоний овал справа) повністю відповідає трансльованому до прототипу цифрового модулю повідомленню (синій овал справа). Контроль вірності виконання командного повідомлення центрального процесору, до яких були підключені світло діоди. Кожній команді відповідав конкретний код на виході центрального

процесору. Також при виконання команд за допомогою логічного аналізатору контролювалися дані на вихідних інтерфейсних лініях SPI ядер, що відповідають за встановлення значень цифрових потенціометрів (зміна підсилення та порогів пікових детекторів).



Рис. 17.4 Вид вікна логічного аналізатору при детектуванні відправлення командного повідомлення.

На етапі тестування програмного забезпечення прототипу цифрового модулю приладу SIDRA були відпрацьовані наступні режими роботи:

- оновлення системного часу прототипу цифрового модулю з інтервалом 1 секунда;

- отримання та збереження телеметричної інформації з інтервалом 10 секунд;

 прийом та відпрацювання командних повідомлень (зміна режимів детектування REG1, REG2, REG3; зміна підсилення масштабних підсилювачів спектрометричних каналів – CG;
 зміна опірного рівня пікових детекторів – CL).
ВИСНОВКИ

Запропонована конфігурація компактного супутникового спектрометру-телескопу енергійних заряджених частинок SIDRA, що буде розташований усередині польського рентгенівського спектрофотометру ChemiX з метою здійснення спільного космічного експерименту на борту космічного апарату «Інтергеліозонд». Розроблений ескізний варіант габаритного креслення приладу, здійснене проектування механічних частин детекторної головки. Розроблена робоча конструкторська документація основних вузлів приладу: утримувачів кремнієвих і сцинтиляційного детекторів, детекторної головки в цілому, конічного коліматору формування куту зору, корпусу друкованої плати модулю аналогової обробки сигналів, корпусу друкованої плати блоку вторинного живлення.

За методом Монте-Карло з використанням бібліотек програм GEANT4-9.6.1 здійснене комп'ютерне моделювання проходження легких ядер крізь детектори телескопічної системи приладу. Отримані величини поглинених енергій в матеріалах детекторів для кожного сорту заряджених частинок. На кожному куті, що змінювався від 0^0 до 50^0 відносно вісі Z детекторного модулю з кроком 50, виконане моделювання проходження електронів з фіксованими первинними енергіями 100, 250 та 500 кеВ та протонів з первинними енергіями 1.5, 8 та 15 МеВ крізь телескопічну систему детекторів детекторного модулю. В результаті обробки даних, накопичених при моделюванні, були побудовані залежності коефіцієнту реєстрації первинних частинок від куту їх надходження та визначена кутова чутливість детекторного модулю.

Розроблені функціональна і принципові електричні схеми каналів аналогової обробки сигналів та їх складових частин: попередніх зарядо-чутливих підсилювачів, підсилювачівформувачів та пристроїв вибірки і запам'ятовування сформованих аналогових сигналів псевдо Гаусової форми з залученням пакету програм National Instruments Multisim 11.0.2. Для забезпечення модулів приладу SIDRA необхідними рівнями напруг розроблені структурна, функціонально і принципова електрична схеми плати вторинного живлення, яка генерує усі необхідні рівні напруги для аналогового та цифрового модулів, а також усі необхідні напруги зворотного зміщення для детекторів від бортової мережі +27 В. Згідно розроблених електричних схем за допомогою програмного забезпечення САПР Р-САD 2006 проведене трасування, а потім виготовлення друкованих плат аналогового модулю і модулю вторинного живлення приладу SIDRA.

У друковані плати аналогової обробки сигналів і вторинного живлення лабораторного прототипу приладу SIDRA напаяні радіокомпоненти згідно робочій конструкторській документації. Розроблена методика перевірки дієздатності і основних режимів роботи плати

вторинного живлення лабораторного макету приладу SIDRA. Проведене тестування виготовленого блоку вторинного живлення; відпрацьовані команди включення та виключення плати, перемикання навантажень з одного пів комплекту на другий, та команди включення та виключення монітору вторинних напруг. Проведений контроль струму споживання та рівнів вихідних напруг в режимі роботи з максимальним навантаженням та в режимі холостого ходу при максимальному, номінальному та мінімальному рівнях первинного бортового живлення. За даними тестування складений Протокол контролю параметрів плати вторинного живлення.

Розроблена методика перевірки дієздатності функціональних вузлів плати аналогової обробки сигналів до функціонального вузлу цифрування сформованих спектрометричних аналогових сигналів. За допомогою стенду на базі плати введення / виведення сигналів – ЛА48Д РСІ та розробленої методики проведене тестування всіх вузлів плати аналогової обробки сигналів, а також визначені фактичні величини регулювання коефіцієнтів підсилення масштабуючих підсилювачів та рівні регулювання порогів спрацювання пікових детекторів.

Виготовлені полегшені механічні корпуси для утримання друкованих плат з вмонтованими радіо компонентами. Відкоригована ескізна конструкторська документація і принципові електричні схеми за результатами перевірки дієздатності і режимів роботи плат вторинного живлення і аналогової обробки сигналів, і за результатами виготовлення полегшених механічних корпусів – утримувачів зазначених друкованих плат.

В якості базового елементу прототипу модулю цифрової обробки сигналів компактного супутникового приладу SIDRA обрана програмована логічна інтегральна схема (ПЛІС) компанії "Microsemi Corporation" M1A3PE1500. У середовищі розробника Libero SoC створений тестовий проект прототипу цифрового модулю. Він складається з центрального процесору (ЦП), оперативної пам'яті ЦП, блоку SPI інтерфейсу, детекторного блоку та шини APB3, до якої підключені всі перераховані блоки. Для моделювання засобами ПЛІС створений блок генератору частинок, функцією якого є генерування тестових сигналів заряджених частинок, які детекторний блок детектує та зберігає у буферній частині. Проведене моделювання роботи тестового проекту прототипу цифрового модулю на базі ПЛІС компанії "Microsemi Corporation" M1A3PE1500, що реалізує алгоритм формування інформаційного кадру у пам'яті та процес формування пакетів даних для передачі за стандартним протоколом і безпосередню їх передачу. У якості протоколу обміну даних обраний інтерфейс SPI, за яким планується обмін даними між приладами SIDRA та Chemix.

З метою зменшення ваги відкоригована робоча конструкторська документація прототипу приладу SIDRA. Зменшення ваги на 262 г досягнуто завдяки перегляду та переробці

креслень корпусів друкованих плат, полегшення підставки під детекторну головку, полегшення детекторної головки та заміні кількох DC/DC перетворювачів плати живлення. В цілому, переглянута механічна конструкція детекторної головки та її складових частин, в тому числі утримувачів кремнієвих детекторів та коліматору. Крім того, до конструкції детекторної головки додані два термоелектричних модулі, які призначені для задавання і стабілізації температурних режимів детекторів. В результаті, вага конструкції детекторної головки разом з підставкою склали загалом 490 грамів.

Для тестового проекту цифрового модулю приладу SIDRA розроблений модуль бази даних енергетичних втрат заряджених частинок в матеріалах детекторів. Модуль складається з трьох основних функціональних блоків: блок бази даних (DataBase_of_particles), блок визначення сорту заряджених частинок (Particle_definer) та блоку APB3 інтерфейсу, завдяки якому встановлюються параметри роботи модулю бази даних. Модуль бази даних містить в собі дані про енергетичні втрати для трьох режимів детектування заряджених частинок. На кожному з режимів детектування блок бази даних дозволяє розрізнити чотири сорти заряджених частинок та розподілити кожен сорт на 50 енергетичних каналів.

Розроблений і погоджений з головною організацією з розробки приладу ChemiX – ЦКД ПАН "Протокол узгодження електричних інтерфейсів між приладом ChemiX та детектором частинок фону ДЧФ". Відзначено, що ДЧФ під'єднується до основного і резервного з'єднувачів приладу ChemiX. Узгоджено таблицю програмних зовнішніх команд управління приладом у ході його льотної експлуатації.

Розроблений вихідний код процедур відпрацювання зовнішніх команд на мові програмування асемблер для центрального процесору тестового проекту цифрового модуля приладу SIDRA. Команди надходять до центрального процесору через шину APB від окремого ядра SPI-інтерфейсу у форматі заголовок-тіло команди-контрольна сума. Процедури відпрацювання команд включають в себе перевірку структури команди та сигналізацію про статус перевірки і виконання команд. Сигналізація статусів перевірки та виконання команд реалізована шляхом виставлення на порт виводу центрального процесору відповідного кодового слова. Виклик та виконання командних процедур включені в тіло основного циклу програми центрального процесора тестового проекту. Оновлений тестовий проект синтезований та імплементований у ПЛІС АЗРЕ1500 у складі плати розробника цифрової апаратури з програмованою логічною інтегральною схемою ProASIC3 Starter Kit виробника "Microsemi Corp."

Розроблене технічне завдання на оновлення структурної і принципової електричних схем. В технічному завданні складено Таблицю з переліком напружень вторинного живлення, в якій дано призначення каналів, вихідні напруження і максимальний вихідний струм по кожному з вторинних напружень. Перелічені зміни до принципової електричної схеми і топології друкованої плати живлення, визначена необхідність перекомпоновки розташування елементів з метою мінімізації геометричних розмірів. Вказано про необхідність встановлення двох додаткових роз'ємів для підключення зовнішніх температурних датчиків під час трасування друкованої плати: одного з'єднувача WF-8 для прийому сигналів від 4-х термодатчиків, встановлених на аналоговій платі, і одного з'єднувача WF-4 для прийому сигналів від 2-х термодатчиків, встановлених на цифровій платі. В електричній схемі також треба передбачити схему перетворення показів зовнішніх термодатчиків в цифровий код. Нарешті, вказана необхідність перероблення методу реалізації відпрацювання команд в схемі електричній з огляду доповнення цифровою частиною плати живлення і заміни реле РПС-45 і оптопар CNY-17 на оновлену елементну базу.

Розроблено структурну схему модулю цифрової обробки сигналів лабораторного прототипу приладу SIDRA. Схема включає в себе підсистему живлення, блоки електричних з'єднувачів; енергонезалежного постійного запам'ятовуючого пристрою для збереження початкових конфігураційних параметрів, програмованої логічної інтегральної схеми (ПЛІС) ProAsic 3E A3PE1500-PQ208. Розроблено принципові електричні схеми зазначених функціональних блоків, складений перелік електронних компонентів плати цифрової обробки сигналів. Перелік компонентів складається з 38 SMT конденсаторів, 6 танталових конденсаторів, 107 SMT резисторів, 4 діодів Шоткі, світлодіоду, 8 з'єднувачів, перемикача SPST-2 та активних компонентів: мікросхеми ПЛІС ProASIC3E A3PE1500 - PQ208, пам'яті 25AA1024T-I/SM (SOIC-8), кварцового осцилятору M581L40002IT та допоміжних електронних компонентів не-авіакосмічного мікросхем. Зроблено оцінку вартості застосування модулю цифрової обробки сигналів лабораторного прототипу приладу SIDRA. Найдорожчим компонентом виявилась мікросхема ПЛІС ProAsic 3E A3PE1500-PQ208 - її ціна складає близько 4000 грн.

За допомогою САПР Altium Designer 14.1 здійснено трасування друкованої плати модулю цифрової обробки сигналів відповідно до розробленої схеми електричної принципової.

Розроблено загальну схему міжплатних електричних з'єднань прототипу приладу, яка включає в себе плати модулів аналогової та цифрової обробки сигналів, модулю живлення, детекторний модуль, з'єднувачі та кабелі. Складений перелік елементів до загальної схеми міжмодульних з'єднань приладу, який також включає перелік всіх кабельних з'єднувачів.

З метою тестування програмного забезпечення прототипу цифрового модулю та для відпрацювання основних режимів його роботи розроблене спеціалізоване програмне забезпечення (СПЗ) для персонального комп'ютеру, які разом імітують поведінку зовнішнього пристрою отримання телеметричної інформації та надсилання командних повідомлень. Графічний інтерфейс СПЗ визначає можливості користувача змінювати процедуру тестування приладу; функціонал СПЗ включає в себе блоки генерування командних повідомлень, отримання даних від цифрового модулю, відображення отриманих даних, їх декодування та збереження.

Після тестування розробленого СПЗ та його побудування у програмний додаток, проведене тестування прототипу цифрового модулю приладу. В якості прототипу цифрового модулю обрана і надана для користування закордонним партнером проекту – Центром космічних досліджень Польської академії наук, плата розробника цифрової апаратури ProAsic Starter Kit з ПЛІС АЗРЕ1500РQ208 на борту. За допомогою СПЗ відпрацьовані режими роботи: а) оновлення системного часу цифрового модулю з інтервалом 1 с; б) отримання та збереження телеметричної інформації з інтервалом 10 с; в) прийом та відпрацювання командних повідомлень (зміна режимів детектування; зміна підсилення підсилювачів спектрометричних каналів; зміна опорного рівня пікових детекторів).

ПОСИЛАННЯ

- Watanabe,T. The Solar-C Mission / T.Watanabe // Proceedings of the Conference of International Society for optics and photonics SPIE. – 2014. – Vol. 9143 "Space Telescopes and Instrumentation 2014: Optical, Infrared, and Millimeter Wave". – Session "Solar System". – Abstract No.91431O.
- Кузнецов, В.Д. Космические исследования Солнца: состояние и перспективы / В.Д.Кузнецов // Солнечно-земная физика. – 2010г.. – Вып. 16. – С.39 – 44.
- Kuznetsov, V. The Interhelioprobe Mission for Solar and Heliospheric Studies / V.Kuznetsov, L.Zelenui // 40th COSPAR Scientific Assembly, Abstracts. – Panel D2.4 "The Science with Future Solar missions, from the Sun to the Heliosphere". – 2014. – Abstract No.D2.4-3-14.
- Sylwester, J. ChemiX: a new generation bent crystal spectrometer for Interhelioprobe mission to the Sun / J.Sylwester, V.Kuznetsov, I.Zimovets, et al. // 40th COSPAR Scientific Assembly, Abstracts. – Panel D2.4 "The Science with Future Solar missions, from the Sun to the Heliosphere". – 2014. – Abstract D2.4-34-14.
- Sylwester, J., ChemiX the soft X-ray Bragg spectrometer under development for the Interhelioprobe Mission / J.Sylwester, M.Siarkowski, Z.Szaforz, J.Bąkała, O.Dudnik, et al. // 13th RHESSI Workshop, Abstracts. – 2014. – Session "Current and Future Instrumentation". – P.17.
- Dudnik,O.V. The high energy charge particle detector module in the ChemiX instrument aboard Interhelioprobe mission: the goals, concept and design / O.V.Dudnik, J.Sylwester, M.Siarkowski, M.Kowalinski, et. al. // 13th Ukrainian Conference on space research, Abstracts. – 2013. – P.123.
- Дудник, А.В., Малогабаритный прибор для мониторинга электронов и ядер высоких энергий в открытом космическом пространстве / А.В.Дудник, М.Прето, Е.В.Курбатов, и др. // Космічна наука і технологія. – 2012г.. – Т.18. – № 6. – С.22 – 34.
- Дудник, А.В. Прибор SIDRA для измерения потоков частиц на спутниковых высотах: лабораторный прототип / А.В.Дудник, М.Прето, Е.В.Курбатов, и др. // Астрономический Вестник. – 2013г. – Т.47. – №1. – С.61 – 69.
- Дудник, А.В. Разработка малогабаритного спутникового прибора SIDRA для мониторинга потоков заряженных частиц в космическом пространстве. – С.65 – 70 / А.В.Дудник, Курбатов Е. В., Сильвестер Я., и др. // в зб. «Космічні дослідження в Україні, 2012–2014.
 Звіт до COSPAR» – 2014. – К: Академперіодика». – 144с. – ISBN 978-966-360-254-7.
- 10. Dudnik,O.V. Functional capabilities of the breadboard model of SIDRA satellite-borne instrument / O.V.Dudnik, M.Prieto, E.V.Kurbatov, et al.// Problems of Atomic Science and

Technology. – 2013. – Vol.3(85). – Issue 60, Series "Nuclear Physics Investigations". – P.289 – 296.

- 11. Dudnik, O.V. Results of the first tests of the SIDRA satellite-borne instrument breadboard model
 / O.V.Dudnik, E.V.Kurbatov, A.M.Avilov, et al.// Problems of Atomic Science and Technology.
 2013. Vol.3(85). Issue 60, Series "Nuclear Physics Investigations". P.297 302.
- Globus M. Inorganic Scintillators for Modern and Traditional Applications / M. Globus, B. Grinyov, Jong Kyung Kim // Monograph: Institute for Single Crystals. Ukraine-Kharki. 2005. 584 p.
- Kleinknecht K. Detectors for particle radiation / Kleinknecht K. // 2nd Edition. Cambridge University press. – 1998. – 246 P.
- 14. http://www.detectors.saint-gobain.com/uploadedFiles/ SGdetectors/Documents/Brochures/ Organics-Brochure.pdf
- 15. Дудник А.В. Детектор на основе монокристалла активированного паратерфенила и кремниевого фотоэлектронного умножителя / Дудник А.В., Андрющенко Л.А., Тарасов В.А., Курбатов Е.В. // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 2. С.41-46.
- 16. Галунов Н.З., Тарасенко О.А., Тарасов В.А. / Энергетический выход радиолюминесценции органических твердотельных сцинтилляторов, возбуждаемых ионизирующими излучениями с различными удельными энергетическими потерями // в моногафии: "Тенденция развития сцинтилляционной техники". ISBN 978-966-02-6891-3. Под ред. А.В. Гектина. Харьков: "ИСМА". 2013. 264 с.
- Bloser,P.F. Scintillator gamma-ray detectors with silicon photomultiplier readouts for highenergy astronomy / Bloser,P.F., Legere,J., Bancroft,C., McConnell,M.L., Ryan,J.M., Schwadron,N. // Proc. SPIE. - V.8859: «UV, X-Ray, and Gamma-Ray Space Instrumentation for Astronomy XVIII". - 88590A. - 26 September, 2013; doi:10.1117/12.2024411.
- Grodzicka, M. Performance of FBK high-density SiPMs in scintillation spectrometry / M.Grodzicka, M.Moszyński, T.Szczęśniak, A.Ferri, C.Piemonte, M.Szawłowski, A.Gola, K.Grodzicki, A.Tarolli // Journal of instrumentation. – 2014. – Vol.9. – doi:10.1088/1748-0221/9/08/P08004.
- Szczesniak, T. Characteristics of scintillation detectors based on inorganic scintillators and SiPM light readout / T.Szczesniak, M.Grodzicka, M.Moszynski, M.Szawowski, D.Wolski, J.Baszak // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2013. – Vol.702. – P.91-93. doi:10.1016/j.nima.2012.09.011.
- 20. Mazur, J. The Relativistic Proton Spectrometer (RPS) for the Radiation Belt Storm Probes Mission / J.Mazur, L.Friesen, A.Lin, D.Mabry, N.Katz, et al. // Space Science Reviews. – 2013. – Vol.179. - Issue 1. – P.221-261. doi:10.1007/s11214-012-9926-9.

- Baker, D.N. The Relativistic Electron-Proton Telescope (REPT) Instrument on Board the Radiation Belt Storm Probes (RBSP) Spacecraft: Characterization of Earth's Radiation Belt High-Energy Particle Populations / D.N.Baker, S.G.Kanekal, V.C.Hoxie, S.Batiste, M.Bolton, et al. // Space Science Reviews. – 2013. – Vol.179. - Issue 1. – P.337-381. doi:10.1007/s11214-012-9950-9.
- 22. Dudnik O.V. The experiment STEP at the Ukrainian Satellite "Poperedzennja" for the Registration of Energetic Particles Precipitating from Earth's Radiation Belts Into Magnetosphere Before Earthquakes / Dudnik O.V., Gopych M.P. // 31st Scientific Assembly of COSPAR (Birmingham, England, 14–21 July 1996). Abstracts. – P. 95.
- 23. Dudnik O. The Satellite "STEP" instrument for registration of energetic particle on board the Ukrainian spacecraft "Warning" / Dudnik O., Malykhina T. // 16th European Cosmic Ray Symposium (Alcala de Henares, Spain, 20–25 July 1998). Proceedings. – P. 223–226.
- 24. Dudnik O.V. Development of Energetic Charge Particle Telescope for on Board Measurements
 / Dudnik O.V., Frolov O.S. // 33rd COSPAR Scientific Assembly (Warsaw, Poland, 16–23 July 2000). Abstracts. Vol. F. P. 398.
- 25. Дудник А.В. Разработка спутникового спектрометра-телескопа энергичных заряженных частиц «СТЭП-Ф» для космического проекта «Коронас-Фотон» и его тестирование на ионном циклотронном ускорителе RIKEN, Япония / Дудник А.В., Гока Т., Матсумото Х., Персиков В.К., Ахвердян В.С., Головаш А., Фуджии М. // З-я Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям (Кацивели, Крым, 15–21 сентября 2003). Тезисы. С. 37.
- 26. Дудник А.В. Перспективы изучения СКЛ и радиационных поясов Земли с помощью прибора СТЭП-Ф КА «КОРОНАС-ФОТОН» / Дудник А.В., Персиков В.К., Котов Ю.Д., Юров В.Н. // Научная сессия «МИФИ-2009» (Москва, Россия, 27–29 января 2009 г.). Аннотации докладов. – Т. 2. – С. 158.
- 27. Dudnik O.V. The satellite telescope of electrons and protons STEP–F of the "Coronas–Photon" international space mission features of development and realization / Dudnik O.V., Zalyubovskiy I.I., Persikov V.K., Kurbatov E.V., Timakova T.G., Zajtsevskiy I.L., Perevertaylo V.L., Perevertaylo A.V., Tarasenko L.I., Borodenko Y.A., Kotov Y.D., Yurov V.N., Tyshkevich V.G., Rubtsov I.V. // 9th Ukrainian Conference on space research (Yevpatoria, Crimea, Ukraine, August 31 September 5 2009). Abstracts. P. 77.
- 28. Дудник А.В. Высокочувствительный спектрометр-телескоп высокоэнергетических частиц СТЭП-Ф спутникового эксперимента КОРОНАС-ФОТОН / Дудник А.В., Персиков В.К., Залюбовский И.И., Тимакова Т.Г., Курбатов Е.В., Котов Ю.Д., Юров В.Н. // Астрономический вестник. – 2011. – Т. 45. – № 3. – С. 219–227.

- 29. Dudnik O.V. The concept of compact on-board instrument for measurements of particle fluxes
 & dose rates / Dudnik O.V., Meziat D., Prieto M. // Научная сессия МИФИ-2009. –
 Аннотации докладов. Том № 2. С. 151.
- 30. Dotsenko O.V. Concept of application of the SIDRA instrument to ensure safe operation of a satellite / Dotsenko O.V., Dudnik O.V., Meziat D., Prieto M. // 9th Ukrainian Conference on space research (Yevpatoria, Crimea, Ukraine, August 31 September 5, 2009) Abstracts. P.76.
- 31. Dudnik O.V. Compact on-board instrument SIDRA for measurement of particle fluxes & dose rates – concept and first model / Dudnik O.V., Bilogub V.V., Kurbatov E.V., Timakova T.G., Dubina V.N., Meziat D., Prieto M. // 9th Ukrainian Conference on space research (Yevpatoria, Crimea, Ukraine, August 31 – September 5, 2009). Abstracts. – P.78.
- 32. Dudnik O.V. First concept of compact instrument SIDRA for measurements of particle fluxes in the space / Dudnik O.V., Prieto M., Kurbatov E.V., Sanchez S., Timakova T.G., Dubina V.N., Parra P // ISSN 2221-7754 The Journal of Kharkiv University. Physical series "Nuclei, Particles, Fields". – 2011. – No.969. – Issue 3(51). – P. 62- 66.
- 33. Dudnik O.V. Onboard instrument SIDRA prototype for measurements of radiation environment in the space / Dudnik O.V., Sanchez S., Prieto M., Kurbatov E.V., Timakova T.G., Dubina V.N., Parra P.// 39th Scientific Assembly of the Committee on Space Research (Mysore, India, July 14-22, 2012). Abstracts. – Session H0.3: "Technical Development of Instrumentation for Current Missions". – STW-B-153 H0.3-0023-12. – P.106.

118

ПРОТОКОЛ № 1/15

согласования электрических интерфейсов между прибором ChemiX и детектором частиц фона <u>ДЧФ</u>

г. Харьков

«_11_» _08_ 2015 г.

1. Общие положения.

- 1.1 Протокол описывает согласование приборов Chemix и ДЧФ по электропитанию, высокоскоростному интерфейсу обмена телеметрическими данными и передачи команд; общую функциональную схему приборов; типы и назначение контактов приборных разъемов.
- 1.2 Протокол согласования электрических интерфейсов является основой для разработки программных модулей автономных устройств цифровой обработки приборов ChemiX и ДЧФ.
- 1.3 Общая функциональная схема приборов ChemiX и ДЧФ приведена в Приложении А.
- 1.4 Типы разъемов и назначение контактов приборных соединителей приборов приведены в Приложении Б.

2. Электропитание.

- 2.1 Прибор ДЧФ подключен к основному и резервному каналам питания прибора ChemiX.
- 2.2 Соединитель кабеля электропитания прибора ChemiX подключается к приборному соединителю XP1 прибора ДЧФ. Соединитель кабеля высокоскоростного интерфейса прибора ChemiX подключается к приборному соединителю XP2 прибора ДЧФ.
- 2.3 Назначение контактов внешних соединителей X118H и X119H прибора ChemiX, и XP1 и XP2 прибора ДЧФ представлено в Таблице 1 Приложения Б.
- 2.4 Потребление Детектора Частиц Фона не превышает 7 Вт.

3. Высокоскоростной интерфейс обмена телеметрической информацией данными и передачи команд.

- 3.1 Информативность ДЧФ не превышает 50 Мб/сутки.
- 3.2 Протоколом обмена данными между приборами ChemiX и ДЧФ является последовательный интерфейс SPI со следующими характеристиками:
 - Роли SPI ядер приборов: ChemiX master, ДЧФ slave.
 - Скорость обмена 100 кб/с (килобит в секунду).
 - Синхронизация по положительному фронту.
 - Размер пакета приема/отправки 32 бита.

г. Вроцлав

- 3.3 Код бортового времени (КБВ) и командные сообщения передаются от прибора ChemiX к прибору ДЧФ в виде трех пакетов по 32 бита за один сеанс передачи.
- 3.4 Для управления прибором ДЧФ используется 13 командных сообщений.
- 3.5 Обозначение линий обмена данными и передачи командных слов по протоколу SPI в Детекторе Частиц Фона показано на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Линии обмена данными и передачи командных сообщений по SPI-интерфейсу в Детекторе Частиц Фона.

3.6 Эпюры передачи и получения кода бортового времени, командных слов и телеметрической информации приведены на рис. 3.2.

<u>Chemix-BPM interface</u>							
1. Transmit (one action) time code and commands from Chemix (master) to BPM (slave)							
CLKA (CLKB)							
Packet_0 Packet_1 Packet_2 MOSIA (MOSIB) CMD/Time CMD/Time CMD/Time							
BPDSSA (BPDSSB)							
2. Receive (one action) data from BPM (slave) to Chemix (master)							
CLKA (CLKB)							
MISOA (MISOB)							
BPDSSA (BPDSSB)							

Рис. 3.2 Эпюры передачи и получения кода бортового времени, командных слов и телеметрической информации между приборами ChemiX и ДЧФ.

4. Последовательность обмена информационными массивами между приборами ДЧФ и ChemiX.

Процесс передачи командных сообщений от прибора ChemiX к ДЧФ осуществляется следующим образом:

- 4.1 Прибор ChemiX принимает от системы сбора научной информации (ССНИ) информационный массив для ДЧФ, который соответствует командным сообщениям либо КБВ.
- 4.2 Содержимое командного сообщения для ДЧФ приведено в таблице № 4.1.

<u>Пакет № 0</u> (биты 0 31) <u>Заголовок</u>		<u>Пакет № 1</u> (биты 32 63) <u>Команда</u>		<u>Пакет № 2</u> (биты 64 95) <u>Контрольная</u> <u>сумма</u> *, (НЕХ)	Примечание
Символь- ное обозначе- ние (ANSI)	HEX	Символьное обозначение (ANSI)	HEX		
		ONPS	0x4f4e5053	0x919E94A3	
		OFPS	0x4f465053	0x919694A3	Команды для
BPDP	0x42504450	SLP1	0x534c5031	0x959C9481	платы
		SLP2	0x534c5032	0x959C9482	питания
		MVON	0x4d564f4e	0x8FA6939E	
		REG1	0x52454731	0x94958B75	
		REG2	0x52454732	0x94958B76	Команды для
		REG3	0x52454733	0x94958B77	цифрового модуля
		TEST	0x54455354	0x96959798	
	0 40504444	SA+value**	0x53410000	Зависит от	
BPDD	0x42504444		+ value**	value**	
		CL+value***	0x434c0000	Зависит от	
			+ value***	value***	
		CG+value***	0x43470000	Зависит от	
			+ value***	value***	
BPDT	0x42504454	TIME	Зависит от КБВ	Зависит от КБВ	Код бортового времени

Таблица № 4.1. Содержание командного сообщения для ДЧФ.

*Рассчитывается путем сложения слов (32 бита) без учета переполнения (пакет № 0 + пакет № 1).

**Первые два символа (16 бит) содержат обозначение команды, остальные 16 бит выделены под значение уровня порога.

***Первые два символа (16 бит) содержат обозначение команды, остальные 16 бит выделены под переменные значения, из которых старшие 8 бит выделены под адрес цифрового потенциометра, а младшие – под записываемое значение.

- 4.3 Для управления прибором ДЧФ по каналу связи с ССНИ требуется 10 команд (20 байт в сутки) размером 12 байт каждая (3 пакета по 4 байта), выдаваемых не чаще, чем 1 раз в неделю.
- 4.4 Расшифровка содержимого пакета № 1 командного сообщения, источник и частота выдачи соответствующих командных сообщений приведены в таблице № 4.2.

№ п.п.	Команда	Назначение	Источник	Частота	Примечание
1.	ONPS	Включение ДЧФ.	ССНИ	Подается при первом включении и при экстренных ситуациях	
2.	OFPS	Выключение ДЧФ.	ССНИ	Подается в экстренных ситуациях	16
3.	SLP1	Включить первый полукомплект платы питания	ChemiX	Подается 1 раз каждый нечетный месяц	команды для платы питания
4.	SLP2	Включить второй полукомплект платы питания	ChemiX	Подается 1 раз каждый четный месяц	
		Включить монитор	ДЧФ	1 раз в сутки	
5.	MVON	вторичных и первичного напряжений платы питания.	ССНИ	нештатная ситуация	
6.	REG1	Перейти на первый режим детектирования частиц ДЧФ (легкие ядра + электроны).	ССНИ	Не чаще 1-го раза в 21 день	Команды для цифровой
7.	REG2	Перейти на второй режим детектирования	ССНИ	Не чаще 1-го раза в 21 день	шлаты

Таблица № 4.2. Расшифровка команд (пакет №1).

8.	REG3	частиц ДЧФ (средние ядра). Перейти на третий режим детектирования частиц ДЧФ (тяжелые ядра).	ССНИ	Не чаще 1-го раза в 21 день	
9.	TEST	Тестирование аналогового и цифрового модулей ДЧФ	ДЧФ ССНИ	1 раз в сутки нештатная ситуация	
10.	SA + value	Установка / изменение опорного уровня радиационной обстановки, при котором происходит выдача аварийного сообщения.	ССНИ	Не чаще 1 раза в неделю	
11.	CL + value	Регулировка уровня срабатывания пиковых детекторов аналогового модуля.	ССНИ	Не чаще 1-го раза в неделю (зависит от радиационной обстановки)	
12.	CG + value	Регулировка усиления масштабных усилителей аналогового модуля.	ССНИ	Не чаще 1-го раза в неделю (зависит от радиационной обстановки)	
13.	TIME	Код времени полученный от ССНИ (4 байта)	ChemiX	1 Гц	Код бортового времени

- 4.5 Прибор ChemiX осуществляет проверку правильности команд по заголовкам и контрольным суммам. В случае несоответствия полученного командного сообщения со списком команд ДЧФ прибор ChemiX передает запрос в ССНИ на повторную отсылку командного сообщения.
- 4.6 Для стабильной работы ДЧФ команды, содержащие заголовки BPDP и BPDD, следует подавать после принятия кадра телеметрической информации.
- 4.7 Прибор ChemiX после идентификации типа сообщения (команда или КБВ) удаляет первый байт, который является «флагом». При передаче КБВ от прибора ChemiX к ДЧФ код бортового времени подписывается заголовком (пакет № 0) «ВРDТ».
- 4.8 Прибор ChemiX формирует из информационного массива командного сообщения (либо подписанного заголовком КБВ), обработанных согласно п.п. 4.1-4.3, пакеты длиной по 32

бита для отправки в ДЧФ. Каждый передаваемый пакет содержит по 4 байта командного сообщения или КБВ.

- 4.9 Сформированные пакеты передаются по протоколу SPI от ChemiX в ДЧФ.
- 4.10 Через 1 секунду после отправки командного сообщения, прибор ChemiX считывает один пакет из буфера ДЧФ. В случае, если содержимое пакета соответствует значению «CROK» (0х43524f4b Command Receive OK), команда считается принятой и выполненной. Прибор ChemiX удаляет команду из списка команд для ДЧФ. Если содержимое пакета соответствует значению «CRFL» (0х4352464c Command Receive Fail), команда считается принятой, но не выполненной. Данную команду ChemiX также удаляет из списка команд ДЧФ. При получении значения «CRFL», ChemiX повторно посылает команду в ДЧФ. Количество попыток не должно превышать 5, после чего ChemiX переходит в режим выдачи КБВ и ожидает принятия телеметрической информации. После принятия данных прибор ChemiX повторяет попытку передать командные сообщения, не более 5 раз.
- 4.11 КБВ передается с частотой 1 Гц.

5. Передача телеметрической информации от Детектора Частиц Фона в прибор ChemiX.

- 5.1 В момент, когда ДЧФ сформировал информационный кадр телеметрических данных, в буфер отправки SPI протокола ДЧФ помещается статусное сообщение, состоящее из одного пакета (32 бита). Это сообщение содержит константу «**DTRD**», которая соответствует статусу «данные готовы». Следующим пакетом (32 бита) передается количество пакетов по 32 бита в сформированном информационном кадре, предназначенного для передачи в прибор ChemiX. Далее следует пакет с порядковым номером кадра, привязанного к коду бортового времени. После пакетов с телеметрическими данными следует последний пакет, который содержит контрольную сумму. Контрольная сумма рассчитывается путем сложения пакетов данных телеметрической информации без учета переполнения.
- Порядок следования пакетов при передаче информационного кадра с телеметрическими данными в прибор ChemiX описан ниже:
- 1) Пакет № 0 **DTRD** (0х44545244) статусное сообщение;
- 2) Пакет № 1 N (0xnnnnnnn) количество пакетов с телеметрическими данными;
- 3) Пакет № 2 NUM (0xnnnnnnn) порядковый номер информационного кадра;
- 4) Пакет №3, Пакет №4, ..., Пакет № (N+1), Пакет № (N+2) телеметрическая информация;
- 5) Пакет № (N+3) контрольная сумма пакетов №3 ÷ №(N+2)
- Прибор ChemiX должен принять информационный кадр ДЧФ сразу же после помещения статусного сообщения **DTRD** в буфер отправки SPI логики ДЧФ. Максимальное время приема информационного кадра ДЧФ прибором ChemiX, начиная с момента выдачи статусного сообщения **DTRD**, не должно превышать 1 секунду. При чтении данных из ДЧФ прибор ChemiX передает пустой пакет (0x0000000) по линии MOSIA (MOSIB).

Информационный кадр ДЧФ формируется каждые 10 секунд. Допустимый размер информационного кадра от 768 до 1280 пакетов по 32 бита.

<u>5.2 Создание аварийного сообщения для прибора ChemiX.</u>

- 5.2.1 При попадании прибора ChemiX в область повышенной радиации Детектор Частиц Фона генерирует аварийное сообщение.
- 5.2.2 Аварийное сообщение представляет собой один пакет данных длинной 32 бита и содержит константу «ALMS», которая в HEX-представлении соответствует **0x414c4d53**. Пакет с аварийным сообщением помещается в буфер отправки SPI протокола ДЧФ сразу же после детектирования аварийной ситуации и ожидает приема со стороны прибора ChemiX.
- 5.2.3 В случае нормализации радиационной обстановки Детектор Частиц Фона генерирует один пакет данных длинной 32 бита и содержит константу «WDAL», которая в HEX-представлении соответствует 0x5744414с. Пакет с сообщением об отмене аварийной обстановки помещается в буфер отправки SPI протокола ДЧФ сразу же после нормализации радиационной обстановки, и ожидает приема со стороны прибора ChemiX.
- 5.2.4 Для обеспечения надежности передачи телеметрических данных статусные сообщения **ALMS** и **WDAL** не передаются во время трансляции телеметрических данных из ДЧФ в прибор ChemiX.
- 5.3 Статусные сообщения прибора ChemiX
- 5.3.1 После принятия информационного кадра от прибора ДЧФ прибор ChemiX генерирует и посылает по протоколу связи сообщение в виде одного пакета (32 бита), содержащий константу **SEOK** (HEX: **0x53454f4b**). Сообщение **SEOK** соответствует ситуации, когда переданная последним пакетом контрольная сумма совпала с контрольною суммой подсчитанной прибором ChemiX за сеанс приема информационного кадра от прибора ДЧФ.
 - 5.3.2 Прибор ChemiX передает в прибор ДЧФ сообщение в виде одного пакета (32 бита), содержащий константу FAIL (НЕХ: 0х4641494с), в случае, когда контрольная сумма, рассчитанная прибором ChemiX во время приема информационного кадра от ДЧФ, не совпала с принимаемой. При этом ДЧФ отрабатывает это сообщение и предпринимает попытку повторной передачи информационного кадра, начиная со статусного сообщения DTRD. Количество попыток передачи информационного кадра, в случае сбоя, равняется 5. После последней попытки передачи информационного кадра прибор ДЧФ обнуляет буфер приема и отправки протокола связи и перезаписывает информационный кадр новыми данными, которые будут переданы в следующий сеанс передачи научной информации.

CBK: Mirosław Kowaliński,

Witold Trzebiński

Inchiel

РИ НАНУ А.В. Дудник

Е.В. Курбатов



ПРИЛОЖЕНИЕ А: Схема соединений между приборами ChemiX и Детектором Частиц Фона

ПРИЛОЖЕНИЕ Б: Соединители интерфейсов.

Электропитание

№ п.п.	Детектор Частиц Фона XP1 (MDM9S)		ChemiX (РС7АЭ, 7 контактов), X118H (X119H)	
	Наименование цепи	Номер контакта	Наименование цепи	Номер контакта
1	+27 B	1, 2	+27 B	1, 2 (X118H)
2	-27 B	3, 4	-27 B	6, 7 (X118H)
3	+27 B	6, 7	+27 B	1, 2 (X119H)
4	-27 B	8,9	-27 B	6, 7 (X119H)

Таблица № 1. Назначение контактов основного и резервного приборных разъемов питания

Высокоскоростной интерфейс

Τ Γ Ν Ο	тт	~		1 U
$1 a \circ \pi u \circ 2$	Назначение контактов	приборных	DASTEMOR BLICOKOCK	постного интерфеиса
1 иолици л = 2.	i i usii u ieiine kontuktob	приобривіх	Pus bemob bbicokoek	poetnoi o mitopuenea

№ п.п.	Детектор Ча ХР2 (МІ	стиц Фона DM21S)	ChemiX	
	Наименование цепи	Номер контакта	Наименование цепи	Номер контакта
5	BPDSSA	1, 2	BPDSSA	1, 2
6	CLKA	3, 4	CLKA	3, 4
7	MISOA	5, 6	MISOA	5, 6
8	MOSIA	7, 8	MOSIA	7, 8
9	DGNDA	9, 10	DGNDA	9, 10
10	BPDSSB	11, 12	BPDSSB	11, 12
11	CLKB	13, 14	CLKB	13, 14
12	MISOB	15, 16	MISOB	15, 16
13	MOSIB	17, 18	MOSIB	17, 18
14	DGNDB	19, 20	DGNDB	19, 20

127

Плата вторичного питания Требования по доработке

1. Общие требования

1.1 Плата вторичного питания включает в себя цифровую часть, предназначенную для приема и исполнения командных слов от бортового компьютера через прибор ChemiX, и для формирования информационного массива о состоянии прибора с последующей передачей его по отдельному протоколу SPI.

1.2 Плата вторичного питания состоит из двух идентичных полукомплектов, вырабатывающих напряжения вторичного питания. Полукомплекты работают поочередно, т.е. в режиме холодного резервирования.

1.3 Питание цифровой части подключено постоянно к первичной бортовой сети +27⁺⁶₋₂B

1.4 Цифровая часть платы питания является общей для обоих полукомплектов, и управляет включением, выключением, выбором и переключением полукомплектов.

1.5 Информационный массив о состоянии прибора включает в себя данные о значениях первичного и вторичных напряжений, и данные, полученные с термодатчиков, установленных в различных точках прибора, а также информацию о последней отработанной команде и наличие/отсутствие аварийной ситуации.

2. Каналы вторичных напряжений

2.1 Каждый из двух полукомплектов платы вторичного питания должен генерировать вторичные напряжения, гальванически развязанные с первичной питающей сетью. Список вторичных напряжений приведен в таблице 2.1

Таблица №2.1

№ п.п.	Предназначение канала	Выходное	Максимальный
		напряжение, В	выходной ток, мА
1	Питание аналоговой платы	±5 (двуполярное)	±300
2	Обратное смещение первого (кремниевого)	+35	≥1
	детектора		
3	Обратное смещение второго (кремниевого)	+165	≥1
	детектора		
4	Обратное смещение третьего	+71	≥1
	(сцинтилляционного) детектора		
5	Питание цифровой платы прибора	+3.3	1200

Перечень напряжений вторичного питания

2.2 Каналы обратного смещения детекторов должны предусматривать плавную регулировку вторичных напряжений на этапе настройки и параллельные посадочные места под запайку постоянных SMD резисторов. Диапазон регулировки не хуже, чем 20 – 120% от значений выходного напряжения, приведенного в таблице № 2.1.

3. Доработка принципиальной схемы электрической и топологии.

3.1 В топологии печатной платы перекомпоновать расположение элементов с целью минимизации ее геометрических размеров. При этом провести доработки, приведенные ниже.

3.2 В электрической схеме принципиальной и топологии платы заменить DC/DC преобразователи A1, A2, A3, A4, A5, A6 в каналах генерирования напряжений смещения кремниевых детекторов на малогабаритные преобразователи от производителя EMCO.

3.3 В топологии печатной платы добавить контактные площадки под постоянные SMD резисторы, подключенные параллельно потенциометрам в цепях регулирования выходного напряжения смещения детекторов с последующей возможностью выпаивания потенциометров и впайки постоянных резисторов на предусмотренные контактные площадки.

3.4 В схеме электрической принципиальной и в топологии платы питания добавить дополнительный термодатчик вблизи DC/DC конвертеров A1, A2, A3, A4, A5, A6.

3.5 При трассировке печатной платы предусмотреть установку двух дополнительных соединителей для подключения внешних температурных датчиков: одного разъема WF-8 для приема сигналов от 4-х термодатчиков, установленных на аналоговой плате; и одного разъема WF-4 для приема сигналов от 2-х термодатчиков, установленных на цифровой плате.

3.6 В схеме электрической принципиальной платы вторичного питания предусмотреть схему преобразования показаний внешних термодатчиков в цифровой код. В качестве внешних термодатчиков используются NTC термисторы при температуре 25°C.

3.7 В схеме электрической принципиальной и топологии платы заменить DC/DC преобразователи в каналах питания платы цифровой обработки сигналов (+5 B, *I*=600 мA) A10, A11 на преобразователи с выходным напряжением 3.3 В и максимальным током *I*=1200 мA.

3.8 При трассировке платы питания добавить два 2-х контактных разъема типа WF-2– по одному для каждого из двух полукомплектов, подключенных к цепи +3.3 В *I*=1200мА.

3.9 В схеме электрической принципиальной и топологии платы заменить конденсаторы C13 и C14 на конденсаторы, которые допускаются использовать в открытом космосе из списка разрешенных компонентов Европейского Космического Агентства.

3.10 В схеме электрической принципиальной и топологии платы заменить поляризованные реле и оптопары на зарубежные аналоги, допущенные к использованию в открытом космосе из списка разрешенных компонентов Европейского Космического Агентства.

3.11 Переработать реализацию отработки команд в схеме электрической принципиальной ввиду дополнения цифровой частью платы питания, и замены реле и оптопар на обновленную элементную базу.

3.12 В схеме электрической принципиальной и топологии платы исключить разъемы XP4, XP5, XP6, XP9 для подачи команд и вывода показаний вторичных напряжений ввиду их ненадобности после дополнения цифровой частью платы питания.

3.13 Подобрать и заменить альтернативным аналогом трансформатор T1 с горизонтальным расположением сердечника ввиду того, что текущую модель с горизонтальным расположением сердечника недоступна для покупки.

3.14 Высота монтажа платы питания не должна превышать 19 мм.

4. Семантика команд цифровой части платы питания

4.1 Цифровая часть платы питания по протоколу SPI принимает от бортового компьютера через прибор ChemiX два типа информационных массивов: командные сообщения, содержащие в себе 3 пакета по 32 бита каждый, и статусные сообщения, состоящие из 1 пакета длиной 32 бита.

4.2 Командное сообщение, поступающее от прибора ChemiX, состоит из заголовка (первый пакет), собственно команды (второй пакет) и контрольной суммы (третий пакет). Контрольная сумма рассчитывается путем сложения пакетов командного сообщения без учета переполнения.

4.3 Командные сообщения, содержащие заголовок BPDD, и предназначенные для отработки цифровым модулем – не принимать к исполнению. Статусные сообщения, состоящие из 1 пакета, также не принимать к исполнению.

В таблице № 4.1 содержится расшифровка командного слова и сообщения, содержащего код бортового времени.

Таблица № 4.1

Пакет № 0 (биты 0 31) Заголовок		Пакет № 1 (биты 32 63) Команда		Пакет № 2 (биты 64 95) Контрольная сумма, (НЕХ)	Примечание
Символь- ное обозначе- ние (ANSI)	HEX	Символьное обозначение (ANSI)	HEX		
BPDP	0x42504450	ONPS	0x4f4e5053	0x919E94A3	

Содержание командных слов

		OFPS	0x4f465053	0x919694A3	Команды для
		SLP1	0x534c5031	0x959C9481	платы
		SLP2	0x534c5032	0x959C9482	питания
		MVON	0x4d564f4e	0x8FA6939E	
DDDT	0	TIME	Зависит от	Зависит от	КБВ
BPDT	0x42504454	TIME	КБВ	КБВ	

В таблице № 4.2 содержится назначение команд платы питания. По протоколу связи первым передается пакет № 0 (биты 0 ... 31), содержащий заголовок BPDP (Background Particle Detector Power).

Таблица 4.2

Значение	
командного слова	Назначение
(биты 3263) *	
ONPS	Включение аналоговой, цифровой плат и платы питания ДЧФ.
OFPS	Выключение аналоговой, цифровой плат и платы питания
0115	ДЧФ.
SI P1	Включить первый полукомплект платы питания (отключается
SLI I	второй полукомплект)
SI P2	Включить второй полукомплект платы питания (отключается
	первый полукомплект)
MVON	Включить монитор всех вторичных и первичного напряжений
	платы питания.
TIME	КБВ, полученный от прибора ChemiX (4 байта)

Перечень команд

*Записываются обозначения в кодировке ANSI (4 символа по 8 бит).

5. Структура и порядок передачи информационного массива цифровой части платы вторичного питания

Информационный массив, формируемый цифровой частью платы вторичного питания, и передаваемый в плату обработки цифровой информации, состоит из пакетов данных объемом по 32 бита. Первым передается заголовок, далее следуют:

1) текущий код бортового времени;

2) пакеты данных, иллюстрирующие наличие или отсутствие аварийной ситуации в приборе;

3) пакет, отображающий номер активного на данный момент полукомплекта;

4) пакеты, содержащие данные о вторичных напряжениях после отработки команды «MVON»;

5) пакеты, содержащие информацию о значениях термодатчиков;

6) пакет данных о последней отработанной команде;

7) пакет, в который помещается значение контрольной суммы.

В таблице № 5.1 приведена расшифровка содержимого информационного массива, формируемого платой питания.

Таблица № 5.1

№ пакета	Назначение пакета	Содержание пакета	HEX:	Примечание
0	Заголовок*	Константа «PSDF» (Power Supply Data Frame)	0x50534446	
1	Код времени	Значение КБВ		Принимается по протоколу обмена в виде сообщения с заголовком «BPDT»
2	Блок статусных сообщений*	«PVOV» (Primary Voltage Over Voltage); либо «PVUN» - (Primary Voltage Under Voltage); либо «PVNV» (Primary Voltage Normal Value)	0x50564f56; 0x5056554e; 0x50564e56	U>33B; U<25B; $25B \le U \le 33B.$
3		«PSER» - (Power Supply Error) либо	0x50534552	U _i < 0.8 U _i или U _i >1.1 U _i (U _i – величины вторичных

Расшифровка информационного массива, передаваемого платой питания

				напряжений);
				вторичные
		«SVNV» (Secondary	0x53564e56)	напряжения в
		Voltages Normal Values)		норме.
4		«PSOT» - (Power	0x50534f54	$T_{PS} > 80 \ ^{0}C;$
		Supply Over		
		Temperature)		
		либо		
		«PSNT» (Power Supply		
		Normal Temperature)	0x50534e54	$T_{PS} < 80 \ ^{0}C.$
		«ETOT» - (External	0x45544f54	$T > 50^{0}C;$
		Thermal sensors Over		
		Temperature)		
5				
5		либо		
		«ETNT» - (External	0x45544e54)	$T < 50^{0}$ C.
		Thermal sensors Normal		
		Temperature):		
6	Текущий активный полукомплект*	«FRST»	0x46525354	Первый
				полукомплект,
0		«SCND»	0x53434e44	второй
				полукомплект.
7				Порядок
				представления
	Информация о вторичных напряжениях	2		измеренных
		контролируемых		значений:
				+27V_PV,
		напряжении		+5V_AU,
				-5V_AU,
	после исполнения			+3.3V_DU.
8	команды			Порядок
		Значения		представления
		контролируемых		измеренных
		напряжений		значений:
				+12V_HV,
	1	1		

				+35V_D1,
				+165V_D2,
				+71V_D3.
9	Информация с температурных датчиков**	Значения температур		Порядок
				представления
				измеренных
				значений: «ТМР1»,
				«TMP2», «TMP3»,
				«TMP4».
10		Значения температур		Порядок
				представления
				измеренных
10				значений:
				«TMP5», «TMP6»,
				«TMP7», «TMP8».
	Последняя отработанная команда*	«OFPS»	0x4f465053	Выключить
				модуль питания;
		«ONPS»	0x4f4e5053	включить модуль
				питания,
		«SLP1»	0x534c5031	перейти на первый
11				полукомплект;
				перейти на второй
		«SLP2»	0x534c5032	полукомплект,
				включить монитор
				напряжений***.
		«MVON»	0x4d564f4e	1
				Рассчитывается
12	Контрольная			путем сложения
		Значение контрольной		слов (32 бита)
				информационного
	сумма	СУММЫ		массива без учета
				переполнения
				Пример: 111 ₂ +
				$101_0 = 100_0$
				$101_2 - 100_2$

*Записываются обозначения в кодировке ANSI (4 символа по 8 бит).

**Данные с датчиков оцифровываются 8-битными АЦП, одно слово содержит 4 значения.

***Команда отключения монитора вырабатывается платой питания автоматически после отработки команды «Монитор».

6. Протокол обмена информационными массивами цифровой части платы питания с внешними устройствами.

6.1 Протокол обмена цифровой части платы питания с внешними устройствами - последовательный SPI интерфейс.

6.2 Электроника SPI интерфейса платы питания работает в роли slave.

6.3 Логика SPI должна быть построена из двух блоков: один блок работает только на прием команд, второй блок осуществляет выгрузку информационного массива.

6.4 Блок, отвечающий за выгрузку массива должен также сигнализировать наличие данных для считывания путем введения дополнительной сигнальной линии is_DATA (эквивалент сигнала «transmit FIFO not empty»).

6.5 Частота синхронизации для обоих блоков – в пределах 0.1–1 МГц, длительность пакета информационного кадра и принимаемого командного сообщения - 32 бита.

6.6 Синхронизация - по положительному фронту, первый передаваемый бит старший. Первый передаваемый пакет – первый.

6.7 На рисунках 6.1 – 6.3 приведены структурная схема прибора и эпюры обмена по последовательному интерфейсу связи SPI.

6.8 В качестве буфера приема команд (SPI логика 2) рекомендуется применять FIFO длиной не меньше командного сообщения (≥32х3).

В качестве буфера отправки информационного кадра (SPI логика 1) рекомендуется применять FIFO (≥32х13) длиной не меньше информационного массива (см. Таблицу № 5.1).



Рис. 6.1 Структурная схема детектора частиц фона и цифровые линии последовательного интерфейса связи.



Рис. 6.2 Эпюры, иллюстрирующие процесс принятия команды платой питания.



Рис. 6.3 Эпюры, иллюстрирующие порядок выгрузки информационного массива.

7. Отработка команд и опрос термодатчиков.

Отработка команды включения монитора вторичных и первичного напряжений платы питания "MVON" осуществляется следующим образом:

7.1 В буфер приема (RX) SPI logic_2 (Рис. 6.1) помещается командное слово содержащее команду «MVON».

7.2 Команда «MVON» отрабатывается платой питания и обновляется информационный массив данными о контролируемых напряжениях.

7.3 После отработки команды «MVON», цифровой частью платы питания восстанавливается исходное рабочее состояние каналов питания.

7.4 После отработки команды «MVON» в буфер отправки (TX) SPI интерфейса платы питания помещается обновленный информационный массив. Линия is_DATA переводится в состояние логической единицы.

7.5 После перехода линии is_DATA в активное состояние из буфера отправки (TX) модуль цифровой обработки информации считывает информационный массив. Линия is_DATA переводится в состояние логического нуля, когда массив полностью считан.

7.6 Выполнение остальных разрешенных команд происходит также непосредственно после помещения в буфер приема (RX) командного слова. После выполнения команд в информационный массив вносится соответствующая информация в поле «Последняя отработанная команда», кадр помещается в буфер отправки, и линия is_DATA переводится в активное состояние. При этом происходит обновление всех полей массива за исключением полей, заполненных данными о значениях вторичных напряжений после последней отработанной команды "MVON" и полей с данными от термодатчиков.

7.7 Принимаемая команда должна пройти проверку на соответствие одной из списка разрешенных команд для платы питания. В случае поступления команды, адресованной не плате питания или же некорректного командного слова, принятые данные удаляются из буфера приема и продолжается нормальная работа платы питания, согласно предыдущим установкам.

7.8 Время выполнения команд не должно превышать 1 секунды от момента помещения командного слова в буфер приема.

7.9 Опрос термодатчиков осуществляется автоматически и не реже, чем через каждые 100 секунд. При этом после опроса датчиков информация о температурах помещается в информационный массив, с последующим помещением массива в буфер отправки и переводом линии is_DATA в активное состояние. При этом также происходит обновление содержимого массива, как и в случае с отработкой команд, описанное выше.

7.10 Информационный массив сохраняется до момента его полного считывания и считывается модулем цифровой обработки данных Детектора Частиц Фона. В случае, когда информационный массив был обновлен, но не последовало его считывание, массив сохраняется в буфере отправки и линия is_DATA остается в активном состоянии. Перезапись содержимого массива осуществляется всегда при наличии новой информации и независимо от факта считывания его из буфера отправки. В момент записи в буфер отправки нового информационного массива линия is_DATA должна находиться в неактивном состоянии («0»). Линия is_DATA переводится в активное состояние только после помещения всего информационного массива в буфер отправки.

7.11 Каждый сформированный/обновленный массив подписывается текущим кодом бортового времени.

Примечание: Частота обновления кода бортового времени и формат времени на данный момент не известны. Известно, что код времени занимает 4 байта. Необходимо предусмотреть обновление внутреннего таймера цифровой части платы питания получаемым периодически значением кода бортового времени.

8. Включение платы питания

8.1 Цифровая часть платы питания включается сразу после подачи первичного напряжения питания +27 В. После подачи питания первичного напряжения цифровая часть платы вырабатывает эквивалент команды «OFPS». Цифровая часть платы питания переходит в режим ожидания команды «ONPS».

8.2 При получении команды «ONPS» цифровая часть платы питания автоматически переходит на первый полукомплект, подает команду включения платы питания и отрабатывает команду монитора вторичных напряжений, сформировав информационный массив и поместив его в буфер отправки.

8.3 В случае смены полукомплекта платы питания в результате аварийной ситуации, цифровая часть платы питания при последующих отработках команды «ONPS» должна автоматически переходить на рабочий полукомплект.

8.4 В случае, когда переключение на другой полукомплект платы питания произошел в отсутствии аварийной ситуации, то при последующих отработках команды «ONPS» автоматически задействуется первый полукомплект платы питания.

9. Действия при возникновении аварийных ситуаций

9.1 При перегреве платы питания либо отклонении вторичных напряжений от нормы цифровая часть платы генерирует обновленный информационный массив, помещает его в буфер отправки SPI logic_1 (Рис. 6.1) и ожидает в течении 10 секунд ответ от Цифрового Модуля прибора. В случае отсутствия ответа от Цифрового Модуля в течении 10 секунд либо принятия ответного сообщения цифровая часть платы питания переключает полукомплект. После чего проводится монитор напряжений и генерируется информационный массив. Ответное сообщение от Цифрового Модуля состоит из одного пакета и содержит константу «ALAC» (Alarm Accepted) в HEX 0x414c4143.

9.2 В случае отклонения значения первичного напряжения питания (+27 В) от допустимого предела более, чем на 10 секунд, цифровая часть платы питания генерирует обновленный информационный кадр, помещает его в буфер отправки и ожидает ответного сообщения от Цифрового Модуля прибора. Если в течении последующих 10 секунд не было ответа («ALAC») либо ответ пришел цифровая часть платы питания отключает прибор (эквивалент команды «OFPS»). После восстановления первичного питания в нормальное значение цифровая часть включает прибор и генерирует информационный массив. В случае перегрева согласно показаниям внешних температурных датчиков, цифровая часть платы питания не предпринимает никаких действий.