

УДК 520.6.05+520.662+53.084

А. В. Дудник<sup>1</sup>, Е. В. Курбатов<sup>1</sup>, В. А. Тарасов<sup>2</sup>, Л. А. Андриющенко<sup>2</sup>,  
И. Л. Зайцевский<sup>3</sup>, Я. Сильвестер<sup>4</sup>, Я. Бонкала<sup>4</sup>, М. Ковалинский<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины, Харьков

<sup>2</sup> Институт сцинтилляционных материалов Национальной академии наук Украины, Харьков

<sup>3</sup> Институт проблем безопасности атомных электростанций Национальной академии наук Украины, Киев

<sup>4</sup> Центр космических исследований Польской академии наук, Вроцлав, Польша

## ДЕТЕКТОР ЧАСТИЦ ФОНА СОЛНЕЧНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ФОТОМЕТРА CHEMIХ КОСМИЧЕСКОЙ МИССИИ «ИНТЕРГЕЛИОЗОНД»: ОТРАБОТКА МОДУЛЕЙ ЛАБОРАТОРНОГО ПРОТОТИПА

*Представлены результаты изготовления, настройки и измерения параметров лабораторных образцов модулей аналоговой обработки сигналов и вторичного питания детектора частиц фона польско-украинского рентгеновского спектрофотометра ChemiX межпланетной миссии «Интергелиозонд». Описаны разработанные, изготовленные и опробованные лабораторные стенды для управления параметрами аналогового модуля и для исследования характеристик малогабаритных органических и неорганических сцинтилляционных детекторов. Представлена и описана функциональная схема прототипа модуля цифровой обработки сигналов и формирования информационных данных на основе ПЛИС ProASIC3E M1A3PE1500; представлены результаты моделирования тестового проекта прототипа цифрового модуля ДЧФ с помощью программного симулятора ModelISim Microsemi ME 10.2 с.*

**Ключевые слова:** спутниковый прибор, детектор заряженных частиц, сцинтиллятор, спектрометр, рентгеновский фотометр, ПЛИС, программное обеспечение, методика настройки.

---

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования солнечно-земных связей с поверхности Земли и на околоземных орбитах [4, 6, 17] в недалеком будущем обогатятся космическими миссиями, особенностью которых является изучение Солнца с близких расстояний. Примерами подобных проектов являются «Solar Orbiter» (ЕКА), «Solar Probe Plus» (НАСА, США), «Solar Polar Orbit Radio Telescope» (Китай), «Solar-C» (JAXA, Япония) [23]. Полезная нагрузка еще одной межпланетной миссии — «Интергелиозонд» [5, 16, 24] со сложной орбитой, пересекающей плоскость эклиптики под поступательно увеличивающимися углами (примерно до 31°), будет

включать в себя аппаратуру для изучения электромагнитных и корпускулярных излучений Солнца с большим временным, пространственным и энергетическим разрешением. Рентгеновский фотометр ChemiX (Chemical composition in X-rays) полезной нагрузки этой миссии предназначен для регистрации микро- и нановспышек, определения химического состава корональной плазмы над яркими точками, вспышечными и активными областями хромосферы, корональными дырами; для исследования вариаций солнечной активности с высоким временным разрешением в диапазоне энергий  $\Delta E = 0.5 \dots 1.5$  кэВ [8, 20—22].

Спектрофотометр ChemiX, общий вид которого представлен на рис. 1, включает в себя детектор частиц фона (ДЧФ), задачами которого явля-

---

© А. В. ДУДНИК, Е. В. КУРБАТОВ, В. А. ТАРАСОВ,  
Л. А. АНДРИЮЩЕНКО, И. Л. ЗАЙЦЕВСКИЙ,  
Я. СИЛЬВЕСТЕР, Я. БОНКАЛА, М. КОВАЛИНСКИЙ, 2015

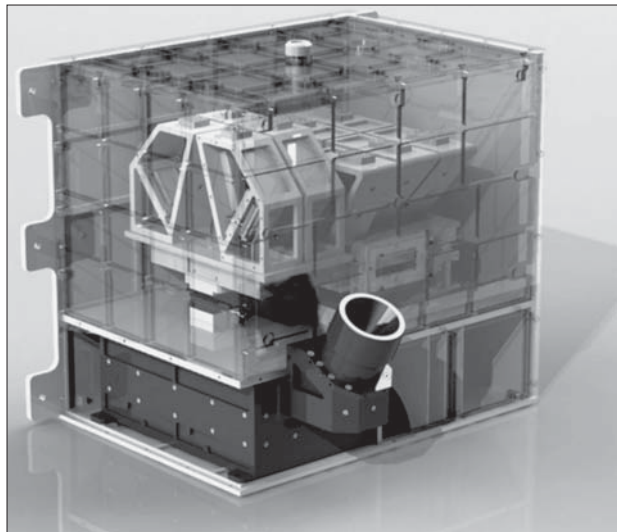


Рис. 1. Общий вид рентгеновского спектрофотометра ChemiX космического проекта «Интергелиозонд»

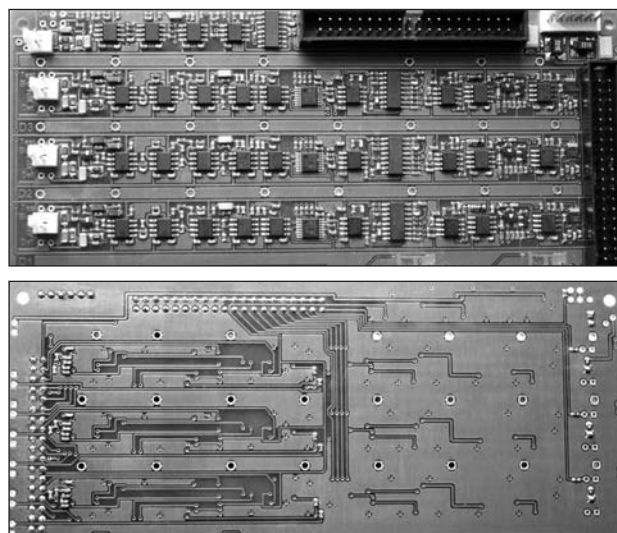


Рис. 2. Фрагмент печатной платы аналоговой обработки сигналов с установленными компонентами. Показаны верхняя (вверху) и нижняя (внизу) стороны платы.

ются: а) мониторинг радиационной обстановки по пути следования космических аппаратов; б) выработка электрических сигналов предупреждения потенциальной опасности радиационного повреждения чувствительных полупроводниковых сенсоров фотометра; в) изучение временной динамики потоков заряженных частиц, уско-

ренных во время хромосферных вспышек и на фронтах межпланетных корональных выбросов массы [13]. ДЧФ в составе польско-украинского прибора ChemiX разрабатывается согласно долгосрочному Договору о научно-техническом сотрудничестве между Радиоастрономическим институтом НАН Украины и Центром космических исследований Польской академии наук. В ходе текущей разработки детектора частиц фона авторы использовали подходы и технические решения, примененные при создании лабораторного образца компактного спутникового прибора SIDRA (The Satellite Instrument for Determination of Radiation Environment) [1–3, 9–12, 14–15, 18–19].

Целью настоящей работы является представление текущего состояния отработки концепции построения и настройки механических модулей, плат аналоговой обработки сигналов, источника вторичного питания, выбора базового элемента модуля цифровой обработки сигналов и формирования информационных массивов детектора частиц фона рентгеновского спектрофотометра ChemiX.

#### МОДУЛЬ АНАЛОГОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Построение концепции модуля ДЧФ прибора ChemiX включает в себя разработку принципиальных электрических схем каналов обработки аналоговых сигналов, поступающих от телескопического модуля детекторов высокоэнергетических заряженных частиц. В телескопическом модуле используются два последовательно расположенных многоэлементных блока детектирования на основе высокоомных кремниевых PIN-детекторов. Спектрометрические каналы высокоомных кремниевых PIN-детекторов функционально не отличаются друг от друга и состоят из а) зарядово-чувствительного предварительного усилителя (ЗЧПУ), предназначенного для преобразования поглощенной энергии в импульс напряжения, амплитуда которого пропорциональна величине поглощенной энергии, б) формирователя, предназначенного для формирования спектрометрического импульса на основе выходного импульса ЗЧПУ, в) масштабирующего усилителя; предназначенного для ре-

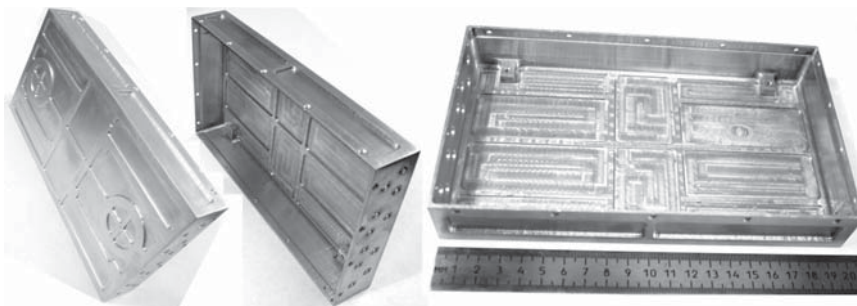


Рис. 3. Цельнофрезерованный корпус платы аналоговой обработки сигналов

гулирования коэффициента усиления спектротрического тракта в соответствии с выбором регистрируемых сортов частиц с помощью подачи телеметрических функциональных команд, γ) устройства выборки и хранения с аналого-цифровым преобразователем (АЦП), который преобразует сформированный импульс в цифровой код, пригодный для обработки модулем цифровой обработки.

Нижним в телескопическом модуле является блок сцинтилляционного детектора с многоэлементным счетчиком оптических фотонов, МРРС (Multi Pixel Photon Counter). Канал преобразования сигналов от сцинтилляционного детектора построен по функционально более простой схеме, чем каналы двух кремниевых блоков детектирования, описанные выше.

Лабораторный образец платы преобразования аналоговых сигналов выполнен с использованием SMT-технологии сборки на дискретных радиокомпонентах размером  $1.6 \times 0.8$  мм (дюймовый типоразмер 0603) и на микросхемах в корпусах SOIC и MSSOP, что позволило минимизировать размер печатной платы. Компоновка и монтаж выполнены с соблюдением требований государственных стандартов по размещению радиокомпонентов и параметрам температурных режимов пайки (рис. 2). Визуальный контроль соединений и электрический контроль цепей, сравнение токов потребления по каждой шине питания с рассчитанными величинами, исходя из паспортов каждого активного элемента, подтвердили готовность модуля к тестовым измерениям в составе лабораторного образца прибора в целом. Измеренный ток потребления по шине

питания «+5В»  $I_+^{\text{ам}} = 221$  мА, по шине питания «-5В» —  $I_-^{\text{ам}} = 156$  мА.

Конструктивно аналоговый модуль представляет собой облегченный фрезерованный, покрытый никелем корпус из сплава марки Д16А ГОСТ17232-99 весом 180 г (рис. 3), внутри которого размещена печатная плата аналоговой обработки сигналов. Габаритный размер корпуса определяется внешним размером печатной платы и необходимостью создания дополнительного свободного пространства за габаритами платы для размещения жгута кабелей, с помощью которых выполнены электрические соединения между модулями. Внутри корпуса предусмотрены выступы с резьбовыми отверстиями для крепления печатной платы. На боковых стенках корпуса предусмотрены механические интерфейсные соединения между корпусами модулей прибора ДЧФ.

Разработана методика проверки работоспособности функциональных узлов платы аналоговой обработки сигналов до узла оцифровки сформированных спектротрических аналоговых сигналов, на основании которой было проведено тестирование и определение основных технических характеристик платы.

Измерения показали, что потребляемая мощность модуля составляет  $P_{\text{ам}} = 1.85$  Вт. ЗЧПУ имеет следующие характеристики: длительность фронта —  $\tau_{\text{ф}} = 25$  нс; чувствительность по энергии —  $\eta_1 = 88$  мВ/МэВ (1-й Si-детектор) и  $\eta_2 = 22$  мВ/МэВ (2-й Si-детектор). Усилитель-формирователь имеет следующие характеристики: длительность импульса на уровне 10 % от максимальной амплитуды —  $\tau_{0.1}'' = 2$  мкс, динамичес-

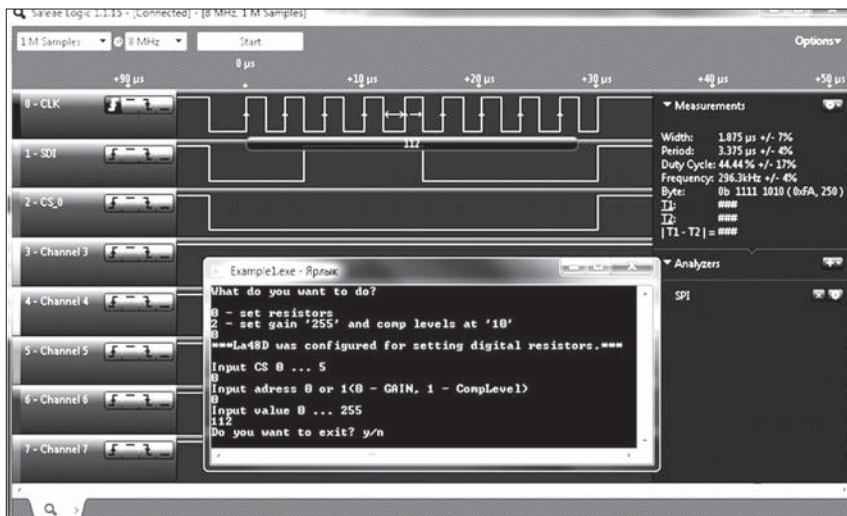


Рис. 4. Интерфейсные окна логического анализатора и программы управления цифровыми потенциометрами платы аналоговой обработки сигналов

кий диапазон выходного сигнала формирователя импульсов —  $U_{\text{ф}} = 0...3.7 \text{ В}$ ; темп счета до  $f = 200 \text{ кГц}$ . С помощью масштабирующего усилителя имеется возможность изменять коэффициент усиления от 1 до 35. Линейный диапазон входных напряжений пикового детектора находится в пределах от  $U_{\text{пд}} = 0.025...3.6 \text{ В}$ ; максимальное время удержания амплитуды спектрометрического импульса —  $t_{\text{пд}}^{\text{уд}} = 2.5 \text{ мкс}$ ; спад сигнала происходит со скоростью  $\Delta U / \Delta t = 4.7 \text{ мВ/мкс}$ . Коэффициенты передачи и формирователя, и пикового детектора составляют  $K_{\text{уф}}^{\text{в}} = K_{\text{пд}}^{\text{в}} = 1$ .

#### СТЕНД ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ АНАЛОГОВОГО МОДУЛЯ

Для дистанционного управления регулируемы-ми параметрами аналогового модуля разработан и опробован лабораторный стенд управления параметрами аналогового модуля на базе цифровой платы ввода/вывода LA48D PCI, специально изготовленного сигнального кабеля, который соединяет аналоговую плату модуля ДЧФ и порт А платы LA48D PCI, и программного продукта, который позволяет управлять платой под операционной системой Windows. Цифровая плата LA48D PCI предназначена для работы в составе персонального компьютера и соединяется с

ним с помощью интерфейса PCI, имеет 48 линий ввода/вывода сигналов и совместима с TTL-уровнями логических сигналов. Плата имеет два разъема типа DHR по 26 контактов каждый, на которые выведены по три двунаправленных 8-битных порта.

Изготовленный стенд позволяет изменять коэффициент передачи масштабирующего усилителя аналогового модуля и управлять уровнем срабатывания компараторов устройств выборки и хранения аналоговых сигналов. Выбор коэффициента усиления определяет сорт регистрируемых частиц, а установка уровня компаратора определяет нижнюю границу энергии регистрации для выбранного сорта частицы. Программа разработана на языке программирования C++ и представляет собой консольное приложение с последовательным вводом необходимых параметров аналоговой платы. Изменение коэффициентов усиления и порогов компараторов пиковых детекторов аналогового модуля обеспечивается цифровыми потенциометрами, которые управляются платой LA48D PCI по SPI-интерфейсу.

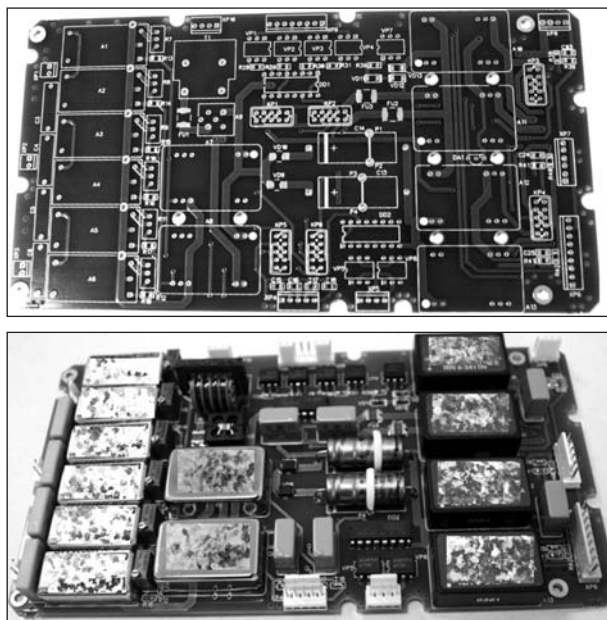
Тестирование работы стенда проводилось с помощью логического анализатора с расширенными возможностями LogicU-Plus разработки

инженерной группы 6-LAB, который подключается к персональному компьютеру с помощью интерфейса USB и имеет свое программное обеспечение. В интерфейсном окне программы логического анализатора на вкладке «Настройка» устанавливаются параметры SPI-протокола, который реализует плата ЛА48Д PCI. После сохранения настроек в главном окне программы устанавливается частота опроса линий и запускается симуляция. Результат проверки работоспособности лабораторного стенда ввода/вывода с помощью логического анализатора LogicU-Plus показан на рис. 4. В данном примере показано, что к цифровому потенциометру аналоговой платы под номером 1 (CS\_0) с адресом 0 (1-й из двух) было отправлено значение 112. С помощью программы Selea Logic 1.1.15 были считаны данные с логического анализатора по SPI-интерфейсу. Расшифровка информационного пакета по линии SDI дала значение 112, что соответствует переданной информации.

#### МОДУЛЬ ВТОРИЧНОГО ПИТАНИЯ

Каждый из двух полукомплектов платы вторичного питания, работающих по принципу «холодного резервирования» состоит из пяти независимых каналов, генерирующих напряжения питания для: а) модуля аналоговой обработки сигналов; б) модуля цифровой обработки данных; в) кремниевых PIN-детекторов заряженных частиц высоких энергий прямой регистрации и полупроводникового фотоэлектронного умножителя, чувствительного к слабым вспышкам люминесценции сцинтиллятора детекторной головки прибора. В разработанной принципиальной электрической схеме предусмотрены индуктивно-емкостные и емкостные фильтры в первичных и вторичных цепях питания каналов  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ан}} = \pm 5 \text{ В}$  и  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ц}} = +5 \text{ В}$ . DC-DC-конвертеры обеспечивают гальваническую развязку между первичными и вторичными цепями, что значительно повышает защищенность каналов питания аналогового и цифрового модулей от помех и возможных перепадов напряжения бортовой системы питания.

На рис. 5 показана плата вторичного питания до установки радиокомпонентов и после мон-



**Рис. 5.** Плата вторичного питания до установки радиокомпонентов (вверху) и после монтажа DC-DC конвертеров, разъемов, микросхем и SMD-компонентов (внизу)

тажа всех элементов. Для облегчения теплового режима работы DC-DC-конвертеров при отсутствии конвективного теплообмена в условиях космоса используются «тепловые мостики», отводящие выделяемое при работе конвертеров тепло на корпус блока питания. Тепловые контакты обеспечиваются применением консистентной теплопроводящей пасты. В плате предусмотрены монтажные отверстия для фиксации «тепловых мостиков». Дополнительно выполнены отверстия для механического крепления сигнальных кабелей.

С целью контроля основных электрических параметров платы питания разработана методика ее проверки для двух режимов эксплуатации: а) без подключенной нагрузки к выходным цепям вторичного питания, т. е. в режиме «холодного хода»; б) в режиме максимальной нагрузки цепей питания. Методика предусматривает проверку отработки таких основных функциональных команд, как включение и выключение платы, последовательное подключение нагрузки к одному из двух полукомплектов, отработка ко-

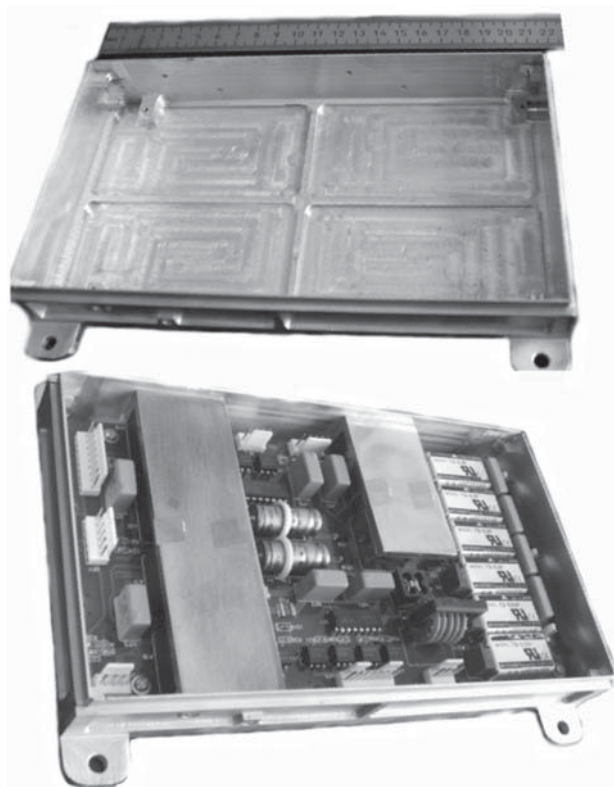


Рис. 6. Облегченный корпус (вверху) и вариант установки платы вторичного питания в корпусе с «тепловыми мостиками» (внизу)

манд проверки уровней первичного и вторичных напряжений с выводом информации в телеметрическую сеть. Кроме того, разработанная методика описывает порядок действий при проверке значений вторичных напряжений, генерируемых платой питания. В табл. 1 и 2 представлены измеренные значения токов потребления при разных значениях напряжения бортовой сети и выходных напряжений одного из двух полукомплектов платы вторичного питания при номинальном значении первичного питания  $U_{вх} = 27$  В.

Для крепления платы вторичного питания изготовлен облегченный цельнофрезерованный корпус массой 160 г согласно разработанной рабочей конструкторской документации. Внутри корпуса предусмотрены выступы с резьбовыми отверстиями для крепления печатной платы. На

боковых стенках корпуса предусмотрены механические интерфейсные соединения между корпусами модулей. С наружной стороны боковых стенок имеются продолжения нижней плоскости корпуса (по два с каждой стороны) с отверстиями для крепления модуля ДЧФ к боковой стенке прибора ChemiX.

На рис. 6 показаны изготовленный корпус (вверху) и вариант установки «тепловых мостиков» на поверхности DC-DC-конвертеров платы вторичного питания, закрепленной внутри облегченного корпуса (вверху). Значительная часть веса (513 г) собранного блока вторичного питания обусловлена суммарной массой DC-DC-конвертеров и «тепловых мостиков».

Таблица 1. Токи потребления платы вторичного питания ( $I_0$  — при отсутствии нагрузки,  $I_n$  — при подключенной нагрузке) при разных значениях напряжения  $U_{вх}$  бортовой сети

$U_{вх}, В$	$I_0, А$	$I_n, А$	$I_0, А$	$I_n, А$
	Полукомплект 1		Полукомплект 2	
23	0.060	0.355	0.058	0.348
27	0.050	0.298	0.052	0.295
34	0.045	0.239	0.045	0.237

Таблица 2. Выходные напряжения 1-го полукомплекта платы питания ( $U_{вых}$  — номинальное значение,  $U_{вых}^0$  — при отсутствии нагрузки,  $U_{вых}^H$  — при подключенной нагрузке) при номинальном значении первичного питания  $U_{вх} = 27$  В

$U_{вых}, В$	Назначение	$U_{вых}^0, В$	$U_{вых}^H, В$
+35	Напряжение смещения для 1-го Si-детектора	+35.53	+35.44
+200	Напряжение смещения для 2-го Si-детектора	+199.8	+197.1
+71	Напряжение смещения для Si-фотоумножителя	+71.2	+70.8
+5	Питание платы цифровой обработки сигналов	+4.98	+4.87
+5	Питание платы аналоговой обработки сигналов	+5.01	+4.97
-5	Питание платы аналоговой обработки сигналов	-4.98	-4.95

## ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОГАБАРИТНЫХ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

### Предпосылки разработки и изготовления лабораторного стенда.

В качестве нижнего детектора антисовпадений в телескопической системе детекторной головки использован органический сцинтиллятор из монокристаллического паратерфенила, сочлененный с кремниевым фотоэлектронным умножителем (ФЭУ). Особенностью детектора является то, что светособирающий световод выполнен в виде цельного нераздельного блока на базе одного и того же монокристалла сцинтиллятора (рис. 7). Это исключает потери света не только на границе сцинтиллятор — световод, но и в самом световоде, который является тем же сцинтиллятором. Эффективность регистрации оптических фотонов кремниевыми ФЭУ зависит от длины волны фотонов и превышают 50—60 % в диапазоне длин волн 350—500 нм спектра излучения паратерфенила, что исключает необходимость применения сместителя спектра.

Для повышения эффективности светособирания вся поверхность сцинтиллятора, за исключением выходного окна, покрыта светоотражающим диффузным отражателем Tetratex, имеющим коэффициент отражения  $\rho = 95\%$ . Такой значительный коэффициент отражения позволяет реализовать высокие сцинтилляционные характеристики детекторов на основе кристаллов активированного паратерфенила.

Кремниевые ФЭУ, работающие в режиме ограниченного гейгеровского разряда, имеют большие внутренние коэффициенты усиления  $K_y^{\text{Si-PM}} = 10^4 \dots 10^7$  (в зависимости от числа пикселей и технологии изготовления фотоприемника). Коэффициент усиления ФЭУ является функцией перенапряжения  $U_{ov}$ , определяемого как:

$$U_{ov} = U_{bias} - U_{bd}, \quad (1)$$

где  $U_{bias}$  — напряжение обратного смещения ФЭУ,  $U_{bd}$  — напряжение пробоя кремниевого ФЭУ. В свою очередь, величина  $U_{bd}$  зависит от температуры. В частности, для кремниевого ФЭУ серии S10931 фирмы «Hamamatsu Photonics» температурный коэффициент напряжения

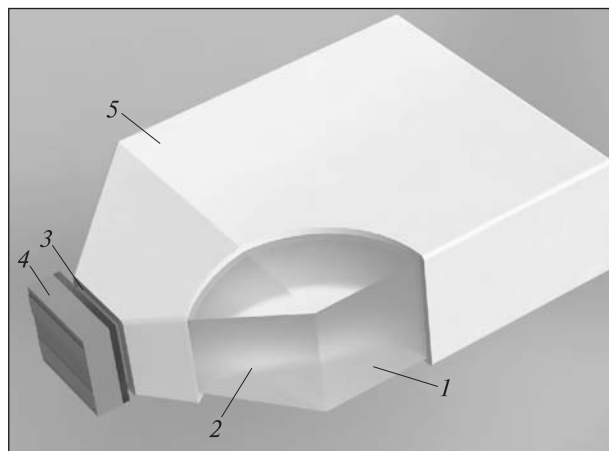
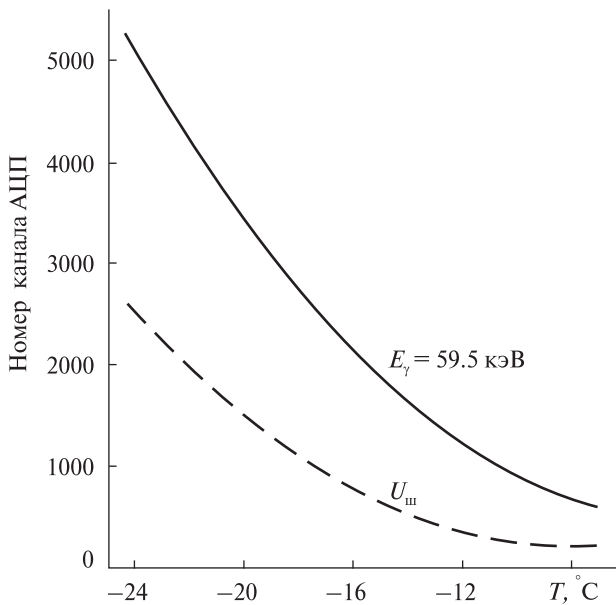


Рис. 7. Схематическое изображение малогабаритного детектора на основе монокристалла активированного паратерфенила: 1 — сцинтиллятор, 2 — светособирающий световод, 3 — оптическая связь, 4 — кремниевый ФЭУ, 5 — светоотражающее покрытие

пробоя составляет  $\Delta U / \Delta T = 56$  мВ/К согласно данным производителя.

Для проверки работоспособности сцинтилляционного детектора, изображенного на рис. 7, и определения степени смещения пика от моноэнергетической линии  $^{241}\text{Am}$   $E_\gamma = 59.5$  кэВ по каналам спектрометрического АЦП в зависимости от температуры был поставлен эксперимент с использованием холодильной камеры. В качестве фотоприемника применялся кремниевый ФЭУ S10931-100P с количеством пикселей 900 и размерами каждого пикселя  $100 \times 100$  мкм. Геометрический размер чувствительной области фотоприемника —  $3 \times 3$  мм, при этом чувствительность к свету — 78.5 % площади (fill factor). Измерение сцинтилляционных характеристик проводилось при одном и том же значении напряжения обратного смещения  $U_{bias} = 68.5$  В.

На рис. 8 показано смещение пика энергетической линии  $E_\gamma = 59.5$  кэВ в каналах АЦП и шумов фотоприемника  $U_{ш}$  в зависимости от температуры. Видно, что коэффициент усиления МРРС S10931-100P  $K_y^{\text{Si-PM}}$  падает более чем в пять раз при увеличении температуры от  $-24$  до  $-7$  °С, что обусловлено увеличением значения с повышением температуры, и как следствие — уменьшением перенапряжения  $U_{ov}$ . В частности,



**Рис. 8.** Зависимость положения пика энергетической линии  $E_\gamma = 59.5$  кэВ в каналах АЦП и шумов фотоприемника  $U_{ш}$  от температуры при напряжении обратного смещения  $U_{bias} = 68.5$  В. (Радиоактивный источник  $^{241}\text{Am}$ , фотоприемник S10931-100P «Hamamatsu Photonics»)



**Рис. 9.** Конструкционный вид компактного настольного стенда для исследования режимов работы малогабаритных органических сцинтилляционных детекторов

для МРРС S10931-100P экспериментальным путем была найдена следующая зависимость  $U_{bd}$  от температуры [7]:

$$U_{bd} = 0.05767T + 67.8631 \text{ [В]}, \quad (2)$$

где  $T$  — температура в  $^{\circ}\text{C}$ .

**Конструкция и технические характеристики компактного стенда для исследования режимов работы сцинтилляционных детекторов.** С целью исследования и оптимизации режимов работы блока органического сцинтиллятора детекторной головки модуля ДЧФ спроектирован, изготовлен и опробован компактный настольный стенд, состоящий из верхнего герметичного и нижнего негерметичного отсеков (рис. 9). В соответствии с разработанной эскизной конструкторской документацией изготовлены механические детали и узлы стенда и печатные платы: а) управления термоэлектрическим модулем (ТЭМ), б) вторичного питания и в) первичных цепей кремниевого ФЭУ — МРРС.

В герметическом откачиваемом отсеке размещается двухкаскадный ТЭМ, исследуемые сменные сцинтилляторы и кремниевые фотоприемники с различными размерами и количеством пикселей для исследования спектрометрических и шумовых характеристик. Остаточное давление воздуха контролируется мембранным манометром. В негерметическом отсеке расположены три электронные печатные платы, перечисленные выше, и герморазъем для вывода сигналов фотоприемника и термодатчика, а также подачи питания на ТЭМ. На внешней стороне корпуса нижнего отсека установлен разъем класса D-sub для выходных сигналов стенда, подачи сигналов управления и напряжений питания.

Тестовые испытания изготовленного компактного стенда позволили получить его следующие основные технические характеристики: а) габаритные размеры: высота — 210 мм, диаметр — 95 мм; б) вес — 1100 г; в) максимальное энергопотребление не превышает 2.9 Вт при максимальной разнице между задаваемой на сцинтилляторе и комнатной температурами; г) минимальное давление в герметичном отсеке — 8 кПа (0.08 атм); д) посадочное место предусмотрено для исследуемого сцинтиллятора с размерами, не превышающими  $15 \times 15 \times 30$  мм; е) среднее время установления температурного режима — до 5 мин; ж) максимальное время установления температурного режима при исполь-



зовании сцинтилляторов больших размеров, и для максимальной разницы между задаваемой и комнатной температурами — 30 мин; з) мощность ТЭМ — 0.95 Вт; и) максимально возможная разница между задаваемой стабилизированной на сцинтилляторе и комнатной температурами:  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; к) точность установления температуры стабилизации —  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОТОТИПА МОДУЛЯ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ И ФОРМИРОВАНИЯ ДАННЫХ

В качестве базового элемента прототипа модуля цифровой обработки сигналов выбрана перепрограммируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) компании “Microsemi Corporation”

ProASIC3E M1A3PE1500. Основными критериями выбора данного типа ПЛИС были совместимость программного обеспечения с программой обработки данных и формирования информационных массивов цифровой части спектрофотометра ChemiX, возможность многократного перепрограммирования, минимальное энергопотребление, возможность использования в экстремальных температурных режимах.

В среде разработки Libero SoC создан тестовый проект, построенный по иерархическому принципу, т. е. каждый из перечисленных далее блоков имеет в своем составе несколько других блоков. Верхний уровень иерархии проекта включает в себя: а) центральный процессор (ЦП), б) оперативную память ЦП, в) блок

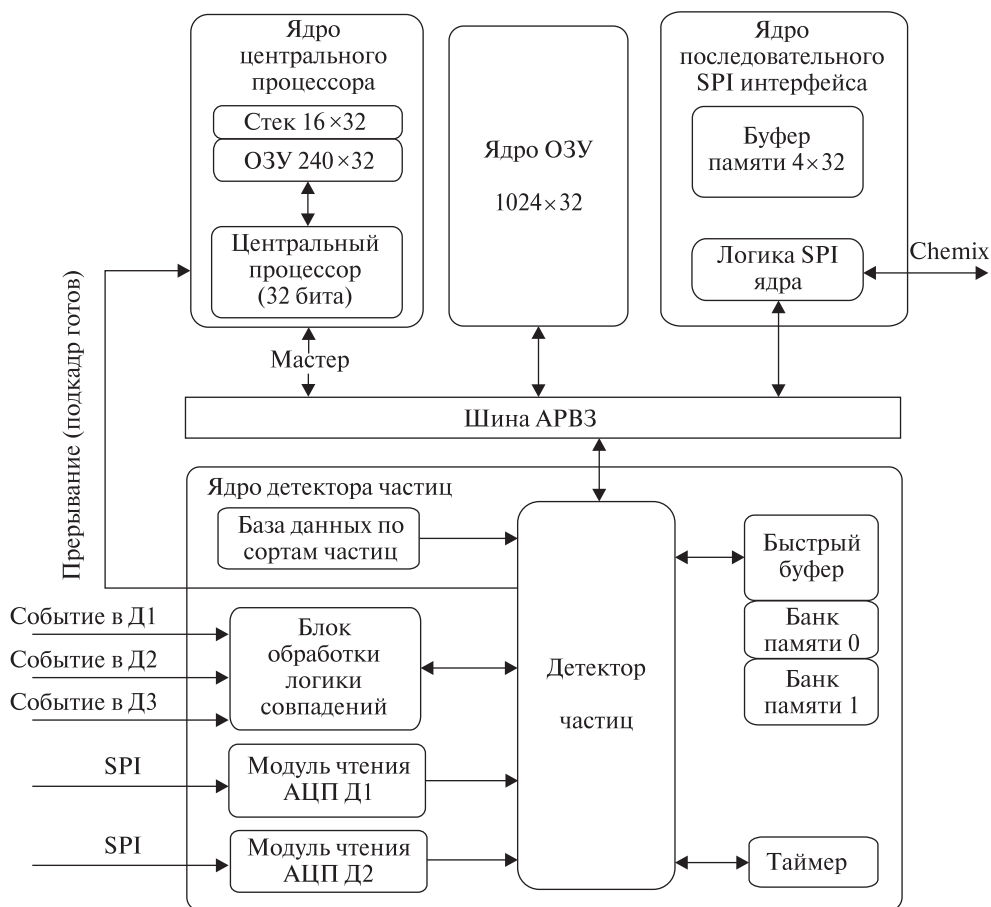


Рис. 10. Структурная схема тестового проекта ПЛИС ProASIC3E M1A3PE1500 прототипа модуля цифровой обработки сигналов

SPI-интерфейса, г) детекторный блок и д) шину APB3, к которой подключены все перечисленные выше блоки (рис. 10). Мастером на шине APB3 выступает ЦП, который читает и записывает данные в подключенные блоки.

Центральный процессор выполнен на базе библиотечного ядра COREABC и имеет следующие параметры: а) разрядность — 32 бита, б) количество устройств по шине APB3 — 3, в) объем внутренней оперативной памяти —  $256 \times 32$ , из них под стек выделено 16 слов, г) адресное пространство внешней оперативной памяти —  $1024 \times 32$ , д) количество линий ввода — 1, е) количество линий вывода — 32. Процессор выполняет функции формирования информационного кадра и передачи данных в персональный компьютер с помощью интерфейса SPI, обрабатывает команды бортового компьютера и управляет детекторным блоком. Детекторный блок управляется ЦП с помощью шины APB3 и предназначен для обработки логики совпадений, чтения кодов АЦП и управления параметрами модуля аналоговой обработки сигналов.

Выходной информационный кадр формируется ЦП на основе данных, собранных детекторным блоком и состоит из 10 подкадров длительностью 10 с каждый. Тестовый проект ПЛИС прототипа модуля цифровой обработки сигналов содержит логический блок генератора частиц, функцией которого является генерирование сигналов, имитирующих сигналы заряженных частиц, которые детекторный блок принимает и сохраняет в буферной части. ЦП каждые 10 с считывает данные о частицах из буферной части детекторного блока ПЛИС и записывает в соответствующее адресное пространство информационного кадра в оперативной памяти ЦП. Процесс формирования информационного массива заканчивается тем, что к информационному кадру каждые 100 с добавляются данные о метках времени, вычисляется и записывается контрольная сумма и телеметрическая информация о работоспособности прибора.

Моделирование тестового проекта прототипа цифрового модуля прибора ДЧФ проведено с помощью программного симулятора ModelISim Microsemi ME 10.2 с. В процессе моделирования

отработаны процедуры: а) формирования информационного кадра, который заполнялся данными из блока генератора частиц, и б) выгрузки информационного кадра, который разбивался на пакеты данных объемом по 32 бита каждый и транслировался по высокоскоростному последовательному протоколу SPI.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны принципиальные электрические схемы и рабочая конструкторская документация, изготовлены металлические корпуса, изготовлены, собраны и настроены платы модулей аналоговой обработки сигналов и вторичного питания детектора частиц фона фотометра мягких рентгеновских лучей ChemiX межпланетной космической миссии «Интергелиозонд». Лабораторный стенд управления параметрами аналогового модуля на базе универсальной платы ввода/вывода цифровых сигналов LA48D PCI показал возможность дистанционного управления параметрами модуля аналоговой обработки сигналов прибора ДЧФ с помощью внешних команд. Специально разработанный компактный стенд для исследования режимов работы малогабаритных органических сцинтилляционных детекторов продемонстрировал возможность измерения параметров сцинтилляторов различной геометрической формы при различных температурах со сменными полупроводниковыми фотоприемниками, имеющими разное количество пикселей. Тестовый проект для модуля цифровой обработки сигналов на основе ПЛИС ProASIC3E M1A3PE1500, разработанный в среде разработчика Libero SoC, показал готовность его отработки на реальной микросхеме, в частности, с помощью платы разработчика цифровой аппаратуры ProsASIC3/E Starter Kit Board с ПЛИС A3PE1500-PQ208 на борту.

*Авторы благодарны администрации Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина Министерства образования и науки Украины за техническое обеспечение выполнения работы. Работа выполнена при поддержке Национальной академии наук Украины в рамках Целевой комплексной программы НАН Украины по научным космическим исследованиям на 2013 — 2016 годы, Договор № 1.57.1.11.*

1. Дудник А. В., Курбатов Е. В., Сильвестер Я. и др. Разработка малогабаритного спутникового прибора SIDRA для мониторинга потоков заряженных частиц в космическом пространстве // Космічні дослідження в Україні, 2012—2014: Звіт до COSPAR. — К: Академперіодика, 2014. — С. 65—70.
2. Дудник А. В., М. Прето М., Курбатов Е. В. и др. Малогабаритный прибор для мониторинга электронов и ядер высоких энергий в открытом космическом пространстве // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 6. — С. 22—34.
3. Дудник А. В., Прето М., Курбатов Е. В. и др. Прибор SIDRA для измерения потоков частиц на спутниковых высотах: лабораторный прототип // Астрон. вестн. — 2013. — **47**, № 1. — С. 61—69.
4. Кузнецов В. Д. Космические исследования Солнца: состояние и перспективы // Солнечно-земная физ. — 2010. — Вып. 16. — С. 39—44.
5. Кузнецов В. Д. Солнечно-земная физика и её приложения // Успехи физ. наук. — 2012. — **182**. — С. 327—336.
6. Кузнецов В. Д., Зеленый Л. М. Космические проекты по солнечно-земной физике // Солнечно-земная физ. — 2008. — **1**, вып. 12. — С. 83—92.
7. Курбатов Е. В., Дудник А. В., Титов К. Г. и др. Сравнительные характеристики сборок из малогабаритных сцинтилляторов на основе п-терфенила и кремниевых ФЭУ // XI-я конф. по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям: Тез. докл. — Киев, 2013 — С. 99.
8. Сильвестер Я., Бакала Я., Подгорски П. и др. «ХЕМИКС» — солнечный Бреговский спектрометр мягкого рентгеновского диапазона нового поколения // Проект «Интергелиозонд»: Тр. раб. совещания по проекту «Интергелиозонд». — Таруса, 2012. — С. 52—64.
9. Dudnik O. V., Bilogub V. V., Kurbatov E. V., et al. Compact on-board instrument SIDRA for measurement of particle fluxes & dose rates — concept and first model // 9<sup>th</sup> Ukr. Conf. on Space Research: Abstracts. — 2009. — P. 78.
10. Dudnik O. V., Kurbatov E. V., Avilov A. M., et al. Results of the first tests of the SIDRA satellite-borne instrument breadboard model // Probs Atomic Sci. and Technology. Ser. "Nuclear Physics Investigations". — 2013. — **3(85)**, N 60. — P. 297—302.
11. Dudnik O. V., Prieto M., Kurbatov E. V., et al. First concept of compact instrument SIDRA for measurements of particle fluxes in the space // J. Kharkiv Univ. Phys. Ser. "Nuclei, Particles, Fields". — 2011. — **969**, N 3(51). — P. 62—66.
12. Dudnik O. V., Prieto M., Kurbatov E. V., et al. Approaches to signal processing from the light scintillation and semiconductor detectors in the compact satellite instrument SIDRA for monitoring of high energy charge particles // 12<sup>th</sup> Ukr. conf. on space research: Abstracts. — 2012. — P. 102.
13. Dudnik O. V., Prieto M., Kurbatov E. V., et al. Functional capabilities of the breadboard model of SIDRA satellite-borne instrument // Probs Atomic Sci. and Technology. Ser. "Nuclear Physics Investigations". — 2013. — **3(85)**, N 60. — P. 289—296.
14. Dudnik O. V., Sanchez S., Prieto M., et al. Onboard instrument SIDRA prototype for measurements of radiation environment in the space // 39<sup>th</sup> Scientific Assembly of COSPAR. Session H0.3 "Technical Development of Instrumentation for Current Missions": Abstracts. — 2012. — Abstract STW-B-153 H0.3-0023-12. — P. 106.
15. Dudnik O. V., Sylwester J., Siarkowski M., Kowalinski M., et al. The high energy charge particle detector module in the ChemiX instrument aboard Interhelioprobe mission: the goals, concept and design // 13<sup>th</sup> Ukr. Conf. on space research: Abstracts. — 2013. — P. 123.
16. Kuznetsov V., Zelenyi L. The Interhelioprobe Mission for Solar and Heliospheric Studies // 40<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly. Panel D2.4 "The Science with Future Solar missions, from the Sun to the Heliosphere": Abstracts. — 2014. — Abstract N.D2.4-3-14.
17. Murphy N. Measurement and Instrument Challenges for Future Solar and Heliospheric Missions // Joint Assembly of American Geophysical Union. Section "Space Magnetospheric Physics", Session "Technology Development for Sun/Solar System Connections Science I": Abstracts. — 2006. — Abstract N SM33C-01.
18. Prieto M., Dudnik O. V., Sanchez S., et al. Breadboard model of the SIDRA instrument designed for the measurement of charged particle fluxes in space // J. Instrumentation. — 2013. — **8**. — T04002.
19. Prieto M., Guzman D., Garcia J. I., et al. Control Unit of the SIDRA Scientific Instrument // Proc. of 9<sup>th</sup> Conf. "Jornadas de Computacion Reconfigurable y Aplicaciones". — Alcalá de Henares, Spain, 2009. — P. 475—484.
20. Sylwester J., Kordylewski Z., Plocieniak S., et al. X-ray Flare Spectra from the DIOGENESS Spectrometer and its concept applied to ChemiX on the Interhelioprobe spacecraft // Solar Phys. — 2014. — arXiv:1411.0850 [astro-ph.SR].
21. Sylwester J., Kuznetsov V., Zimovets I., et al. ChemiX: a new generation bent crystal spectrometer for Interhelioprobe mission to the Sun // 40<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly. Panel D2.4 "The Science with Future Solar missions, from the Sun to the Heliosphere": Abstracts. — 2014. — Abstract D2.4-34-14.
22. Sylwester J., Siarkowski M., Szafarz Z., Bąkala J., Dudnik O., et al. ChemiX — the soft X-ray Bragg spectrometer under development for the Interhelioprobe Mission // 13<sup>th</sup> RHESSI Workshop. Session "Current and Future Instrumentation": Abstracts. — 2014. — P. 17.

23. *Watanabe T.* The Solar-C Mission // Proc. of SPIE. — 2014. — **9143**. “Space Telescopes and Instrumentation 2014: Optical, Infrared, and Millimeter Wave”, Session “Solar System”. — Abstract N 91431O.
24. *Zimovets I., Zelenyi L., Kuznetsov V., and the IHP Team.* Current state of the Interhelioprobe mission // 14<sup>th</sup> European Solar Physics Meeting. Session 1 “New and Upcoming Heliospheric Observational and Data Assimilation Facilities”: Programme and Abstract Book. —2014. — P. 12.

Стаття надійшла до редакції 02.02.15

О. В. Дудник<sup>1</sup>, Е. В. Курбатов<sup>1</sup>, В. О. Тарасов<sup>2</sup>,  
Л. А. Андрищенко<sup>2</sup>, И. Л. Зайцевский<sup>3</sup>,  
Я. Сильвестер<sup>4</sup>, Я. Бонкала<sup>4</sup>, М. Ковалинский<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Радіоастрономічний інститут

Національної академії наук України, Харків

<sup>2</sup> Інститут сцинтиляційних матеріалів

Національної академії наук України, Харків

<sup>3</sup> Інститут проблем безпеки атомних електростанцій

Національної академії наук України, Київ

<sup>4</sup> Центр космічних досліджень

Польської академії наук, Вроцлав, Польща

#### ДЕТЕКТОР ЧАСТИНОК ФОНУ СОНЯЧНОГО РЕНТГЕНІВСЬКОГО ФОТОМЕТРУ СЕМІХ КОСМІЧНОЇ МІСІЇ «ІНТЕРГЕЛІОЗОНД»: ВІДПРАЦЮВАННЯ МОДУЛІВ ЛАБОРАТОРНОГО ПРОТОТИПУ

Подаються результати дослідження, налаштування і вимірювання параметрів лабораторних зразків модулів аналогової обробки сигналів і вторинного живлення детектора частинок фону польсько-українського рентгеновського спектрофотометра ChemiX міжпланетної місії «Інтергеліозонд». Описуються розроблені, виготовлені і випробувані лабораторні стенди для управління параметрами аналогового модуля і для досліджень характеристик малогабаритних органічних і неорганічних сцинтиляційних детекторів. Представлено і описано функціональну схему прототипу модуля цифрової обробки сигналів і формування інформаційних даних на основі ПЛІС ProASIC3E M1A3PE1500; представлено результа-

ти моделювання тестового проекту прототипу цифрового модуля ДЧФ за допомогою програмного симулятора ModelISim Microsemi ME 10.2 с.

**Ключові слова:** супутниковий прилад, детектор заряджених частинок, сцинтилятор, спектрометр, рентгеновський фотометр, ПЛІС, програмне забезпечення, методика налаштування.

О. В. Дудник<sup>1</sup>, Е. В. Курбатов<sup>1</sup>, В. О. Тарасов<sup>2</sup>,  
Л. А. Андрищенко<sup>2</sup>, И. Л. Зайцевский<sup>3</sup>, Я. Сильвестер<sup>4</sup>,  
Я. Бонкала<sup>4</sup>, М. Ковалиński<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Institute of Radio Astronomy

of National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv

<sup>2</sup> Institute for Scintillation Materials

of National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv

<sup>3</sup> Institute Issues Safety of Nuclear Power Stations  
of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

<sup>4</sup> Space Research Centre

of Polish Academy of Sciences, Wroclaw, Poland

#### BACKGROUND PARTICLE DETECTOR FOR THE SOLAR X-RAY PHOTOMETER CHEMIX OF SPACE MISSION “INTERHELIOPROBE”: AN ADJUSTMENT OF BREADBOARD MODEL MODULES

We present our results of investigation, adjustment and measuring of the parameters of laboratory prototypes of the analog processing signal and secondary power supply units for Background Particle Detector of the Polish-Ukrainian X-ray spectrophotometer ChemiX for the interplanetary “Interhelioprobe” mission. We describe the laboratory benches designed, manufactured and tested for controlling the analog module parameters and for investigating the characteristics of small-size organic and inorganic scintillation detectors. The functional block diagram of the pilot model of digital signal processing and information data streaming based on ProASIC3E M1A3PE1500 FPGA is presented. We also present the results of the BPD digital module test project prototype simulation using the ModelISim Microsemi ME 10.2c program simulator.

**Key words:** satellite device, charge particle detector, scintillator, spectrometer, X-ray photometer, FPGA, software, technique of adjustment.