

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМЕНИ
Д.В.СКОБЕЛЬЦЫНА

На правах рукописи

УДК *xxx.xxx*

Золотарев Иван Анатольевич

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ В
КОСМИЧЕСКОМ АППАРАТЕ ПРИ ПОЛЕТЕ ПО
ВЫСОКОШИРОТНОЙ ОРБИТЕ**

Специальность 05.26.02 —

«Безопасность в чрезвычайных ситуациях
(авиационная и ракетно-космическая техника)»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук
Бенгин Виктор Владимирович

Москва — 2016

Оглавление

| | Стр. |
|--|-----------|
| Введение | 5 |
| Глава 1. Обзор Литературы | 8 |
| 1.1 Радиационная обстановка на высокоширотных околоземных орбитах. Вопросы, требующие детального исследования. | 8 |
| 1.2 Методы регистрации дозы ионизирующих излучений | 9 |
| 1.3 Приборы, использовавшиеся для дозиметрического контроля в космосе | 10 |
| 1.3.1 Пассивные дозиметры | 10 |
| 1.3.2 Активные детекторы | 10 |
| 1.4 Математическое моделирование дозиметрических приборов для космических условий | 13 |
| 1.4.1 GEANT4 | 13 |
| 1.4.2 FLUKA | 14 |
| 1.4.3 SHIELD | 14 |
| 1.5 Возможности КА Ломоносов в продолжении ряда российских исследований радиационной обстановки | 14 |
| Глава 2. Аппаратура для проведения исследований | 15 |
| 2.1 Прибор Дэпрон | 15 |
| 2.1.1 Устройство прибора | 15 |
| 2.2 Конструктивные особенности прибора | 17 |
| 2.3 Детекторы | 19 |
| 2.4 Аналоговая обработка сигналов | 21 |
| 2.5 Цифровая обработка сигналов | 22 |
| 2.6 Связь с внешними системами | 25 |
| 2.6.1 Питание | 26 |
| 2.6.2 Программное обеспечение | 26 |
| 2.6.3 Контрольная проверочная аппаратура | 28 |
| 2.7 Градуировочные характеристики прибора | 28 |

| | |
|---|-----------|
| Глава 3. Обработка информации с прибора | 30 |
| 3.1 Общая схема обработки и распределения потоков информации | 30 |
| 3.1.1 Программа Depron Terminal | 31 |
| 3.1.2 Программа DepronExplorerView | 32 |
| 3.1.3 Структура массивов (базы данных) результатов измерений | 33 |
| 3.1.4 Содержание блоков данных ДЭПРОН | 34 |
| 3.1.5 Периодичность выдачи массивов данных | 35 |
| Глава 4. Результаты | 36 |
| 4.1 Спектрометр протонов и электронов | 36 |
| 4.1.1 Методы исследования спектрометрических характеристик прибора СПЭ | 37 |
| 4.1.2 Описание моделирования в Geant4 | 37 |
| 4.1.3 Разработка структурных схем блоков аппаратуры радиационного контроля ОКП и описание принципов их работы | 38 |
| 4.1.4 Описание электронной модели прибора СПЭ | 38 |
| 4.2 Подбор параметров отбора событий | 45 |
| 4.2.1 Классический метод определения порогов по энергосвечению | 45 |
| 4.2.2 Статистический метод определения порогов по энергосвечению | 46 |
| 4.2.3 Подбор временных параметров моделирования | 47 |
| 4.2.4 Результаты и обсуждение | 50 |
| 4.3 Структурные схемы логических устройств отбора событий | 51 |
| 4.4 Выводы раздела | 52 |
| Глава 5. Результаты | 54 |
| 5.1 Планетарное распределение дозы на высоте полета КА а также потоков нейтронов | 54 |
| 5.2 Спектры ЛПЭ и распределение мощности эквивалентной дозы | 54 |
| Заключение | 55 |
| 5.3 Благодарности | 55 |
| Список сокращений и условных обозначений | 56 |

| | |
|--|-----------|
| Список литературы | 57 |
| Список рисунков | 58 |
| Список таблиц | 60 |
| Приложение А. Структура данных измерений ДЭПРОН | 61 |
| А.1 Блок данных ДЭПРОН А | 61 |
| А.2 Блок данных ДЭПРОН S | 62 |
| А.3 Блок данных ДЭПРОН Н | 63 |
| А.4 Блок данных ДЭПРОН N | 63 |
| А.5 Блок данных ДЭПРОН Т | 64 |
| А.6 Команды прибора ДЭПРОН | 64 |
| А.7 Отладочные сообщения прибора ДЭПРОН | 65 |
| Приложение Б. Общий вид модели прибора СПЭ в среде Simulink/Matlab. | 67 |
| Приложение В. Примеры вставки листингов программного кода | 69 |

Введение

Актуальность работы обусловлена планами создания пилотируемого транспортного корабля нового поколения, работающего на высокоширотных и лунных орбитах. Проект транспортного корабля активно разрабатывается с 2010 г. и к настоящему времени, начата работа по выпуску рабочей конструкторской документации на составные части корабля, в том числе и на дозиметр бортовой.

Несмотря на непрерывный дозиметрический контроль всех российских космических миссий, начиная с первого полета человека в космос и заканчивая полетами экспедиций на МКС, не вызывает сомнений необходимость продолжения ряда исследований радиационной обстановки на каждом из пилотируемых и на значительной части беспилотных космических аппаратах.

Именно поэтому необходимо разработать приборы для проведения непрерывного дозиметрического мониторинга области околоземного пространства, в которой планируется проведение перспективных пилотируемых полетов. *Данная работа направлена на создание основ для осуществления такого мониторинга.*

Целью данной работы является разработка методов исследования распределения мощности дозы космической радиации и создание на основе этих методов современных приборов, предназначенных для космических аппаратов работающих на околоземных и лунных орбитах.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо было решить следующие задачи задачи:

1. Систематизация и обобщение характеристик радиационных условий на аналогичных орбитах (аппараты БИОН, Прогноз, Cluster) для разработки программы эксперимента;
2. Разработать бортовой дозиметр для нового пилотируемого транспортного корабля;
3. Разработать прибор для дозиметрического мониторинга на борту космического аппарата «Ломоносов»;
4. Участвовать в подготовке и проведении эксперимента с дозиметром на борту КА «Ломоносов»;
5. Обработать и провести анализ научной информации с прибора ДЭПРОН.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Первое положение
2. Второе положение
3. Третье положение
4. Четвертое положение

Научная новизна:

1. Впервые разработан исследовательский прибор, сочетающий в едином блоке дозиметр заряженных частиц и нейтронные детекторы;
2. Впервые ...
3. Было выполнено оригинальное исследование спектрометрических свойств спектрометра электронов и протонов

Научная и практическая значимость ...

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается ... Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на: Ломоносовских чтениях, международной конференции COSPAR2014, конференции ОМУС-2015 (г. Дубна).

Личный вклад. Автор принимал активное участие в проведении тепловых испытаний полупроводникового детектора с усилительным трактом прибора. Проведены проверки работоспособности усилительного тракта с радиоактивными источниками ОСГИ Cs137 и Co60. Автор участвовал в проведении испытаний детекторов тепловых нейтронов на лабораторном источнике нейтронов.

Проведены работы по стыковке и согласованию платы цифровой обработки сигналов с аналоговыми усилительными трактами и дискриминирующими блоками прибора. Автором вместе с его научным руководителем написана программа на C++ для контроллера платы цифровой обработки сигналов. Для наземной отработки и испытаний написана программа для ПК на WinForms/C#, позволяющая оперативно контролировать параметры работы прибора и выходные данные.

Написана программа на базе пакета Geant4 для математического моделирования характеристик прибора Дэпрон, а также программы для моделирования характеристик приборов ДБ-8 и Liulin.

Автором предложена методика проведения моделирования разрабатываемого спектрометра заряженных частиц для определения его спектрометрических качеств. Создана исчерпывающая модель электронных схем спектрометра в си-

стеме Simulink. Подготовлена программа для статистических исследований регистрируемых спектрометром событий и на основе этой программы вычислены оптимальные настройки порогов прибора для протонов.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в XX печатных изданиях [Sokolov; Gaidaenko; Lermontov; Management], X из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК [Sokolov; Gaidaenko], XX — в тезисах докладов [Lermontov; Management].

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и двух приложений. Полный объём диссертации составляет 70 страниц с 17 рисунками и 4 таблицами. Список литературы содержит 2 наименования.

Глава 1. Обзор Литературы

1.1 Радиационная обстановка на высокоширотных околоземных орбитах. Вопросы, требующие детального исследования.

Исследования радиационной обстановки в космическом пространстве связано с началом полетов автоматических аппаратов и человека в космос. Широкое распространение технологий, связанных с использованием космической техники, а также непрерывные пребывание человека в космическом пространстве во время миссий на космических станциях МИР и МКС позволило выявить ряд опасностей космических полетов, среди которых особое внимание следует уделить радиационной опасности [logachev2007].

Запуск 2-го и 3-го спутников Земли, с приборами, изготовленными в НИИ-ЯФ МГУ, показал принципиальную возможность полета человека в космос, однако, как можно заметить из данных полученных при начальных исследованиях радиационной обстановки, на орбите земли существуют отдельные области повышения радиационного фона (Рисунок ...). Существование данных областей связано с неоднородностями магнитного поля Земли и приводит к формированию области повышения потоков частиц в Южно Атлантической области [logachev2007], названной Южно-Атлантической Аномалией (ЮАА), как показано в статье Вернова С.Н.[vernov1961] . В первом приближении для описания магнитного поля Земли на высотах до 2000 км можно использовать представление модели смещенного диполя, этот подход позволяет учитывать ЮАА [Модель космоса 3 том 20стр].

Рисунок Распределение потоков частиц по данным 2-го корабля-спутника над поверхностью земного шара на высоте 320 км. (цифры у линий дают потоки частиц в $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$) [logachev2007].

Таким образом, магнитное поле Земли экранирует космические аппараты, находящиеся на средних широтах и невысоких орбитах порядка трехсот-четырехсот километров от поверхности Земли (именно на этих высотах поддерживается обращение космических станций). Значительный вклад, до 60%, в дозовую нагрузку аппараты и их экипаж получают в ЮАА [?].

Другими, важными с точки зрения радиационной обстановки, являются приполярные области [Горчаков Е.В. **Внешний радиационный пояс и полярные сияния. Искусственные спутники Земли, 1961, вып. 9, с. 66-70.**].

При выборе более высокоширотных и высоких орбит дополнительного внимания требуют области полярных шапок, так как в этих областях границы радиационных поясов Земли ближе к поверхности. Даже на небольших высотах, начиная от 300 км в интервале геомагнитных широт 55-70 наблюдается резкое возрастание интенсивности излучения и частицами, составляющими этот внешний радиационный пояс являются электроны различных энергий, их поток достигает $10^5 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ стер}^{-1}$ [Исследования космических лучей и земного корпускулярного излучения при полетах ракет и спутников; УФН, т. 70, вып. 4, 585 (1960)]. При солнечных событиях в этих областях создаются условия для многократного повышения потоков частиц, что может привести к необходимости специальных мер по предотвращению чрезмерной радиационной нагрузке на экипаж космического аппарата.

1.2 Методы регистрации дозы ионизирующих излучений

Среди методов регистрации ионизирующих излучений можно выделить несколько наиболее используемых:

Газовые ионизационные детекторы, в том числе пропорциональные и газоразрядные счетчики.

Сцинтилляционные детекторы

Полупроводниковые детекторы

Трековые детекторы

Спектрометры заряженных частиц, спектрометры нейтронов и спектрометры

Первые эксперименты в космосе по измерению радиационных условий предполагали использование ионизационных камер достаточно большого размера (десятки см^3) однако

Дописать

1.3 Приборы, использовавшиеся для дозиметрического контроля в космосе

1.3.1 Пассивные дозиметры

Дописать

CR-39 тканеэквивалентный трековый детектор [Zhou, D., O'Sullivan, D., Semones, E., et al. Radiation dosimetry of high LET particles in low Earth orbit. Acta Astronautica 63, 855–864, 2008]

TLD-100, -600, -700, OSLD Люминисцентные детекторы [?]

BR&Bya type NPE FILM фотографическая эмульсия

Pille портативная считывающая система[(Apathy et al., 2002, Apathy et al., 2007]

EVARM детектор MOSFET

Матрешка-Р ионизационная камера [Machrafi, R., Garrow, K., Ing, H., et al. Neutron dose study with bubble detectors aboard the International Space Station as part of the MATROSHKA-R experiment. Radiation Protection Dosimetry 133 (4), 200–207, 2009]

1.3.2 Активные детекторы

Liulin-4

Детекторы серии Liulin используются с 1988 года, когда их первое поколение было использовано на борту космической станции МИР [Caffrey JA 2011]. Liulin-4 не последний прибор в этой серии, но его простое устройство и компактные размеры обеспечивают удобство использования для многих конкретных задач. Этот спектрометр состоит из единственного кремниевого детектора, зарядочувствительного предусилителя, микроконтроллера и флэш-памяти. Насыщенный литием кремниевый детектор имеет толщину 0,3 мм и площадь 2 см².

В приборе установлен 12-ти битный АЦП, но только 8 бит из них используется для получения 256 канального спектра энерговыделения за выбранный интервал времени накопления: от 10 до 3539 с. Амплитуда импульса определяется после предусилителя и разделяется по 256 энергетическим каналам, начинающимся с 0,02 МэВ до 20 МэВ. Выделение энергии, большее 20 МэВ записывается в наибольший энергетический канал [Dachev, Ts., 2002] .

Для определения дозы в данном типе детектора энерговыделение в каждом канале определяется умножением счета в детекторе на энергию канала. Эти результаты делятся на массу объема детектора и суммируются для определения общей дозы по всем каналам [Dachev, Ts., 2002]. Записанная форма спектра энерговыделения может предоставить дополнительную информацию относительно природы доминирующего радиационного поля (ЮАА, ГКЛ и др.), но не является достаточно подробной для определения ЛПЭ воздействующей радиации [Caffrey JA 2011].

Размер и портативность спектрометра типа Liulin-4 делает его жизнеспособным кандидатом для активной персональной дозиметрии во время солнечного события, но ограничения в возможности определения эффективной ЛПЭ и эквивалентной дозы предотвращают вытеснение методов пассивной дозиметрии. Liulin-4 существует во многих модификациях и с многими опциями и может работать как на химическом источнике тока, так и на непрерывном питании, функционировать как с внешним ЖК-дисплеем так и без него, и может включать GPS-приемник [Dachev, Ts., Tomov, B., Matviichuk, Yu., et al. Calibration results obtained with Liulin-4 type dosimeters. *Advances in Space Research* 30 (4), 917–925, 2002.].

DOSTEL

DOSTEL – Дозиметрический полупроводниковый телескоп был разработан в 1995 году как малый телескоп частиц для использования на миссиях космических шаттлов к космической станции МИР. Прибор включает в себя два кремниевых детектора по технологии PIPS, расположенных как телескоп [Beaujean, R., и др. 2002]. Каждый детектор имеет толщину 0,315 мм с чувствительной зоной 6,93 см², зазор в 15 мм между детекторами дает геометрический фактор 824 см²ср

(единица измерения определяется чувствительной площадью детектора и полем зрения) для детектирования совпадающих событий [Beaujean, R., и др. 2002]. Каждый детектор соединен с зарядочувствительным усилителем через интегрирующую емкость, двух стадийным усилителем импульсов, двумя пиковыми детекторами, двумя RC-фильтрами для снижения уровня шумов и 8-ми битным АЦП. Такая компоновка позволяет поводить анализ амплитуд импульсов отдельно для высокого и низкого энергетического диапазона [Beaujean, R., и др. 2002].

Когда совпадающее событие записано обоими детекторами, становится возможным определить ЛПЭ падающего излучения. Так как известно, что траектория частицы ограничена конусом возможных направлений, средняя толщина детектора может быть использована для оценки длины трека частицы. Делением энерговыведения на среднюю длину свободного пробега, для данного детектора 0,364 мм [Beaujean, R., и др. 2002] с плотностью 2,33 г/см³ [Knoll GF, Radiation detection and measurement, third edition, Wiley: 2000, p802 на странице 357] можно получить приближенное значение ЛПЭ. Результат таких вычислений нормируется на известный коэффициент для перехода от ЛПЭ кремнии к ЛПЭ в воде, таким образом прибор DOSTEL записывает ЛПЭ в диапазоне от 0,1 до 240 кЭВ/мкм [Beaujean, R., Kopp, J., Burmeister, S., et al. Dosimetry inside MIR station using a silicon detector telescope (DOSTEL). Radiation Measurements 35, 433–438, 2002].

дописать

RRMD-III Determines path length with PSDs [Doke et al. (2001, 2004)]

Liulin-5 Assumes mean-chord-length across FOV in LET calculation [Semkova et al. (2004, 2007)]

Liulin Phobos Assumes mean-chord-length; orthogonal telescopes [Dachev et al. (2009)]

CPDS Determines path length with PSDs; can determine species for C, N, and O particles [Lee et al. (2007)]

TEPC Assumes mean-chord-length for all angles; LET assumed equal to y (Lineal energy) [Badhwar et al. (1996), Gersey et al.(2002, 2007)]

R-16 Pulse-type ion chamber: 1 pulse per 5 mrad; shallow and deep dose rates; assumes average LET [Mitricas et al. (2002), Badhwar (2000)]

BBND Heavy system; short-term experiment; requires 3He Koshiishi et al. (2007), Matsumoto et al. (2001)

1.4 Математическое моделирование дозиметрических приборов для космических условий

Математическое моделирование широко применяется на всех этапах создания исследовательских приборов предназначенных для использования в условиях космоса. В первую очередь оно необходимо на этапе проектирования аппаратуры для выбора характеристик регистрирующих радиацию модулей исходя из поставленных экспериментальных задач [Luszik-Bhadra M. et al., 2009, Hassler D et al., 2008]. На последующих шагах разработки аппаратуры математические методы используются при верификации результатов калибровочных и градуировочных испытаний на источниках ИИ и ускорителях заряженных частиц [Zeitlin C et al., 2010]. Также одним из основных применений является уточнение функции отклика прибора во время штатной работы [C. Zeitlin et al., 2010].

Среди математических методов моделирования взаимодействия ИИ и нейтральных излучений с материалами и детектирующими модулями приборов следует отметить наиболее используемые программные пакеты, основанные на методе Монте-Карло:

GEANT4 комплекс программ для моделирования прохождения частиц через вещество[1]

SHIELD

PHITS particle and heavy ion transport code system

FLUKA

1.4.1 GEANT4

Данная система математического моделирования разрабатывается для нужд работы ЦЕРН и активно используется в ряде областей науки, медицины и технологии [2].

1.4.2 FLUKA

1.4.3 SHIELD

1.5 Возможности КА Ломоносов в продолжении ряда российских исследований радиационной обстановки

На каждом российском пилотируемом корабле со времен первого полета человека в космос устанавливались дозиметрические приборы, изготовленные в НИИЯФ МГУ, полный список и результаты этих экспериментов можно найти в монографии Ю.И. Логачева 2007г.

Глава 2. Аппаратура для проведения исследований

2.1 Прибор Дэпрон

Прибор Дэпрон разрабатывался как исследовательский инструмент для решения широкого круга научных задач. Основной задачей прибора является измерение мощности дозы и потоков ионизирующих излучений. Дополнительными задачами выделены регистрация нейтронов тепловых энергий и высокоэнергетичных частиц. Такое сочетание решаемых задач, для прибора относительно небольшого веса, является уникальным и позволяет надеяться на получение достаточно подробной информации о радиационной обстановке на борту КА.

2.1.1 Устройство прибора

В состав прибора ДЭПРОН входят два узла с полупроводниковыми детекторами и два узла с газоразрядными гелиевыми счетчиками нейтронов. Также в состав прибора входят узлы усиления и формирования сигналов от полупроводниковых и нейтронных детекторов и узел цифровой обработки сигналов.

Поглощенная доза регистрируется узлами с полупроводниковыми детекторами. Для получения информации о величине поглощенной дозы используется принцип регистрации величины заряда в объеме полупроводника, пропорционального энергосвободному в данном объеме.

$$D = \frac{E}{m} = \frac{w_i \cdot \frac{q}{e}}{m} = \frac{w_i \cdot \Delta U \cdot \sum K \cdot C}{m \cdot e \cdot \eta} = V \cdot \sum K \quad (2.1)$$

по материалам «ПРИБОР ДЭПРОН, В.В. Бенгин, О.Ю. Нечаев, И.А. Брильков, А. Амелюшкин, В. Петров» представленной на рабочем совещании «Universat» (Университетские спутники), 7-10 июня в МГУ им. М.В. Ломоносова

где

D поглощенная доза

E энергия поглощенная в чувствительном объеме



Рисунок 2.1 — Блок-схема прибора ДЭПРОН

m масса чувствительной зоны детектора

w_i энергия формирования пр пары

e заряд электрона

q электрический заряд образованный в чувствительном объеме

K выходной сигнал АЦП

C входная емкость системы детектор-предусилитель

η суммарный градуировочный коэффициент тракта усиления до АЦП

ΔU шаг дискретизации АЦП

Оба полупроводниковых детектора скомпонованы в кассету и расположены в относительной близости друг от друга. Схема построения прибора с параллельным расположением двух полупроводниковых детекторов была использована для получения информации о ЛПЭ частиц, прошедших одновременно оба детектора. Функциональная схема прибора ДЭПРОН показана на рисунке 2.1.

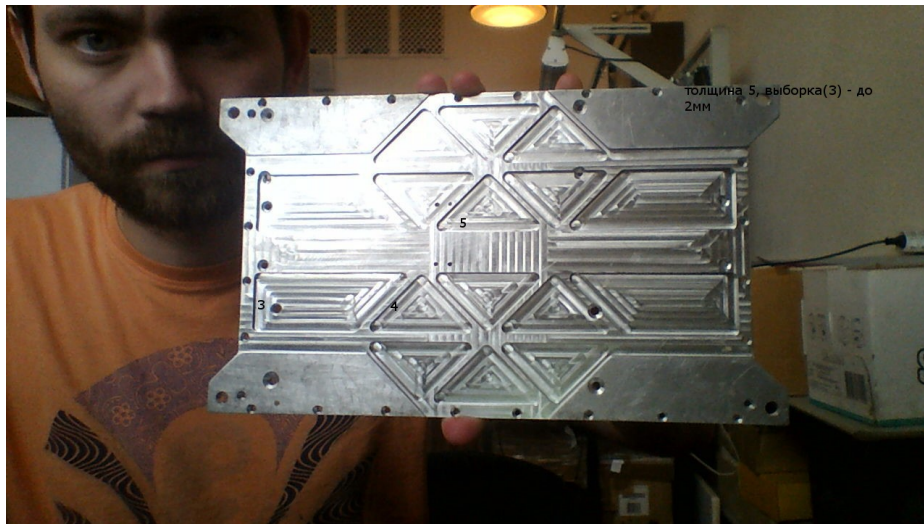


Рисунок 2.2 — Вариант размещения выборок в днище прибора ДЭПРОН.

Впоследствии данный вариант переработан и заменен исходя из конструктивных соображений крепления модулей электроники и улучшения теплосброса источников питания, через термоконтакт с бортом КА.

2.2 Конструктивные особенности прибора

Прибор состоит из одного блока, габаритный чертеж которого представлен в Приложении 1. Габаритные размеры прибора: длина 280 мм, ширина 160 мм, высота 78 мм. Масса прибора - 3 кг. Корпус прибора составлен из шести пластин Д16т – листового дюралюминия, толщиной 4,5 мм, обработанного на станке ЧПУ. В каждой пластине фрезерованы повторяющиеся выборки треугольной формы до толщины 2 мм. Выборки расположены таким образом, чтобы сформировать «ребра» жесткости в стенках прибора, как видно на рисунке 2.2. С лицевой стороны пластины корпуса оксидированы, с целью получения электропроводной поверхности всего прибора.

На лицевом торце прибора распложены два разъема СНП-333, используемых для передачи данных в БИ аппаратуры спутника (разъем X1) и для передачи питания в прибор ДЭПРОН от бортовой аппаратуры спутника (разъем X2). Также на лицевой панели находятся два разъема РС-7 предназначенные для передачи информации по каналу RS232 от прибора ИМИСС-1 (разъем X5) и сквозной передачи питания от бортовой аппаратуры к прибору ИМИСС-1 (разъем X4). Во всех перечисленных разъемах предусмотрен контроль стыковки разъемов с помощью

короткозамкнутых линий, а также дублирование информационных и токонесущих линий.

Дополнительно на лицевую панель прибора вынесен технологический разъем РС 19 ХТЗ, используемый для проверки функционирования прибора в лабораторных условиях методом подачи на детекторные узлы калиброванных сигналов с генератора, а также для контроля внутренних рабочих напряжений. Проверка работоспособности прибора и подача сигналов с генератора осуществляется с помощью блока КПА, имеющему четыре экранированных канала для передачи низкоамплитудных сигналов и два светодиодных индикатора для контроля наличия рабочих напряжений +5В и +12 В в приборе ДЭПРОН. В штатном режиме работы данный разъем не подключен и закрыт заглушкой. Схема распределения линий в разъемах представлена в Приложении 2.

Платы электроники блоков усиления и формирования аналоговых сигналов располагаются в трех тонкостенных алюминиевых кассетах и выполнены в формате 11-ти контактных печатных плат размерами 34x50мм (2.3). Данный формат печатных плат распространен в производстве научной аппаратуры изготовления НИИЯФ МГУ и с успехом применяется для космической аппаратуры уже на протяжении нескольких десятков лет. Применение данного стандарта позволяет соблюсти принцип модульности построения приборов, используя отработанные в космических условиях надежные схемы, komponуя из них тракты с параметрами, заданными потребностями текущих экспериментальных задач.

В средней части рисунка последовательно располагаются три корпусных кассеты с платами электроники: левая и правая кассеты содержат платы формирователей триггерных сигналов от детекторов, центральная кассета ориентирована перпендикулярно и содержит две платы полупроводниковых детекторов и ЗЧУ, а также платы дополнительного усиления.

В нижней части рисунка находится нейтронный счетчик СИ13Н (цилиндр), экранированный 1 см оргстекла



Рисунок 2.3 — Внутренняя компоновка модулей прибора ДЭПРОН. Вид сверху со снятой крышкой прибора.

2.3 Детекторы

Дозиметр заряженных частиц выполнен на кремниевых ионно-имплантированных Д1 пролетных детекторах, работающих в режиме регистрации амплитуд импульсов. Детекторы изготовлены по специальному заказу НИИЯФ МГУ в ООО «Детектор-СИ» в соответствии с АБЛК.418219.402ТУ. Детекторы, в соответствии с паспортом, предназначены для спектрометрии и радиометрии заряженных частиц в составе предназначенной для этих целей аппаратуры. Детекторы могут эксплуатироваться при атмосферном давлении или в вакууме до 10^{-6} мм.рт.ст. чувствительный элемент детектора изготовлен из высокоомного кремния п-типа по технологии ионной имплантации.

Значения параметров детекторов приведены в таблице 2.1.

Рекомендуемая схема включения детектора приведена на рисунке 2.4.

+Еп источник напряжения;

Rсм сопротивление смещения;

D1 Детектор.

| Наименование параметра | Фактические параметры |
|---|-----------------------|
| Рабочее напряжение, В | 90 |
| Обратный ток, нА | 4 |
| Энергетический эквивалент шума, кэВ | 5 |
| Постоянная времени квазигауссова формирования импульса, мкс | 2 |
| Предельно допустимое напряжение, В | 130 |
| Примечания: Аттестация производилась при 26 С. | |

Таблица 2.1 — Полупроводниковые детекторы прибора ДЭПРОН(по материалам **ТУ**)

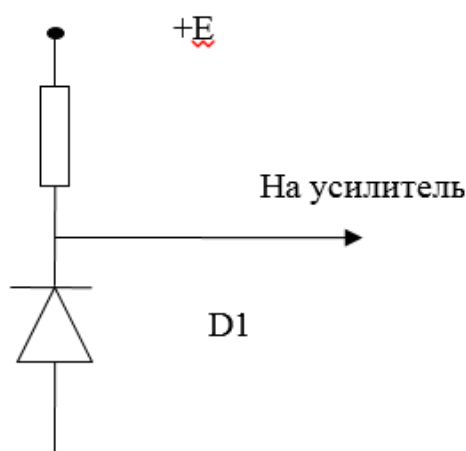
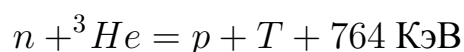


Рисунок 2.4 — Рисунок Схема включения детектора.

Для обеспечения надежности используются два полупроводниковых детектора. Детекторы образуют телескоп, что обеспечивает возможность регистрировать спектр ионизационных потерь.

Детектор нейтронов выполнен на счётчике медленных нейтронов «СИ-13Н», представляющем собой газоразрядный счетчик, работающий в режиме коронного разряда. Для обеспечения надежности используются 2 счетчика. Вторым детектор нейтронов окружен замедляющей оболочкой из поликарбоната, что позволило расширить энергетический диапазон регистрируемых нейтронов. При прохождении нейтрона через газ $He-3$, наполняющий счетчик, происходит ядерная реакция:



Продукты реакции вызывают ионизацию газа в счётчике, что приводит к образованию газового разряда и появлению электрического импульса на электро-

де счетчика. Импульс поступает на вход усилителя-формирователя и, затем, поступает на регистр прерываний процессора, где используется для подсчета числа зарегистрированных нейтронов.

2.4 Аналоговая обработка сигналов

Платы полупроводниковых детекторов и предусилителей (внутренний номер SSD006) изготовлены методом фотолитографии в стандартном формате 34x50, использование современных миниатюрных электронных компонент позволило совместить блоки предусиления и детектирования на одной плате и закрыть единым экраном от электромагнитных помех.

Сигнал с полупроводникового детектора поступает на зарядовочувствительный предусилитель A225F, фирмы AMPTEC, специализирующейся на производстве компонент для космической промышленности.

Рисунок A225F

На выходах предусилителя формируются два сигнала. Один (S-сигнал) - имеет амплитуду пропорциональную заряду, образовавшемуся в детекторе и длительность порядка 5 – 10 мксек. Этот сигнал поступает на амплитудно-цифровой преобразователь (АЦП). Второй сигнал предусилителя A225F (t-сигнал) имеет короткое, менее 0.5 мксек, время задержки от момента прихода сигнала с детектора до максимума амплитуды и используется для запуска процесса цифровой обработки пришедшего импульса. Этот (t-сигнал) сигнал поступает на вход усилителя и, после усиления, поступает на регистр прерываний процессора, где используется для запуска процесса преобразования амплитуды сигнала, поступившего на АЦП, в код. Дальнейшая обработка сигналов с полупроводниковых детекторов производится микропроцессором прибора в цифровой форме.

2.5 Цифровая обработка сигналов

Для записи результатов измерений прибора используется внутренняя память микроконтроллера, входящего в состав узла цифровой обработки сигналов. В нее записываются, а затем передаются в Блок Информации КА «Ломоносов» кадры информации.

На этапе опытно-конструкторских разработок (при макетировании прибора ДЭПРОН) в качестве узла цифровой обработки сигнала использовался 8-битный микроконтроллер ATmega128. Данная микросхема отличается низкой потребляемой мощностью и обладает развитыми средствами ввода данных и обмена информацией, а также достаточной вычислительной мощностью. Печатная плата контроллера была разработана в НИИЯФ МГУ Н.Н. Веденькиным и Д.Г. Аксельродом. На плате расположены два АЦП, а также дополнительная память, независимый преобразователь питания и контроллер обеспечения связи по последовательному каналу (RS232). Как показали опытно-конструкторские работы, проведенные с макетом дозиметра ДЭПРОН, данный узел обеспечивает потребности по бортовой обработке сигналов от детектора по производительности, несмотря на то, что по современным меркам частота работы ядра процессора невелика - 16 MHz. Также выбранный контроллер обладает достаточным для поставленной задачи количеством входных каналов.

Для преобразования амплитуды импульсов, сформированных на выходе аналоговых трактов усиления, использовались 12-ти битные АЦП AD7495 фирмы Analog Devices со скоростью работы 1 MSPS (миллион измерений в секунду). Данные АЦП используют высокоскоростной последовательный интерфейс (SPI – Serial Peripheral Interface), который был реализован программным способом. Управление моментом захвата амплитуды входного сигнала также производилось программным способом подачей цифрового сигнала «0» на линию CS.

В первой версии платы цифровой обработки сигналов подключение обоих АЦП к контроллеру прибора производилось по независимым каналам: CS (Chip Select – Активный логический вход АЦП), SCLK (Serial Clock – логический вход АЦП), SDATA (Data Output – логический выход АЦП). Задача максимально быстрого захвата сигналов с выхода предусилителя решалась включением встроенного в АЦП устройства выборки и хранения (англ. “track and hold circuit”) в мо-

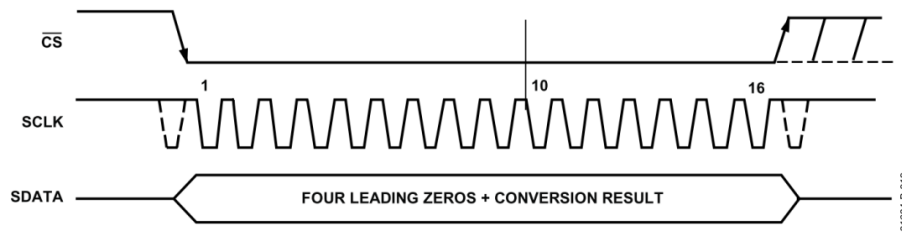


Рисунок 2.5 — Используемый в приборе ДЭПРОН режим работы АЦП (AD7495), по материалам: «1 MSPS, 12-Bit ADCs AD7475/AD7495», One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A., 2005 Analog Devices, Inc.

мент получения контроллером сигнала от таймингового выхода предусилителя. Для этого прерывания контроллера настроены при получении такого сигнала на выдачу управляющего сигнала на вход CS АЦП, ответственного за оцифровку сработавшего канала аналоговой части прибора. Дальнейшая оцифровка амплитуды захваченного в буфере АЦП сигнала производилась после выхода из процедуры обработки прерывания, так как этот процесс отнимает значительное время. Испытания процедуры управления оцифровкой АЦП показали, что точность измерений АЦП чувствительна к временной регулярности тактирующего сигнала подаваемого на SCLK АЦП. Одной из причин таких нерегулярностей является возможность срабатывания прерывания в ПО контроллера во время исполнения процедуры генерации тактирующих импульсов, что в условиях эксплуатации прибора при высоких потоках ионизирующих излучений (например, в области ЮАА) не редкость. Временное отключение обработки прерываний может устранить данный недостаток работы прибора, однако испытания такого режима работа показали накопление необработанных прерываний в буфере контроллера, которые впоследствии обрабатывались неверно, из-за чего решено отказаться от использования этого режима.

Рисунок. Осциллограмма: регулярность тактирующего сигнала, подающегося на SCLK АЦП.

Выявление нерегулярности тактирующего сигнала потребовало проверку этого сигнала с помощью осциллографа. Дизассемблирование скомпилированного кода ПО микроконтроллера показало критические места кода, требующие изменения алгоритма генерации тактирующих импульсов и добавления промежутков простоя процессора (_por – в коде “no operation”). Окончательная проверка регулярности сигнала, генерируемого выверенным кодом, производилась сняти-

ем временной развертки тактирующего сигнала на осциллографе. Данный подход использовался и при последующих отработках работы АЦП прибора ДЭПРОН.

Рисунок Блок схема подключения АЦП к контроллеру версия 1.

Таким образом, в первой версии платы цифровой обработки сигналов использовались шесть независимых каналов контроллера, что ограничивало возможность подключения дополнительных информационных каналов с детекторной части прибора. Также одной из проблем данного подхода является двойная нагрузка на микроконтроллер прибора ДЭПРОН, так как управляющие сигналы генерируются программным способом. Такой подход предоставлял сомнительное преимущество в независимом управлении АЦП из программного обеспечения микроконтроллера, поэтому было принято решение изменения способа подключения АЦП.

Следующим конструктивным решением было включение обоих АЦП в параллельный режим работы, когда управляющий (CS) и тактирующий (SCLK) сигналы подаются на оба АЦП. Каналы данных (SDATA) подключены к независимым входам контроллера.

Рисунок Блок схема подключения АЦП к контроллеру версия 2.

При проектировании Блоков обработки Информации (БИ) было принято решение по организации обмена по каналу CAN между дочерними приборами, входящими в Комплекс Научной Аппаратуры (КНА) «Ломоносов». Однако использованный для макетирования контроллер ATmega128, и данный контроллер был заменен на AT90CAN128. Данное решение было продиктовано минимальными изменениями уже разработанного программного обеспечения и незначительными доработками печатных плат, необходимым для внедрения контроллера AT90CAN128.

Опыт работы с данным контроллером также показал его применимость для целей построения полноценного дозиметра ионизирующих излучений. Тем не менее, по требованию других участников проекта данный контроллер был заменен более современным и более производительным контроллером AT91SAM7X256. Всего в составе КНА насчитывается 4 прибора, в которых использована схема цифровой обработки сигнала на базе AT91SAM7X, некоторые из этих приборов испытывали нехватку производительности данного модуля до замены ЦПУ. В целях унификации разработанный аппаратуры модуль цифровой обработки сигналов и связи был заменен и в приборе ДЭПРОН. Данное изменение состава прибо-

ра повлекло за собой необходимость повторения цикла разработки программно-математического обеспечения прибора и проведения повторных калибровок АЦП и счетных каналов схемы цифровой обработки. Необходимость данных работ обусловлена принципиальным отличием архитектуры контроллера: в исходном варианте это архитектура AVR, а в окончательном ARM.

В финальном варианте цифровая обработка сигналов осуществляется с помощью микропроцессора AT91SAM7X512. Программно-математическое обеспечение ДЭПРОН функционирует на одной микропроцессорной плате SSD234. Данная плата собрана на базе микроконтроллера AT91SAM7X512 производства фирмы ATMEL, и содержит процессор ARM7 TDMI® ARM® Thumb® с 32-разрядной RISC-архитектурой команд.

Программное обеспечение процессора осуществляет регистрацию сигналов, поступающих со схем преобразования импульсов с детекторов, их преобразование и накопление, передачу результатов по каналу связи с блоком информации КА. Объем сбрасываемой информации не превышает 1 Мбайт/сутки.

2.6 Связь с внешними системами

Связь с Блоком Информации «Ломоносов»

Связь с БИ осуществляется посредством канала Controller Area Network (CAN), использующегося в качестве стандарта промышленных сетей. CAN ориентирован на объединение в единую сеть различных исполнительных устройств и датчиков. Режим передачи данных - последовательный, широкополосный, пакетный. Программные модули и аппаратные схемы разрабатывались для комплекса аппаратуры в целом Н.Н. Веденькиным и прошли проверку при доводке аппаратуры и комплексных испытаниях КНА.

Прибор ДЭПРОН формирует в рабочем режиме пакеты данных по 512 байт, которые накапливаются во внутренней памяти контроллера. Подготовленная очередь пакетов передается на БИ КА «Ломоносов», где накапливается для передачи на Землю.

Передача информации от космического аппарата происходит через сеть фиксированной спутниковой связи. Данные передаются через общественную сеть

Интернет и архивируются на специально выделенном сервере данных. Альтернативно, при отсутствии подключения к спутниковой сети связи, используется канал передачи телеметрической информации с платформы КА «Ломоносов», при таком подключении данные ДЭПРОН поступают на Землю через центр управления полетами (ЦУП) и ввиду ограниченной пропускной способности этого канала данные передаются частично.

Связь с прибором ИМИСС

Связь с прибором ИМИСС-1 осуществляется по каналу RS232 (USART). Поступающая информация транслируется прибором ДЭПРОН в БИ по каналу CAN без изменений. В соответствии с расчетным объемом данных от прибора ИМИСС затраты производительности микроконтроллера ДЭПРОН на трансляцию данных в БИ будут незначительны по отношению к затратам на выполнение основных задач прибора ДЭПРОН.

2.6.1 Питание

Электропитание схем прибора ДЭПРОН осуществляется с использованием DC/DC преобразователей. Напряжение питания бортовой сети 27В, подключено через разъем X2 прибора ДЭПРОН и поступает на два преобразователя 28/12 В. С первого преобразователя напряжение поступает на стабилизатор напряжения и далее из этого напряжения формируются номиналы: +6 В, для питания схем усилителей, формирователей и микропроцессора. Со второго преобразователя питание поступает на преобразователь +70 В, для питания полупроводниковых детекторов и на преобразователь +1200 В, для питания газоразрядных счетчиков.

2.6.2 Программное обеспечение

Программно-математическое обеспечение прибора ДЭПРОН состоит из программы для контроллера прибора, написанной на языке C++(C), с использованием пакета IAR Workbench[®] для микроконтроллеров архитектуры ARM[®].

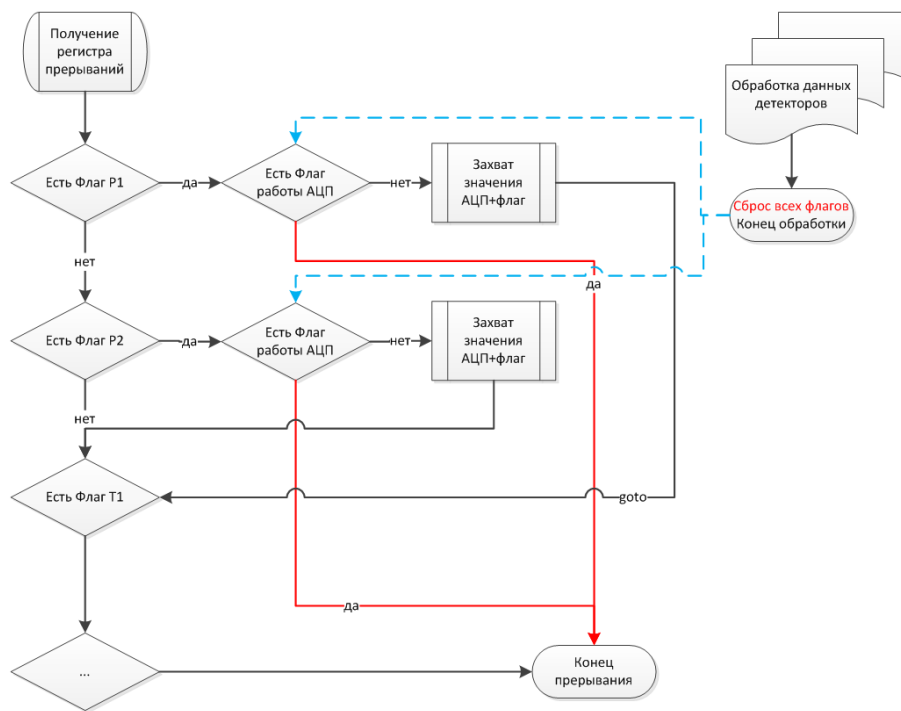


Рисунок 2.6 — Блок схема работы процедуры Ext_Interrupt, **требуется обновления!**

Исполняемый код программы формируется из двух файлов:

- `detector.c` – прикладные функции для работы прибора ДЭПРОН
- `main.cpp` – инициализация контроллера прибора и функции обмена информацией с БИ. В процедуре `main` этого файла работает основной бесконечный цикл программы, в котором вызываются функции обмена информацией по каналу CAN и процедура `Detectors_Handling`.

Работа прибора ДЭПРОН основана на прерываниях, которые обрабатываются по мере их поступления в процедуре `Ext_Interrupt` (см. рисунок 2.6), а ресурсоемкий разбор полученных данных и запуск АЦП происходят в процедуре `Detectors_Handling`, которая отрабатывает постоянно.

Таблица Распределение битов в регистре прерывания

Блок схема работы процедуры Detectors_Handling

2.6.3 Контрольная проверочная аппаратура

Контрольно приемная аппаратура (КПА) прибора ДЭПРОН используется для проведения автономных испытаний прибора. КПА ДЭПРОН состоит из:

- Ноутбук (или другой персональный компьютер) с установленной операционной системой Windows XP и установленным специальным программным обеспечением (программой Deptron Terminal), наличием порта RS232, либо дополнительно преобразователь интерфейсов USBRS232;
- Блока питания, обеспечивающего измерение потребляемого тока нагрузки GwINSTEK GPS-4303;
- Преобразователя интерфейсов USBRS232 (при отсутствии COM порта у ПК);
- Комплекта соединительных кабелей
- Блока КП – контрольно-приемного блока

Рис.1. Схема подключения КПА для проверки функционирования прибора ДЭПРОН.

Блок КП предназначен для подключения генератора и осциллографа к тестовым входам прибора ДЭПРОН, а также для контроля наличия рабочих напряжений в контурах прибора. Блок КП имеет 4 входных гнезда BNC промаркированных в соответствии с каналами прибора ДЭПРОН на которые передаются тестовые сигналы с генератора:

- X1
- X2...

На лицевой панели блока КП расположены 2 светодиодных индикатора. Подключение Блока КП к прибору ДЭПРОН происходит через тестовый вход ХТЗ (типа РС19).

2.7 Градуировочные характеристики прибора

Градуировка прибора ДЭПРОН проводится с использованием зависимости
??

Большая часть величин в этой формуле известна, а экспериментально были определены недостающие величины. Данная работа была проведена Сиолаповым Виктором вместе с Бенгиным В.В,

Глава 3. Обработка информации с прибора

Отладка программного обеспечения и проверка обработки сигналов от детекторов на этапе конструкторских работ производилась подключением канала RS232 к последовательному (COM) порту персонального компьютера. Программное обеспечение контроллера формирует отладочные послышки и массивы тестовых данных и отправляет по интерфейсу USART, реализованному на всех использовавшихся контроллерах. Такой способ передачи тестовых данных выбран как максимально приближенный к условиям реального функционирования прибора.

Отладка программного обеспечения и проверка обработки сигналов от детекторов на этапе конструкторских работ производилась подключением канала RS232 к последовательному (COM) порту персонального компьютера. Программное обеспечение контроллера формирует отладочные послышки и массивы тестовых данных и отправляет по интерфейсу USART, реализованному на всех использовавшихся контроллерах. Такой способ передачи тестовых данных выбран как максимально приближенный к условиям реального функционирования прибора.

Отработка работы прибора в комплексе научной аппаратуры позволяет использовать штатный способ передачи информации по каналу CAN, в таком случае критерием работы прибора является выдача от БИ содержательных блоков информации с меткой, соответствующей прибору ДЭПРОН.

3.1 Общая схема обработки и распределения потоков информации

Для обработки данных и отладки работы прибора ДЭПРОН были использованы специально разработанные программные средства. Поскольку отладка прибора ДЭПРОН производится подключением по каналу RS232 а при работе в штатном режиме передача данных ведется по каналу CAN, для взаимодействия с прибором были написаны две программы.

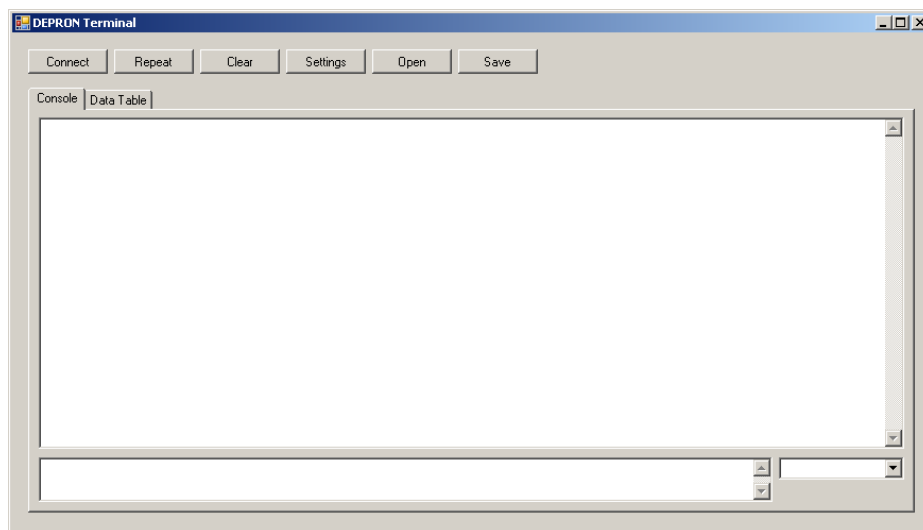


Рисунок 3.1 — Интерфейс программы **Depron Terminal**

3.1.1 Программа Depron Terminal

Данная программа предназначена для отладки прибора во время лабораторных испытаний, проверки работоспособности прибора при приемо-сдаточных работах. Программа была написана в средстве разработки ПО Microsoft Visual Studio на языке C#, с использованием фреймворка .NET3.5. Пользовательский интерфейс программы построен на основе WinForms, поэтому отличается консервативностью и достаточно низкими аппаратными требованиями.

Программа позволяет:

- Подключаться к прибору ДЭПРОН по каналу RS232 (с использованием COM порта)
- Принимать и отображать тестовые данные сформированные прибором ДЭПРОН
- Сохранять запись потока данных на жесткий диск ПК (в фоновом режиме и по запросу)
- Открывать сохраненные данные с носителя информации
- Посылать команды на прибор ДЭПРОН (в том числе с заданной периодичностью)

Данная программа была использована как основа для разработки отладочной программы для дозиметрических блоков ДБ-8м. Основные принципы работы новой программы, названной **DB8m Terminal** были сохранены и она обеспечивает те же базовые функции. Дополнительно программа обеспечивает возможность

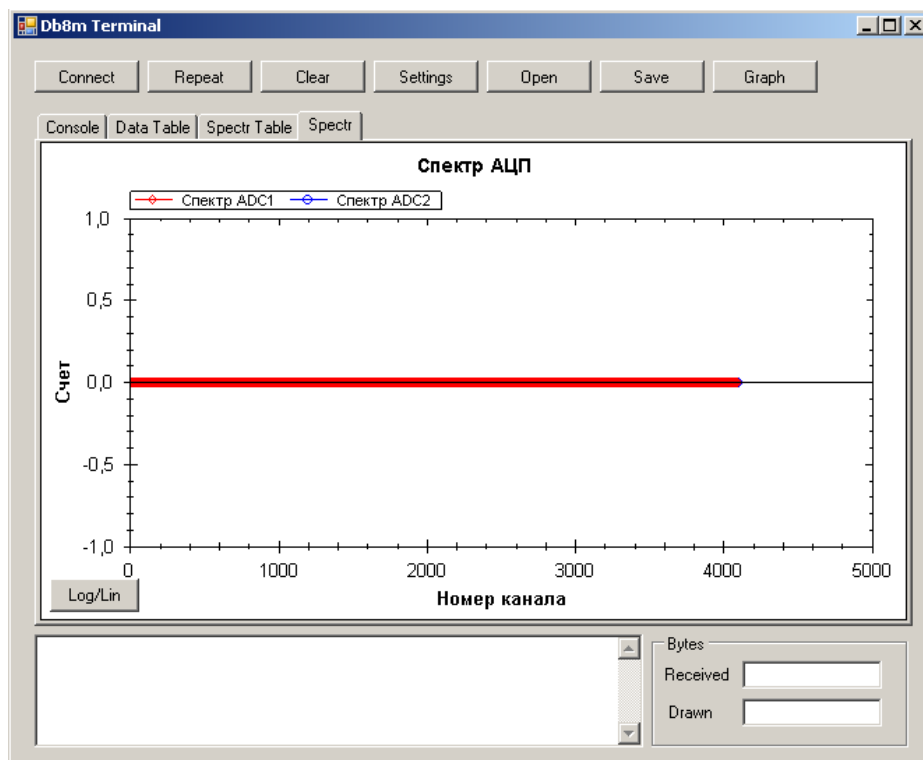


Рисунок 3.2 — Интерфейс программы **DB8mTerminal**

накопления спектров энерговыделения по детекторам ДБ-8м и отображения их в графическом виде, в режиме реального времени.

Графическое отображение спектров реализовано с использованием компонента ZedGraph. Введение такой возможности значительно ускорило калибровку и градуировку прибора на источниках радиационного излучения, так что может быть рекомендовано для программ аналогичной направленности.

3.1.2 Программа DepronExplorerView

Данная программа предназначена для просмотра и обработки данных прибора полученных во время комплексных испытаний или во время штатной работы прибора. Аналогично Depron Terminal, данная программа была написана в среде разработки ПО Microsoft Visual Studio на языке `c#` с использованием фреймворка .NET3.5. Пользовательский интерфейс программы построен на основе WPF.

На момент комплексных испытаний прибора ДЭПРОН программа DepronExplorerView позволяет отображать все типы бинарных данных, получен-

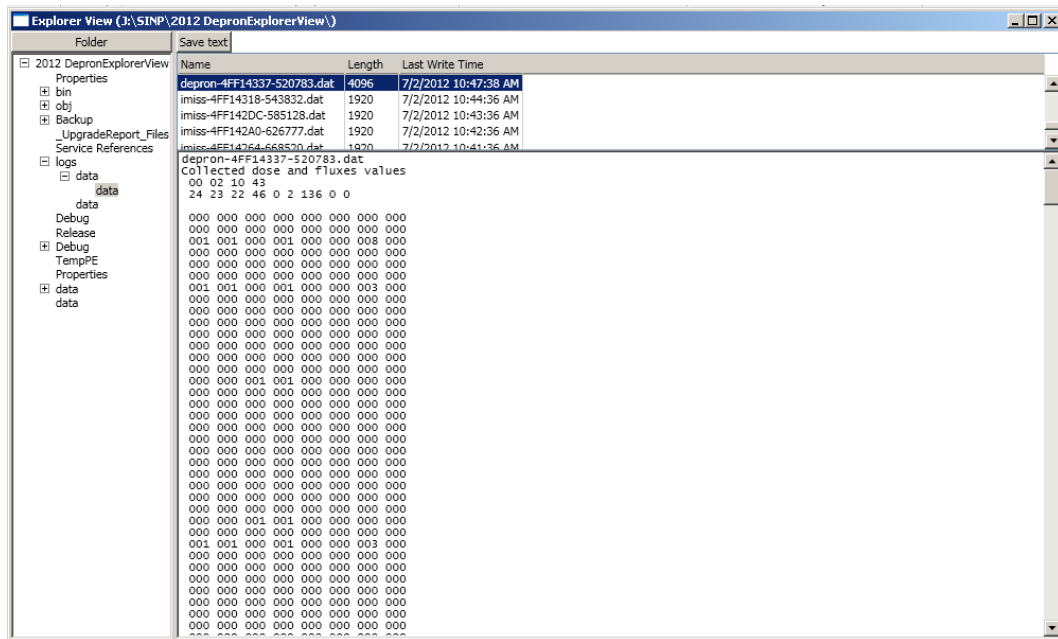


Рисунок 3.3 — Интерфейс программы **DepronExplorerView**

ных от прибора ДЭПРОН, в таблично-текстовой форме и сохранять полученные данные в текстовые файлы. Для удобства использования интерфейс программы выполнен в стиле файлового менеджера.

Подготовленная программа активно использовалась при всех испытаниях прибора ДЭПРОН в комплексе аппаратуры спутника, а также будет использоваться при предполетных проверках на космодроме Восточный.

3.1.3 Структура массивов (базы данных) результатов измерений

Результаты измерений прибора ДЭПРОН формируются в массивы информации размером 512 байт.

Каждое сообщение состоит из следующих полей:

- начало сообщения;
- категория;
- длина сообщения;
- данные.

Поле “начало сообщения” содержит 2 байта:

- байт DLE – 11110000;
- байт STX – 11111111.

На момент написания в программе ДЭПРОН используются нестандартные значения для байт DLE и STX, поэтому во избежание путаницы в дальнейших версиях ПО ДЭПРОН будут использоваться общепринятые значения этих байт.

Поле “категория” состоит из одного байта (CAT). При обмене с БИ используются варианты сообщений: A, S, H, N. Коды сообщений соответствуют таблице ASCII: A - 01000001, S - 01010011, H - 01001000, N – 01001110.

Поле “длина сообщения” содержит 1 байт (LEN) по умолчанию передается “\0”, что означает общую длину посылки 512 байт.

В ином случае значение длины равно общему числу байт сообщения, исключая поле “начало сообщения”.

Поле “данные” (RECORD) содержит данные в соответствии с описанием передаваемых сообщений и их спецификацией.

Общая структура сообщений выглядит следующим образом:

| Начало сообщения (DLE,STX) | Категория(CAT) | Длина(LEN) | Данные (RECORD) |
|-------------------------------|----------------|------------|--------------------|
| Метка 1 | Метка 2 | | |
| 2 байта | 2 байта | | 508 байт |

3.1.4 Содержание блоков данных ДЭПРОН

Прибор ДЭПРОН в процессе штатной работы формирует несколько типов массивов информации, которые соответствуют различным типам измерений:

- дозиметрические измерения потока ионизирующих излучений;
- измерения спектров потока ионизирующих излучений;
- запись данных высокоэнергетичных событий в детекторах;
- измерение временного характера кратковременных нейтронных явлений;

Также прибор ДЭПРОН формирует ответ на пришедшую команду от БИ.

Типы массивов данных прибора ДЭПРОН:

- блок данных ДЭПРОН A Collected dose and fluxes values
- блок данных ДЭПРОН S Energy deposition spectra
- блок данных ДЭПРОН H High Amplitude Data
- блок данных ДЭПРОН N Neutron burst data

– блок данных ДЭПРОН Т квитанция на полученную команду

3.1.5 Периодичность выдачи массивов данных

| Блок данных | Содержание | Периодичность | АВ | Величины | поглощенной |
|--------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---|--|
| дозы и потоков частиц | 1 мин. | S | Спектр энерговыделения | 5 мин. | N |
| Данные о высокоэнергетичных событиях | По мере накопления данных | N | Данные по нейтронным вспышкам | По мере накопления данных, но не более 10 массивов в минуту | T |
| Квитанция на полученную команду | По мере поступления команд | квитанция на полученную команду | T[DEBUG] | Данные по времени выполнения блоков программы | По мере заполнения буфера отправки сообщений прибора |

Глава 4. Результаты

4.1 Спектрометр протонов и электронов

Прибор СПЭ содержит четыре одинаковых четырех-детекторных телескопа, устройства аналоговой и цифровой обработки сигналов детекторов, интерфейсные устройства, источники вторичного напряжения.

Структурно аппаратура разделяется на Детекторные Блоки и Блок Обработки Данных. Блок обработки данных выступает как интерфейсный блок с бортовой аппаратурой КА и телеметрией, а детекторные блоки в свою очередь, связаны кабельной сетью с блоком обработки данных.

Основным элементом детекторного блока являются детекторные сборки - телескопы, состоящие из полупроводниковых детекторов различной толщины и сцинтилляционного детектора, расположенных один под другим, которые регистрируют попадающие в них частицы. Оси телескопов из различных детекторных блоков расположены под углом $109^{\circ}28'$ друг относительно друга.

Рисунок 4.2. Структурная схема детекторного блока прибора СПЭ. Сверху указано количество устройств данного типа в детекторном блоке. .

На рис. 4.2 представлена структурная схема одного детекторного блока. Детекторы каждого телескопа производят электрические импульсы, амплитуда которых пропорциональна энерговыделению в детекторах, далее эти импульсы через эмиттерный повторитель поступают на вход зарядочувствительного усилителя, который усиливает сигналы до величин, позволяющих производить с помощью компараторов выделение энергетических порогов.

В детекторных блоках находятся электронные логические устройства отбора, работающие на принципе совпадений и антисовпадений электрических импульсов. Данные логические устройства отбора реализуют условия, позволяющие отдельно регистрировать электроны и протоны ОКП и получать энергетические распределения (зависимость потоков частиц от энергии) этих частиц в пространстве и во времени. Дополнительно в функции этого логического устройства, входит счетчик, обеспечивающий регистрацию количества событий, удовлетворяющих условиям отбора конкретного логического устройства. Данные со счетчиков

за определенный момент времени записываются в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), обеспечивающее запоминание первичных данных по зарегистрированным частицам.

Данные из ОЗУ детекторного блока поступают в постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) блока обработки данных, в котором собирается и хранится информация со всех детекторных блоков и, после специальной сортировки, по мультиплексному каналу информационного обмена (МКИО) поступает в бортовые системы МКА. В **следующем параграфе** приведены структурные схемы логических схем отбора событий, реализованные по результатам моделирования.

4.1.1 Методы исследования спектрометрических характеристик прибора СПЭ

Исторически первой задачей при переработке электронных схем прибора СПЭ была поставлена цель построения модели в системе Simulink или LabView. Создание такой модели было поручено диссертанту и в данной главе подробно описываются методы и результаты проведенных исследований. Построенная модель в Simulink требует входных данных с детекторов для анализа пригодности выбранных логических схем и проверки необходимого уровня быстродействия. Средством для получения подробных входных данных был выбран метод Монте-Карло моделирования, реализованный в пакете Geant4.

4.1.2 Описание моделирования в Geant4

Данное моделирование проводилось

4.1.3 Разработка структурных схем блоков аппаратуры радиационного контроля ОКП и описание принципов их работы

Разработка структурных схем блоков аппаратуры радиационного контроля ОКП проводилась путем моделирования работы цифровых и аналоговых узлов прибора СПЭ (телескопическая система) в среде Simulink (MATLAB), с использованием данных численного моделирования детектирующей части прибора в среде Geant4. Simulink – это графическая среда имитационного моделирования, позволяющая при помощи блок-диаграмм в виде направленных графов строить динамические модели, включая дискретные, непрерывные и гибридные, нелинейные и разрывные системы. Дополнительные пакеты расширения Simulink позволяют решать спектр задач от разработки концепции модели устройства до тестирования, проверки, генерации кода и аппаратной реализации [1].

Simulink интегрирован в среду MATLAB, что позволяет использовать встроенные математические алгоритмы, такие как расчет параметров распределения Пуассона, что будет продемонстрировано в разделе 4.2.3

4.1.4 Описание электронной модели прибора СПЭ

Электронная модель прибора СПЭ создавалась с использованием как стандартных блоков Simulink, так и специализированных блоков для программирования промышленно выпускаемых программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), представлена на рисунке Б.1 приложения Б.

При построении электронной модели прибора из стандартной библиотеки блоков Simulink были использованы:

1. блок “From Workspace”, позволяющий импортировать подготовленные массивы входных данных об энергосвечениях в детекторах;
2. блок “To File”, позволяющий экспортировать в структурированный файл (формата .MAT) массивы выходных данных логических счетчиков;

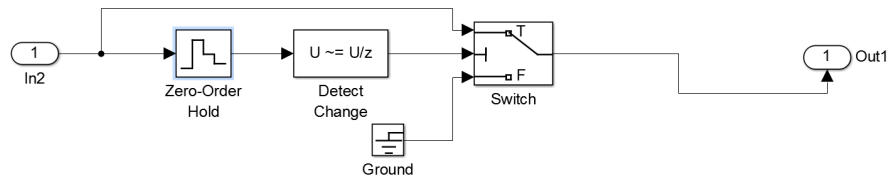


Рисунок 4.1 — Подсистема имитации аналоговых сигналов, формирования импульсов сигналов длительностью в 1 такт.

3. блок “Scope”, позволяющий проводить визуализацию массивов и строить графики промежуточных результатов вычислений в режиме реального времени;
4. блок определения изменения уровня сигнала “Detect Change”, формирования преключателей “Switch” и имитации реальных длительностей сигналов от формирователей аналоговой части прибора путем реализации задержки сигнала “Zero-order Hold”. Эти блоки экспортируются только в подсистемы имитации аналоговых сигналов (рис. 4.1);
5. блок «Relay», имитирующий работу компараторов аналоговой части прибора и настраиваемый на пороговые значения включения и выключения, соответствующие энергетическим порогам прибора СПЭ.

А также другие блоки из стандартной библиотеки Simulink.

На входы модели при моделировании подавались величины энерговыделений в детекторах, полученные в результате Монте-Карло моделирования прибора СПЭ проведенного Чирской Н.. Так как при моделировании в Geant4 каждое событие считается независимым от остальных, для использования этих данных в среде Simulink требуется вводить дополнительную временную характеристику, определяющую частоту срабатываний компараторов аналоговой части прибора, что будет подробно рассмотрено в разделе 4.2.3. Входные данные были разделены в файлы по типу частиц и, так как в реальных условиях работы прибор будет находиться в условиях облучения протонами и электронами КИ одновременно, в модели производится смешивание потоков этих данных путем суммирования (рис.4.2).

Подсистема формирования импульсов сигналов длительностью в 1 такт требуется для верного последующего смешивания сигналов. Ввод данных по энерговыделениям в детекторах происходит таким образом, что образуется ступенчатая функция, представленная на рисунке 4.3 в изображениях d2p и d2e, с длительно-

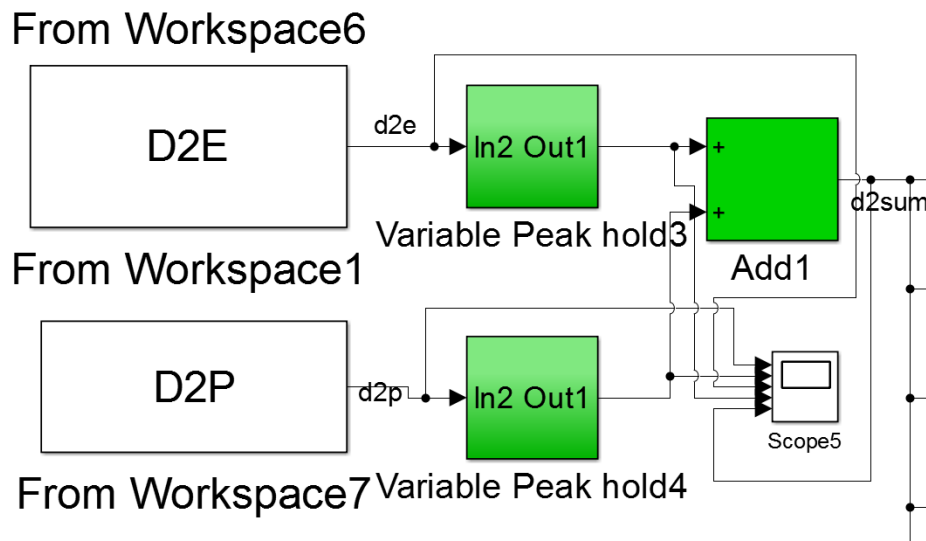


Рисунок 4.2 — Смешивание сигнала в детекторе 2 прибора СПЭ. «Variable Peak hold» - Подсистема формирования импульсов сигналов длительностью в 1 такт, «Scope5» – виртуальный осциллограф, «From Workspace» - ввод данных по энерговыделениям в детекторах, «Add1» - сумматор

стью ступени, зависящей от параметров распределения Пуассона. Из рисунка 4.3 видно, что временные параметры для электронов гораздо меньше по длительности, чем для протонов. Суммирование сигналов такой формы привело бы к просчету части событий регистрации электронов, поэтому смешивание происходит на фронтах входных сигналов от электронов и от протонов. Пример работы системы имитации аналоговой части прибора изображен на рис. 4.2 (графики получены с помощью осциллографа рис 4.1), суммированный сигнал показан последним. Видны многократные прохождения через детектор электронов и одно прохождение протона. После формирования смешанный сигнал поступает на группу блоков 1d2.... nd2 (рисунок 4.3), имитирующих работу компараторов. Рисунок 4.1 Для каждого блока типа nd2 подбирались индивидуальные значения порогов срабатывания, в соответствии с итогами определения этих параметров в разделе 3.3. Блоки nd2 производят на выходах двоичные сигналы (0 при значении на входе блока менее порога и 1 при превышении порога), пригодные для дальнейшего цифрового преобразования. Кроме того, полученные на выходах компараторов сигналы требуют формирования сигналов длительности 3 мкс для полного соответствия с принципом работы аналоговой части прибора, определяемой характерными значениями RC цепей детекторов. Цепочка преобразования сигналов показана на рисунке 4.3.

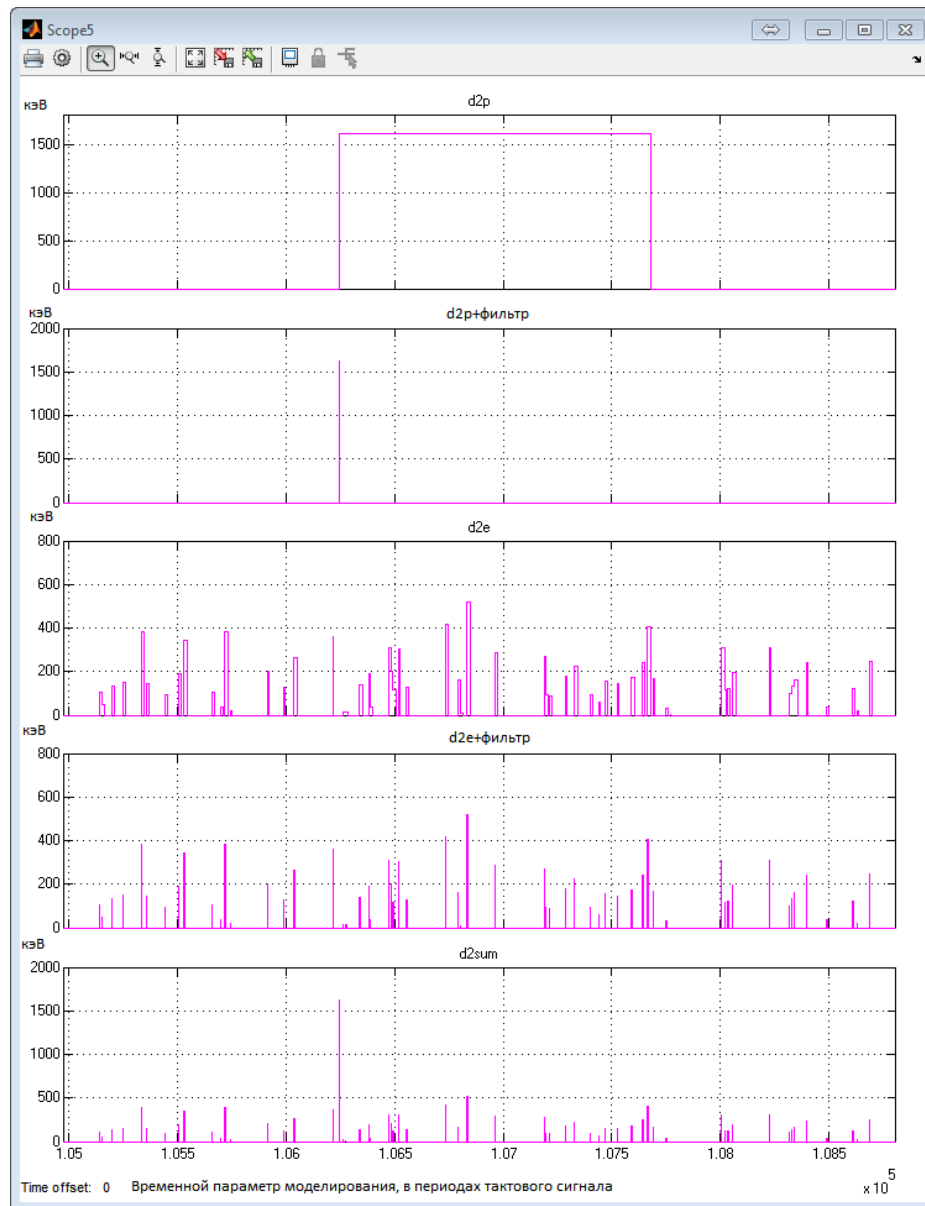


Рисунок 4.3 — Моделирование работы аналоговой части детектора 2 прибора СПЭ, d2e – энергосвечение от электронов КИ, d2p - энергосвечение от протонов КИ, d2e+фильтр и d2p+фильтр – входные данные по энергосвечению после выделения фронтов, d2sum – итоговое энергосвечение в детекторах прибора. Временной параметр выражен в единицах тактовых сигналов ПЛИС (длительность 40нс)

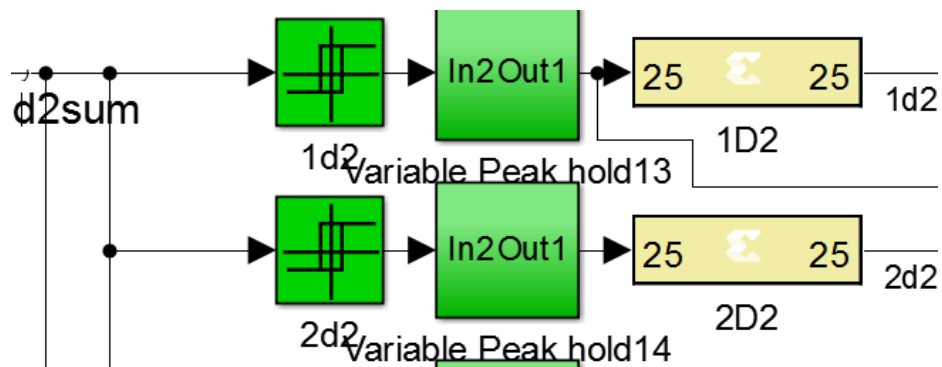


Рисунок 4.4 — Подсистемы имитации компараторов (1d2 и 2d2) и формирователей длительности цифровых сигналов (Variable Peak Hold13-14)

Подсистема имитации реальных длительностей цифровых сигналов от формирователей аналоговой части прибора выделена от остальной модели и предназначена для формирования цифровых сигналов с длительностью 3мкс, (рис. 3.6), выраженное в числе тактовых сигналов равно 75. Для канала 1Д2 (стробирующий канал, наличие которого является сигналом для всех каналов к запуску обработки) использована длительность в 400 нс для обеспечения необходимого времени работы схем отбора событий.

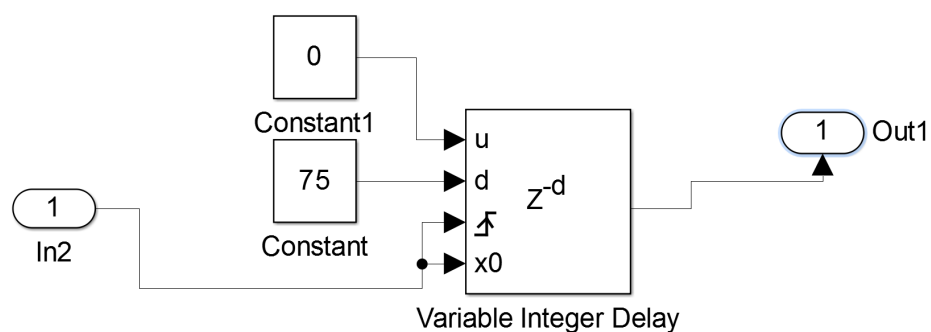


Рисунок 4.5

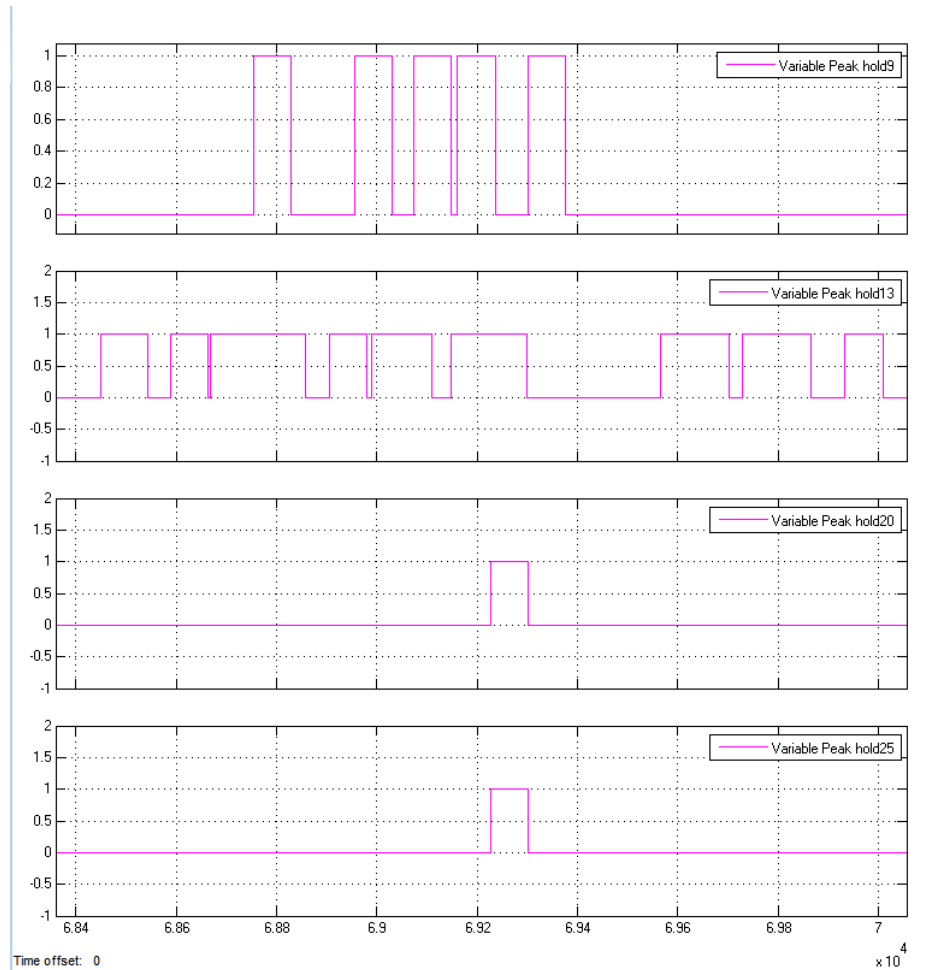


Рисунок 4.6 — Подсистема имитации формирователей аналоговой части прибора, использующая блоки постоянных значений “Constant”, и задержки сигнала “Variable Integer Delay”. Ниже показан сформированный импульс длительностью 3 мкс (75 тактов несущей частоты ПЛИС)

После аналоговых преобразований сигналы поступают на цифровую обработку для отбора событий по определенным признакам, которая реализуется в ПЛИС. Логика цифровых преобразований в ПЛИС реализуется с помощью элементов библиотеки Xilinx Blockset. В данной библиотеке создана модель отбора событий, подходящая для определения типа частицы и измерения энергетических параметров данной частицы. В состав элементов библиотеки Xilinx Blockset входит набор наиболее часто встречающихся при разработке ПЛИС элементов логики (И, ИЛИ, НЕ и тд.), элементов с двумя устойчивыми состояниями, мультиплексоры, шифраторы и дешифраторы, наборы различного типа регистров. Блоки каждого канала отбора событий по энерговыделениям были сгруппированы в подсистемы: e1-e6 каналы выделения параметров электронов, p1-p8 каналы выделения параметров протонов. Подробный состав каждой подсистемы в виде структурных схем блоков аппаратуры радиационного контроля приведен в разделе 4. Разработка микропрограммы для прошивки ПЛИС с использованием средств Simulink и Xilinx Blockset происходит в несколько этапов:

1. Производится составление структурных схем модели.
2. Производится тестирование работоспособности модели в среде Simulink.
3. Корректируются структурные схемы с учетом результатов моделирования.
4. Код модели экспортируется в аппаратно независимый код в формате VHDL.
5. Полученный код VHDL используется для прошивки ПЛИС.
6. Производится одновременная симуляция работы программы в среде Simulink и в ПЛИС.
7. Производится корректировка кода VHDL по результатам симуляции.

Блоки библиотеки Xilinx Blockset оптимизированы для работы с устройствами производства Xilinx, аппаратный код VHDL пригоден для использования и на ПЛИС других производителей, с условием обеспечения архитектурной совместимости целевых ПЛИС с ПЛИС производства Xilinx. Такой метод позволяет после переноса кода рассчитывать на возможность использования полученных микропрограмм для ПЛИС российского производства.

| № канала | E1 | E2 | E3 | E4 | E5 | E6 |
|-------------------------|-----------|------------|---------|---------|---------|----------|
| Границы интервалов, МэВ | 0,15-0,35 | 0,35 - 0,6 | 0,6-1,0 | 1,0-2,0 | 2,0-4,0 | 4,0-10,0 |

Таблица 4.1 — Предварительные энергетические интервалы измеряемых энергий электронов для телескопа СПЭ.

4.2 Подбор параметров отбора событий

Одной из целей данного моделирования было выяснение границ энергетических каналов (электронных и протонных), подходящих для измерения прибором СПЭ. В соответствии с ТЗ энергетический диапазон измеряемых электронов должен составлять 0,15-10,0 МэВ и должен измеряться в 4-6 энергетических интервалах. В качестве первого приближения, рассмотрены интервалы с приблизительно логарифмическим шагом по энергии (таблица 4.1).

На подготовительном этапе работ для электронов и протонов были выбраны предварительные границы порогов энерговыделений для каждого детектора и выбрано количество необходимых интервалов регистрации по первичным энергиям исходя из требований ТЗ.

4.2.1 Классический метод определения порогов по энерговыделению

Для определения энергий первичных частиц и разбиения по выбранному набору интервалов используется метод совпадений. При таком подходе контролируется энерговыделение в каждом из детекторов телескопа - оно должно соответствовать заданным нижним и верхним порогами интервалам по энерговыделению [ссылка на книгу гальперин или прайс?](#). Основной предпосылкой данного метода является осевое приближение - рассмотрение только тех заряженных частиц, траектории которых минимально отклоняются от нормальных по отношению к плоскости всех детекторов. В таблице 3.2 приведены предварительные энергетические пороги компараторов детекторов телескопа СПЭ, подобранные классическим методом при рассмотрении зависимостей энерговыделений в детекторах определенной толщины от энергий первичных электронов.

Таблица 3.2 - Предварительные пороги энергосвободы в энергетических единицах для компараторов детекторов телескопа СПЭ

4.2.2 Статистический метод определения порогов по энергосвободы

Так как распространение заряженных частиц в теле детектора имеет стохастический характер и даже для моноэнергетической линии имеет вид кривой Ландау, с наложенной на нее гауссовой функцией (4.1), видно что классический подход к подбору порогов позволяет получить только первое приближение значений. Тем не менее именно этот подход является наиболее удобным для планирования телескопических систем, подбора необходимых толщин детекторов и величины боковой защиты телескопа. Типичный вид данной кривой представлен на рисунке 4.7 Акимов Ю.К. и др. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике

$$f(\Delta E, x) = \frac{1}{2\pi\sqrt{\sigma}} \int_{-\infty}^{\infty} f(\Delta E', x) e^{\frac{-\Delta E - \Delta E'}{2\sigma^2}} d(\Delta E') \quad (4.1)$$

где ΔE энергетические потери в веществе толщиной x

обработать литературу:

2. В. П. Чистяков, Курс теории вероятностей, М., Наука, 1978 3. Е. Бюклинг, К. Каянти, Кинематика элементарных частиц, М., Мир, 1975

5. Р. Бок, Х. Грот, Д. Ноц, М. Реглер, Методы анализа данных в физическом эксперименте., М., Мир, 1993 6. Идье В., Драйард Д., Джеймс Ф., Рус М., Садуле Б., Статистические методы в экспериментальной физике, М., Атомиздат, 1976 7. ROOT User's Guide [<http://root.cern.ch/drupal/content/users-guide>]

Для уточнения энергетических эквивалентов порогов был предложен статистический метод с использованием данных Монте-Карло моделирования спектрометра. Для каждого интервала энергий первичных частиц были построены зависимости dE от E . По этим графикам визуально можно определить диапазоны энергосвободы в отдельных детекторах прибора. Ценным вспомогательным средством при таких изысканиях оказались средства описательной статистики.

График для примера

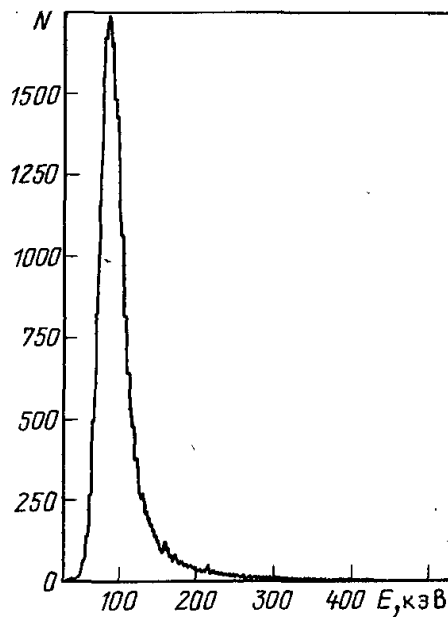


Рисунок 4.7 — Кривая Ландау, представляющая распределение энерговывделений в полупроводниковом детекторе от π -мезонов энергии 10 ГэВ

4.2.3 Подбор временных параметров моделирования

Как было изложено выше, при моделировании в Geant4 каждое событие считается независимым от остальных событий. Для использования данных такого моделирования требуется вводить дополнительную временную характеристику, определяющую частоту срабатываний компараторов аналоговой части прибора. Для этих целей возможно получить информацию о средней частоте регистрации частиц в приборе, основываясь на итогах моделирования в Geant4, путем учета всех типов событий (в пределах коллиматора и боковые события), имеющих ненулевое энерговывделение в детекторах. Модельные данные необходимо соотнести с реальными интегральными потоками на выбранных орбитах, получая среднюю частоту регистрации событий, максимально приближенную к реальным условиям работы прибора.

Известно, что временное распределение регистрации частиц КИ соответствует распределению Пуассона, с параметром, равным среднему временному интервалу между моментами регистрации частиц [3].

В таблице 4.2 приведены рассчитанные по формуле 1 параметры распределения Пуассона, задающие временное распределение срабатываний детекторов прибора от электронов (потоки протонов значительно меньше). При расчете ис-

пользовался геометрический фактор – отношение зарегистрированных частиц к общему потоку при моделировании (n/N), а также расчетные интегральные потоки на целевых орбитах и площадь модельного источника частиц, связывающая данные величины 4.2.

$$t = \frac{N}{n} \cdot \frac{1}{F(> E) \cdot S} \quad (4.2)$$

где:

t – средний период регистрации частиц при моделировании

N - общее количество частиц при моделировании;

n - количество зарегистрированных детекторами частиц при моделировании;

$F(> E)$ – интегральный поток частиц КИ (электронов) на выбранных орбитах;

S – площадь источника частиц (прибор помещен в центр сферы с изотропным потоком излучения).

При расчетах использовались следующие значения параметров:

$N = 2,00E + 08$ частиц было запущено с поверхности сферы

$S = 6,08E + 01\text{см}^2$ площадь источника частиц при моделировании

$F(> E)$ интегральный поток частиц КИ на выбранных орбитах.

В таблицах 3.11 -3.113 введены обозначения:

– n_A, n_B, n_C – количество частиц, выделивших энергию в детекторах прибора для различных типов корпуса прибора,

– t_A, t_B, t_C - рассчитанные временные параметры распределения Пуассона для различных типов корпуса прибора

Варианты материала корпуса (1 на Рис. 2.1):

– вариант А - латунь;

– вариант В – дюралюминий;

– вариант С - выше пунктирной линии – латунь, ниже – дюралюминий.

| Орбита | $F(E > 0,15\text{МэВ})$ | n_A | n_B | n_C | $t_A, \text{с}$ | $t_B, \text{с}$ | $t_C, \text{с}$ |
|---------|-------------------------|----------|----------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1700 км | 6,40E+07 | 1,13E+05 | 1,09E+05 | 1,17E+05 | 4,52E-07 | 4,68E-07 | 4,37E-07 |
| 8000 км | 1,10E+07 | 1,16E+05 | 1,17E+05 | 1,23E+05 | 2,58E-06 | 2,55E-06 | 2,43E-06 |

Таблица 4.2 — Расчетные параметры распределения Пуассона для модельных потоков электронов.

Из таблицы 4.2 видно, что скорости счета для различных типов материалов корпуса различаются на 1-5%. Аналогичным образом рассчитаны параметры распределения Пуассона, задающие временное распределение срабатываний детекторов прибора от протонов (таблица 3.12).

| Орбита | $F(E > 0,15\text{МэВ})$ | n_A | n_B | n_C | $t_A, \text{с}$ | $t_B, \text{с}$ | $t_C, \text{с}$ |
|---------|-------------------------|----------|----------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1700 км | 6,40E+07 | 1,13E+05 | 1,09E+05 | 1,17E+05 | 4,52E-07 | 4,68E-07 | 4,37E-07 |
| 8000 км | 1,10E+07 | 1,16E+05 | 1,17E+05 | 1,23E+05 | 2,58E-06 | 2,55E-06 | 2,43E-06 |

Таблица 4.3 — Расчетные параметры распределения Пуассона для модельных потоков протонов.

Таблица 3.12 -Параметры распределения Пуассона для модельных потоков протонов

В таблицах 3.11 и 3.12 энергии частиц заданы в МэВ, потоки – всенаправленные - в единицах числа частиц через 1 см^2 в секунду [$1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$]. Таблица 3.12 демонстрирует, что потоки протонов существенно ниже потоков электронов и для задачи учета временных свойств прибора данными потоками можно пренебречь. И приведенных таблиц видно, что рассчитанные скорости счета для электронов очень высоки, учитывая длительности импульсов формирователей, которые поступают с выхода аналоговых схем усиления. Длительность импульсов формирователей около 3 мкс и определяется скоростью работы зарядо-чувствительных усилителей – увеличение скорости их работы отрицательно скажется на точности регистрации энергосвечения в детекторах и как следствие снизит точность определения энергий исходных частиц.

Следует отметить, что при выборе только тех частиц, энергосвечение которых в детекторе 2 (вывод 4 раздела 2) ненулевое, скорость счета становится значительно меньше, это дает основание считать, что аналоговая и цифровая части прибора будут справляться с обработкой информации с детекторов с минимальным «мертвым» временем регистрации. В таблице 3.13 представлены расчетные средние времена регистрации электронов с ненулевым энергосвечением в детекторе 2.

Однако и эта оценка является завышенной, так как для регистрации в цифровой части прибора эти частицы должны иметь энергосвечение в детекторе 2, превышающее выставленный минимальный порог младшего канала этого детектора, который составляет 120 кэВ (1Д2). Величина этого порога определяется не столько необходимостью снижения загрузок детекторов от низкоэнергетичных

событий, сколько шумами детектора, которые пропорциональны емкости детектора и обратно пропорциональны толщине.

Таблица 3.13 - Параметры распределения Пуассона для модельных потоков электронов с ненулевым энерговыделением в детекторе 2

4.2.4 Результаты и обсуждение

обнаружение с помощью моделирования двух проблем: пороги подобраны неточно, времена обработки недостаточны - высокие энергии в просчетах

Результаты выбора диапазонов каналов для детекторов прибора СПЭ показывают, что для однозначного определения типа и энергии первичной частицы требуется использование не менее 4 энергетических порогов для каждого детектора, а для детекторов 2 и 3 используется 8 и 7 порогов соответственно.

В качестве рекомендаций по итогам моделирования стоит выделить: 1. изменение априорных значений порогов в детекторах, что позволит проводить более точные измерения энергий первичных частиц 2. необходимость снижения времени реакции аналоговых трактов прибора для повышения быстродействия прибора в целом и получения возможности регистрации более высоких значений потоков 3. необходимо обеспечить длительность стробирующего сигнала (младшего энергетического порога - 1Д2) до величин порядка 200-400 нс Для реализации большого количества порогов рационально использовать многоканальные компараторы, либо перейти на использование быстродействующих АЦП небольшой разрядности (до 8 бит). Использование многоканальных компараторов, таких как например 4-х канальный 1481СА2Т производства ОАО «НПП «Пульсар», позволит использовать по одной либо двум микросхемам на один детектор (один тракт усилителей - формирователей). Большую унификацию схемных решений обеспечивает замена компараторов на АЦП, так как исчезает необходимость калибровать каждый энергетический канал отдельно, которых в приборе СПЭ 19. В таком случае необходимо будет провести единственную калибровку для каждого из четырех детекторных трактов. К отрицательным сторонам такого решения стоит отнести большее энергопотребление по сравнению с использованием компараторов, возможные нелинейности характеристик АЦП и меньшую общую

надежность системы из-за более высокой интеграции в микросхемах АЦП. Также использование АЦП не освобождает от использования компаратора в тракте детектора 2, который в любом случае должен использоваться как сигнал для одновременного запуска всех АЦП. Данный компаратор должен быть настроен на превышения минимального уровня в младшем канале детектора 2 (канал 1Д2 таблица 3.8). В ходе создания электронной модели работы прибора получен аппаратный код VHDL, оптимизированный для использования с устройствами производства Xilinx, но пригодный для использования и для ПЛИС других производителей, в том числе и российских.

4.3 Структурные схемы логических устройств отбора событий

По результатам моделирования параметров энергетических интервалов разработаны структурные схемы логики определения параметров зарегистрированных частиц, а также служебные логические блоки необходимые для реализации функций прибора на микросхеме ПЛИС. В зависимости от требуемой пропускной способности схем логики (раздел 3.6) на стадии моделирования аппаратуры обычно производится оптимизация быстродействия схем логики. Такая оптимизация обычно подразумевает сопоставления максимальных и минимальных путей распространения сигнала по трактам цифровой логики. В дальнейшем эти пути выравниваются по длительности выполнения. Каждый элемент логической схемы срабатывает примерно за 1 такт ПЛИС (для целей моделирования нами выбрана длительность 40нс), без учета метастабильных состояний. Таким образом вывешивая длины на структурных схемах логики и добавляя в короткие тракты регистры (операция конвейеризации) теоретически можно достигнуть производительности всего тракта, например из 10 элементов: 1 полное срабатывание за 1 такт несущей частоты, вместо 1 полного срабатывания за 10 циклов несущей частоты[1]. К сожалению, такая оптимизация цифровых схем в случае прибором СПЭ не обоснована, так как максимальная разница длин трактов не более 5 элементов, что приводит к незначительному снижению пропускной способности схем отбора по сравнению с длительностью входного сигнала и время реакции микросхемы снизится лишь до 200 нс. Длительность входного стробирующего сигнала в приборе

СПЭ составляет 3 мкс, поэтому разница в 200 мкс является незначительной. Однако данный подход может и должен быть использован, если потребуется снизить частоту тактового сигнала ПЛИС – а этот шаг возможно потребуется для снижения энергопотребления прибора СПЭ – весомый вклад в него вносит именно потребление ПЛИС, которое определяется в первую очередь частотой его работы.

На рис. 4.3 – 4.16 приведены структурные схемы 14 логических устройств отбора событий, планируемых к реализации в разрабатываемом детекторном блоке в соответствии с таблицами 3.9 и 3.10.

Моделирование на тестовых потоках данных показало, что устойчивая работа счетчиков, присоединенных к выходу каждого канала, возможна лишь при использовании схем выделения положительных фронтов импульсов, (схема представлена на рис.4.17).

Рисунок 4.17 - Структурная схема счета и выделения положительных фронтов сигнала.

4.4 Выводы раздела

При разработке моделей электронных схем прибора в Simulink было обнаружено что первоначальный дизайн схем не позволяет обрабатывать все поступающие события с детекторов при максимальных потоках ИИ в рабочих режимах прибора. Такие максимальные загрузки будут наблюдаться в приполярных областях и в области ЮАА, именно в тех зонах где по ряду исследований происходит накопление более 80% от суточной дозы для КА в околоземном пространстве. [сделать ссылку на работы Бенгина и Лишневого](#)

Простейшим путем решения проблемы высоких загрузок является сокращение площади детекторов, однако такой путь чреват значительным снижением углов обзора телескопа, либо геометрического фактора. А снижение этих характеристик спектрометра приведет к потере части информации по питч-угловому распределению заряженных частиц либо к малой статистической значимости измерений в большей части траектории спутника. Оба эти фактора могут свести к невыполнимой задаче построения аппроксимации точечных измерений с группы спутников на все околоземное пространство.

Лучшим же способом данная проблема может быть решена с помощью сокращения выходных импульсов аналоговых трактов усиления сигналов, а также повышения быстродействия логики обработки совпадений и антисовпадений.

По результатам моделирования разработаны структурные схемы прибора СПЭ. Логические устройства отбора реализованы на простейших логических элементах И и НЕ. Данные логические устройства отбора реализуют условия, позволяющие отдельно регистрировать электроны и протоны ОКП и получать энергетические распределения (зависимость потоков частиц от энергии) этих частиц в пространстве и во времени. Даны рекомендации по улучшению быстродействия полученных схем и их сопряжению с аналоговыми схемами прибора СПЭ.

1. Максфилд К., Проектирование на Плис. Архитектура, средства и методы. Курс молодого бойца Пер. с англ. В. М. Барская Издательство: Додэка-XXI, 2007 год 407 стр. ISBN: 978-5-94120-147-1

Литература 1. <http://matlab.ru/products/simulink> 2. Tukey, John W. Exploratory Data Analysis. Pearson. 1977 ISBN 978-0201076165. 3. Статистика для физиков: Лекции по теории вероятностей и элементарной статистике / Д. Худсон . – 2-е изд., доп . – Москва : Мир, 1970 . – 296 с.

Глава 5. Результаты

5.1 Планетарное распределение дозы на высоте полета КА а также потоков нейтронов

5.2 Спектры ЛПЭ и распределение мощности эквивалентной дозы

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. На основе анализа ...
2. Численные исследования показали, что ...
3. Математическое моделирование показало ...
4. Для выполнения поставленных задач был создан ...

5.3 Благодарности

Данная работа была бы невозможна без всемерной поддержки моей жены Золотаревой Любови Святославовны.

Список сокращений и условных обозначений

АЦП - Аналогово-цифровой преобразователь

ДЭПРОН - Дозиметр Электронов, Протонов и Нейтральных излучений

ДБ - Дозиметр Бортовой

ЮАА - Южно-Атлантическая Аномалия

Список литературы

1. Geant4 developments and applications / J. Allison [и др.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 2006. — Т. 53, № 1. — С. 270—278. — DOI: [10.1109/TNS.2006.869826](https://doi.org/10.1109/TNS.2006.869826).
2. GEANT4 - A simulation toolkit / S. Agostinelli [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2003. — Т. 506, № 3. — С. 250—303. — DOI: [10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8). — arXiv: [1005.0727v1](https://arxiv.org/abs/1005.0727v1).

Список рисунков

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Блок-схема прибора ДЭПРОН | 16 |
| 2.2 | Вариант размещения выборок в днище прибора ДЭПРОН. В последствии данный вариант переработан и заменен исходя из конструктивных соображений крепления модулей электроники и улучшения теплосброса источников питания, через термоконтакт с бортом КА. | 17 |
| 2.3 | Внутренняя компоновка модулей прибора ДЭПРОН. Вид сверху со снятой крышкой прибора. | 19 |
| 2.4 | Рисунок Схема включения детектора. | 20 |
| 2.5 | Использованный в приборе ДЭПРОН режим работы АЦП (AD7495), по материалам: «1 MSPS, 12-Bit ADCs AD7475/AD7495», One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A., 2005 Analog Devices, Inc. | 23 |
| 2.6 | Блок схема работы процедуры Ext_Interrupt, требуется обновления! | 27 |
| 3.1 | Интерфейс программы Depron Terminal | 31 |
| 3.2 | Интерфейс программы DB8mTerminal | 32 |
| 3.3 | Интерфейс программы DepronExplorerView | 33 |
| 4.1 | Подсистема имитации аналоговых сигналов, формирования импульсов сигналов длительностью в 1 такт. | 39 |
| 4.2 | Смешивание сигнала в детекторе 2 прибора СПЭ. | 40 |
| 4.3 | Моделирование работы аналоговой части прибора СПЭ | 41 |

| | | |
|-----|---|----|
| 4.4 | Подсистемы имитации компараторов (1d2 и 2d2) и формирователей длительности цифровых сигналов (Variable Peak Hold13-14) Подсистема имитации реальных длительностей цифровых сигналов от формирователей аналоговой части прибора выделена от остальной модели и предназначена для формирования цифровых сигналов с длительностью 3мкс, (рис. 3.6), выраженное в числе тактовых сигналов равно 75. Для канала 1Д2 (стробирующий канал, наличие которого является сигналом для всех каналов к запуску обработки) использована длительность в 400 нс для обеспечения необходимого времени работы схем отбора событий. | 42 |
| 4.5 | | 42 |
| 4.6 | Подсистема имитации формирователей аналоговой части прибора СПЭ | 43 |
| 4.7 | Кривая Ландау | 47 |
| Б.1 | Общий вид модели прибора СПЭ в среде Simulink/Matlab. Логика определения типа и энергии частиц сгруппирована в подсистемы: е1-е6 структурные схемы выделения электронов, р1-р8 структурные схемы выделения протонов. D1...4E – промоделированные массивы энерговыведений в детекторах от электронов, D1...4P - промоделированные массивы энерговыведений в детекторах от протонов. Блоки score1-score4 – виртуальные осциллографы в среде MATLAB, обеспечивающие наглядное отображение реакции исследуемого устройства на задаваемые внешние сигналы. Зеленым цветом показаны подсистемы имитации аналоговых сигналов, голубым цветом – подсистемы предназначенные для трансляции в аппаратный код ПЛИС, желтым цветом – выводы ПЛИС. | 68 |

Список таблиц

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Полупроводниковые детекторы прибора ДЭПРОН(по материалам ТУ) | 20 |
| 4.1 | Предварительные энергетические интервалы измеряемых энергий электронов для телескопа СПЭ. | 45 |
| 4.2 | Расчетные параметры распределения Пуассона для модельных потоков электронов. | 48 |
| 4.3 | Расчетные параметры распределения Пуассона для модельных потоков протонов. | 49 |

Приложение А

Структура данных измерений ДЭПРОН

А.1 Блок данных ДЭПРОН А

| Данные (RECORD) | | | | | | | |
|--------------------|--------|--------|--------|--------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Время | | | | Аппаратный счетчик детектора 1 | Счет детектора 1 | Счет детектора 2 | Счет детектора 2 |
| месяц | день | час | мин | | | | |
| 1 байт | 1 байт | 1 байт | 1 байт | 2 байта | 2 байта | 2 байта | 2 байта |

Продолжение:

| Данные (RECORD) | | | | | |
|-------------------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------|------------------------------------|
| Нейтронный счетчик 1 | Нейтронный счетчик 2 | Доза по первому детектору | Доза по второму детектору | Доза совпадений | Массивы секундной динамики 2 |
| 2 байта | 2 байта | 4 байта | 4 байта | 4 байта | 480 байт |

Блок массивов секундной динамики содержат шестьдесят массивов, содержащих приращения значений счетчиков за секунду, сжатых алгоритмом логарифмического сжатия, разработанным В.В. Бенгиным.

| Массив секундной динамики | | | |
|-----------------------------------|------------------|------------------|-------------------|
| Аппаратный счетчик детектора 1 | Счет детектора 1 | Счет детектора 2 | Счет совпадений 1 |
| 1 байт | 1 байт | 1 байт | 1 байт |

Продолжение:

| Массив секундной динамики | | | |
|---------------------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Нейтронный счетчик 1 | Нейтронный счетчик 2 | Доза по первому детектору | Доза по второму детектору |
| 1 байт | 1 байт | 1 байт | 1 байт |

А.2 Блок данных ДЭПРОН S

| Данные (RECORD) | | | | | | | | | |
|--------------------------|--------|--------|--------|-----------|--------------------------|---------------------------|--------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Спектр детектора 1 | Время | | | | Спектр детектора 2 | Счетчик детектора 1 | Спектр совпаде- ний 1 | Счетчик детектора 2 | Спектр совпаде- ний2 |
| | месяц | день | час | мин | | | | | |
| 124 байта | 1 байт | 1 байт | 1 байт | 124 байта | 4 байта | 124 байта | 4 байта | 124 байта | 4 байта |

Вместо длины сообщения LEN для данного массива в заголовок записывается номер массива спектров (0-255).

Каждый передаваемый спектр содержит число зарегистрированных импульсов, попадающих в соответствующий энергетический канал детектора. Количество энергетических диапазонов 62, верхние границы каналов выбраны с помощью алгоритма логарифмического преобразования номера канала.

| Канал № | Код АЦП | Канал № | Код АЦП | Канал № | Код АЦП | Канал № | Код АЦП |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 2 | 16 | 18 | 160 | 34 | 640 | 50 | 2560 |
| 3 | 24 | 19 | 176 | 35 | 704 | 51 | 2816 |
| 4 | 32 | 20 | 192 | 36 | 768 | 52 | 3072 |
| 5 | 40 | 21 | 208 | 37 | 832 | 53 | 3328 |
| 6 | 48 | 22 | 224 | 38 | 896 | 54 | 3584 |
| 7 | 56 | 23 | 240 | 39 | 960 | 55 | 3840 |
| 8 | 64 | 24 | 256 | 40 | 1024 | 56 | 4096 |
| 9 | 72 | 25 | 288 | 41 | 1152 | 57 | 4608 |
| 10 | 80 | 26 | 320 | 42 | 1280 | 58 | 5120 |
| 11 | 88 | 27 | 352 | 43 | 1408 | 59 | 5632 |
| 12 | 96 | 28 | 384 | 44 | 1536 | 60 | 6144 |
| 13 | 104 | 29 | 416 | 45 | 1664 | 61 | 6656 |
| 14 | 112 | 30 | 448 | 46 | 1792 | 62 | 7168 |
| 15 | 120 | 31 | 480 | 47 | 1920 | 63 | 7680 |
| 16 | 128 | 32 | 512 | 48 | 2048 | | |
| 17 | 144 | 33 | 576 | 49 | 2304 | | |

Таким образом, массивы спектров состоят из 62 четырехбайтных целых значений, порядок которых соответствует приведенному набору каналов.

А.3 Блок данных ДЭПРОН Н

| Данные (RECORD) | | | |
|-----------------|--------|---|--------------------------------------|
| Время | | Индекс массива высоких амплитуд(по умолчанию значение 63) | Массивы данных по высоким амплитудам |
| месяц | день | | |
| 1 байт | 1 байт | 2 байта | 63 массива по 8 байт |

Структура записи в массивы данных по высоким амплитудам:

| Массив данных по высоким амплитудам | | | | | |
|-------------------------------------|-----------|---------------|---------|--------|--------|
| Код АЦП 1 | Код АЦП 2 | Время события | | | |
| | | Код таймера | секунда | минута | час |
| 2 байта | 2 байта | 1 байт | 1 байт | 1 байт | 1 байт |

А.4 Блок данных ДЭПРОН Н

Информация по зарегистрированным нейтронным всплескам представлена в виде блока данных, состоящего из 127 массивов по 4 байта каждый. Структура записи в массив данных по нейтронным всплескам :

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 32 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 |
| Время дня в секундах | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|---|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| НД | | Количество тиков таймера после предыдущего нейтронного импульса | | | | | | | | | | | | |

НД – номер сработавшего нейтронного детектора:

01 – срабатывание первого детектора

10 – срабатывание второго детектора

11 – срабатывание обоих детекторов

А.5 Блок данных ДЭПРОН Т

В общей структуре сообщения для данного блока данных не выдается длина сообщения LEN, вместо этого передается '\0'. (Исправлено 27.02.2013)

Данный блок данных генерируется в ответ на пришедшее по каналу CAN от БИ командное сообщение, либо по мере заполнения выходного буфера при работе в режиме отладки прибора ДЭПРОН.

А.6 Команды прибора ДЭПРОН

Для управления работой прибора ДЭПРОН предусмотрено 6 типов команд:

- Сброс настроек к заводским параметрам
- Увеличение временного диапазона для нейтронных последовательностей
- Уменьшение временного диапазона для нейтронных последовательностей
- Увеличение полосы фильтра шумов протонных каналов
- Уменьшение полосы фильтра шумов протонных каналов
- Увеличение интервала времени сглаживания

| № | Команда | Описание команды |
|---|---------|--|
| 1 | Clr | сброс настроек к заводским параметрам |
| 2 | Tn+ | увеличение интервала между моментами регистрации нейтронов |
| 3 | Tn- | уменьшение интервала между моментами регистрации нейтронов |
| 4 | Psnr+ | увеличение допустимого протонного фона |
| 5 | Psnr_ | уменьшение допустимого протонного фона |
| 6 | Alpha+ | увеличение интервала времени сглаживания |

Ответный массив информации от прибора ДЭПРОН.

| Данные (RECORD) | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|---------------------------------|---------|--------------------------|-------------------------------|---------|---------|
| Время | | | | | Номер команды поро-дившей ответ | D tick | Счетчик при-нятых команд | Текущий фон по-тока прото-нов | Psnr | Alfa |
| мес | день | час | мин | сек | | | | | | |
| 1 байт | 1 байт | 1 байт | 1 байт | 1 байт | 4 байта | 4 байта | 4 байта | 4 байта | 4 байта | 4 байта |

Где:

D tick - интервал времени меньше которого считается, что идет один нейтронный всплеск, мсек/6

Psnr - максимальный уровень протонного фона, выше которого нейтронные всплески не регистрируются.

Alfa - константа экспоненциального сглаживания для расчета фона протонов

А.7 Отладочные сообщения прибора ДЭПРОН

Для проверки работы таймера высоких амплитуд и последовательности выполнения программного кода прибора ДЭПРОН существует возможность выдачи последовательностей измеренных временных промежутков, маркированных по названиям выполняемых блоков программного кода. Такая выдача происходит во время включения прибора ДЭПРОН в отладочном режиме, для этого необходима прошивка контроллера с объявленным макросом DEBUGTIME.

Измерение времени выполнения блоков происходит с помощью таймера прибора ТС1. Информация записывается последовательно в блоки данных ДЭПРОН Т, каждый пакет имеет размер 4 байта, первые два байта отведены под идентификационные символы, последние два байта содержат накопленное значение таймера ТС1, который настроен на работы с частотой 20 МГц.

| Данные (RECORD) | | | | | | | | | |
|-----------------|----------|------------------|-----------------|-----------------|--|--|--|--|--|
| Пакет таймера 1 | | | Пакет таймера 2 | Пакет таймера 3 | | | | | |
| Символ 1 | Символ 2 | Значение таймера | | | | | | | |
| 1 байт | 1 байт | 2 байта | 4 байта | 4 байта | | | | | |

Таблица определения выполненных блоков по маркирующим символам пакета таймера.

| Символ 1 | Символ 2 | Выполненный блок |
|----------|----------|---|
| A | D | Выполнен блок External_ADC_Read_Double |
| E | 0x01 | Выполнен блок Ext_Interrupt, вхождение блока P1 |
| E | 0x02 | Выполнен блок Ext_Interrupt, вхождение блока P2 |
| E | 0x04 | Выполнен блок Ext_Interrupt, вхождение блока N1 |
| E | 0x08 | Выполнен блок Ext_Interrupt, вхождение блока N2 |
| E | 0x10 | Выполнен блок Ext_Interrupt, вхождение блока T2 |
| D | 0 | Выполнен блок Detectors_Handling, Detectors_Flags пустое |
| D | 1 | Выполнен блок Detectors_Handling, до вызова External_ADC_Read_Double |
| D | 2 | Выполнен блок Detectors_Handling, после вызова External_ADC_Read_Double и до конца функции |
| N | 0 | Выполнен блок New_Secunde_Handler (вызов Data_CAN_Sending и Command_Handler каждую секунду) |
| N | 1 | Выполнен блок New_Secunde_Handler (сохранение текущей дозы каждую секунду) |
| N | 2 | Выполнен блок New_Secunde_Handler (отправка накопленных за минуту данных и каждые пять минут спектра) |

Приложение Б

Общий вид модели прибора СПЭ в среде Simulink/Matlab.

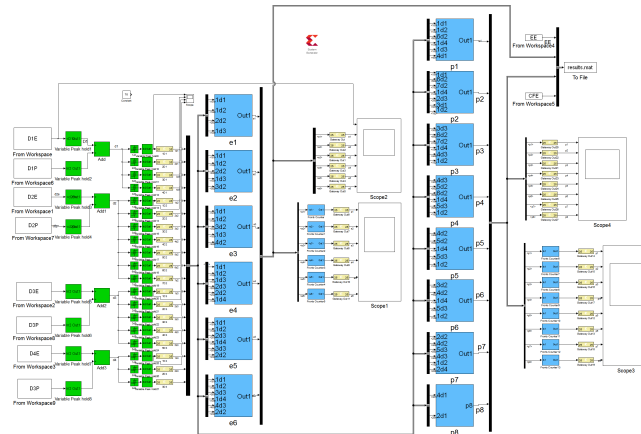


Рисунок Б.1 — Общий вид модели прибора СПЭ в среде Simulink/Matlab. Логика определения типа и энергии частиц сгруппирована в подсистемы: e1-e6 структурные схемы выделения электронов, p1-p8 структурные схемы выделения протонов. D1...4E – промоделированные массивы энерговыведений в детекторах от электронов, D1...4P - промоделированные массивы энерговыведений в детекторах от протонов. Блоки scope1-scope4 – виртуальные осциллографы в среде MATLAB, обеспечивающие наглядное отображение реакции исследуемого устройства на задаваемые внешние сигналы. Зеленым цветом показаны подсистемы имитации аналоговых сигналов, голубым цветом – подсистемы предназначенные для трансляции в аппаратный код ПЛИС, желтым цветом – выходы ПЛИС.

Приложение В

Примеры вставки листингов программного кода

Для крупных листингов есть два способа. Первый красивый, но в нём могут быть проблемы с поддержкой кириллицы (у вас может встречаться в комментариях и печатаемых сообщениях), он представлен на листинге **В.1**.

Листинг В.1 Программа “Hello, world” на C++

```

#include <iostream>
using namespace std;

5 int main() //                                xelatex    lualatex

{
    cout << "Hello, world" << endl; //latin letters in
        commentaries
    system("pause");
    return 0;
10 }

```

Пример **В.2**, иллюстрирующий подключение переопределённого языка. Может быть полезным, если подсветка кода работает криво. Без дополнительного окружения, с подписью и ссылкой, реализованной встроенным средством. **вставить пример получения квантилей, подбор параметров и оптимизацию**

Листинг В.2 Пример листинга с подписью собственными средствами

```

## Caching the Inverse of a Matrix

## Matrix inversion is usually a costly computation and there may
    be some
5 ## benefit to caching the inverse of a matrix rather than compute
    it repeatedly
## This is a pair of functions that cache the inverse of a matrix.

## makeCacheMatrix creates a special "matrix" object that can
    cache its inverse

```

```

10 makeCacheMatrix <- function(x = matrix()) {#
    xelatex b lualatex
    i <- NULL
    set <- function(y) {
        x <<- y
        i <<- NULL
15    }
    get <- function() x
    setSolved <- function(solve) i <<- solve
    getSolved <- function() i
    list(set = set, get = get,
20    setSolved = setSolved,
    getSolved = getSolved)
    }
25
    ## cacheSolve computes the inverse of the special "matrix"
    ## returned by
    ## makeCacheMatrix above. If the inverse has already been
    ## calculated (and the
    ## matrix has not changed), then the cachesolve should retrieve
    ## the inverse from
    ## the cache.
30
    cacheSolve <- function(x, ...) {
        ## Return a matrix that is the inverse of 'x'
        i <- x$getSolved()
        if(!is.null(i)) {
35            message("getting cached data")
            return(i)
        }
        data <- x$get()
        i <- solve(data, ...)
40        x$setSolved(i)
        i
    }

```