

**Федеральное космическое агентство
Федеральное государственное унитарное предприятие
Московское опытно-конструкторское бюро «Марс»
Министерство образования и науки Российской Федерации
Московский авиационный институт
(государственный технический университет)**

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИСПЫТАНИЕ БОРТОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Под редакцией доктора техн. наук, профессора А.С. Сырова

*Допущено Учебно-методическим объединением
высших учебных заведений Российской Федерации
по образованию в области авиации, ракетостроения и
космоса в качестве учебного пособия для студентов
высших учебных заведений РФ, обучающихся по
направлению подготовки дипломированного специалиста 160600
«Интегрированные системы летательных аппаратов»
и по специальности 161101 «Системы управления летательными
аппаратами» подготовки специалиста*

**Москва
Издательство МАИ-ПРИНТ
2011**

ББК 39.56
УДК 629.7.05
НП 79

НП 79 Авторы: Андреев В.П., Волович Н.В., Глебов В.М., Дорский Р.Ю., Дубинкин И.М., Каравай М.Ф., Кособоков В.Н., Кравчук С.В., Малистин А.И., Петров А.Б., Попов Б.Н., Сацко А.В., Синельников В.В., Смирнов В.В., Сыров А.С., Чащин В.А.

ISBN 978-5-7035-2281-3

Проектирование и испытание бортовых систем управления: Учебное пособие / Под редакцией А.С. Сырова. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2011. – 344 с.: ил.

В настоящем учебном пособии рассматриваются вопросы проектирования и испытания бортовых систем управления. Предлагается систематизированный отбор материала, необходимого для понимания и описания процессов как на этапе проектирования, так и при испытании систем управления. Базовым материалом послужили конкретные разработки МОКБ «Марс».

Предназначено для студентов старших курсов и аспирантов соответствующих специальностей, а также может быть полезным для молодых специалистов и научно-технических работников, занимающихся созданием и эксплуатацией систем управления космическими аппаратами и разгонными блоками.

Рецензенты:

кафедра «Радиоэлектронные и телекоммуникационные устройства и системы» Московского государственного института электроники и математики (технического университета) (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. *Л.Н. Кечиев*);

генеральный конструктор и генеральный директор ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», д-р техн. наук *В.В. Хартов*

ISBN 978-5-7035-2281-3

© ФГУП МОКБ «МАРС», 2011

© Московский авиационный институт
(государственный технический университет), 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.	6
Введение.	8
1. Бортовая цифровая вычислительная система.	11
1.1. Основное назначение и функции бортовой цифровой вычислительной системы	13
1.2. Основные характеристики микроконтроллера i8XC196KC	15
1.3. Память бортовой цифровой вычислительной системы.	25
1.4. Функционирование подсистем бортовой цифровой вычислительной системы	27
1.5. Обеспечение отказоустойчивости	30
1.6. Унифицированная структура реконфигурации бортовой цифровой вычислительной системы	33
1.7. Средство загрузки и отладки бортовых программ.	35
1.8. Анализ существующих проектных решений по бортовой цифровой вычислительной машине для космических аппаратов.	36
1.9. Конструкция бортовой цифровой вычислительной системы «Марс-4»	40
2. Блоки силовой автоматики	42
2.1. Структура резервирования блоков силовой автоматики	44
2.2. Типовой тракт выдачи разовой команды	47
2.3. Канал внешних устройств	52
2.4. Вычислительная система блока управления и контроля.	57
2.5. Средства самоконтроля.	59
3. Конструкция электронной и оптоэлектронной аппаратуры разработки МОКБ «Марс»	61
3.1. Конструкция электронных блоков системы управления.	61
3.2. Конструкция систем управления космических аппаратов с длительным сроком эксплуатации	73
3.3. Конструкция оптоэлектронной аппаратуры	74
3.4. Конструкция электронной аппаратуры для беспилотных аппаратов, работающих в атмосфере Земли	79

4. Особенности проектирования бортовой аппаратуры для эксплуатации в космических условиях	81
4.1. Воздействие радиационной среды на работу электронных устройств и блоков	82
4.2. Воздействие факторов электризации на работу электронных устройств и блоков	98
4.3. Электромагнитная совместимость электронных устройств и блоков	113
5. Программно-алгоритмическое обеспечение системы организации вычислительного процесса бортовой системы управления	125
5.1. Алгоритмы системы организации вычислительного процесса	126
5.2. Алгоритмы контроля, диагностики и реконфигурации вычислительных систем	129
5.3. Алгоритмы системной логики	144
6. Организация математического моделирования при разработке алгоритмического обеспечения бортовых систем управления ...	145
6.1. Особенности разработки и отработки бортового программного обеспечения	147
6.2. Основные испытательные стенды	151
7. Функциональное программное обеспечение бортовых систем управления	157
7.1. Типовое распределение ресурсов по задачам	160
7.2. Организация бортового программирования и отладки модулей функционального программного обеспечения	167
7.3. Типовая технология разработки, отладки и испытаний функционального программного обеспечения	170
7.4. Формирование сборок функционального программного обеспечения и комплексная отладка на стендах	173
7.5. Отладка и испытания функционального программного обеспечения на автоматизированном цифровом комплексе ..	176
8. Организация испытаний аппаратуры бортовых систем управления	181

8.1. Виды испытаний аппаратуры	181
8.2. Испытательное оборудование	184
8.3. Требования по внешним воздействующим факторам, предъявляемые к летательным аппаратам	189
8.4. Методика проведения испытаний на широкополосную случайную вибрацию	192
8.5. Методика проведения испытаний на виброудар	193
8.6. Методика проведения испытаний на воздействие линейных ускорений	194
8.7. Методика проведения термовакуумных испытаний	195
8.8. Летные испытания	196
9. Основы построения системы автоматизированного проектирования цифровых устройств	203
9.1. Терминология в САПР. Цель и предмет САПР	206
9.2. Принципы создания САПР. Методы принятия решения в САПР	209
9.3. Виды обеспечения САПР	210
9.4. Классификация САПР	218
9.5. Основные достоинства САПР	219
10. Система автоматизированного проектирования электронных устройств Altium Designer	222
10.1. Состав и основные функции Altium Designer. Типы документов. Маршрут проектирования	222
10.2. Схемотехническое проектирование	227
10.3. Разработка печатных плат в среде Altium Designer	241
11. Проектирование цифровых устройств на платформе программируемой логики	279
11.1. Язык описания аппаратуры VHDL	279
11.2. Проектирование цифровых устройств на основе ПЛИС фирмы Altera в среде разработки Quartus II	301
Приложение. Перечень основных сокращений	318
Библиографический список	339

ПРЕДИСЛОВИЕ

28 сентября 2010 года Приказом № 348 по Московскому авиационному институту (государственному техническому университету) в составе факультета «Робототехнические и интеллектуальные системы» образована кафедра «Бортовая автоматика беспилотных космических и атмосферных летательных аппаратов». Кафедра осуществляет образовательный процесс на базе ФГУП МОКБ «Марс».

Настоящее учебное пособие соответствует разделам ряда учебных курсов в рамках подготовки дипломированных специалистов, обучающихся по направлению 160600 «Интегрированные системы летательных аппаратов» и 161101 «Системы управления летательными аппаратами». Учебное пособие, кроме помощи в самостоятельном изучении материала, предназначено для курсового и дипломного проектирования, а также может быть полезным для молодых специалистов данного профиля деятельности и аспирантов.

Это пособие является логическим продолжением двух ранее изданных книг: «Бортовые системы управления космическими аппаратами» и «Система управления разгонным блоком» (Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010 год).

В настоящем учебном пособии рассматриваются вопросы проектирования и испытания бортовых систем управления космическими аппаратами и разгонным блоком.

Базовым материалом послужили конкретные разработки МОКБ «Марс» – системы управления разгонным блоком и бортовые системы управления ряда космических аппаратов.

Разработка, изготовление, испытания и эксплуатация сложных технических систем сопровождаются выпуском большого количества технической документации: эскизные, технические и рабочие проекты, технические задания и предложения и т.д. При составлении перечисленных документов широко используются сокращения и аббревиатуры. В пособии приводится малый толковый словарь терминов и сокращений, использованных при изложении материала.

.....

Авторы благодарят аспиранта Козлова В.В., студенток Митькину М.А. и Ярмолевич Е.А. кафедры «Системы приводов авиационно-космической техники» МАИ и сотрудников МОКБ «Марс» Мещерскую Е.М., Самаль Е.А., Юрьян Ю.В. за помощь при написании 10 и 11 разделов учебного пособия. Также авторы благодарят сотрудников МОКБ «Марс» Качалову Е.Э. и Кособокову Т.В. за помощь в подготовке рукописи.

Данный том учебного пособия подготовлен коллективом авторов:

Андреев В.П. (разд. 4), Волович Н.В. (разд. 3), Глебов В.М. (разд. 3), Дорский Р.Ю. (разд. 1, 2), Дубинкин И.М. (разд. 7), Каравай М.Ф. (разд. 1), Кособоков В.Н. (разд. 5), Кравчук С.В. (разд. 6, 7), Малистин А.И. (разд. 4), Петров А.Б. (разд. 7), Попов Б.Н. (разд. 9, 10, 11), Сацко А.В. (разд. 8), Синельников В.В. (разд. 1, 2), Смирнов В.В. (разд. 1, 2), Сыров А.С. (разд. 1, введение), Чашин В.А. (разд. 8, 9, приложение).

ВВЕДЕНИЕ

Московское опытно-конструкторское бюро «Марс» имеет многолетний опыт создания авиационных и космических систем навигации и управления. Предприятие обеспечивает полный цикл разработки, изготовления и испытаний бортовых систем управления, имеет высококвалифицированные кадры, современную компьютерную технику, производственную и стендовую базу.

В 1955–60 гг. коллективом предприятия была создана первая в СССР астронавигационная система управления для межконтинентальной крылатой ракеты «Буря». В середине 60-х годов разработаны астросистемы управления ориентацией космических аппаратов исследования Луны и окололунного пространства. Несколько позже были созданы астросистемы для самолетов Ту-95МС, Ту-142М, Ту-160 [17].

В 1983–93 гг. проводилась разработка алгоритмического и программного обеспечения системы управления и навигации орбитального корабля «Буран» на участке аэродинамического спуска с высоты 20 километров до посадки. В эти же годы проводились разработки автopilотов для самолетов-разведчиков.

Начиная с 1994 г. МОКБ «Марс» проводит работы по созданию систем и бортовых комплексов управления для новых изделий космического применения. К этим изделиям в первую очередь относится разгонный блок «Бриз-М» для ракеты-носителя «Протон-М» разработки ГКНПЦ им. М.В. Хруничева [7]. Система управления разгонным блоком «Бриз-М» разработки МОКБ «Марс» к 1.01.2011 г. обеспечила успешное выведение 45 спутников различного назначения на геостационарные и высокоэллиптические орбиты.

В 1999 г. МОКБ «Марс» приступило к проектированию систем управления для современных космических аппаратов (КА).

Космический аппарат дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) «Монитор-Э» (ГКНПЦ им. М.В. Хруничева) запущен 26.08. 2005 г. на околополярную солнечно-синхронную круговую орбиту

($H_{\text{КР}} = 550$ км). Космический аппарат связи «KazSat» (ГКНПЦ им. М.В. Хруничева) проработал на геостационарной орбите в штатном режиме с 18 июля 2006 г. по 8 июня 2008 г., после чего еще чуть более года – до 14 августа 2009 г. – уже в нештатном режиме. С 11 февраля 2009 г. на геостационарной орбите работает КА «Экспресс-МД1» (ГКНПЦ им. М.В. Хруничева). 21 января 2011 г. запущен геостационарный КА метеонаблюдений «Электро-Л» (НПО им. С.А. Лавочкина) [15]. Все четыре бортовые системы управления разработаны коллективом МОКБ «Марс».

Разработаны и находятся в стадии отработки системы управления и наземная контрольно-проверочная аппаратура для космических аппаратов «KazSat-2», «Экспресс-МД2» (ГКНПЦ им. М.В. Хруничева) и других.

Накопленный опыт разработки, наземных и летных испытаний систем и комплексов управления для объектов космического назначения позволили МОКБ «Марс» сформировать унифицированный ряд систем управления для космических аппаратов различного применения, единый подход к проектированию наземной контрольной аппаратуры, сквозную директивную технологию создания и отработки аппаратуры и программного обеспечения, состав и структуру типовых комплексных и динамических моделирующих стендов.

Обобщение накопленного опыта проектирования и испытаний позволяет иметь прочный фундамент для подготовки специалистов в области систем управления движением и навигацией беспилотных летательных аппаратов.

Предлагаемое учебное пособие в сочетании с ранее выпущенными продолжает разрабатывать в учебно-методическом плане направление проектирования и испытаний бортовой автоматики беспилотных космических и атмосферных летательных аппаратов.

В настоящем учебном пособии представлены материалы по техническому и программному обеспечению бортовых систем управления: бортовой цифровой вычислительной системы и соответ-

ствующего программного обеспечения системы организации вычислительного процесса, блокам силовой автоматики. Большое внимание уделено конструкции блоков и датчиков, а также особенностям проектирования бортовой аппаратуры в условиях радиации, электромагнитных помех и электростатических разрядов. Рассмотрены вопросы математического моделирования при разработке и отладке алгоритмического обеспечения и функционального программного обеспечения. Приведены материалы по испытаниям бортовой аппаратуры на внешние воздействующие факторы. Завершают книгу материалы по системам автоматизированного проектирования, используемым в МОКБ «Марс» при создании бортовых систем управления.

1. БОРТОВАЯ ЦИФРОВАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

Бортовая цифровая вычислительная система (БЦВС) является важнейшей частью бортовой системы управления (БСУ) космическим аппаратом (КА). БЦВС решает основные задачи системы управления и обеспечивает информационное взаимодействие с другими подсистемами. В состав БСУ наряду с БЦВС входят (рис. 1.1):

– блоки силовой автоматики (БСА), обеспечивающие коммутацию электропитания и электрическое взаимодействие со смежными системами, имеющими аналоговый вход (выход);

– информационно-измерительная система (ИИС), состав и характеристики которой определяются условиями функционирования КА, решаемыми задачами и предъявляемыми точностными требованиями;

– исполнительные органы (ИО), состав и характеристики которых определяются инерционно-массовыми характеристиками КА и заданными требованиями по динамике и точности стабилизации.

Связь БЦВС с перечисленными блоками и системами, а также с целевой аппаратурой (ЦА) и системой телеметрических измерений (СТИ) осуществляется в соответствии с ГОСТ Р 52070-2003 [10] по мультиплексному каналу обмена (МКО-1).

По второму, отдельному, каналу обмена (МКО-2) бортовая аппаратура командно-измерительной системы (БАКИС), обеспечивающая прием данных от наземного комплекса управления (НКУ), связана с БЦВС и ЦА. Бортовая цифровая вычислительная система является контроллером шины (КШ) по отношению ко всем устройствам, кроме БАКИС, по отношению к которой БЦВС является окончательным устройством (ОУ).

ИИС формирует вектор параметров состояния \bar{R} космического аппарата, который поступает в БЦВС, где используется в вычислительных алгоритмах. В результате формируется вектор управления $\bar{\sigma}$, который передается на исполнительные органы. БСА получают от смежных систем вектор сигналов \bar{S} и передают на смежные системы вектор команд \bar{K} . Командно-программная информация (КПИ) посту-

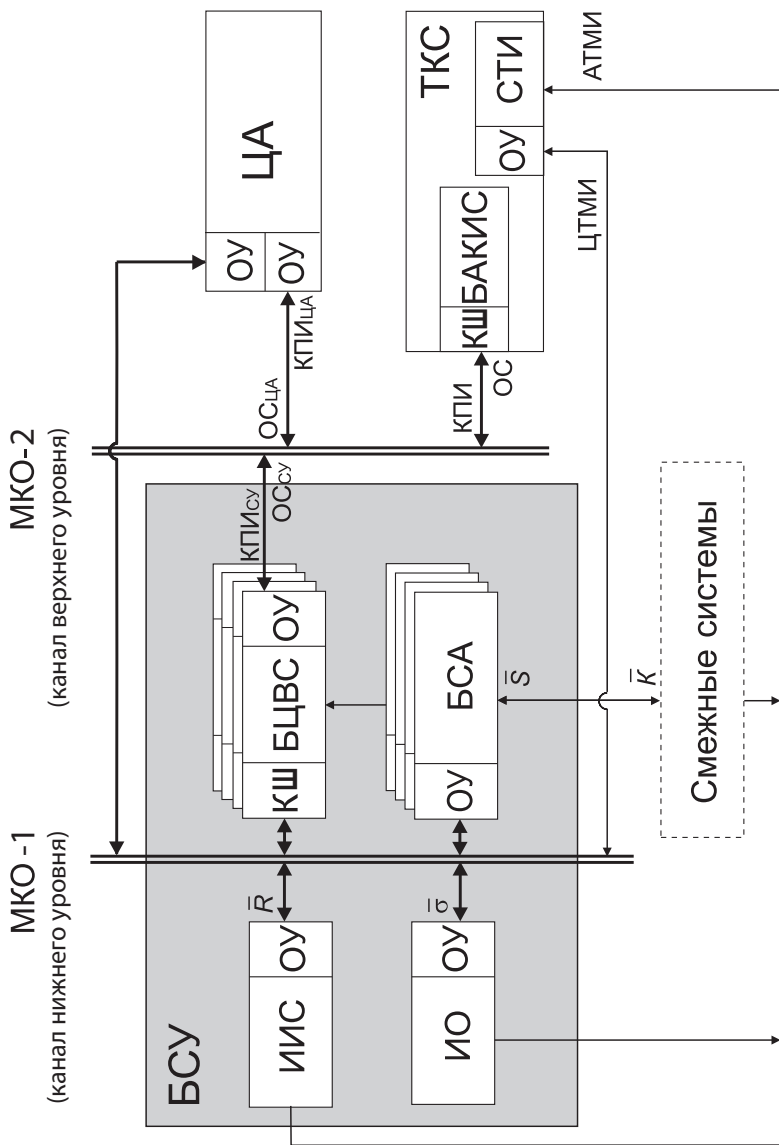


Рис. 1.1. Структурная схема бортовой системы управления космическим аппаратом

пает из НКУ через телекомандную систему (ТКС) в бортовую систему управления, а аналоговая (АТМИ) и цифровая телеметрическая информация (ЦТМИ) – в обратном порядке. ЦА также обменивается с БСУ командно-программной информацией.

На рис. 1.1 также обозначено: КПИЦА – командно-программная информация целевой аппаратуры; КПИСУ – командно-программная информация системы управления; ОС – ответное слово.

1.1. Основное назначение и функции бортовой цифровой вычислительной системы

Бортовая цифровая вычислительная система (рис. 1.2) состоит из четырех идентичных двухпроцессорных функциональных каналов (в дальнейшем – граней). Грань включает в себя два процессорных ядра: центральный процессор (ЦП) и процессор ввода-вывода (ПВВ) – оба на микроконтроллерах (процессорах) 80С196КС20 фирмы Intel [22]. Каждое ядро содержит в своем составе оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), репрограммируемое постоянное запоминающее устройство (РПЗУ) flash-типа. ПВВ также содержит два адаптера МКО и порты межпроцессорного обмена (МПО). ПВВ и ЦП связаны между собой двухпортовым ОЗУ (ДОЗУ). Также в каждой грани имеется свой источник вторичного питания (ВИП). Синхронизацию работы каналов обеспечивает устройство формирования цикла (УФЦ). БЦВС представляет собой аппаратную среду для функционирования общесистемного и прикладного (функционального) программного обеспечения.

БЦВС обеспечивает выполнение вычислительного и управляющего процессов в рамках задач, решаемых бортовыми системами управления космических аппаратов (БСУ КА), и выполняет следующие функции:

- реализует информационно-командную сеть на основе мультиплексного канала обмена (МКО) по ГОСТ Р 52070-2003 и обеспечивает логику взаимодействия со смежными системами БСУ по шинам МКО;

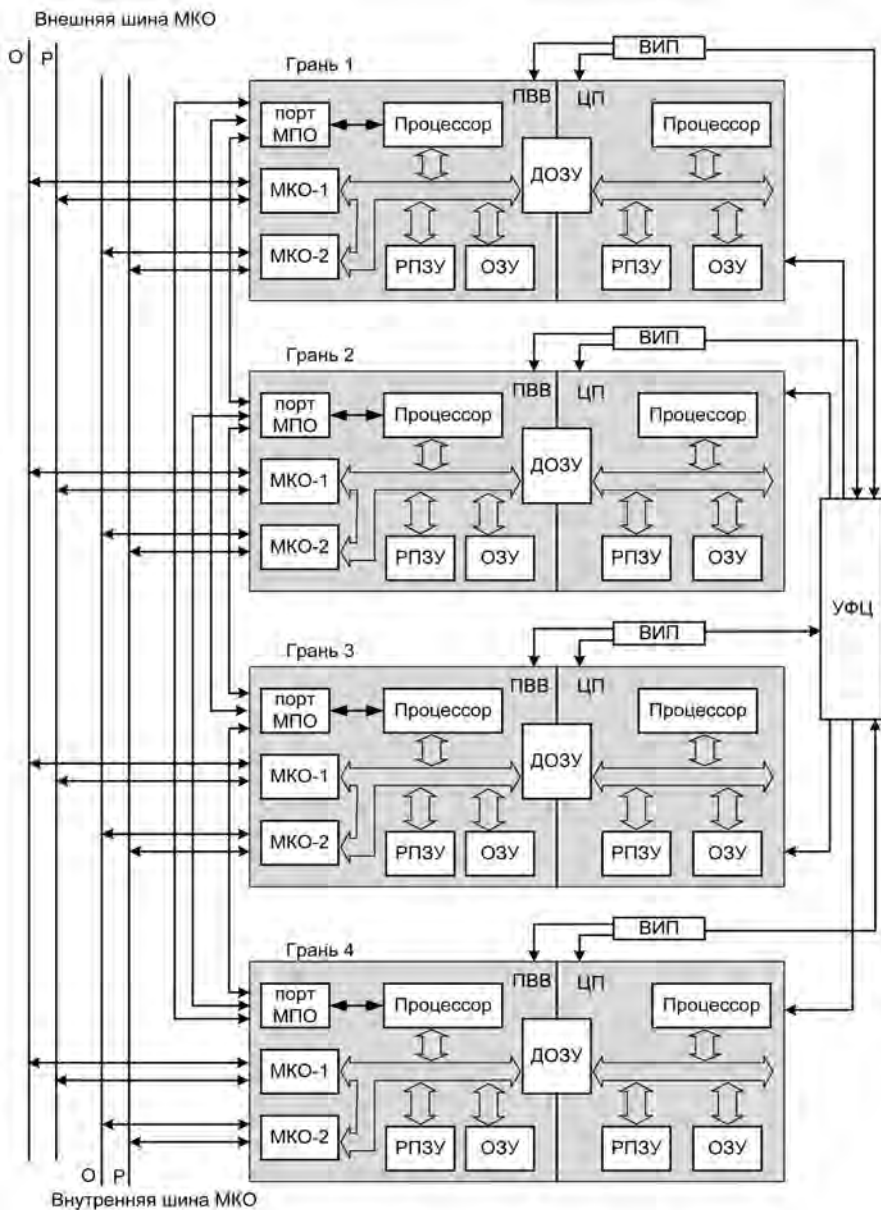


Рис. 1.2. Функциональная схема бортовой цифровой вычислительной системы

- осуществляет ввод в БЦВС программ и полетного задания от наземного комплекса через БАКИС;
- формирует массивы цифровой телеметрической информации и осуществляет вывод телеметрической информации из БЦВС через телеметрическую систему на Землю;
- осуществляет совместно с блоком управления и контроля (БУК) и другими БСА ввод в БЦВС периферийных сигналов от бортового радиокомплекса и информационных систем, а также вывод периферийных сигналов на управляющие органы, пиротехнические устройства и комплекс научной аппаратуры;
- проводит контроль каналов и линий связи;
- осуществляет восстановление информации при отказах в резервированных системах БЦВС и БУК;
- осуществляет совместно с БУК выдачу управляющих релейных команд в соответствии с кодовыми командами, поступающими с Земли через бортовой радиокомплекс.

Некоторый недостаток быстродействия (2 млн регистровых операций у одного микроконтроллера на частоте 20 МГц) был ликвидирован применением двухпроцессорной архитектуры в каждой грани системы. Каждая грань содержит два процессорных ядра, одно из них является центральным (ЦП) и выполняет функциональные программы, а другое выполняет функции ввода-вывода (ПВВ), предварительной обработки данных, анализирует результаты тестирования, осуществляет программное мажоритирование данных в многогранной архитектуре и др. Суммарное пиковое быстродействие грани составляет 4 млн регистровых операций в секунду.

БЦВС имеет многогранную и многопроцессорную структуру именно с целью получения высокой отказоустойчивости.

1.2. Основные характеристики микроконтроллера i8XC196KC

Выбор указанного микроконтроллера обусловлен его высокой надежностью, развитыми средствами интерфейса и удовлетворительной

производительностью на частоте 20 МГц. Несмотря на то, что этот микроконтроллер выпускается уже более 20 лет, он остается востребованным в создании высоконадежной космической аппаратуры. В частности, для будущей космической разработки, начатой в 2002 г. в США (Jet Propulsion Lab. – UCLA), в качестве основного «рабочего» бортового микроконтроллера был выбран именно i8XC196KC. Более совершенная бортовая многопроцессорная машина-диспетчер на высокопроизводительных микропроцессорах предназначалась в этой разработке для менее критических функций полета.

Не последнюю роль для МОКБ «Марс» в выборе процессора сыграло наличие его в планах для воспроизводства отечественной промышленностью. На сегодняшний день уже выпускается отечественный радиационнотойкий аналог 1874BE05T, и МОКБ «Марс» применяет его в новых разработках.

Обозначение i8XC196KC объединяет несколько вариантов микроконтроллеров, различающихся тактовой частотой (16 или 20 МГц) и типом внутреннего ПЗУ программ:

80C196KC – без внутреннего ПЗУ;

83C196KC – с масочным ПЗУ;

87C196KC – с однократно программируемым ПЗУ.

В состав i8XC196KC (см. рис. 1.3) входят:

1. Центральное процессорное устройство – ЦПУ (регистровое арифметико-логическое устройство – РАЛУ, микропроцессорное устройство управления им и регистровый файл – сверхоперативное ОЗУ на 512 байт).

2. Постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) объемом 16 Кбайт (варианты: однократно программируемое, масочное, без ПЗУ).

3. Тактовый генератор.

4. Сторожевой таймер и два встроенных 16-разрядных таймера, синхронизируемых изнутри (таймер 1) или изнутри и снаружи (таймер 2). Таймер 2 имеет защелку.

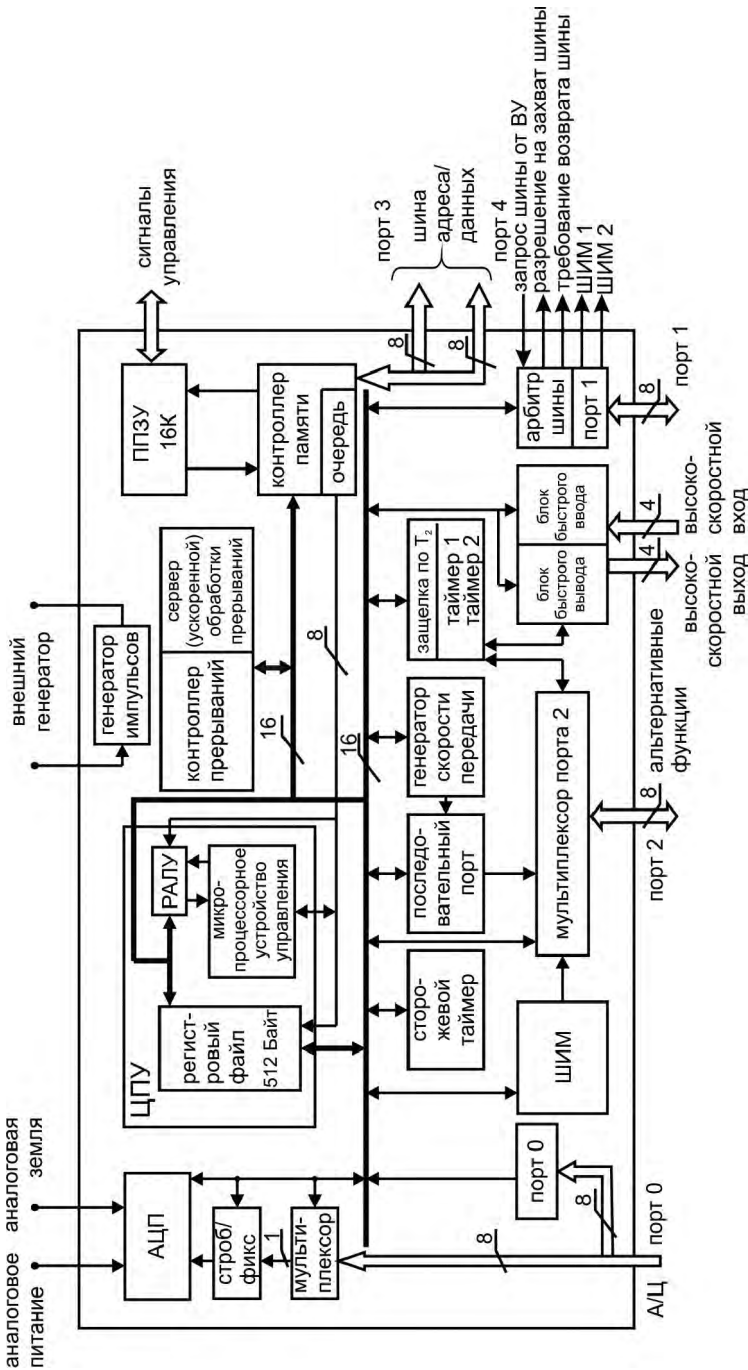


Рис. 1.3. Функциональная схема микроконтроллера i8XC196KC

5. Контроллер прерываний, имеющий 28 источников запросов, 16 векторов и 16 приоритетов, и встроенный сервер ускоренной обработки прерываний, обеспечивающий быстрый обмен данными между периферийными устройствами и памятью практически без участия центрального процессора.

6. Встроенный аналого-цифровой преобразователь (АЦП): имеет 10 разрядов, 8 входов. На частоте 20 МГц время преобразования составляет около 26 мкс.

7. Последовательный дуплексный порт по стандарту RS-232 с управлением скоростью передачи. Максимальная скорость обмена в асинхронном режиме – 1 МБод. Использует альтернативную функцию порта 2.

8. Генератор широтно-импульсно модулированного (ШИМ) сигнала. Использует порт 1 для ШИМ 1, ШИМ 2 и альтернативную функцию порта 2 для ШИМ 0.

9. Блок быстрого вывода. Его функция – выполнять различные действия в запрограммированные моменты времени с минимальным участием центрального процессорного устройства.

10. Блок быстрого ввода, предназначенный для фиксации до 4-х внешних событий, например перехода из 0 в 1, и реагирование на них без участия процессора. Действием на обнаружение внешнего события могут быть одиночные или пакетные пересылки, включение АЦП и др.

11. Цифровые порты. Имеются пять 8-разрядных портов ввода-вывода дискретных сигналов. Многие имеют альтернативные функции для работы со встроенными периферийными устройствами.

Микроконтроллер i8XC196KC имеет следующие основные характеристики:

- Эффективное суммарное быстродействие на частоте 20 МГц – не менее 2 млн оп./сек при выполнении арифметических, логических, загрузочных операций и операций запоминания над 16-битовыми операндами с прямой и непосредственной адресацией.

• Типы данных: бит (разряд), байт = 8 бит, слово = 16 бит, двойное слово = 32 бит. 32-битный операнд используется в операциях сдвига, деления «32 на 16» и как результат умножения «16 на 16». Остальные операции с 32-битными операндами и операции с плавающей запятой могут выполняться только программным способом.

- Количество команд – 105.
- Способы адресации:

Микроконтроллер i8XC196КС имеет шесть способов адресации:

- 1) прямая регистровая адресация;
- 2) косвенная адресация;
- 3) косвенная адресация с инкрементом;
- 4) непосредственная адресация;
- 5) коротко-индексная адресация;
- 6) длинно-индексная адресация.

Модуль центрального процессора обеспечивает выполнение программы пользователя и состоит из собственно центрального процессора и контроллера памяти. В состав центрального процессора входят регистровый файл (по существу это внутреннее ОЗУ) и регистровое арифметико-логическое устройство (РАЛУ).

Внутренняя 16-разрядная шина связывает центральный процессор с контроллером памяти и контроллером прерываний, а также со всеми встроенными на кристалл периферийными устройствами. Дополнительная внутренняя 8-разрядная шина используется для непосредственной передачи байтов команды из контроллера памяти в регистр команд, расположенный в РАЛУ.

В состав центрального процессора входит устройство микропрограммного управления, предназначенное для приема от контроллера памяти кода очередной команды, дешифрации кода и генерации последовательности управляющих команд, подаваемых на регистровое арифметико-логическое устройство. Эти команды необходимы для выполнения операций над байтами, словами и длинными словами,

расположенными в 256-байтовом нижнем регистровом файле. Использование механизма адресации операндов через вертикальное окно в нижнем регистровом файле позволяет выполнять в РАЛУ также и операции с данными, расположенными в верхнем регистровом файле.

Центральный процессор связывается с внутренней кодовой памятью команд – ПЗУ и внешней памятью данных – ОЗУ через контроллер памяти. Исключение составляет регистровый файл, доступ к которому обеспечивается непосредственно. В состав контроллера памяти входят несколько устройств: вспомогательный счетчик команд, 4-байтовая очередь из предварительно выбранных из памяти и готовых для выполнения кодов команд, контроллер шины, регистры адреса и данных.

Запрос на доступ к памяти может поступить как от центрального процессора при выполнении текущей команды, так и от диспетчера очереди предварительно выбранных кодов команд. Механизм предварительной выборки команд существенно повышает производительность центрального процессора, так как к моменту завершения выполнения текущей команды следующая команда уже считана из памяти и готова для немедленного выполнения.

Центральный процессор получает коды команд из 4-байтовой очереди команд по специальной 8-разрядной шине. Код текущей выполняемой инструкции всегда находится в регистре команд РАЛУ.

За выполнение программы пользователя в правильной последовательности отвечает основной счетчик команд, содержимое которого указывает на адрес очередной подлежащей выполнению команды. Содержимое основного счетчика команд автоматически увеличивается (в зависимости от длины текущей команды) встроенной схемой инкрементирования.

Как отмечено выше, для ускорения выборки кодов команд из внешней или внутренней памяти используется вспомогательный счетчик команд, содержимое которого задает адрес команды, подлежащей выборке из памяти. Выбранная команда поступает в очередь на вы-

полнение. Как только очередная команда считывается из очереди и передается на дешифрирование в устройство микропрограммного управления центрального процессора, диспетчер очереди формирует запрос в контроллер шины на считывание очередной команды.

Контроллер шины входит в состав контроллера памяти и обеспечивает формирование необходимых управляющих сигналов как для считывания данных из внешней памяти или внешнего периферийного устройства, так и для записи данных во внешнее ОЗУ или в периферийное устройство. Таким образом, контроллер шины обеспечивает считывание кодов машинных команд и запись/считывание данных. Запрос на считывание очередной инструкции поступает от диспетчера очереди, а запрос на запись/считывание данных (операндов) – от центрального процессора. Запрос от диспетчера очереди имеет более высокий приоритет.

Если линейная последовательность выполнения команд программы нарушается, например, вследствие выполнения команды условного или безусловного перехода или вызова подпрограммы, значение вспомогательного счетчика команд перезагружается текущим значением основного счетчика команд и очередь ранее выбранных команд аннулируется (очищается). Перезагрузка вспомогательного счетчика команд и извлечение первого байта кода инструкции из памяти занимает четыре машинных такта.

Регистровое арифметико-логическое устройство имеет достаточно сложную внутреннюю структуру. В его состав помимо собственно 16-разрядного арифметико-логического устройства, регистра команд и устройства микропрограммного управления входят несколько вспомогательных регистров:

1. Регистры старшего и младшего слова, предназначенные для использования в командах с 32-разрядными операндами в качестве регистров временного хранения данных. Они имеют собственные устройства сдвига, что ускоряет выполнение команд сдвига, нормализации, умножения и деления.

2. Регистр второго операнда арифметико-логического устройства, используемый в двухоперандных командах, в частности для хранения множителя или делителя в операциях умножения или деления соответственно.

3. 6-разрядный счетчик числа циклов для организации сдвига операнда на заданное число разрядов со схемой автоматического декрементирования.

4. Регистр селектирования заданного бита, который позволяет автоматически генерировать необходимую маску при выполнении команд проверки бита по номеру бита, указанному в команде.

5. Регистры констант (0, 1, 2), необходимых для ускорения типовых операций в АЛУ.

После завершения любой операции в АЛУ результат анализируется и соответствующие признаки результата (нуля, переноса, переполнения и т.д.) выставляются в слове состояния программы. Признаки результата операции используются в командах условной передачи управления для организации ветвлений в программе.

Различные типы микроконтроллеров семейства MCS-196 отличаются количеством ячеек памяти в регистровом файле – так называемом регистровом ОЗУ. Естественно, что чем больше объем сверхоперативной регистровой памяти, тем более сложные вычисления и с большим быстродействием могут быть организованы в микропроцессорной системе на базе данного микроконтроллера.

В микроконтроллере i8XC196KC первые 256 ячеек регистрового файла имеют короткие байтовые адреса и относятся к нижнему регистровому файлу, а все остальные – 16-разрядные адреса и относятся к верхнему регистровому файлу. Наибольшим быстродействием обладают команды с прямой регистровой адресацией операндов в нижнем регистровом файле. При этом используются байтовые адресные поля, и команды имеют предельно короткий формат и наименьшее время выполнения. Для доступа к операндам за пределами нижнего регистрового файла (в том числе и к внешней памяти) используются

специальные способы адресации, в частности косвенная, базово-индексная, а также адресация через специальные вертикальные окна.

Младшие 24 байта нижнего регистрового файла относятся к регистрам специального назначения центрального процессора. Здесь расположен также указатель стека. Вся остальная область регистрового ОЗУ, в том числе область верхнего регистрового файла, является оперативной памятью общего назначения и может использоваться программистом по своему усмотрению. Доступ производится к байтам, словам или двойным словам.

Производительность микроконтроллеров определяется прежде всего частотой тактового генератора. Между тем цифры производительности (млн оп./с) нельзя рассматривать как абсолютный критерий быстродействия. С учетом того, что большая часть команд, за исключением команд умножения и деления выполняется за 4-5 машинных тактов, эквивалентная производительность процессора равна примерно 2 млн операций в секунду. Реальная производительность должна оцениваться на представительном наборе рабочих программ.

На стадии разработки и отладки микропроцессорной системы приходится использовать внешнюю память программ. Затем, когда алгоритмы и программное обеспечение полностью оттестированы и начинается серийный выпуск изделия, программное обеспечение «прошивается» во внутреннюю память микроконтроллера. Кроме того, в ряде применений требуется внешняя память данных, часто энергонезависимая, для хранения промежуточных массивов информации, результатов тестирования работоспособности оборудования, текущих настроек системы управления, циклограмм управления оборудованием в функции времени и т.д.

В системах встроенного управления, где часто приходится изменять алгоритмы управления и программное обеспечение, единственной альтернативой оказывается применение в качестве внешней памяти программ репрограммируемого ПЗУ (ППЗУ) flash-типа.

Несмотря на большое количество интегрированных на кристалл периферийных устройств, их часто оказывается недостаточно для

решения конкретной задачи. В этом случае приходится дополнительно использовать внешние периферийные устройства, программируемые порты ввода-вывода данных, контроллеры прерываний, контроллеры последовательного ввода-вывода данных и т.д.

Встроенный контроллер внешней шины обеспечивает корректное подключение к микроконтроллеру внешней памяти и внешних периферийных устройств, а также формирование необходимых сигналов управления ими. Большинство микроконтроллеров MCS-196 имеют мультиплексированную шину адреса/данных, а самые совершенные из них могут работать и с немultipлексированной шиной адреса/данных, что повышает производительность системы и упрощает интерфейс с внешней памятью и периферией. В зависимости от разрядности используемой внешней памяти и периферии шина может работать в нескольких режимах:

- Стандартном – как 16-разрядная мультиплексированная шина (вся внешняя память и периферия 16-разрядные).
- 8-разрядном – когда вся внешняя память и периферия 8-разрядные.
- Динамически переключаемом между 8- и 16-разрядным режимами в зависимости от типа внешнего устройства, к которому в данный момент происходит обращение.

Наличие специального входа готовности Ready допускает расширение сигналов чтения RD# и записи WR# для подключения медленно действующей памяти и устройств ввода/вывода (например, жидкокристаллического дисплея). Изменяя программно байты конфигурации микроконтроллера, можно задать требуемое число тактов ожидания для оптимального сопряжения микроконтроллера с внешними устройствами.

В БЦВС микроконтроллер 80C196KC20 используется с внешней памятью, т.е. в режиме микропроцессора. Режим внешней шины – только 16-разрядный.

1.3. Память бортовой цифровой вычислительной системы

Память одной грани БЦВС составляют регистровые файлы ЦП и ПВВ по 512 байт каждый, ОЗУ с двойным доступом (ДОЗУ) и память РПЗУ и ОЗУ:

Память программ (РПЗУ) каждого из процессорных ядер организована в виде корневого сегмента (сегмента, не зависящего от состояния регистра страниц) и страниц. Объем страничного РПЗУ ЦП составляет 1 М x 16 бит (2 Мбайт). Размер страницы 8 К x 16 (16 Кбайт), 128 страниц. Страничная память реализована на четырех БИС flash-памяти фирмы AMD AM29F040 с организацией 512 К x 8 бит. Размер корневого сегмента ЦП – 4К x 16 (8 Кбайт). РПЗУ ПВВ имеет аналогичную организацию. Корневой сегмент имеет объем 8 К x 16 (16 Кбайт), 16 страниц по 8 К x 16 (16 Кбайт) в микросхемах, отдельных от корневого сегмента и 8 страниц в тех же микросхемах, что и корневой сегмент. Всего 24 страницы по 16 Кбайт = 384 Кбайт страничного РПЗУ. Оба корневых сегмента и страницы ПВВ реализованы на микросхемах AM29F010 с организацией 128 К x 8 бит.

Оперативная память данных (ОЗУ) ПВВ имеет объем 32 К x 16 (64 Кбайт), реализована на двух микросхемах CY62256LL фирмы Cypress с организацией 32 К x 8. ОЗУ перекрывает все адресное пространство микроконтроллера и доступно не полностью: для использования на борту открыты окна суммарным объемом 23 Кбайт и еще 32 Кбайт используются при отладке для подмены корневого сегмента и одной (любой) страницы.

В каждом из двух адаптеров МКО также имеется буферное ОЗУ объемом 32 Кбайт – 2 страницы по 16 Кбайт в окне страниц РПЗУ (всего 4 страницы).

ОЗУ ЦП имеет объем 128 К x 16 (256 Кбайт) и реализовано на двух микросхемах фирмы Samsung KM68000CLGI с организацией 128 К x 8. Из них 64 Кбайт, так же как и в ПВВ, перекрывает все адресное пространство и также доступно не полностью: для использования на борту открыты окна суммарным объемом 31 Кбайт и еще 24 Кбайта

Таблица 1.1

Карта памяти ПВВ

Диапазон адресов	Назначение	Объем
0000h ... 01FFh	Регистровый файл	0,5 Кбайт
0200h ... 03FFh	Управляющие регистры	
0400h ... 0FFFh	ОЗУ переменных БОС	3 Кбайт
1000h ... 1FFFh	ОЗУ отладчика	4 Кбайт
2000h ... 5FFFh	Корневой сегмент ПЗУ	16 Кбайт
6000h ... 6FFFh	Двухпортовое ОЗУ	4 Кбайт
7000h ... BFFFh	Основное ОЗУ	20 Кбайт
C000h ... CFFFh	Страницы 0 ... 15, 24 ... 31 – страницы РПЗУ.	24 стр. по 16 Кбайт
	Страницы 16, 17, 18, 19 – ОЗУ адаптеров МКО	4 стр. по 16 Кбайт

используются при отладке для подмены корневого сегмента и одной (любой) страницы. Остальные 192 Кбайта доступны как 24 страницы по 4 К x 16 (8 Кбайт).

Общее для ЦП и ПВВ ДОЗУ, предназначенное для межпроцессорного обмена между этими ядрами, имеет объем 4 К x 16 (8 Кбайт) и реализовано на микросхеме CY7C133 фирмы Cypress. Из ЦП и ПВВ ДОЗУ доступен весь этот объем, но в разных диапазонах адресов. Одновременное обращение к этой памяти со стороны ЦП и ПВВ не допускается.

Карты памяти ПВВ и ЦП приведены в табл. 1.1 и 1.2 соответственно.

Комментарии к картам памяти:

Самой «жизненно важной» для микроконтроллера i8XC196KC областью адресного пространства является область начиная с адреса 2000h. Здесь расположены вектора прерываний, байт конфигурации кристалла (настройки способа управления шиной) и адрес, с которого

Таблица 1.2

Карта памяти ЦП

Диапазон адресов	Назначение	Объем
0000h ... 01FFh	Регистровый файл	0,5 Кбайт
0200h ... 03FFh	Управляющие регистры	
0400h ... 0FFFh	ОЗУ переменных БОС	3 Кбайт
1000h ... 1FFFh	ОЗУ отладчика	4 Кбайт
2000h ... 3FFFh	Корневой сегмент ПЗУ	8 Кбайт
4000h ... 4FFFh	Двухпортовое ОЗУ	4 Кбайт
5000h ... 9FFFh	Основное ОЗУ	24 Кбайт
A000h ...BFFFh	Страницы ОЗУ	24 стр. по 8 Кбайт
C000h ... CFFFh	Страницы 0 ... 127 – страницы РПЗУ	128 стр. по 16 Кбайт

начинается исполнение программы после окончания сигнала начального сброса (Reset) – 2080h. В диапазоне адресов 2000h ... 5FFFh расположено внутреннее ПЗУ (если оно есть). При использовании внешнего РПЗУ в этой же зоне расположен корневой сегмент РПЗУ. Поскольку ЦП занимается функциональными задачами, у него существенно по сравнению с ПВВ увеличен объем памяти программ. Размер корневого сегмента РПЗУ уменьшен для расширения объема непосредственно адресуемого ОЗУ.

1.4. Функционирование подсистем бортовой цифровой вычислительной системы

Рассмотрим работу резервированной вычислительной системы и элементы схемы, обеспечивающие ее функционирование. Система в исправном состоянии содержит четыре грани, из них активизированы и постоянно работают три, одна грань находится в резерве. Далее рассматривается именно этот режим «с рабочей тройкой». Возможен

также режим «1+1», в котором одна грань является ведущей, одна в горячем резерве, и две находятся в холодном резерве – выключены.

Для организации параллельного межпроцессорного обмена центрального процессора с процессором ввода-вывода (ЦП \leftrightarrow ПВВ) применено общее поле памяти с двойным доступом.

Межпроцессорный (межгранный) обмен в системе организован по мультиплексному принципу. Через встроенные в процессор последовательные порты, работающие в синхронном режиме (режим «0»), выдается информация по последовательному каналу одновременно в три соседних канала, которые принимают эту информацию. Передача «сам-себе» физически не производится. Обесточенный резервный канал подсоединен, но информацию не принимает. Таким образом, каждый процессор может формировать у себя три информационных массива – один собственный и два массива от двух других процессоров. Скорость обмена с учетом протокола обмена между процессорами ввода-вывода составляет 250 Кбайт/с. Блок-схема межпроцессорного обмена (грань i БЦВС \leftrightarrow МПО \leftrightarrow грань j БЦВС) приведена на рис. 1.4.

Связь БЦВС с периферийными устройствами и внешними системами осуществляется по мультиплексным каналам обмена МКО по ГОСТ Р 52070-2003. В зависимости от характера периферийных устройств могут применяться от одного до трех дублированных каналов, через один из которых (внешний) БЦВС связана с системными абонентами. При этом устройство может выполнять функции либо контроллера, либо монитора, либо оконечного устройства.

Все узлы сети БЦВС через контроллеры и пару приемопередатчиков (основной/резервный) подсоединены к линиям связи каналов как абоненты, однако только один из них (по определенному правилу) является контроллером канала, остальные выполняют функции мониторов. При отказе узла, являющегося контроллером, его передатчик блокируется, и по определенному правилу, вырабатываемому системой контроля и диагностики (СКД), функции контроллера передаются исправному узлу.

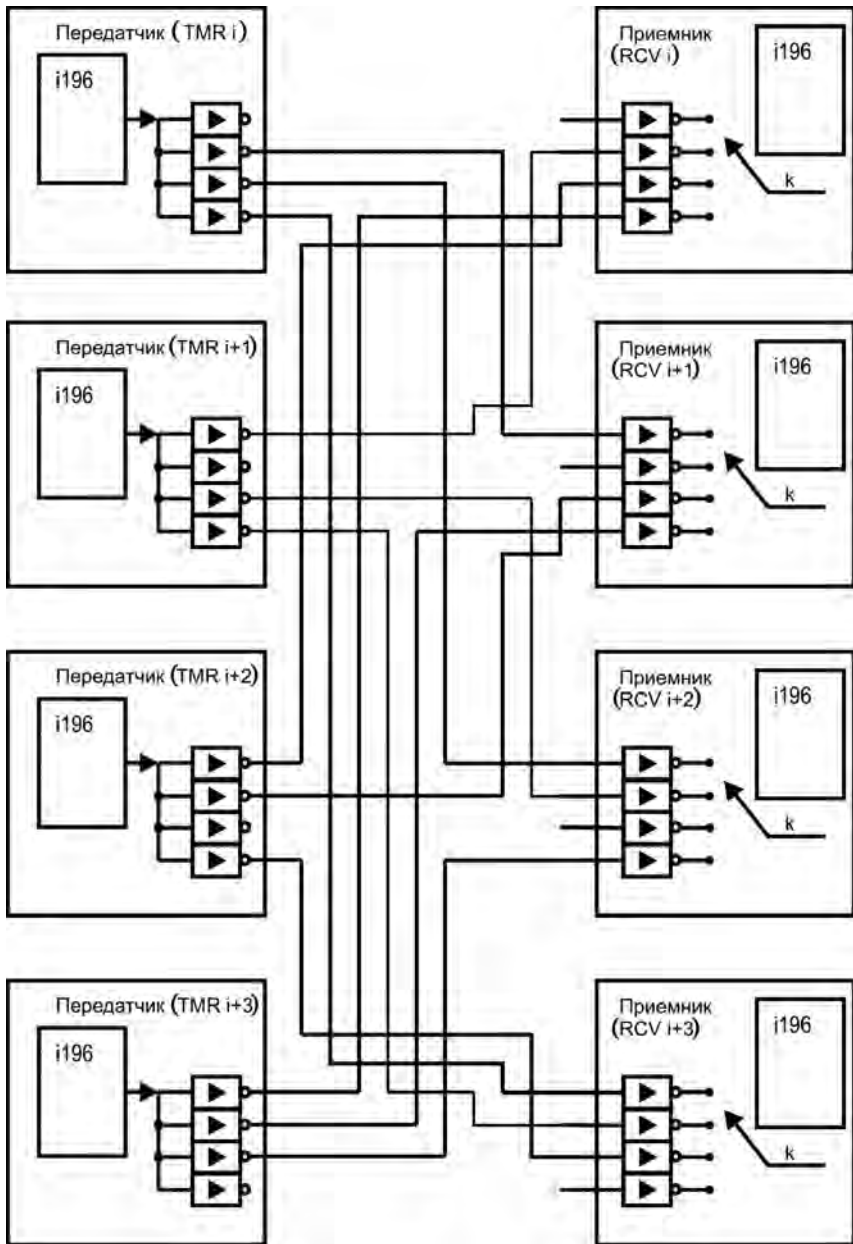


Рис. 1.4. Блок-схема межпроцессорного обмена

Устройство формирования цикла обеспечивает синхронизацию работы граней и состоит из 4-х независимых каналов, каждый из которых содержит стабильный кварцевый генератор, делитель частоты (до 40 Гц), цепи сброса счетчика-делителя, мажоритарный элемент и буферы. Синхронизация граней осуществляется в начале каждого цикла (25 мс). Каждый канал УФЦ вырабатывает сигнал цикла для своей грани. Он формируется на мажоритарном элементе канала по первым двум сигналам цикла любых граней и через буферные элементы подается на входы немаскируемого прерывания процессоров граней. Мажоритарный элемент выравнивает фронты импульсов цикла, подающиеся на входы прерывания процессора, обеспечивая таким образом синхронное начало цикла во всех работающих гранях.

Для определения исправности граней постоянно (раз в 100 мс) проводится измерение значения напряжения питания и тока потребления каждой грани с помощью встроенного в процессор АЦП (в ядре ПВВ) – каждая грань измеряет свой ток и напряжение, а также ток и напряжение других граней. Помимо этого в составе программной подсистемы СКД (система контроля и диагностики) формируются признаки функциональной исправности на основе мажоритирования массивов, передаваемых по каналам МПО и МКО, и признаки тестовой исправности по результатам фоновое тестирования граней. Каждая грань имеет регистр разовых команд для включения и выключения питания всех остальных граней. Выключение может быть выполнено при обнаружении неисправности и для перевода в холодный резерв. Включение – для вывода из резерва. Функция управления питанием всех граней возлагается только на одну грань, назначенную ведущей.

1.5. Обеспечение отказоустойчивости

Обеспечение отказоустойчивости является одним из краеугольных вопросов проектирования аппаратуры для космических аппаратов.

Один из основных способов достижения высокой отказоустойчивости при достаточно высоком уровне собственной надежности –

резервирование. Увеличение кратности резервирования всегда было продуктом компромисса между желанием увеличить степень отказоустойчивости и получением приемлемых массогабаритных характеристик.

Для кардинального увеличения жизнеспособности необходимо:

- увеличение надежности аппаратуры (увеличение времени наработки на отказ);
- увеличение кратности резервирования (но обычно не выше 4÷5).

В качестве характеристик надежности приняты долговечность, сохраняемость и безотказность. Определение этих терминов приведено в соответствии с ГОСТ 27.002-89 [9].

Под отказом понимается такое нарушение работоспособности, которое приводит к невыполнению хотя бы одной из требуемых функций технического задания (ТЗ). Под безотказностью понимается свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки.

Долговечность характеризуется свойством объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Под сохраняемостью понимают свойство объекта сохранять в заданных пределах значение параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Бортовая цифровая вычислительная система должна иметь следующие характеристики надежности:

1. Безотказность:

- вероятность безотказной работы блока за время эксплуатации по штатной циклограмме в течение 10 лет – не менее 0,968;
- средняя наработка на единичный отказ в условиях наземной эксплуатации должна быть не менее 50000 ч.

2. Долговечность:

- назначенный срок службы блока с момента поставки на завод-изготовитель КА должен составлять не менее 14,5 лет и обеспечивать:
 - эксплуатацию на заводе-изготовителе КА в течение одного года;
 - срок хранения в течение трех лет;
 - эксплуатацию на орбите в течение 10,5 лет;
- назначенный ресурс блока с момента поставки на завод-изготовитель КА должен быть не менее 97000 ч и обеспечивать:
 - эксплуатацию на заводе-изготовителе в составе космического аппарата, технического и стартового комплекса – 5000 ч;
 - эксплуатацию на орбите в составе КА – не менее 92000 ч.

Время хранения от момента последней электрической проверки до пуска не должно превышать 0,5 года.

БЦВС должна сохранять работоспособность при любом единичном отказе в функционально независимых участках схемы. Это свойство оговаривается в ТЗ как отказоустойчивость к последовательным одиночным отказам составных частей БЦВС.

Функционально независимым является любой из нижеперечисленных участков схемы БЦВС: грань (ВИП + ЦП + ПВВ + канал УФЦ), канал МКО.

С целью увеличения надежности БЦВС и увеличения степени ее отказоустойчивости в ТЗ выдвигается следующее требование к системе контроля и диагностики: два однотипных отказа не должны приводить к созданию аварийной ситуации на борту.

Поскольку значительная часть высоконадежных бортовых систем опирается на мажоритарное восстановление искаженной информации, то одновременный отказ однотипных подсистем в разных гранях может приводить к общему отказу системы. Эта ситуация предопределяет более высокие требования к системе тестового и функционального контроля каждой грани БЦВС, позволяющей парировать подобные отказы, хотя возможно за счет некоторого снижения производительности в течение времени восстановления.

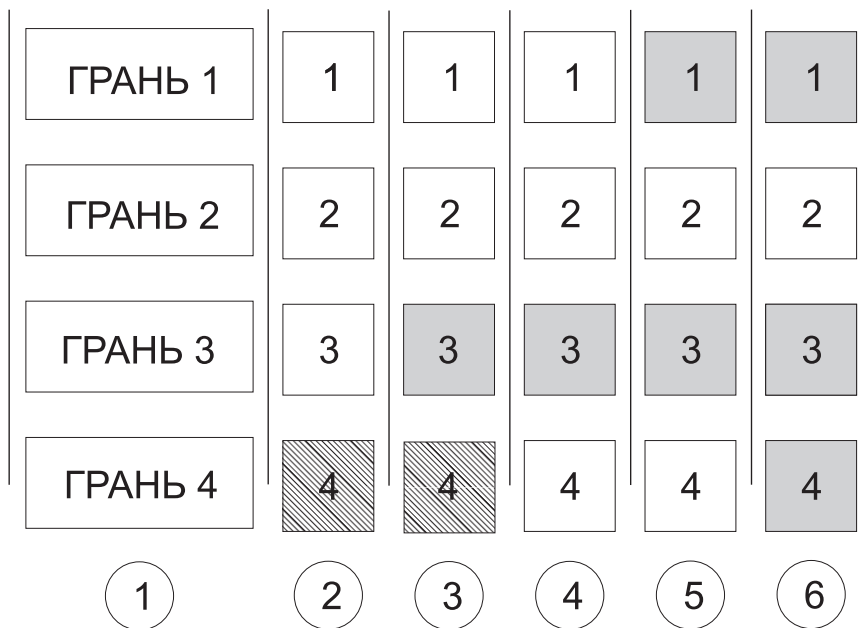
1.6. Унифицированная структура реконфигурации бортовой цифровой вычислительной системы

Схемная реализация одного функционального канала (грани) осуществлена на двух платах.

Кратность резервирования, равная четырем, при приемлемой общей массе блока (см. раздел «Конструкция БЦВС») обеспечивает требования по надежности к БЦВС и создает предпосылки для реализации высоких характеристик живучести БЦВС и системы в целом. Важнейшей предпосылкой для этого выступает высокая надежность каждой грани БЦВС. Это является важнейшей гарантией многолетней безотказной работы такой необслуживаемой системы, как БЦВС. Расчеты показывают, что альтернативный вариант с увеличением кратности резервирования до $5 \div 6$ и более снижает общую надежность за счет повышения вероятности появления так называемых латентных (т.е. скрытых, трудно обнаруживаемых) неисправностей.

Принятая в БЦВС стратегия реконфигурации заключается в обнаружении возникновения отказа в системе, точном определении отказавшей грани, в ограниченном числе попыток восстановления информации в сбившейся грани и, в случае неудачи, в выводе грани из рабочей конфигурации с заменой ее на исправную грань.

На рис. 1.5 приведена унифицированная структура реконфигурации БЦВС при различных вариантах последовательного во времени возникновения отказов в БЦВС. Здесь конфигурация граней при начальном включении показана в столбце (1), все четыре грани включены, они тестируются, и по результатам тестов на следующем этапе, показанном в столбце (2), формируется конфигурация системы. Приведен пример, когда все четыре грани по результатам тестов оказались исправными. Система контроля и диагностики (СКД) назначает грань с наименьшим номером контроллером шины, две другие грани назначаются мониторами, а исправная грань с наибольшим номером (4) отправляется в «холодный» резерв. В столбце (3) показана ситуация (до реконфигурации) при возникновении отказа в третьей (зачерненной)



- ① Конфигурация при включении БЦВС
 - ② Конфигурация штатной работы БЦВС
 - ③ Конфигурация при первом отказе до реконфигурации
 - ④ Конфигурация после реконфигурации
 - ⑤ Конфигурация после второго последовательного отказа
 - ⑥ Конфигурация после третьего последовательного отказа
- Отказ
 Резерв

Рис. 1.5. Унифицированная структура реконфигурации БЦВС

грани. После реконфигурации конфигурация системы соответствует столбцу ④. Первые две грани остаются подключенными к линии, четвертая грань выводится из резерва и включается как монитор вместо отказавшей третьей грани. Третья грань выключена. В пятом столбце показана конфигурация при последующем отказе первой грани. В работе остаются две грани. Исправная грань с наименьшим номером (2) становится контроллером, четвертая грань остается монитором. В шестом столбце показана конфигурация при возникновении еще одного отказа, на этот раз в четвертой грани. Единственная исправная грань (вторая) становится контроллером. Остальные неисправные – выключены.

Бортовая цифровая вычислительная система, спроектированная по описанной идеологии, получила название «Марс-4».

1.7. Средство загрузки и отладки бортовых программ

Для бортовых вычислителей, построенных на основе микроконтроллеров i8XC196KC(KB), разработано средство загрузки и отладки бортовых программ – отладочный комплекс DBG6 (далее – Отладчик).

Это многоканальное средство, предназначенное для резервированных многопроцессорных систем. Комплекс состоит из двух аппаратных частей – встроенный в каждое бортовое устройство узел отладчика и адаптер отладчика (АО), устанавливаемый в слот ISA инструментального компьютера, и двух программных частей: программы, исполняемой в инструментальном компьютере, и программы, пересылаемой в ОЗУ бортового устройства. АО имеет 12 каналов, т.е. возможна отладка многопроцессорной системы, в составе которой может быть до 12 микроконтроллеров i8XC196KC(KB). Радиальные связи позволяют при отключении питания некоторых граней (что характерно для резервированных систем) сохранять обмен с оставшимися.

Отладчик позволяет запускать и останавливать процессор, подменять корневой сегмент и одну (любую) страницу РПЗУ на ОЗУ для временной загрузки отлаживаемых программ и для обеспечения

функций статической отладки (пошаговый проход, точки останова). При остановленном процессоре (подаче на него сигнала $Reset = 0$) узел отладчика становится задатчиком на шине и позволяет загружать и считывать все области РПЗУ и ОЗУ (кроме регистрового файла и ОЗУ адаптеров МКО). При запущенном процессоре ($Reset = 1$) узел отладчика становится портом, доступным процессору для чтения и записи, способным генерировать запросы прерывания. В этом случае доступ ко всем ресурсам на плате выполняется уже силами процессора, обмен с которым происходит по прерываниям. В этом режиме уже возможен доступ и к регистровому файлу, и к медленным устройствам, например к адаптерам МКО, а также реализуются функции статической отладки. Запись в РПЗУ возможна только при остановленном процессоре.

1.8. Анализ существующих проектных решений по бортовой цифровой вычислительной машине для космических аппаратов

Основные характеристики западных БЦВМ для космических аппаратов, наиболее часто применявшихся в течение последних десяти лет, т.е. одновременно с применением «Марс-4» в России, приведены в табл. 1.3. Здесь собраны данные как для одноканальных (одногранных) систем, так и для резервированных (обычно дублированных или троированных) машин.

Одноканальные системы, декларируемые обычно в западных материалах как «одноплатный компьютер для космических применений» (OBSC – On Board Space Computer), на самом деле являются дублированными по всем подсистемам, кроме основной памяти. При этом все или, во всяком случае, некоторые подсистемы имеют независимо управляемые источники питания, которые могут отключать отказавшую подсистему и переключаться на альтернативную. Таким образом, OBSC – это, по существу, дублированный по подсистемам бортовой компьютер. Когда из них собирают двухплатные (двугранные) конфигурации, реально они представляют собой четырехканальную систему,

а для троированной конфигурации – шестиканальную структуру. Правда, механизм перехода от троированной конфигурации к пяти- или четырехканальной структуре доподлинно не известен, поскольку он не описан в доступной литературе, но, несомненно, что предельно экономное расходование избыточного ресурса здесь вполне реализуемо.

Сказанное не относится к системам памяти. В одноплатном OBSC основная память имеется в одном экземпляре, она обслуживает как основной (ведущий) канал, так и – при необходимости – альтернативный. Этот недостаток (наличие резервной памяти для каждого канала) компенсируется применением избыточного кодирования в памяти и контроллером по обнаружению и коррекции одиночных ошибок (EDAC-контроллер).

Проведенное сравнение характеристик БЦВС «Марс-4» с импортными бортовыми компьютерами показало следующее.

Существенным преимуществом БЦВС «Марс-4» стало предоставление не просто вычислительной машины для систем реального времени, а всей системы управления, в которой решены и реализованы все системные вопросы управления периферийными устройствами. Для потребителя остаются только специфичные вопросы конкретных устройств.

Другое преимущество – наличие операционной системы реального времени (ОС РВ), состоящей из нескольких десятков программных модулей универсального применения, включая разнообразные драйверы. ОС РВ прошла многочисленные испытания на натуральных стендах и при реальных пусках на космических объектах. Особую ценность представляет та часть ОС РВ, которая реализует системные функции диагностирования, выработки «истинной» информации по данным от различных каналов, реконфигурации и восстановления вычислений, включая ввод в работу резервной грани. На зарубежных машинах применяется в основном коммерческая ОС РВ VxWorks, которая не затрагивает таких сложных проблем реконфигурации и восстановления в многогранных системах. Поэтому за рубежом популярно троирование

Сравнительные характеристики зарубежных б

Вычислитель	Фирма	Базовый процессор	Производительность	Система команд	ПЗУ
Astrium (France)	Ottobrunn (FR)	P-1750A 16-bits, RH*, OS-VxWorks	1,8 MIPS 1,3 Mflop 20 MHz	Mil-Std 1750A CISC архитектура	128 Кбайт PROM (Harris) 128 Кбайт ROM в чипе RH*
RH-32 SBC	Honeywell (USA)	R3081 32-bits, RH*, OS-VxWorks	20 MIPS 20 MHz	RISC R3000	512 Кбайт EEPROM Стартовая память 512 Кбайт
603e PowerPC SBC	Honeywell (USA)	Motorola 603e PowerPC 32-bits, RH*, OS-VxWorks	283 MIPS 200 MHz		512 Кбайт EEPROM Стартовая память 512 Кбайт
TMR603e PowerPC SBC	Space Electronics (USA)	Motorola 603e PowerPC 32-bits, RH*, OS-VxWorks	283 MIPS 200 MHz		512 Кбайт EEPROM Стартовая память 512 Кбайт
Платформа E 3000	Ottobrunn (FR)	P-1750A 16-bits, RH*, OS-VxWorks	1,8 MIPS 1,3 Mflop 20 MHz	Mil-Std 1750A CISC архитектура	128 Кбайт PROM (Harris) 128 Кбайт ROM в чипе RH*
SPARC ERC32 SBC	Ottobrunn (FR)	TEMIC SPARC 32-bits (3 MCM), RH*, OS-VxWorks	14 MIPS 3 Mflops 20MHz	Microsystem Scalable Proc. archit	1 Мбайт EEPROM
ERC32 SC MCM	Ottobrunn (FR)	TEMIC SPARC 32-bits (3 MCM), RH*, OS-VxWorks	20 MIPS 5 Mflops 25 MHz	SUN Microsystem Scalable Proc. archit	
RT SPARC 32 CM	Space Electronics (USA)	TEMIC SPARC RH*, OS-RTEMS	14 MIPS 3 Mflops 20 MHz	SUN Microsystem Scalable Proc. archit	128 Кбайт EPROM
RHPCM	Space Electronics (USA)	64-bits Intel Pentium RH*	200 MIPS 120 MHz	i Pentium	2 Мбайт EEPROM, 128 boot EPROM

RH* – (radiation hardened – радиационнстойкий) устойчивость 100 Крад

Таблица 1.3

х бортовых систем космического применения

	ОЗУ	Интерфейсы	Внутреннее резервирование	Специфичные подсистемы
И	128 Кбайт в чипе 2 × 32 Кбайт × 8 Защищенная память RH* (Honeywell)		Питание, защищенная па- мять, процессор, блок реконф.	Модуль реконфи- гурации (ASIC)
Б	4MB SRAM MCM (EDAC) автономный «чистильщик», 512 Кбайт SRAM, Кэш ком. 16 Кбайт, Кэш дан. 16 Кбайт, все – RH*	MIL-STD 1553, RS-422, АЦП, DMA-контроллер	Дубл.: процессор, Кэш ком., Кэш дан., сопроцессор	Повторение ко- манд (1,5 мкс), резервный раз- ряд в ОЗУ, JTAG-порт
Б	4MB SRAM MCM (EDAC) автономный «чистильщик», 512 Кбайт SRAM, Кэш ком. 16 Кбайт, Кэш дан. 16 Кбайт, все – RH*	MIL-STD 1553, RS-422, АЦП, DMA-контроллер		
Б		MIL-STD 1553, RS-422, АЦП, Ethernet, параллел. интерфейс PCI		Логика троированного голосования
И	128 Кбайт в чипе 2 × 32 Кбайт × 8 Защищенная память RH* (Honeywell)		Троирование процессоров	
	2 Мбайт SRAM (EDAC)	MIL-STD 1553, SpaceWire, VME, FLEX I/O (гибкий интерфейс в/в)		
	6 Мбайт RAM (EDAC) для команд, 32 Мбайт RAM (циклич. код) для данных, Кэш – 8 Кбайт	3x MIL-STD 1553, DMA, 1355, SpaceWire, PCI, OBDH, 2xUART, 8-bits интерфейс		
	4 Мбайт SRAM (EDAC), автономный «чистильщик»	RS-422 АЦП-ЦАП VME, CPCI		
	4 Мбайт SRAM (EDAC)	PCI, MIL-STD 1553, RS-232, RS-422, АЦП, Ethern. 10/100, параллельный порт 8-32 bits		Intel-PCI мост

(и дублирование) не на программном уровне, а на аппаратном, при этом подсистемы вынуждены работать синхронно, что очень неудобно.

К числу недостатков БЦВС «Марс-4» следует отнести недостаточное использование радиационнотойких микросхем (RH* – radiation hardened – радиационнотойкий, устойчивость к накоплению ионизации 150 Крад). Однако постепенно этот вопрос решается за счет замены ПЛИС фирмы Altera на стойкие к радиации отечественные базовые матричные кристаллы.

Серьезное преимущество некоторых западных машин – их высокая производительность (для микропроцессоров в RH-исполнении, которые работают с частотами до 200 МГц).

Кроме этого, у ряда импортных компьютеров применяется оперативная память и flash-память в RH-исполнении. Оперативная память выполняется с кодером-декодером по Хэммингу, что позволяет корректировать сбои и отказы в ячейке памяти при считывании информации на магистрали потребителя и записывать исправленную информацию в искаженную ячейку (если там был сбой). Для уменьшения вероятности появления двойных ошибок сбойного характера в одном и том же слове памяти предусмотрена периодическая процедура чистки памяти от одиночных сбоев (scrubbing).

1.9. Конструкция бортовой цифровой вычислительной системы «Марс-4»

Основой конструкции БЦВС «Марс-4» является металлическая рамка с печатной платой, на которой размещены электронные компоненты. Размер плат составляет 180×120 мм с тем, чтобы рамки с элементами выдерживали механические эксплуатационные нагрузки без применения амортизации. На стороне платы, свободной от электрорадиоизделий (ЭРИ), приклеена во весь размер платы металлическая пластинка для отвода тепла от ЭРИ к элементам конструкции. На периферии рамки отфрезерована канавка для размещения герметизирующей эластичной прокладки, отфрезерованы пазы для установки

пакетных магистральных соединителей (до 10 штук) и расположены проушины для стяжки рамок в пакет. Размер рамок соответственно 190×130 мм (без проушин), высота может быть 5,5 мм и 7 мм в зависимости от высоты электроэлементов. В БЦВС все рамки высотой 5,5 мм. Боковые стенки рамки являются формообразующими элементами боковых стенок блока. Рамка с платой и элементами имеет вес 220–240 г в зависимости от плотности размещения элементов.

Рамки с платами укладываются в пакет и стягиваются шпильками, образуя пакетный электронный блок. Для электрического соединения параллельно расположенных печатных плат в блоке используются пакетные магистральные соединители (СПМ). СПМ содержат корпус и контактные пружинные проволочные кольца, упирающиеся в контактные площадки на платах, и при стяжке пакета создаются высокие удельные давления в зонах контакта, что дает надежные контакты, которые не нарушаются даже в особо тяжелых климатических условиях и при больших механических перегрузках. На периферии платы их может быть до 10 штук. Одноименные контакты в платах совместно с СПМ образуют сквозные вертикальные кросс-магистрالی, исключая необходимость в кросс-платах. Боковые стенки рамки образуют внешние стенки блока, осуществляя внешнюю механическую, электромагнитную и радиационную защиту элементов блока.

Пакет плат с одной стороны накрыт герметизирующей крышкой, с другой стороны сопрягается с отсеком, где расположены источники питания и кросс-плата, соединяющая вертикальные магистрالی с внешними разъемами. Конструкция БЦВС «Марс-4» при объеме электроники, представленном выше, занимает объем не более 5 дм^3 и имеет вес не более 6 кг. Более подробно вопросы конструкции БЦВС рассмотрены в разделе 3.

2. БЛОКИ СИЛОВОЙ АВТОМАТИКИ

Блоки силовой автоматики (БСА) предназначены для организации взаимодействия между бортовой цифровой вычислительной системой (БЦВС) и исполнительными органами и датчиками бортовой системы управления (БСУ). Это могут быть как простые датчики (контакт, терморезистор), простые исполнительные органы (пиропатрон, нагреватель, клапан), так и электронные блоки, требующие прямых команд управления. В простейшем случае это команды управления питанием электронного блока.

В космическом аппарате (КА) «Монитор-Э» функции взаимодействия со всеми смежными системами были реализованы в одном блоке силовой автоматики, получившем название коммутационно-преобразующего устройства – КПУ. В него входили четырехкратно резервированная вычислительная система (ВС КПУ) и исполнительные устройства. В связи с большим количеством устройств блок получился конструктивно сложным. В последующих бортовых системах управления – для КА «KazSat» и «Экспресс-МД1» [7] – эти функции были разделены между тремя блоками меньших размеров. Ведущим среди них является блок управления и контроля (БУК), имеющий собственную вычислительную систему (ВС БУК), аналогичную ВС КПУ. А блоки управления БУ1 и БУ2 (блоки-спутники) занимают подчиненное положение, не имеют своей ВС и управляются по каналу внешних устройств от ВС БУК. В БСУ для КА «Электро-Л» и «Спектр-Р» [15] по сравнению с ранее упомянутыми системами увеличилось число команд, поэтому было увеличено число блоков-спутников – это блоки БУ3...БУ7.

В функции БУК входит:

- осуществление первого включения системы управления по командам от разгонного блока;
- обмен информацией с БЦВС по мультиплексному каналу обмена (МКО) в соответствии с ГОСТ Р 52070-2003;
- управление работой астродатчиков (АД) по разовым командам;

- подача питания на солнечные датчики положения (СДП) и прием информации от СДП;
- формирование сигналов управления и прием информации от гироскопического измерителя вектора угловой скорости;
- прием команд непосредственного исполнения от бортовой аппаратуры командно-измерительной системы на включение и отключение системы управления;
- управление другими БСА по каналу внешних устройств (КВУ).

В функции БУ1 входит:

- управление средствами раскрытия солнечных батарей (СБ);
- управление системой обеспечения тепловых режимов (СОТР);
- формирование и выдача команд управления в систему электроснабжения (СЭС);
- формирование и выдача команд управления в аппаратуру преобразования и управления двигательной установкой (АПУ ДУ).

В функции БУ2 входит:

- управление работой агрегатов двигательной установки;
- управление работой пиросредств.

В блоке БУК сосредоточены функции, общие для БСУ различных КА. В блоках-спутниках реализованы функции, различающиеся для различных КА.

Блок управления и контроля должен удовлетворять следующим требованиям:

- иметь высокую надежность и отказоустойчивость в течение периода активного существования спутника;
- быть устойчивым к сбоям при воздействии космического излучения на рабочей орбите и иметь механизмы восстановления информации при сбоях;
- быть устойчивым к воздействиям эксплуатационных дестабилизирующих факторов;

- иметь минимальные (не более 20 кг) массогабаритные и энергетические (не более 35 Вт) характеристики;
- обеспечивать возможности унификации при дальнейшем развитии и модернизации без коренной переделки аппаратуры.

2.1. Структура резервирования блоков силовой автоматики

Для понимания общей структуры, прежде всего структуры резервирования блоков силовой автоматики КА, сравним между собой упрощенную структурную схему СУ РБ «Бриз-М» (рис. 2.1) и аналогичную схему системы управления КА (рис. 2.2).

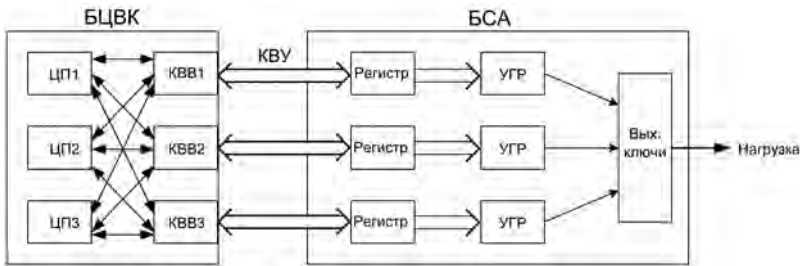


Рис. 2.1. СУ РБ «Бриз-М» в части управления БСА

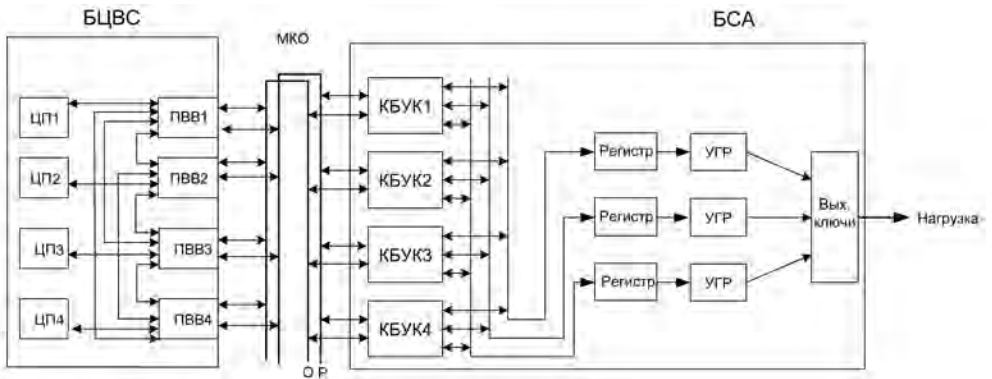


Рис. 2.2. Упрощенная структурная схема системы управления КА в части управления БСА

СУ РБ «Бриз-М» трехкратно резервирована. «Перевязки» резерва есть только в вычислительной машине – бортовом цифровом вычислительном комплексе (БЦВК). Здесь и далее под «перевязкой» резерва понимается такое объединение выходных сигналов резервированных модулей, после которого структуру, расположенную до этого объединения, можно рассматривать как единую отказоустойчивую, и объединенный выходной сигнал уже не зависит от отказов каждого модуля в отдельности. В данном случае каналы межпроцессорного обмена обеспечивают две «перевязки»:

- входные данные для каждого ЦП получаются объединением от трех контроллеров ввода-вывода (КВВ);

- выходные данные от трех ЦП объединяются в каждом КВВ.

С выхода бортового цифрового вычислительного комплекса, а именно из устройств КВВ, происходит управление каналами (гранями) БСА без «перевязок», т.е. «канал в канал»: первая грань БЦВК управляет первой гранью БСА, вторая грань БЦВК – второй гранью БСА, третья – третьей гранью БСА. Информационная магистраль (шина), по которой происходит управление, называется каналом внешних устройств (КВУ), причем внешних – с точки зрения процессора в составе КВВ, в противопоставление внутренним узлам самого контроллера ввода-вывода. В «Бриз-М» используется параллельный байтовый КВУ. Он содержит 8 линий данных, 6 линий адреса, стробы записи и чтения. Всего 16 сигналов. «Перевязку» между гранями на магистрали с таким количеством связей организовать проблематично.

На рис. 2.1 показан типовой тракт прохождения одной разовой команды. В действительности канал внешних устройств каждой грани на выходе БЦВК разветвляется на три БСА. На входе каждого блока силовой автоматики имеется устройство для буферизации КВУ. В каждом БСА несколько (до нескольких десятков) исполнительных устройств. В исполнительном устройстве содержится регистр для приема данных с КВУ и хранения принятых данных, для каждого бита имеется узел гальванической развязки (УГР) и выходные силовые

ключи. Выходные ключи соединены между собой по мажоритарной схеме. Таким образом, на выходных ключах выполняется «перевязка» в структуре резервирования. Система должна сохранить свою исправность при отказе одного любого элемента. В случае отказа в одной грани на отрезке тракта от КВВ до выходной мажоритарной схемы эта мажоритарная схема обеспечит выдачу правильного сигнала «по большинству», так как другие грани исправны. Последующий отказ в другой грани по тракту прохождения той же команды приведет уже к нарушению функционирования, но вероятность возникновения двух отказов значительно меньше вероятности возникновения одного.

«Время жизни» разгонного блока – около суток. А срок активного существования (САС) космического аппарата составляет несколько лет. Для долгоживущих систем недостаточно парировать один отказ. Необходимо после того, как отказ элемента произошел, сохранять способность парировать отказы. Для увеличения допустимого числа парлируемых отказов следует увеличить число «перевязок» в системе. Одна дополнительная «перевязка» – канал МКО на выходе БЦВС. Эта «перевязка» обеспечивает парирование отказов в отдельных гранях БЦВС. Другая «перевязка» – на выходе ВС БУК, для парирования отказов в ВС БУК, выполнена на КВУ. Специально для обеспечения возможности «перевязки» был разработан другой канал внешних устройств – синхронный последовательный. Каждое из вычислительных устройств ВС БУК (или ВС КПУ) – контроллер КПУ (ККПУ) или контроллер БУК (КБУК) – имеет выход на все три КВУ, т.е. способен управлять любой гранью исполнительных плат, в том числе и всеми тремя. В блоках КПУ и БУК все исполнительные устройства управляются по последовательному КВУ. Кроме того, в блоке БУК выполняется преобразование последовательного КВУ в параллельный, и блоки-спутники подключаются к трем выходным шинам блока БУК аналогично тому, как БСА подключаются к БЦВК в СУ РБ «Бриз-М».

2.2. Типовой тракт выдачи разовой команды

Проведем детальное обсуждение структуры блоков силовой автоматики. Начнем с выходных каскадов.

Традиционно в ракетной технике функции переключения выполняли электромагнитные реле. На их примере обсудим схему соединения выходных ключей. Соединением выходных ключей, управляемых от трех граней, необходимо выполнить функцию « ≥ 2 » (мажоритарную функцию, функцию голосования). Пусть x_1, x_2, x_3 – сигналы, пришедшие от первой, второй и третьей граней соответственно, тогда требуется реализовать функцию

$$y = x_1 \& x_2 + x_2 \& x_3 + x_3 \& x_1 \quad (2.1)$$

или

$$y = (x_1 + x_2) \& (x_2 + x_3) \& (x_3 + x_1), \quad (2.2)$$

где знаком «+» обозначена функция «ИЛИ».

В качестве выходного элемента каждой грани будем использовать электромагнитное реле, имеющее две нормально разомкнутых контактных группы. Остается соединить эти контакты согласно приведенным формулам. Формуле (2.1) соответствует схема, изображенная на рис. 2.3,а, а формуле (2.2) – схема на рис. 2.3,б. При реализации выходных ключей на МОП-транзисторах выгоднее использовать 5-ключевую схему (рис. 2.3,в), соответствующую формуле (2.3), позволяющую сэкономить один транзистор:

$$y = (x_1 + x_2) \& (x_1 \& x_2 + x_3). \quad (2.3)$$

В описываемых блоках используется схема рис. 2.3,в в случае реализации на МОП-транзисторах и рис. 2.3,а при реализации на электромагнитных реле.

Для подключения к нагрузке удобно использовать модификацию схемы 2.3,в с объединением на нагрузке (рис. 2.4). Линии связи и контакты соединителей также резервируются, а такая схема позволяет полностью проконтролировать эти связи вместе с контролем мажоритарной схемы при выполнении операции «развала граней».

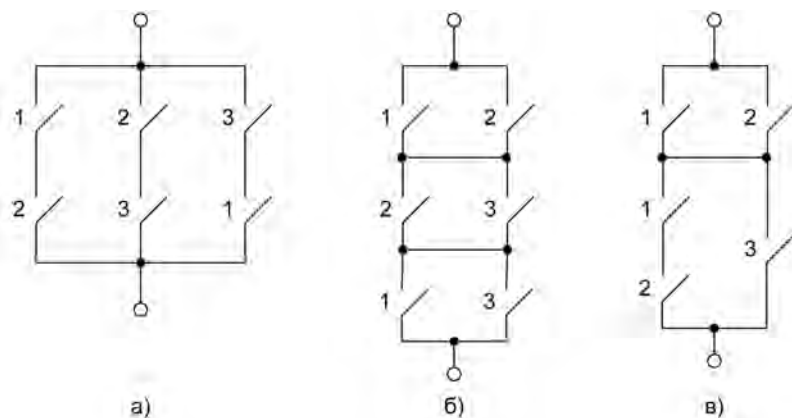


Рис. 2.3. Варианты мажоритарного соединения ключей

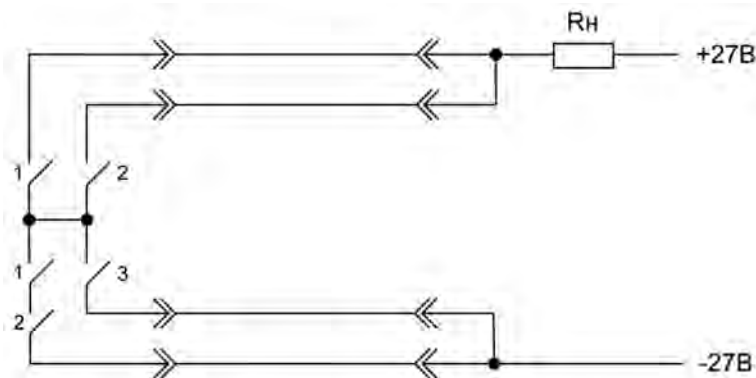


Рис. 2.4. Подключение к нагрузке

Что же касается применяемой элементной базы, то начиная с КА «Монитор-Э» в разработках МОКБ «Марс» проведена массовая замена электромагнитных реле на МОП-транзисторы. Главной причиной является низкая надежность этих реле как любого узла, содержащего движущиеся механические детали. Другие недостатки электромагнитных реле:

- малый срок службы;
- ограниченное общее количество срабатываний;

- ограниченная частота срабатывания контактов;
- ограниченное суммарное время нахождения обмотки реле под током;
- значительные габариты и масса;
- низкая устойчивость к пониженному атмосферному давлению.

Хорошую перспективу для коммутации цепей имеет применение транзисторных ключей на полевых транзисторах с изолированным затвором (МОП-транзистор – металл-оксид-полупроводник, английское название – MOSFET). Они уже получили очень широкое распространение и изготавливаются многими зарубежными, а теперь уже и отечественными фирмами в разнообразной номенклатуре. В разработках МОКБ «Марс» используются МОП-транзисторы с индуцированным каналом (т.е. при нулевом напряжении между затвором и истоком канал закрыт), в основном n-канальные, редко p-канальные. Основное их свойство – малое сопротивление канала сток-исток в открытом состоянии, что делает их пригодными для коммутации больших токов, а малая рассеиваемая мощность обуславливает их малые габаритные размеры и возможность упаковки в небольшие технологичные корпуса. В бортовой системе управления для КА «Монитор-Э», «KazSat», «Электро-Л», «Спектр-Р» использованы импортные МОП-транзисторы. В последующих разработках планируется переход на отечественные.

Электромагнитные реле сохранились только там, где требуется «механическая память», например для включения питания. Для этого используются двухпозиционные реле, которые перекидывают свои контакты при подаче импульса напряжения на одну обмотку, и контакты сохраняют это положение сколь угодно долго до подачи импульса на другую обмотку.

Управление ключом по затвору выполняется с трансформаторной гальванической развязкой (во всех БСА вторичное питание развязано от бортовой сети и от корпуса). На рис. 2.5 представлен фрагмент тракта выдачи одной разовой команды в одной грани: регистр, узел

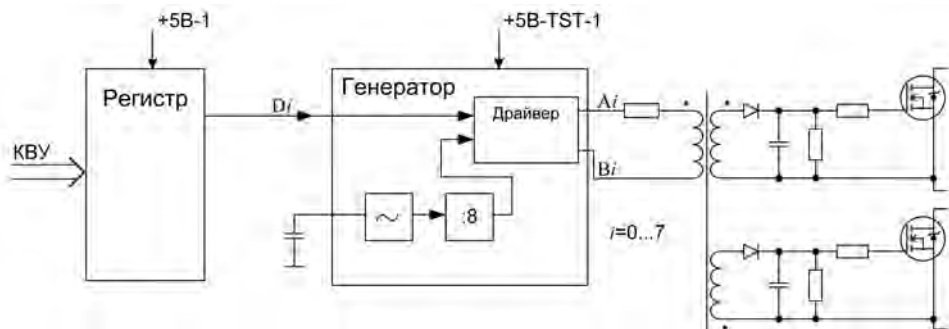


Рис. 2.5. Фрагмент тракта выдачи разовой команды в одной грани

гальванической развязки и два транзистора, которые используются для дальнейшего объединения по мажоритарной схеме.

Входные данные от КВУ поступают в регистр и записываются в нем. С выхода регистра сигнал D_i поступает на логический вход разрешения многоканального генератора (используется регистр на байт и 8-канальный генератор, здесь i – номер разряда в регистре). Генератор выдает на первичную обмотку трансформатора противофазные сигналы A_i и B_i . На затвор каждого выходного транзистора поступает напряжение со вторичной обмотки трансформатора после выпрямления однополупериодным выпрямителем. Регистр питается от источника $+5\text{ В}$ своей грани ($+5\text{ В}-1$). Генераторы каждой грани запитываются от отдельного источника « $+5\text{ В}-\text{TST}$ » (в первой грани – $+5\text{ В}-\text{TST}-1$). Обозначение « TST » не имеет прямого отношения к тестированию. Отдельная запитка генераторов гальванической развязки является дополнительной ступенью защиты от ложной выдачи команд. Это напряжение включается после того как подано и установилось напряжение основного питания грани $+5\text{ В}$, регистры приведены в исходное состояние и выполнено тестирование КВУ и регистров. Регистр и многоканальный генератор выполнены на основе базовых матричных кристаллов серии 5503. На входах разрешения у генератора нет верхних защитных диодов, поэтому он допускает подачу сигналов на его входы при отсутствии питания.

Частным случаем мажоритарного выходного каскада является выходной каскад для управления пиропатронами. Пиропатрон отличается от других нагрузок тем, что:

- это прибор разового действия;
- ложное срабатывание пиропатрона приводит к серьезным последствиям в системе;
- при расплавлении нити пиропатрона она может создать произвольные замыкания: расплавленный металл может замкнуть подводящие провода на корпус и между собой (т.е. связь может не разорваться).

Поэтому, во-первых, вводятся дополнительные ступени предохранения от выдачи ложной команды, во-вторых, разрываются оба подводящих провода – и «плюс», и «минус».

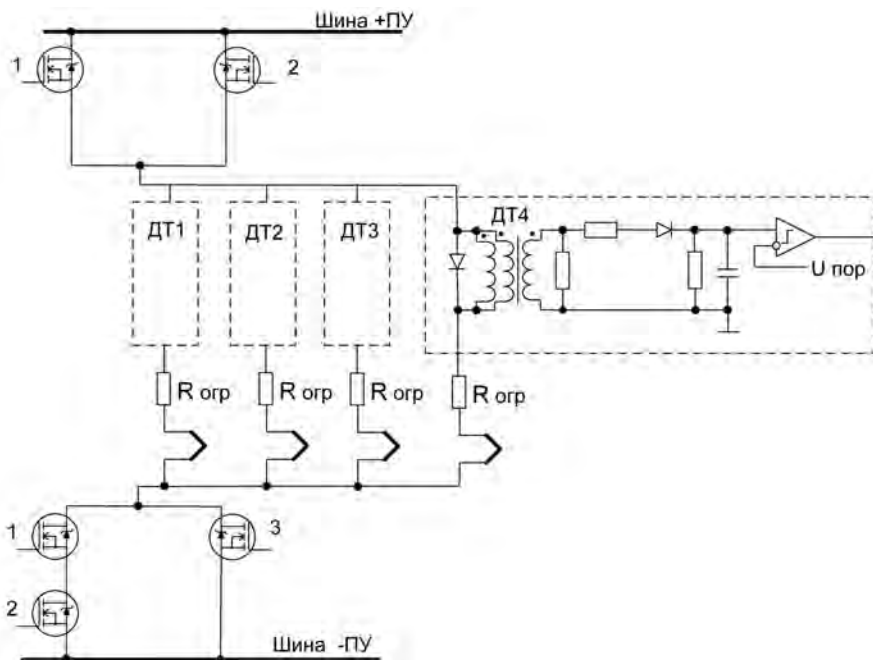


Рис. 2.6. Выходной каскад управления пиропатронами

На рис. 2.6 представлен выходной каскад управления пиропатронами, используемый в БСУ для КА «Монитор-Э», «KazSat», «Экспресс-МД1», «Электро-Л», «Спектр-Р». Он предназначен для подрыва группы из четырех пиропатронов. Шины «+ПУ» и «-ПУ» формируются отдельными мощными ключами. До подачи на них напряжения бортовой сети проверяется отсутствие напряжения между этими шинами и между каждой из шин и корпусом. Затем к этим шинам подключается источник безопасного тока и выдаются команды на подрыв, чтобы по срабатываниям трансформаторных датчиков тока проверить целостность всех нитей пиропатронов. Только после проведения этих защитных операций источник безопасного тока отключается и на шины «+ПУ» и «-ПУ» коммутируется напряжение бортовой сети. После подрыва в заданном порядке всех пиропатронов шины снова обесточиваются. Команда на подрыв – это подача на нить пиропатрона импульса тока, ограниченного резистором $R_{огр}$. Сила тока определяется типом пиропатрона, обычно это от 1 до 5 А. Длительность выдаваемого импульса 100 мс при том, что время перегорания нити составляет около 2 мс. Регистр устройства коммутации пиропатронов имеет дополнительную защиту – узел аварийного сброса (независимый генератор и счетчик). Если по какой-либо причине не придет команда обнуления по КВУ, этот узел сбросит регистр через 200 ... 250 мс после последней записи. Цифрами 1, 2 и 3 на рисунке обозначены номера граней, от которых управляются транзисторы.

2.3. Канал внешних устройств

Рассмотрим подробнее варианты каналов внешних устройств, используемые в блоках силовой автоматики.

В каждой из трех граней параллельного канала внешних устройств внутри блоков БУ1, БУ2 и БУ3 ... БУ7 используются сигналы, приведенные в табл. 2.1.

Диаграммы циклов записи и чтения представлены на рис. 2.7.

Таблица 2.1

Сигналы, используемые в каналах внешних устройств

Обозначение	Тип		Выполняемая функция
	На стороне задатчика	На стороне исполнительного устройства	
D0 ... D7	Двунаправленный	Двунаправленный	Шина данных
A0 ... A4	Выход	Вход	Шина адреса
WR	Выход	Вход	Строб записи
RD	Выход	Вход	Строб чтения

В цикле записи данные и адрес выставляются задатчиком шины за 0,5 мкс до строба записи WR и удерживаются 0,5 мкс после его окончания. Длительность строба WR составляет 1 мкс. Данные фиксируются в регистре исполнительного устройства по низкому уровню сигнала WR. В цикле чтения адрес также гарантированно не меняется за 0,5 мкс до начала и в течение 0,5 мкс после окончания строба чтения RD. Выходы шины данных со стороны задатчика в это время находятся в высокоимпедансном состоянии (на рис. 2.7 обозначено «ZZ»). Длительность сигнала RD составляет 1 мкс. По низкому уровню этого сигнала выбранное устройство выставляет на шину читаемые данные, и в момент окончания строба они фиксируются в задатчике шины. За пределами шинных циклов записи и чтения состояния шин адреса и данных значения не имеют. На шине адреса остается последний адрес, по которому выполнялся обмен, а шина

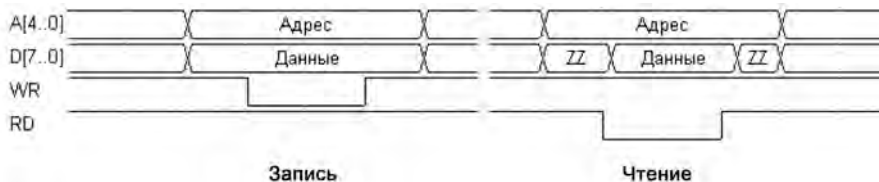


Рис. 2.7. Диаграммы циклов записи и чтения параллельного канала внешних устройств

данных «подтягивается» резисторами к напряжению питания. В шине адреса используется 5 разрядов, соответственно в одном блоке может быть не более 32 адресов. В СУ РБ «Бриз-М» используется аналогичный КВУ, но количество адресных разрядов – 6. Все адресное пространство – 64 адреса на все БСА вместе.

Как упоминалось выше, последовательный синхронный КВУ разработан для обеспечения возможности «перевязки» на выходе ВС КПУ (ВС БУК). Далее приведено описание этого канала.

1) Канал использует 4 линии:

Таблица 2.2

Линии, используемые в канале внешних устройств

На стороне задатчика линии		На стороне ведомых абонентов	
Обозн.	Назначение	Обозн.	Назначение
CLK	тактовый сигнал (выход)	CLK	тактовый сигнал (вход)
DO	выходные данные (инвертированы)	DI	входные данные (инвертированы)
DIA	данные/адрес (выход)	DIA	данные/адрес (вход)
DI	входные данные (инвертированы)	DO	выходные данные (инвертированы)

Сигналы выдаются открытым коллектором (либо открытым стоком).

2) Тактовая частота на линии CLK большую часть времени присутствует постоянно. Если на шине присутствует несколько задатчиков, возможно пропадание тактового сигнала при передаче управления от одного задатчика к другому. Пропадание не может произойти во время кадра обмена. Время пропадания не ограничено, при пропадании тактового сигнала на линии CLK остается высокий уровень. Тактовая частота CLK – 1 МГц.

3) Входные сигналы ведомого абонента (выходные сигналы задатчика) изменяются одновременно с нарастающим фронтом CLK, а защелкиваются по спадающему фронту. Ответные данные изменяются

по спадающему фронту CLK, а фиксируются в приемном регистре задатчика – по следующему спадающему фронту.

4) Адрес (за исключением разряда A7) и данные передаются начиная с младшего разряда. Общая длина кадра обмена – 19 разрядов.

5) Первые 10 разрядов передаваемой информации имеют следующее значение:

– разряды 1..8 – 8-разрядный адрес ячейки, к которой происходит обращение, передаются в порядке: A7, A0, A1, A2, A3, A4, A5, A6;

– разряд 9 (R/\bar{W}) – тип операции: запись при низком уровне или чтение при высоком уровне;

– разряд 10 (P1) – дополнение до нечетности (см. пояснение ниже) разрядов A0-A7 и R/\bar{W} .

6) При записи (R/\bar{W} – низкий) следующие 8 разрядов (D0 ... D7) – это данные для записи, последний разряд (P2) – дополнение до нечетности 8 разрядов данных. Данные записываются в ячейку назначения, если:

а) совпал адрес;

б) R/\bar{W} – низкий;

в) условия четности полей адреса и данных выполнены.

Замечание по поводу контроля четности (нечетности). Идеология контроля четности выбрана исходя из того, чтобы состояние обрыва линии давало неверный результат контроля четности. Обрыв линии – состояние высокого уровня. Данные в линии инвертированы по отношению к тем, данным которые записывает и читает вычислитель (задатчик линии). Соответственно в вычислителе аппаратно выполняется дополнение до нечетности как группы адреса (первые 10 разрядов кадра), так и группы данных (вторые 9 разрядов кадра). В линии это выглядит так, что в каждой группе присутствует нечетное число разрядов низкого уровня. То же относится и к ответным данным (9 разрядов).

7) В качестве подтверждения успешной записи в адресуемую ячейку ведомый абонент отдает задатчику квитанцию длительностью

1 бит по линии ответных данных DO. Положение фронтов квитанции должно соответствовать п. 3.

8) При чтении (R/\bar{W} – высокий) после распознавания адреса, приема бита R/\bar{W} и проверки четности начиная с ближайшего спадающего фронта CLK на выход DO выдаются 8 разрядов данных (D0 ... D7) и бит дополнения их до нечетности (P2) («нечетность» – аналогично п. 6).

9) Сигнал «данные/адрес» имеет высокий уровень при передаче адреса и низкий уровень при передаче данных. Изменение уровня сигнала DIA происходит перед битами четности P1 и P2.

10) Информация, выдаваемая задатчиком в поле данных в кадре чтения, игнорируется ведомым абонентом (обычно задатчик выдает нули, т.е. в линии высокий уровень, а затем следует дополнение до нечетности).

На рис. 2.8: Load – внутренний сигнал чтения ведомого абонента; Write – внутренний сигнал записи ведомого абонента. Обозначения сигналов DI и DO указаны для задатчика шины. «ZZ» – высокоимпедансное состояние, доопределенное резистором до напряжения питания; «XX» – безразличное состояние (см. п. 10).

Адресное пространство БСА 8-разрядное, т.е. максимальное число адресуемых абонентов – 256. Изначально для КА «Монитор-Э» этот

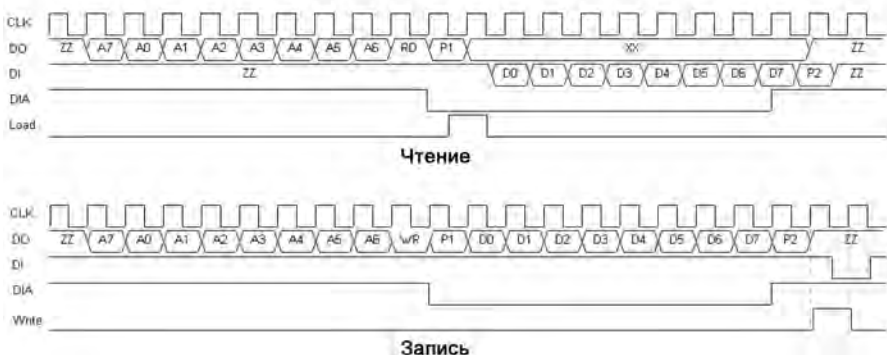


Рис. 2.8. Диаграммы циклов записи и чтения последовательного канала внешних устройств

канал был разработан с 7-разрядным адресом. Затем один разряд был добавлен, и для совместимости с уже имеющимися интерфейсными микросхемами для исполнительных устройств этот разряд был добавлен в начало кадра.

В блоке БУК имеется преобразователь последовательного синхронного КВУ в параллельный. Из 8 разрядов адреса на его выходе 5 разрядов (A0 ... A4) выдаются на блоки-спутники, а старшие три разряда (A5, A6, A7) дешифрируются, и в зависимости от их значения формируются стробы записи и чтения только для одного из блоков-спутников. Таким образом, все адресное пространство БСА поделено на 8 зон по 32 адреса. Первая зона (с адресами от 00h до 1Fh) – это исполнительные устройства самого блока БУК. Они работают непосредственно на последовательном КВУ без преобразования в параллельный.

2.4. Вычислительная система блока управления и контроля

ВС БУК состоит из четырех одинаковых вычислительных устройств – контроллеров блока управления и контроля – и объединительного устройства УС ПК (устройство соединительное – преобразователь кода). Каждый КБУК построен на основе процессора Intel 80C196KC20, который был заменен на отечественный радиационно-стойкий аналог 1874BE05T. Схемотехника КБУК мало чем отличается от схемотехники устройства ПВВ в составе БЦВС. Карта памяти устройства КБУК приведена в табл. 2.3. Отличия есть в системе синхронизации граней и в наличии канала внешних устройств.

Отличие заключается в том, что в блоке управления и контроля есть средство синхронизации с БЦВС. КБУК является абонентом МКО с функцией оконечного устройства (ОУ). Все грани ВС БУК – это ОУ с одинаковыми адресами. Одна грань назначается ведущей – активное ОУ, остальные выполняют функции ОУ без права выдачи ответного слова. Каждый цикл БЦВС выдает команду синхронизации для БУК. Эта команда вызывает прерывание в процессорах всех

Таблица 2.3

Карта памяти КБУК

Диапазон адресов	Назначение	Объем
0000h ... 01FFh	Регистровый файл	0,5 Кбайт
0200h ... 03FFh	Управляющие регистры (включая управление КВУ)	
0400h ... 0FFFh	ОЗУ переменных БОС	3 Кбайт
1000h ... 1FFFh	ОЗУ отладчика	4 Кбайт
2000h ... 5FFFh	Корневой сегмент ПЗУ	16 Кбайт
6000h ... BFFFh	Основное ОЗУ	24 Кбайт
C000h ... CFFFh	Страницы 0 ... 15, 24 ... 31 – страницы РПЗУ; страницы 16, 17 – ОЗУ адаптера МКО	24 стр. по 16 Кбайт 2 стр. по 16 Кбайт

граней. Далее каждый процессор записывает в свой таймер цикла константу – то значение времени, которое должно быть по циклу БЦВС. В конце цикла таймеры граней синхронизируются между собой.

Каждая грань ВС БУК имеет задатчик для трех граней КВУ, но управлять каналом в каждый момент времени должна только одна грань. Какая именно – решается программно. Приемники ответных данных в составе задатчика работают независимо от передатчиков. Это позволяет организовать «прослушивание» ответной линии. Когда одна грань ВС БУК выдает запрос на чтение, ответные данные «слышат» все грани. Поэтому не требуется дополнительного времени для передачи по каналам межпроцессорного обмена считанных из исполнительных устройств данных в другие грани.

Опишем циклограмму первого включения ВС БУК и порядок переключения резерва.

При включении питания одновременно начинают работать все четыре грани ВС БУК. Каждая грань выполняет свой автономный тест

(расширенный тест встроенного контроля, РТВК), затем БУК входит в циклический режим, и грани синхронизируются между собой. Далее выполняется тест встроенного контроля в циклическом режиме (ТВКЦ), и ВС БУК переходит в штатный режим с конфигурацией рабочей тройки: три грани включены, одна выключается – переводится в холодный резерв. В этом режиме каждая из граней КВУ находится под управлением одной грани ВС БУК. При полной исправности первая грань КВУ находится под управлением первой грани ВС БУК, вторая – под управлением второй, третья – под управлением третьей, четвертая грань ВС БУК – в холодном резерве. В случае обнаружения отказов возможна передача управления на другие грани. Режим с рабочей тройкой обеспечивает немедленное парирование отказов путем аппаратного мажоритирования на выходе исполнительных устройств. В этом режиме ВС БУК находится до окончания всех операций с пиропатронами, затем (по команде с Земли) переходит в двугранный режим «1+1»: одна грань рабочая, одна в горячем резерве и две в холодном. Управление всеми тремя гранями КВУ передается одной ведущей грани. В этом режиме удастся лучше экономить ресурс ВС БУК, но при обнаружении отказа придется затратить время на его парирование.

2.5. Средства самоконтроля

Один отказ в системе не должен привести к нарушению ее функционирования. Средства контроля должны позволить проверить, что до старта система была исправна полностью, чтобы возникший во время работы отказ был первым. Во время полета контроль нужен для поддержки автоматической реконфигурации системы в случае отказа. Телеметрия результатов контроля используется для принятия решения в сложных ситуациях, в том числе и для реконфигурации по командам с Земли.

В блоках силовой автоматики и их составных частях имеются следующие средства контроля:

– В последовательном КВУ контролируется факт записи в регистр с помощью квитанции. Эта квитанция используется как при автономном контроле устройств после их изготовления, так и на борту. В устройствах с параллельным КВУ также есть выходной сигнал квитанции записи, но он используется только на этапе автономного контроля устройств, в составе блока эта связь не проложена.

– В некоторых устройствах есть функция эхо-контроля регистра: можно прочесть записанные в регистр данные.

– В большинстве случаев вместо состояния регистра контролируется ток или напряжение в нагрузке. Наличие тока в нагрузке – наиболее полный показатель исправности, поскольку контролируется правильность прохождения сигналов по всему тракту выдачи команды: КВУ, регистр, гальваническая развязка, выходные ключи, связь с нагрузкой и сама нагрузка.

Для этих целей в БСА разработки МОКБ «Марс» использованы датчики тока на основе импульсных трансформаторов, регистрирующие нарастающий фронт импульса тока, датчики на основе магнитного усилителя, датчики Холла и шунтовые.

Средства контроля тракта пироустройств подробно описаны в разделе 2.2. Для выполнения такого объема контрольных операций в блоке, содержащем этот тракт, встроены тестер, позволяющий измерять напряжение между заданными цепями. В этом же устройстве расположен генератор безопасного тока обтекания пиропатронов. Для того чтобы импульсные датчики тока в составе коммутаторов пироустройств реагировали на слабый ток обтекания, в качестве тока обтекания используется последовательность импульсов большой скважности.

3. КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ И ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ РАЗРАБОТКИ МОКБ «МАРС»

С 1993 г. МОКБ «Марс» активно занимается разработкой аппаратуры систем управления беспилотных аппаратов, работающих как в атмосфере Земли, так и в околоземном космическом пространстве.

Аппаратура работает в следующих условиях по внешним воздействующим факторам:

- диапазон температур от -50°C до $+70^{\circ}\text{C}$;
- влажность окружающего воздуха до 90 %;
- воздействия частот до 2000 Гц при перегрузках более 10 g;
- вакуум до 10^{-6} мм рт. ст. и воздействие ионизирующего излучения космического пространства.

При этом необходимо обеспечение надежности порядка 0,998 в течение заданного срока службы при минимально возможных габаритно-массовых характеристиках.

В настоящем разделе рассмотрена эволюция конструктивного исполнения аппаратуры с целью более полного обеспечения вышеперечисленных требований.

Ряд разработок закончился созданием летных образцов приборов, которые успешно применяются в различных бортовых системах управления. О них речь пойдет ниже.

3.1. Конструкция электронных блоков системы управления

В основу конструкции электронных блоков системы управления разгонным блоком (РБ) «Бриз-М» разработки 1994 г. были заложены следующие принципы:

- электронные устройства с установленными элементами монтируются на жестком основании (корпусе блока) и связаны между собой объемным монтажом – проводами (рис. 3.1);
- тепло с устройств передается на рамки и корпус блока, а с корпуса – на термоплату РБ «Бриз-М»;

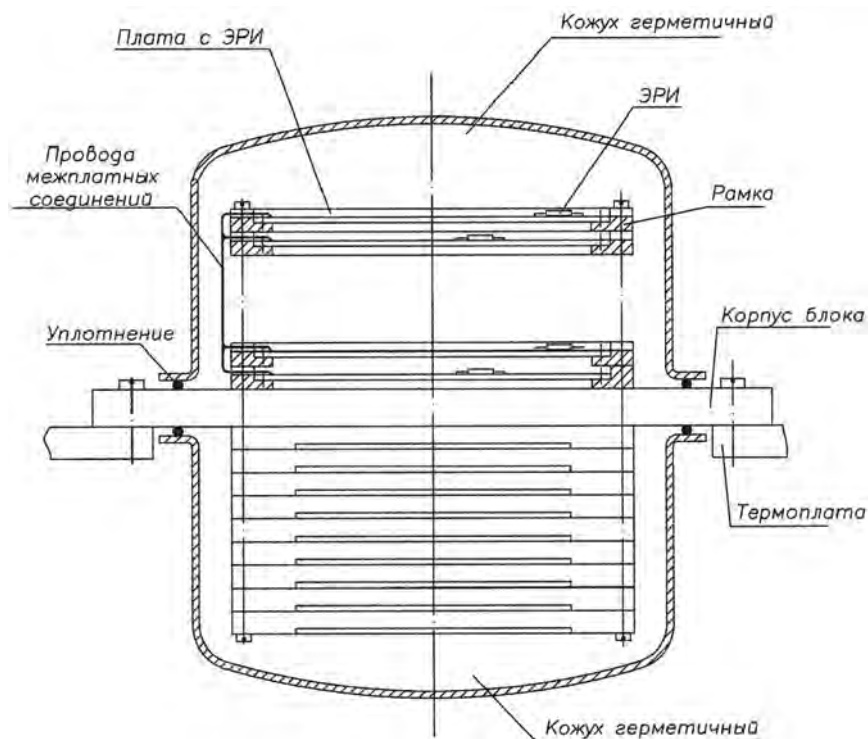


Рис. 3.1. Первый вариант конструктива блоков системы управления РБ «Бриз-М»

– блоки герметизированы и заполнены азотом до нормального давления.

Предполагалось, что соединение устройств проводами даст 100 % надежность. Однако в процессе отладки блока, когда устройства перемещались относительно друг друга, провода в местах распайки надламывались и электрический контакт терялся. При механических испытаниях выяснилось, что K_n (коэффициент передачи механического воздействия) на верхних устройствах собранной «этажерки» превышал 20 единиц и ряд электрорадиоизделий (ЭРИ) отлетал от устройств – перегрузка рвала выводы ЭРИ в местах их распайки на плату.

Таким образом, в процессе изготовления блоков и их испытаний выяснилось, что положенные в основу конструкции идеи не обеспечивают функционирование блоков.

В 1996 г. конструкция блоков была переработана. В основу разработки было заложено:

- платы не связаны между собой проводами, а оканчиваются соединителями типа СНП-135;
- каждая плата, независимо от соседних, через соединитель типа СНО-135 устанавливается на общей для 10...15 плат кросс-плате;
- механически платы закрепляются в так называемой корзине с помощью клиновых зажимов, которые передают тепло с платы на корзину;
- корзина соединяется с корпусом блока через металлорезиновые амортизаторы, существенно снижающие воздействие механических нагрузок на ЭРИ.

Введение амортизаторов поставило задачу передачи тепла от корзины к корпусу блока, которая была решена установкой гибких медных проводников между корзиной и корпусом. Суммарное сечение проводников и их длина рассчитывались из условия разницы температур между корзиной и корпусом не более 3°С при обеспечении требуемого хода амортизаторов на их резонансной частоте.

Блоки в данном конструктивном исполнении успешно выдержали все наземные испытания и были приняты к эксплуатации.

Схематично второй вариант конструктива изображен на рис. 3.2.

В 2001 г. с целью выведения РБ «Бриз-М» большей полезной нагрузки на орбиту и возможностью использования разработанной бортовой цифровой вычислительной системы (БЦВС) на космических аппаратах была поставлена задача существенно уменьшить габаритно-массовые характеристики блоков системы управления при одновременном повышении их защиты от радиации.

Применение уникальной пакетной конструкции блоков, предложенной русскими изобретателями А.В. Богдановым и Ю.А. Богдановым

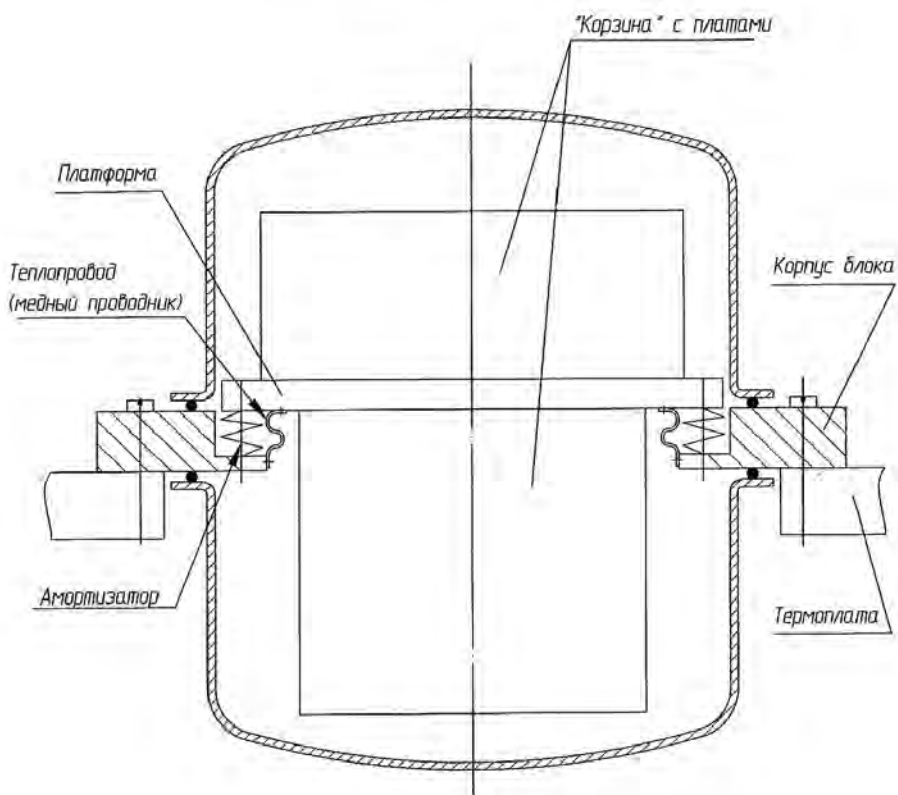


Рис. 3.2. Второй вариант конструктива блоков СУ «Бриз-М»

в 80-х годах XX века, позволило разрешить эти противоречивые требования.

Основная идея конструкции заключается в том, что блок состоит из сложенных в единый пакет модулей, обрамленных металлической рамкой – обечайкой. Каждая плата, составляющая основу модуля, снабжена алюминиевой пластиной – теплоотводом. Соединения между модулями выполняются при помощи пружинных колодок с нулевым усилием сочленения, которые устанавливаются внутри металлических рамок.

Модули, равномерно стянутые в пакет шпильками, образуют блок, в котором корпусом являются внешние поверхности модульных рамок и торцевые крышки. Пакетная сборка обеспечивает высокую стойкость к механическим воздействиям, высоконадежное соединение плат, значительное снижение массогабаритных характеристик и возможность организации кондуктивного теплоотвода.

В основу нового конструктива положен оригинальный межплатный соединитель, представляющий собой кольцо эллиптической формы, изготовленное из бронзы и установленное между контактными площадками соседних плат, выполненных по рельефной технологии.

Конструктивно 25 колец с шагом 1 мм устанавливаются в электро-изоляционный корпус, образуя соединитель печатного монтажа – СПМ (рис. 3.3).

Каждое устройство устанавливается на обечайку (рис. 3.4), по периметру которой выполнены 10 пазов под установку межплатных соединителей, т.е. между любыми соседними платами реализуется коммутация 250 электрических цепей. Для обеспечения механической прочности и исключения локальных перегревов к каждой плате со стороны, противоположной установке ЭРИ, приклеен теплопровод – алюминиевая пластина толщиной 1 мм (рис. 3.5).

Рельефная технология – это одно из направлений развития печатных плат, выполненных по аддитивной технологии, т.е. рисунок наносится на нефольгированный текстолит с помощью фрезеровки на

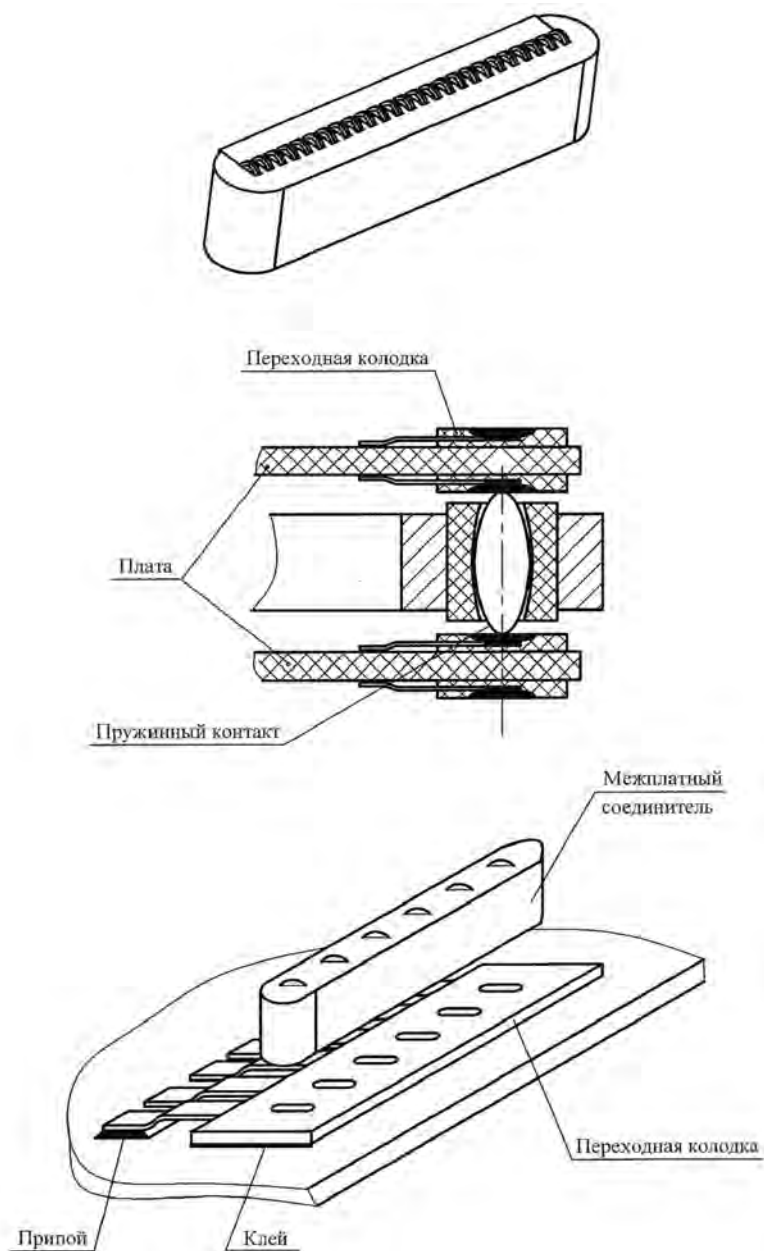


Рис. 3.3. Соединитель печатного монтажа

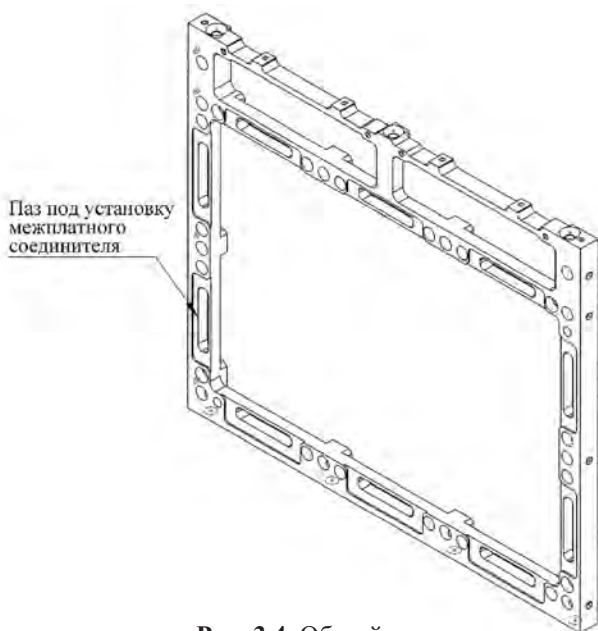


Рис. 3.4. Обечайка

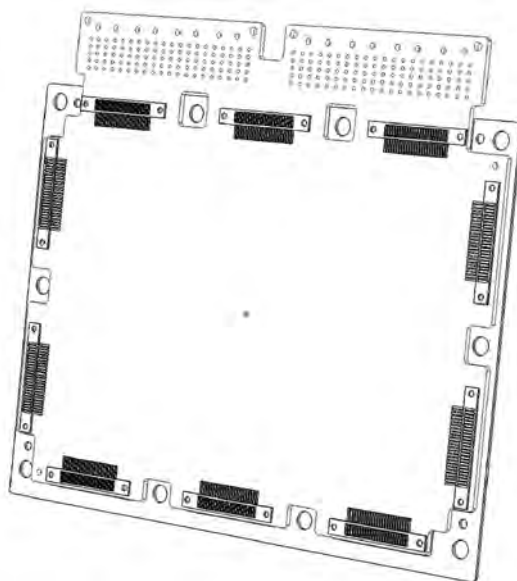


Рис. 3.5. Плата с теплопроводом

специальных станках с последующим «меднением» проводящего рисунка. Платы, изготовленные по рельефной технологии, идентичны по разводке шести-, восьмислойным платам за счет минимальных диаметров (до 0,2 мм) переходных отверстий и минимальных расстояний (до 0,1 мм) между ними.

В МОКБ «Марс» было принято решение устанавливать межплатный соединитель на стандартную многослойную печатную плату через колодки, выполненные по рельефной технологии. Это позволило использовать разводку и изготовление многослойных печатных плат по технологии, которой владеют многие заводы.

Разводка печатных плат производится с помощью средств автоматизированного проектирования и пакета прикладных программ P-CAD. В настоящее время предприятие осваивает перспективный пакет программ Altium Designer [26], позволяющий провести цикл сквозного проектирования изделия, включая также этап выпуска конструкторской документации и файлов управляющей информации для автоматизированного производства печатных плат.

Все устройства представляют собой многослойную (до 10 слоев) или двухстороннюю печатную плату с установленными на ней ЭРИ. Пример печатной платы с нанесенными трассами показан на рис. 3.6. Устройства разработаны с учетом требований поверхностного монтажа, где элементы устанавливаются на поверхности и распаиваются на специальные контактные площадки с помощью паяльных станций вручную или на специальном оборудовании для автоматизированной пайки с применением конвейерных печей, позволяющих устанавливать высокоинтегрированную элементную базу с малым шагом (до 0,3 мм). На рис. 3.7 показан образец устройства, выполненный в пакете Altium Designer (см. раздел 9, 10).

Схематично сборка устройств показана на рис. 3.8. Для обеспечения электрического соединения плат с блочными соединителями каждая 5...7-я плата выполнена конструктивно отличной от остальных. Она увеличена по высоте и за счет этого имеет два поля с контактными

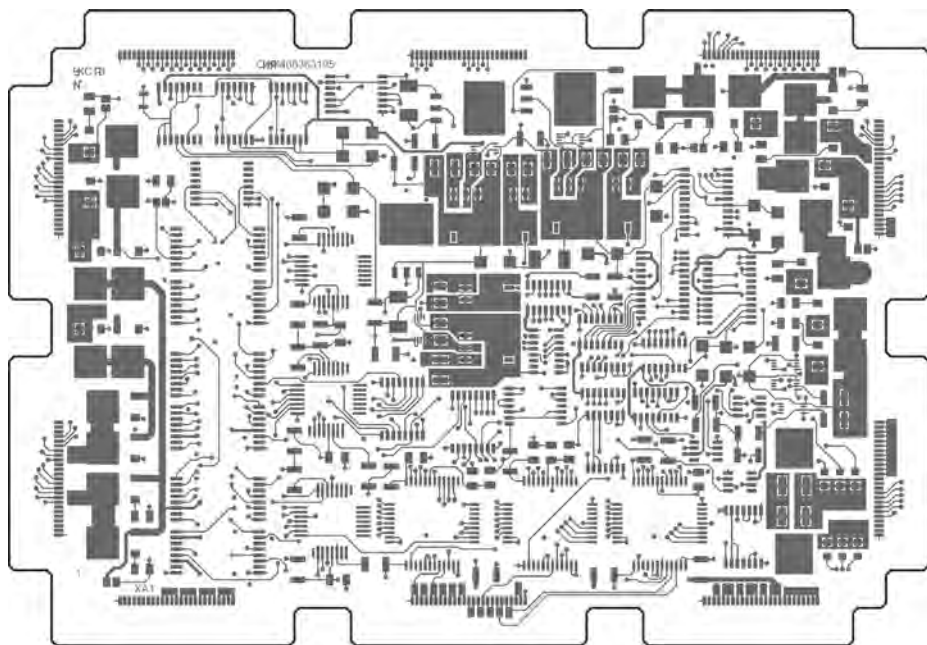


Рис. 3.6. Плата с нанесенными трассами

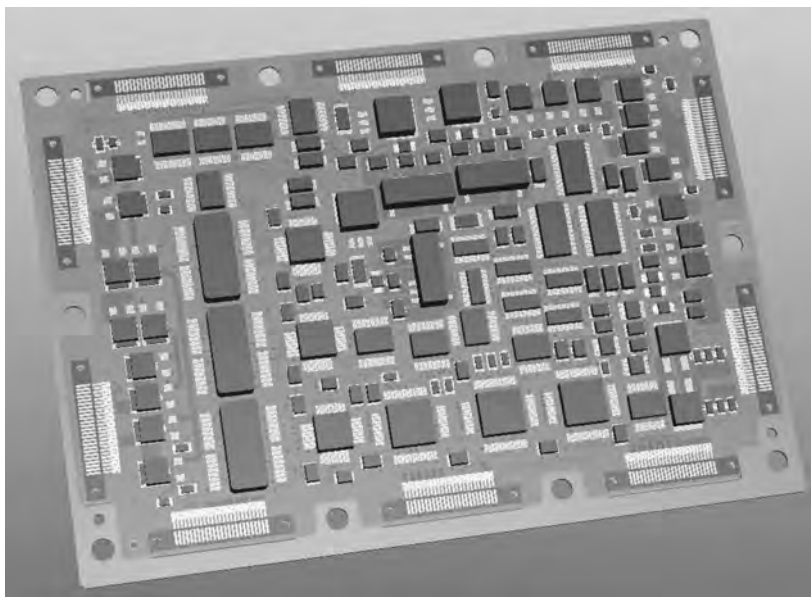


Рис. 3.7. Образец устройства, выполненный при помощи Altium Designer

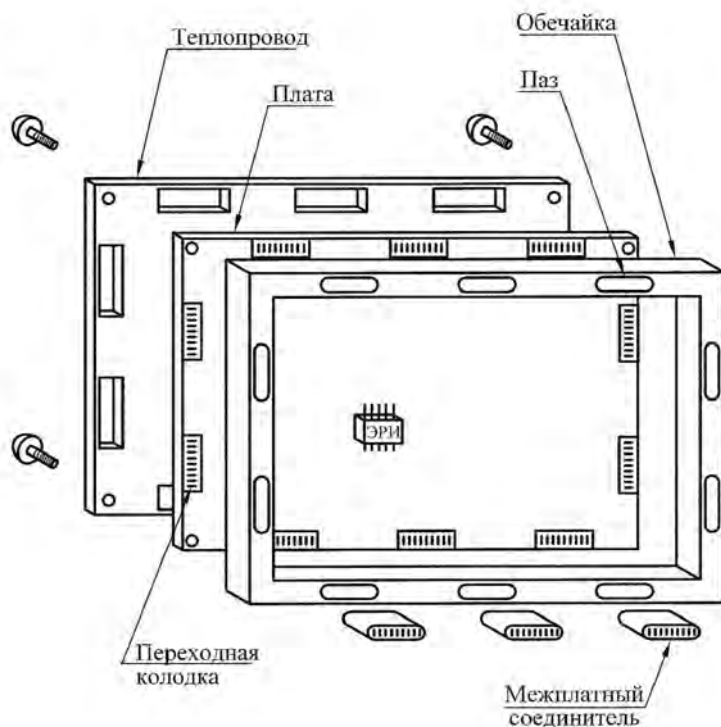


Рис. 3.8. Схематичная сборка устройства

площадками, на которые распаяны провода от внешних (блочных) соединителей. Соответственно и обечайки, на которые устанавливаются данные платы, конструктивно отличаются от прочих. На верхний торец обечаек устанавливаются пластины с блочными соединителями (рис. 3.9).

Таким образом, используя два типоразмера плат и обечаек, создается конструкция любого электронного блока.

Сборка блока осуществляется стягиванием всего набора плат винтами, при этом обеспечивается электрический контакт каждой платы с соседними (рис. 3.10).

Габаритно-массовые характеристики блоков уменьшены в два раза.

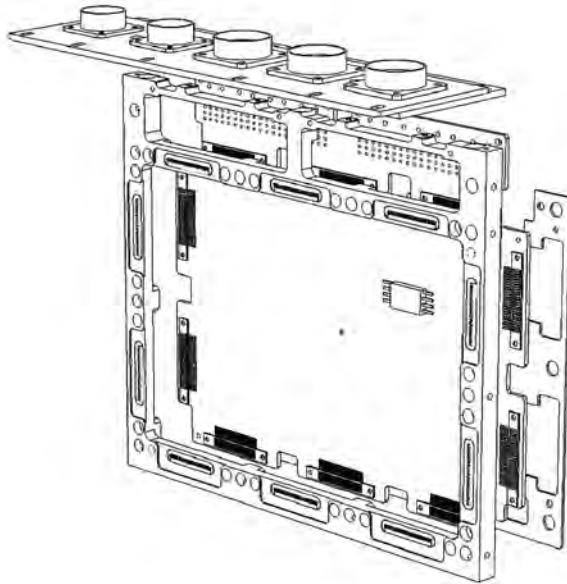


Рис. 3.9. Схематичная сборка устройства с выходными соединителями

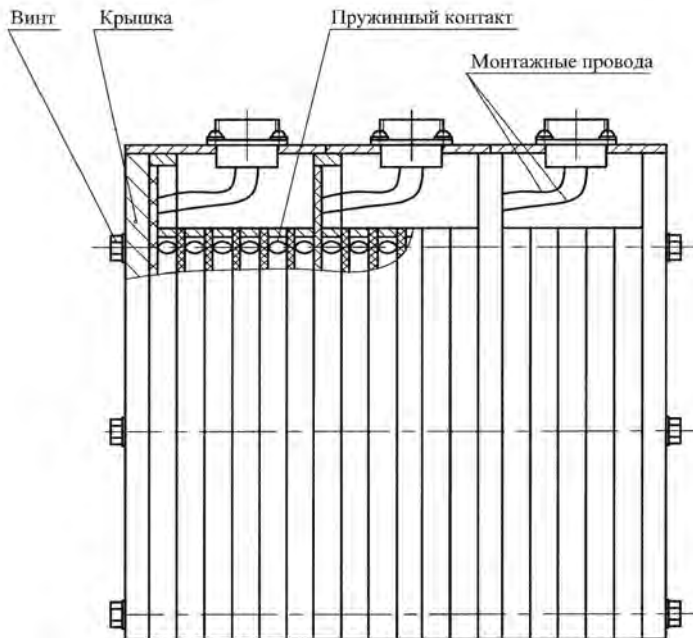


Рис. 3.10. Схематичная сборка блока

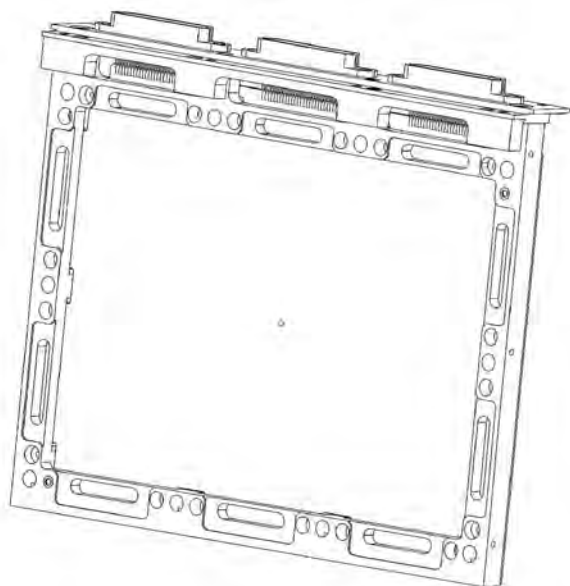


Рис. 3.11. Устройство с соединителями СНП-339

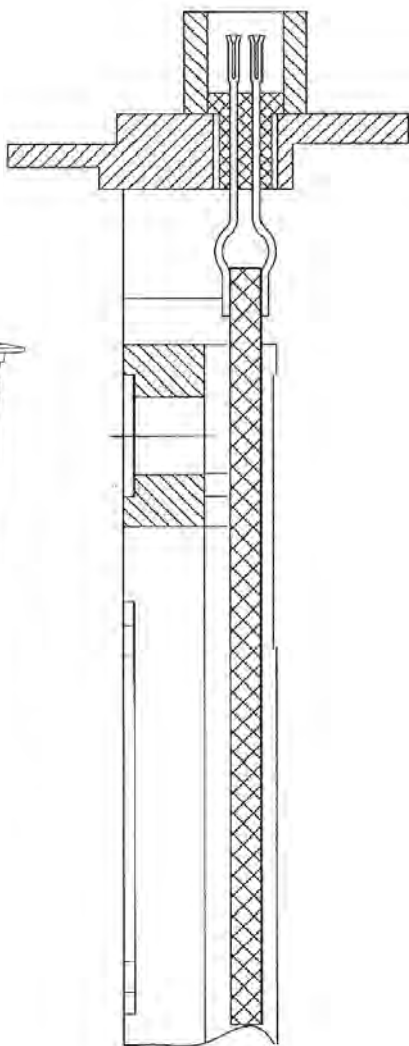


Рис. 3.12. Распайка соединителя СНП-339

Блоки успешно выдержали все механические и тепловакуумные испытания согласно требованиям к системе управления разгонным блоком «Бриз-М» и показали наличие большого конструктивного запаса по стойкости к механическим воздействиям. К настоящему времени выполнено более 40 успешных пусков ракеты-носителя «Протон» с РБ «Бриз-М».

Продолжается дальнейшая модернизация вышеописанного конструктива, в котором существует достаточно большое количество монтажных проводов, соединяющих платы с выходными соединителями блока. Опробуется вариант замены соединителей типа РС на соединители СНП-339, которые распаиваются непосредственно на плату. Устройство с соединителями СНП-339 изображено на рис. 3.11 и 3.12.

3.2. Конструкция систем управления космических аппаратов с длительным сроком эксплуатации

Принципиальное отличие при конструировании «долгоживущих» (до 15 лет) электронных блоков от «короткоживущих» (несколько суток) – их чувствительность к излучениям, действующим в космическом пространстве. В основном это радиационные пояса вокруг Земли, состоящие из электронов и ядер тяжелых элементов (например урана), летящих из галактического пространства. Кроме того, периодические (раз в 5...7 лет) вспышки на Солнце в течение нескольких суток бомбардируют околоземное пространство частицами с энергией, на несколько порядков превышающей обычный радиационный фон.

Эти факторы воздействуют на тонкие полупроводниковые структуры микросхем, частично или полностью их разрушая.

Защитой от космической радиации является установка экранов между микросхемой и открытым пространством (рис. 3.13). Частично эту задачу выполняют элементы спутника, в основном же электронные блоки имеют собственную защиту. Толщина экрана (г/см^2) рассчитывается исходя из орбиты спутника и заданного времени его активного

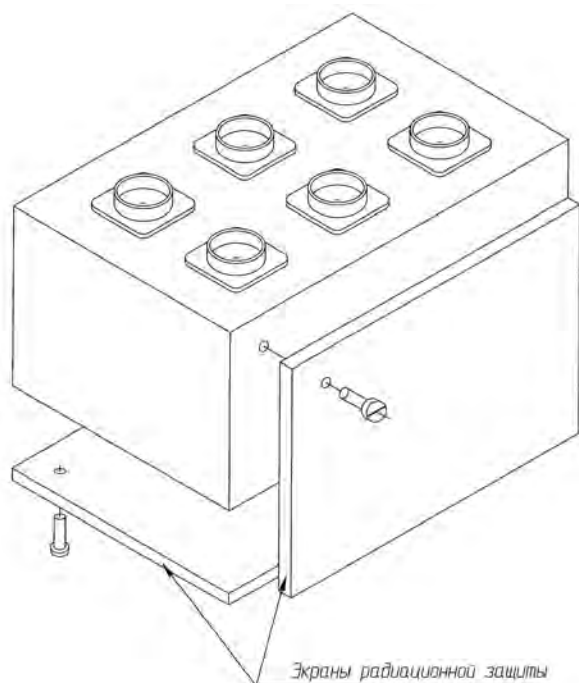


Рис. 3.13. Радиационная защита блоков

существования. Например, для геостационарной орбиты и десяти лет активного существования требуется ≈ 8 мм ($2,1$ г/см²).

3.3. Конструкция оптоэлектронной аппаратуры

Для обеспечения задач по управлению движением космического аппарата необходимо иметь датчики положения космического аппарата относительно некоторых опорных точек (Земля, Солнце, удаленные звезды). Предприятием разработано и внедрено в эксплуатацию три вида таких оптоэлектронных датчиков [6].

Солнечный датчик положения

Солнечный датчик положения (СДП) предназначен для стабилизации неуправляемого вращения КА после отделения от носителя таким образом, чтобы обеспечить максимальный поток солнечной энергии на панели солнечных батарей.

Конструктивно СДП (рис. 3.14) выполнен в виде корпуса, на котором под углом $\approx 90^\circ$ расположены две узкие щели, закрытые светофильтрами, внутри корпуса установлены фотодиоды, выдающие сигнал при их засветке Солнцем. При попадании Солнца в зону угла α , равного $\approx 5^\circ$, сигнал от фотодиода поступает в бортовую систему управления (БСУ) и далее на исполнительные механизмы космического аппарата. По сигналам с СДП бортовая система управления разворачивает КА так, чтобы панели солнечных батарей располагались перпендикулярно световому потоку.

СДП является прибором невысокой точности, погрешность в $1^\circ \dots 2^\circ$ в положении солнечных батарей вполне допустима. Поэтому в

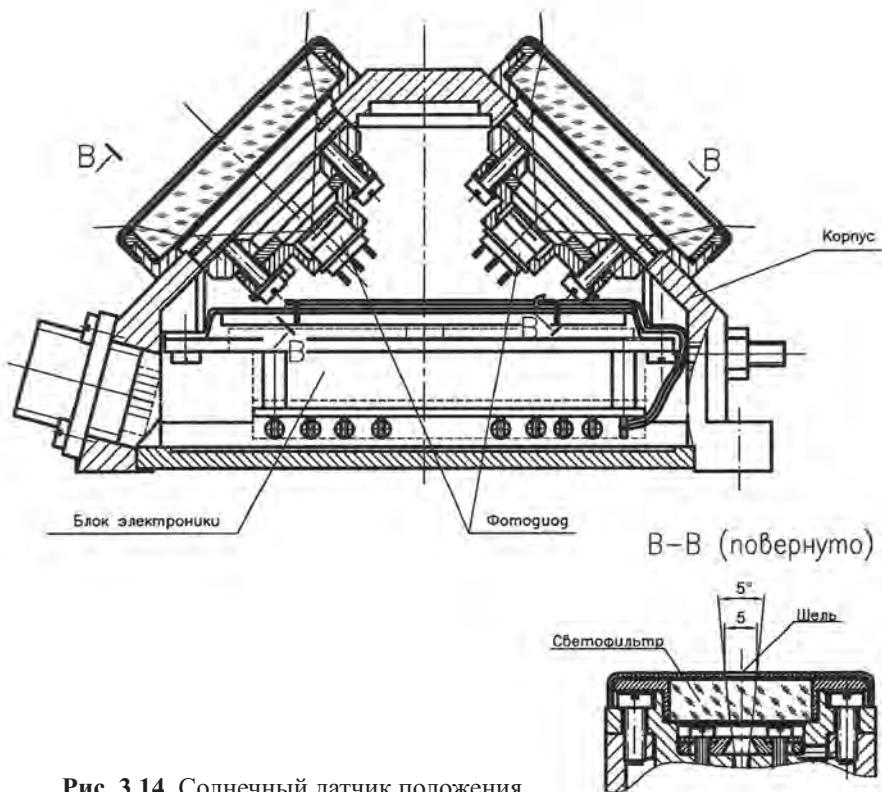


Рис. 3.14. Солнечный датчик положения

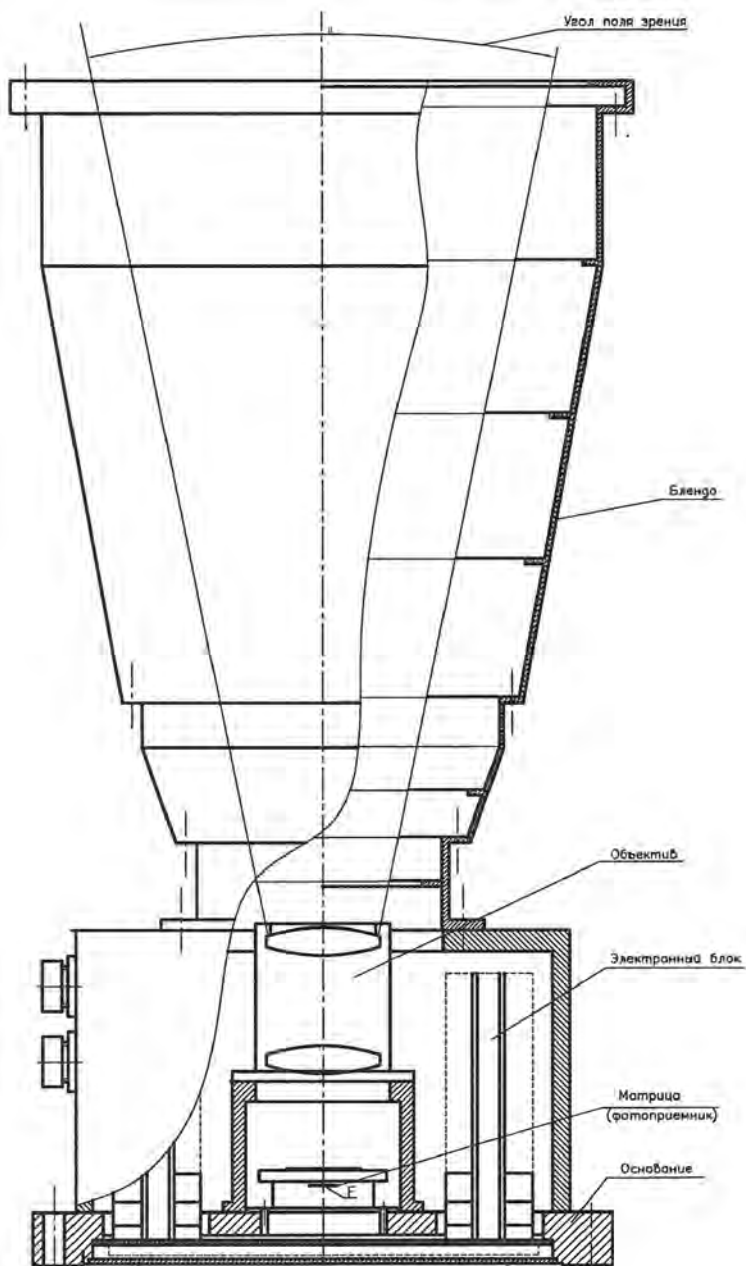


Рис. 3.15. Астродатчик

СДП нет требований по обеспечению высокой стабильности взаимного положения его частей. В то же время датчик подвергается прямому воздействию солнечного излучения и излучению космического пространства, что заставляет обеспечивать качественную радиационную защиту его ЭРИ за счет толстых стенок корпуса.

Астродатчик

Астродатчик (АД) предназначен для измерения фактического положения звезд, попавших в его поле зрения, и по результатам замеров выдачи исходной информации в БСУ для коррекции показаний гироскопов, управляющих движением космического аппарата в заданной системе координат.

Астродатчик состоит из объектива, фоточувствительной матрицы, на которую проецируются изображения звезд, электронного блока, в котором происходит сравнение видимой на матрице картины с заложенным в электронном блоке каталогом звезд и выработка корректирующего сигнала для бортовой системы управления.

Объектив, матрица и электронный блок (рис. 3.15) установлены на основании из алюминиевого сплава. Там же установлена бленда, предохраняющая объектив от засветки Солнцем и бликов от элементов конструкции космического аппарата.

Астродатчик является высокоточным прибором. Нестабильность положения его визирной оси относительно строительных осей космического аппарата должна быть не более 30". Для обеспечения этого требования все элементы конструкции АД подвергаются термостабилизации, установочные поверхности выполняются с погрешностью в единицы микрон. Конструктивно предусмотрено обеспечение достаточно равномерного теплового режима при работе ЭРИ.

Точный датчик Солнца

Точный датчик Солнца (ТДС) предназначен для автономного поиска, обнаружения и измерения углового положения геометрического центра Солнца в приборной системе координат, связанной с посадоч-

ным местом ТДС, и циклической выдачи измерительной и телеметрической информации в БСУ КА. Опознавание изображения Солнца в ТДС осуществляется автономно.

Точный датчик Солнца (рис. 3.16) состоит из:

- фотоприемного устройства на основе ПЗС-матрицы (ФППЗ), преобразующей световое изображение на световой площадке в электрический сигнал с каждого пикселя матрицы;
- оптического устройства, формирующего с помощью блока диафрагм изображение Солнца на фоточувствительном слое матрицы в пределах поля зрения и обеспечивающего также необходимое ослабление светового потока с помощью многокомпонентного фильтра с расчетной спектральной характеристикой;
- электронного блока, который осуществляет при первичной обработке информации, полученной с фотоприемника, усиление аналогового видеосигнала и его цифровое преобразование, затем вторичную обработку информации, управление всем вычислительным процессом в различных режимах ТДС, вычисление координат геометрического

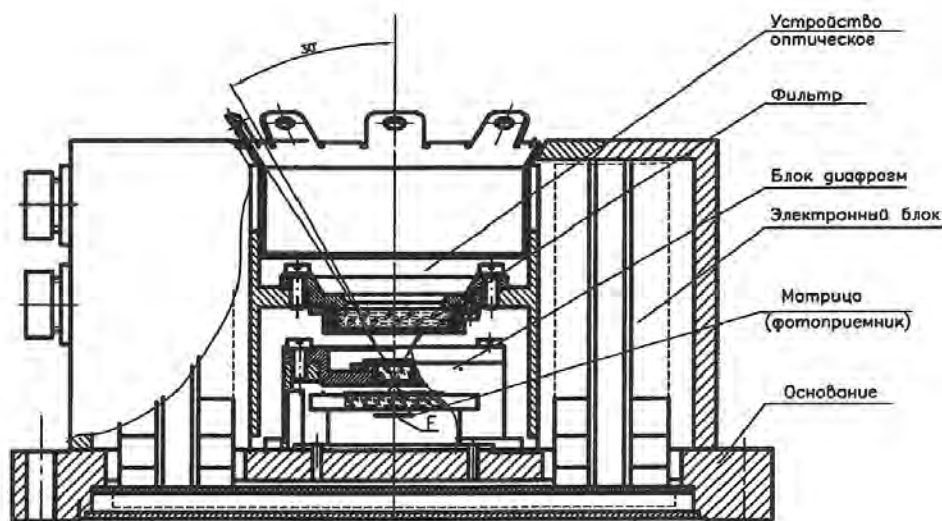


Рис. 3.16. Точный датчик Солнца

центра изображения в приборной системе координат, проверку достоверности полученных данных и передачу информации в БСУ.

Оптическое устройство, фотоприемник и электронный блок установлены на основании из алюминиевого сплава, обеспечивающем стабильность положения визирной оси ТДС относительно строительных осей КА. С этой целью все элементы конструкции ТДС подвергаются термостабилизации, а установочные поверхности выполняются с погрешностью в несколько микрон. Конструкцией прибора предусмотрено обеспечение достаточно равномерного теплового режима при его работе.

Основные технические характеристики ТДС:

- угловое поле зрения не менее 60° ;
- погрешность измерения направления на геометрический центр Солнца (1σ) в поле зрения $\pm 2^\circ$ не более 1 угл. мин;
- потребляемая мощность не более 12 Вт;
- масса не более 2,3 кг;
- габариты $110 \times 186 \times 180$ мм.

3.4. Конструкция электронной аппаратуры для беспилотных аппаратов, работающих в атмосфере Земли

К аппаратуре для беспилотных аппаратов, работающих в атмосфере Земли, предъявляются следующие требования:

- длительное хранение (10 и более лет) в диапазоне температур $\pm 50^\circ\text{C}$ и при влажности до 98 %;
- стойкость к воздействию ударов порядка 100 g и более;
- функционирование при температуре до $+ 70^\circ\text{C}$.

Как правило, конструктив блоков состоит из плат с соединителями типа СНП, сочленяемых с общей кросс-платой через соединители типа СНО. Платы с помощью клиновых зажимов крепятся к корпусу блока (рис. 3.17).

Для обеспечения длительного хранения платы покрываются несколькими слоями электроизоляционного влагостойкого лака, попутно дающего дополнительную механическую прочность установленным на платы ЭРИ. Элементы с большой массой дополнительно крепятся с помощью хомутов или кронштейнов. Блоки, подвергающиеся особенно большим механическим воздействиям, устанавливаются на амортизированные платформы. Для исключения перегрева аппаратуры для атмосферных летательных аппаратов применяется принудительная продувка атмосферным воздухом.

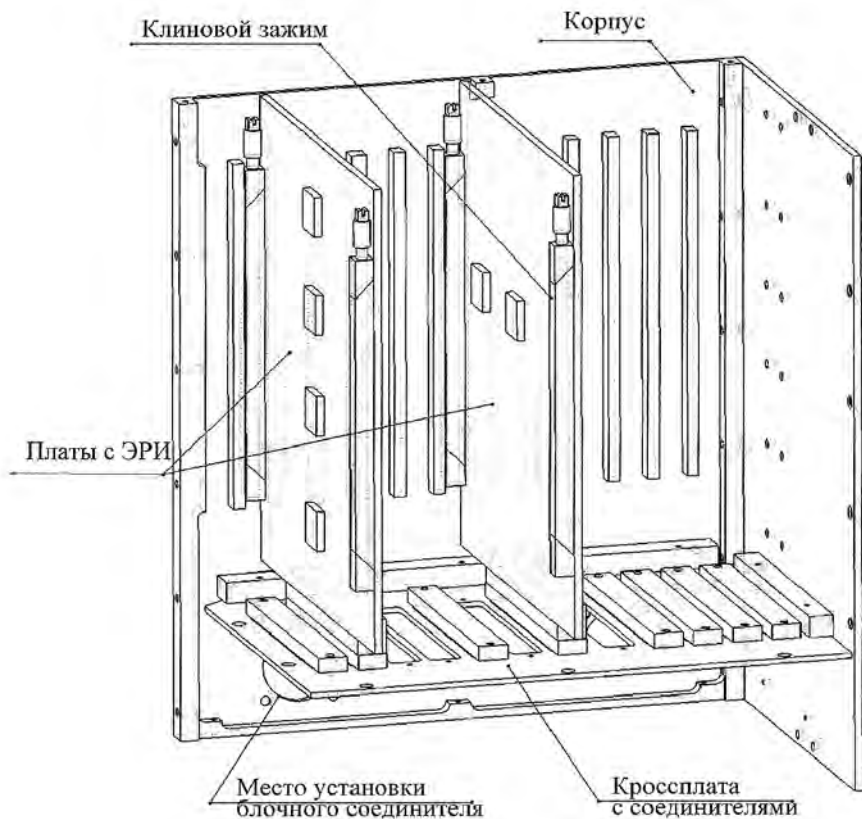


Рис. 3.17. Конструкция блока, работающего в атмосфере Земли

4. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ В КОСМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Создание космических аппаратов (КА) с длительными сроками активного существования требует обеспечения работоспособности радиоэлектронной аппаратуры в условиях воздействия ионизирующих излучений космического пространства. Для этого необходимо корректно оценить уровни радиационных воздействий на элементную базу, провести экспертизу элементной базы с целью предварительной оценки обеспеченности требуемых уровней по радиационной стойкости и устойчивости к воздействию заряженных частиц, а также выявить наименее стойкие узлы конструкции. Полученная информация позволяет обеспечить выполнение технических требований при существенном сокращении материальных затрат, при подготовке и проведении испытаний узлов электронной аппаратуры.

Оценка уровней радиационных воздействий внутри КА производится на основе заданных радиационных условий на орбите. Полный состав условий включает факторы космического окружения, которые делятся на факторы прямого и косвенного воздействия. К факторам прямого воздействия относятся:

- солнечные протоны ($1 < E < 100$ МэВ);
- протоны радиационных поясов ($E > 1$ МэВ);
- магнитосферные электроны (35 кэВ $< E < 1$ МэВ);
- электроны радиационных поясов ($E > 1,5$ МэВ);
- галактические лучи ($E > 10$ ГэВ);
- солнечное рентгеновское излучение.

К факторам косвенного воздействия относятся:

- солнечная активность;
- геомагнитная возмущенность (магнитные бури, суббури).

Внешние радиационные условия космического пространства определяют уровни ионизирующего воздействия на конкретные узлы

и элементы КА. При этом следует учитывать ослабления радиационного воздействия, вызванные экранирующими влияниями окружающей аппаратуры. В конечном итоге должны быть получены величины суммарных поглощенных доз ионизирующих излучений при оценке уровней стойкости к поверхностным радиационным эффектам и интегральные энергетические спектры для протонов, а также интегральные спектры линейных потерь энергии для ионов при оценке эффектов от отдельных ядерных частиц. В ряде случаев (например, при использовании изделий оптоэлектроники) необходимо произвести оценку энерговыделения, затрачиваемого на структурные повреждения, и максимальной плотности потока ионов и протонов для оценки максимальной частоты возникновения эффектов от отдельных ядерных частиц. Кроме внешнего воздействия необходимо учитывать при проектировании взаимное воздействие совокупности элементов и блоков с целью обеспечения их помехоустойчивости.

4.1. Воздействие радиационной среды на работу электронных устройств и блоков

Рассмотрим кратко радиационные условия, характерные для функционирования КА. Работоспособность аппаратуры в условиях ионизирующего воздействия оценивается параметром «радиационная стойкость изделия». Под радиационной стойкостью понимается свойство аппаратуры, комплектующих элементов и материалов выполнять свои функции и сохранять параметры в пределах установленных норм во время и после действия ионизирующего излучения. Ионизирующее излучение по физической природе подразделяется на следующие основные виды: α - и γ -излучения, нейтронное излучение, электронное излучение, протонное излучение.

Основные характеристики ионизирующих излучений космического пространства [1]:

- Энергия частиц, выражаемая в электрон-вольтах (эВ),
 $1\text{эВ} = 1,6021 \cdot 10^{-19}$ Дж.

– Плотность потока частиц, определяемая числом частиц N , проходящих через площадку в 1 см^2 за 1 с [N частиц / ($\text{см}^2 \cdot \text{с}$)].

– Интегральный поток Φ , т.е. усредненный поток по всему энергетическому распределению частиц со сложным энергетическим спектром; Φ определяется плотностью потока частиц, умноженной на время облучения [N частиц / см^2].

– Поглощенная доза (D) – это количество энергии, переданное веществу ионизирующим излучением в расчете на единицу массы. За единицу измерения поглощенной дозы в системе СИ принят грэй (Гр); 1 Гр – это доза, при которой массе 1 кг передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж . внесистемной единицей поглощенной дозы является рад, $1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$.

– Мощность поглощенной дозы (P) – значение поглощенной дозы, отнесенное к единице времени [$\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{с})$].

Частицы, находящиеся в естественной космической радиационной среде, по степени влияния на повреждения электроники космического корабля могут быть подразделены на две группы:

1) проникающие частицы, которые включают протоны и более тяжелые ионы всех элементов периодической таблицы;

2) захваченные частицы, которые включают протоны, электроны и более тяжелые ионы.

Захваченные электроны имеют энергию до 4 МэВ , а захваченные протоны и более тяжелые ионы – до сотен МэВ . Проникающее излучение состоит из частиц галактических космических лучей и частиц от солнечных эффектов (массовый выброс из короны и вспышки). Космические лучи характеризуются низким уровнем потоков. При солнечных вспышках периодически происходят выбросы протонов высоких энергий, альфа-частиц, тяжелых ионов и электронов.

Солнечные протоны имеют энергию до 100 МэВ , а энергия более тяжелых ионов достигает диапазона ГэВ . Все частицы являются изотропными и всенаправленными в первом приближении.

В космосе также имеется низкоэнергетичная протонная и электронная плазма с плотностью потока до 10^{12} см²/с. Плазмосфера и низкоэнергетичный (менее 0,1 МэВ) компонент заряженных частиц – это главная составляющая в околоземной среде. Плазмосфера – область, заполненная холодной плазмой, вращающейся с Землей под действием электрического поля коротации. Плазмосфера с внешней стороны заканчивается плазмопаузой, отделяющей ее от плазменного слоя, в котором частицы плазмы движутся под действием конвекционного электрического поля. Во внешних областях магнитосферы и в межпланетном космосе плазма связана с солнечным ветром. Из-за низкой энергии плазмы тонкие слои материала легко задерживают плазму, так что она не опасна для большей части электроники КА. Однако плазма разрушает поверхности материалов, и изменения в плазменной среде могут способствовать поверхностным электростатическим явлениям.

Радиационные эффекты, которые важно учитывать при проектировании приборов и КА, разделяются приблизительно на следующие категории: ухудшение параметров электронных устройств и блоков при поглощении суммарной ионизирующей дозы (total ionization dose, TID), ухудшение параметров электронных устройств и блоков из-за повреждения при замещении и однократных эффектов (Single Event Effect, SEE).

Используется следующая классификация эффектов, возникающих в устройствах от воздействия отдельных ядерных частиц [23].

Единичный сбой (Single Event Upset, SEU) – это изменение состояния или переходный процесс в устройстве, вызванный потоком частиц высокой энергии, таких как космическое излучение или поток протонов. Это явление может встречаться в элементах цифрового, аналогового или оптического устройств либо проявляться в связанных цепях интерфейса (это подмножество известно как переходные процессы от отдельных частиц SETs (Single Event Transients)). Они являются случайными ошибками, при которых однократный сброс

либо перезапись данных устройства сразу переводят его в нормальный режим работы.

Фатальный сбой (Single Hard Error, SHE) – сбой типа SEU, который вызывает постоянные изменения в функционировании устройства. Например, «зависший» бит в памяти устройства.

Эффект «защелкивания» (Single Event Latchup, SEL) – потеря функционирования устройства из-за повышенного уровня электрического тока. Явление SEL может вызвать серьезное повреждение устройства, и требуется несколько циклов включения-выключения питания данного устройства, чтобы восстановить его нормальное функционирование.

Вторичный пробой от воздействия ядерных частиц (Single Event Burnout, SEB) – явление, которое может вызвать выход устройства из строя из-за высокого уровня электрического тока в транзисторах питания.

«Прокол» подзатворного тонкого диэлектрика (Single Event Gate Rupture, SEGR) – появление одиночного иона, который вызван состоянием мощного полевого МОП-транзистора, в свою очередь вызывает появление токопроводящего пути в оксидном слое прибора.

Эффект от отдельных ядерных частиц (Single Event Effect, SEE) – любой эффект, поддающийся измерению, в электрических цепях, вызванный ударом ионов.

Множественный сбой битов (Multiple Bit Upset, MBU) – явление, вызванное потоком частиц высоких энергий, таких как космическое излучение или поток протонов. Оно вызывает множественные сбои и переходные процессы, когда частицы проходят через устройство или систему.

Общая ионизирующая доза в электронике – это совокупность повреждений за длительный период от ионизации из-за протонов и электронов. Она вызывает пороговые сдвиги, утечку тока и отклонения реакции по времени.

Эффект сначала появляется как ухудшение параметров устройств и в конечном счете приводит к функциональному отказу. Возможно уменьшить TID экранирующим материалом, который поглощает большинство электронов и низкоэнергетичные протоны.

Повреждение замещения – совокупное долговременное неионизирующее повреждение из-за протонов, электронов и нейтронов. Указанные частицы вызывают дефекты в оптических материалах, что заканчивается существенными искажениями при передаче информации. Эффект затрагивает функционирование оптронов (часто используемый компонент в силовых блоках), солнечных батарей, ПЗС и линейных биполярных устройств.

Степень экранирования блоков зависит от местоположения устройства. Например, стеклянное покрытие солнечных батарей уменьшает электронное и протонное повреждение из-за поглощения низкоэнергетичных частиц. Увеличение экранирования, однако, обычно неэффективно для оптоэлектронных компонентов, поскольку высокоэнергетичные протоны проникают через самые лучшие материалы корпуса КА. Для датчиков в приборах необходимо понять геометрию расположения измерительного инструмента в отсеке КА для определения уязвимости в среде.

Однократные эффекты происходят в результате возникновения заряда, генерируемого на пути первичных или вторичных ионизирующих частиц, накопления его в узлах схемы и нарушения нормальной работы схемы. Нарушение нормальной работы вызывается более тяжелыми ионами, но для некоторых устройств протоны могут вызвать однократные эффекты. Иногда SEEs вызываются прямой ионизацией протоном, но в большинстве случаев эффект, вызванный протоном, возникает из-за вторичных частиц, которые появляются, когда протон сталкивается с ядром материала в устройстве.

Некоторые однократные эффекты не являются разрушающими, как в случае однократных сбоев (SEUs), однократных переходных процессов (SETs), многобитовых ошибок (MBU), однократных аппа-

ратных ошибок (SHEs) и т.д. Однократные эффекты также могут быть разрушительными, как в случае однократных нарушений срабатывания (SELS), однократных разрушений затвора (SEGRs) и однократных перегораний (SEBs).

Серьезность эффекта может изменяться от искажения данных до полного прекращения функционирования КА в зависимости от типа эффекта и критичности системы, в которой этот эффект происходит. Экранирование не является эффективной защитой для однократных эффектов, потому что они вызываются легкопроникающими высокоэнергетичными частицами.

Предпочтительный метод для борьбы с однократными эффектами состоит в использовании устойчивых к SEE компонентов. Когда устойчивые к SEE компоненты недоступны, схема защиты от защелкивания иногда используется вместе с анализом типа отказа. Неразрушающие эффекты могут быть устранены путем обнаружения ошибок и кодов исправления (EDACs), схем фильтрации и т.д.

Рассмотрим термины и определения (табл. 4.1), используемые при воздействии отдельных тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) на работу интегральных схем (ИС) [24].

Таблица 4.1

Таблица терминов

Термин	Определение
Сбоеустойчивость ИС к одиночным сбоям	Стойкость ИС к одиночным сбоям от воздействия отдельных ТЗЧ и высокоэнергетичных протонов космического пространства
Показатели стойкости ИС к одиночным сбоям при воздействии отдельных ТЗЧ и высокоэнергетичных протонов	Значения частоты сбоев и вероятности возникновения сбоев ИС, характеризующие ее стойкость к воздействию отдельных ТЗЧ и высокоэнергетичных протонов космического пространства

Таблица 4.1 (окончание)

Термин	Определение
Вероятность возникновения одиночных сбоев ИС	Вероятность возникновения хотя бы одного одиночного сбоя ИС при заданном потоке ТЗЧ и/или протонов
Сечение сбоя ИС от протонов и ТЗЧ	Отношение общего количества одиночных сбоев ИС к флюенсу частиц
Пороговая энергия протонов, вызывающая сбой ИС	Значение энергии протона, начиная с которой наблюдаются одиночные сбои в ИС
Пороговое энерговыделение (пороговый заряд) возникновения одиночного сбоя ИС	Энергия (заряд), выделенная ТЗЧ или протоном в чувствительной области элемента ИС, начиная с которой наблюдается появление одиночных сбоев
Пороговые линейные потери энергии иона в веществе	Линейные потери энергии иона, начиная с которых наблюдается появление одиночных сбоев в ИС
Чувствительные области элементов ИС	Области ИС, генерация зарядов в которых приводит к сбоям элементов ИС
Эффективный объем чувствительной области элемента ИС	Объем чувствительной области ИС, в пределах которого происходит собирание неравновесного заряда, вызывающего одиночные сбои
Сечение насыщения сбоев ИС	Сечение сбоев ИС, величина (численное значение, отличное от нуля) которого остается практически постоянной при увеличении энергии протонов и линейных потерь энергии ионов

В космосе суммарная ионизирующая доза вызывается прежде всего протонами и электронами, захваченными в радиационном поясе Земли (РПЗ), и солнечными протонами.

Радиационный пояс Земли (РПЗ) в западной литературе обычно называется поясом Van Allen. Радиационный пояс Земли открыт американскими и советскими учеными С.Н. Верновым и А.Е. Чудаковым в 1957–1958 гг. и представляет собой в первом приближении тороид, в котором выделяется две области:

- внутренний радиационный пояс на высоте ~ 4000 км, состоящий преимущественно из протонов с энергией в десятки МэВ;
- внешний радиационный пояс на высоте $\sim 17\,000$ км, состоящий преимущественно из электронов с энергией в десятки кэВ.

Зависимость положения нижней границы радиационного пояса – долготная. Над Атлантикой возрастание интенсивности начинается на высоте 50 км, над Индонезией – на высоте 1300 км.

Происхождение захваченных частиц с энергией, значительно превышающей среднюю энергию теплового движения атомов и молекул атмосферы, связывают с действием нескольких физических механизмов:

- с распадом нейтронов, созданных космическими лучами в атмосфере Земли (образующиеся при этом протоны пополняют внутренний радиационный пояс);
- с «накачкой» частиц в радиационные пояса во время геомагнитных возмущений (магнитных бурь), которая в первую очередь обуславливает существование электронов внутри пояса;
- с ускорением и медленным переносом частиц солнечного происхождения из внешней во внутреннюю области магнитосферы (так пополняются электроны внешнего пояса и пояс протонов малых энергий).

Проникновение частиц солнечного ветра в радиационный пояс Земли возможно через особые точки магнитосферы (дневные полярные каспы, рис. 4.1), а также через так называемый нейтральный слой

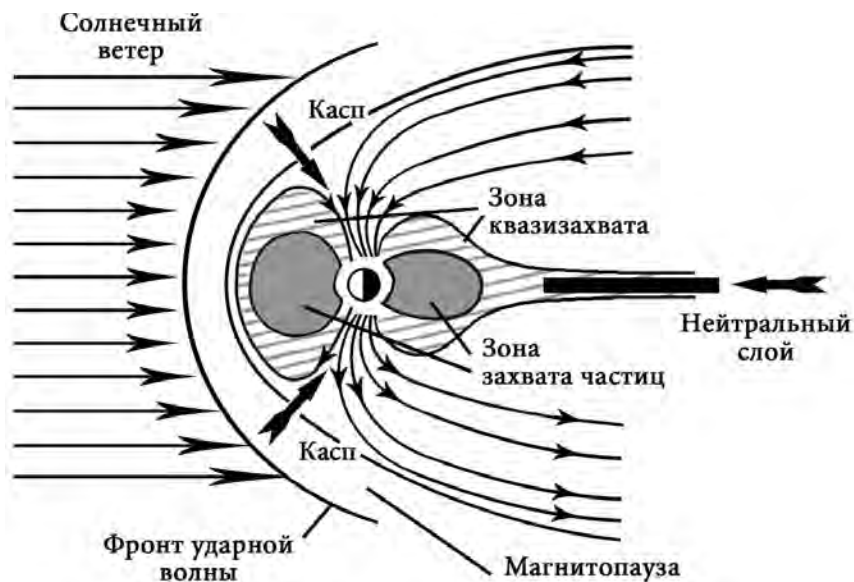


Рис. 4.1. Строение магнитосферы Земли

в хвосте магнитосферы (с ее ночной стороны). В области дневных каспов и в нейтральном слое хвоста геомагнитное поле резко ослаблено и не является существенным препятствием для заряженных частиц межпланетной плазмы.

На рис 4.1 приведено строение магнитосферы Земли в плоскости, проходящей через магнитные полюсы Земли и линию Земля – Солнце [1]. Стрелками указаны области, через которые частицы солнечного ветра проникают в магнитосферу.

Радиационный пояс Земли представляет собой серьезную опасность при длительных полетах КА в околоземном пространстве. Потoki протонов малых энергий могут вывести из строя солнечные батареи и вызвать помутнение тонких оптических покрытий.

Поскольку электроны замедлены, их взаимодействие с орбитальными электронами экранирующего материала вызывает вторичное излучение фотонов, известное как тормозное излучение. Вообще доза

от ионов космических галактических лучей и вторичных протонов незначительна по сравнению с другими источниками. При анализе поверхностных повреждений также важно включать эффекты от очень низкоэнергетичных частиц.

Однократные эффекты могут быть вызваны тяжелыми ионами (солнечные и галактические космические лучи) и в некоторых случаях протонами (захваченными и солнечными) и нейтронами. Повреждения замещения происходит прежде всего из-за захваченных и солнечных протонов, а также нейтронов, которые возникают при взаимодействии первичных частиц с материалами КА и атмосферой.

Электростатический разряд может произойти на поверхности КА из-за низкоэнергетичных электронов. Накопление заряда диэлектриком внутри КА происходит, когда высокоэнергетичные электроны проходят через КА и накапливаются в диэлектрических материалах.

Накопление суммарной ионизирующей дозы вызывает ухудшение работы и отказ в блоках памяти, преобразователях электропитания и т.д. Неионизирующая потеря энергии в материалах (замещения в атомах) вызывает деградацию солнечных батарей, оптоэлектроники и датчиков. Низкоэнергетичные частицы способствуют также эрозии поверхностей. На геостационарных орбитах низкоэнергетичные частицы (менее 40 кэВ) плазмы солнечного ветра способствуют деградации поверхностных материалов. Более высокоэнергетичные частицы, захваченные в поясах Van Allen, и высокоэнергетичные солнечные лучи могут проникать через стеклянную поверхность солнечной батареи и подложку структуры и поэтому вызывать ухудшение работы солнечной батареи. Компоненты микроэлектроники также восприимчивы к высокоэнергетичным частицам даже при том, что они находятся внутри корпуса блока.

В геостационарной среде возникает электростатический заряд поверхности КА. Так как используются различные материалы и так как солнечный свет может освещать только одну сторону КА одновременно, всегда будет некоторое дифференциальное накопление заряда

наряду с абсолютным зарядом. Влияние этого поверхностного накопления заряда на работу КА должно оцениваться как источник сбоев и отказов. Поверхностное накопление заряда может нарушить научные измерения параметров окружающего пространства, когда требуется измерение электростатических полей. По этой причине требуется правильный выбор материала для уменьшения дифференциального накопления заряда. Если электростатический анализ дает значение дифференциальных потенциалов меньше 500 В, не должно быть никаких проблем с зарядом космического корабля. Однако если предполагаемые потенциалы на материалах превышают 500 В, может использоваться специальная программа электростатического анализатора [4].

Поверхностное накопление заряда также увеличивает загрязнение этой поверхности. Загрязняющие вещества притягиваются обратно к заряженным поверхностям и оседают на них. Это изменяет характеристики поверхности. Изменения во вторичных и фотоэлектронных изделиях приводят к изменению электростатических характеристик. Оседание диэлектрических загрязнителей может также уменьшить проводимость поверхности. Если произошли неблагоприятные электростатические эффекты на поверхностях, материалы могут быть повреждены, что может изменить их свойства. В табл. 4.2 перечислены приемлемые и недопустимые поверхностные покрытия и материалы для использования в КА.

Плотности потока протонов, проходящих через КА, наиболее часто используются для исследований стандартной солнечной батареи, когда принимается во внимание толщина стеклянной поверхности элемента. Есть два возможных источника частиц высоких энергий: захваченные электроны, встречающиеся на геостационарной орбите, и протоны от солнечных вспышек, которые могут возникать в любое время в течение 12 лет полета КА. Плотности потоков протонов также используются для определения эффектов повреждения при замещении, однако большинство методов анализа требует, чтобы частицы с

Таблица 4.2

Поверхностные покрытия и материалы
 для использования в космических аппаратах

Приемлемые материалы / покрытия	Недопустимые материалы / покрытия
Окраска (газовая сажа)	Анодирование
GSFC NS43 окраска (желтая)	Материал фиберглас
Окись олова / индия	Окраска (белая)
Цинковый ортотитанат окраска (белая)	Полиэфирная пленка (неокрашенная)
Alodyne	Тефлон (неокрашенный)
	Картон (неокрашенный)
	Силикон
	Кварцевая или стеклянная поверхность (по возможности избегать)

поверхности проходили через материалы, окружающие чувствительные компоненты. Ежедневные значения плотности потоков могут колебаться в пределах от двух до трех порядков в зависимости от уровня активности на Солнце.

Суммарные интегральные плотности потоков солнечных протонов, как правило, оцениваются на основании данных реальных полетов КА. На основании опытных данных можно отметить, что даже при том, что экран поглощает низкоэнергетичные частицы, низкоэнергетичный диапазон спектра заполняется частицами более высокой энергии, теряющими энергию при прохождении через материал.

В случаях, когда трудно оценить толщину экранирующего окружения вокруг чувствительных элементов, более детальный анализ геометрии КА может потребоваться для оценки ожидаемых уровней дозы. Это делается моделированием электронных блоков или прибор-

ров и структуры КА. Объем экранирующего окружения вокруг выбранного чувствительного элемента оценивается с использованием разбиения на секторы и трехмерной трассировки лучей. В случаях, когда отдельные части не соответствуют требованиям проекта верхнего уровня и такие «более трудные» части нельзя заменить, часто выгодно использовать более точные методы определения дозы для отдельных компонентов КА, чтобы оценить их [4].

Один из методов для вычисления суммарной дозы – разбиение на секторы, при этом трехмерная трассировка лучей выполняется за три шага:

- 1) Моделирование структуры КА:
 - разработка трехмерной модели структур КА и компонентов;
 - разработка библиотеки материалов;
 - определение чувствительных мест.
- 2) Моделирование радиационной среды:
 - определение радиационной среды вокруг КА;
 - разработка модели ослабления частиц с использованием теоретических конфигураций экранирования.
- 3) Получение результатов для каждого чувствительного места:
 - деление структурной модели на секторы;
 - отслеживание луча через секторы для вычисления распределения массы материала;
 - использование результатов трассировки лучей для вычисления суммарной дозы с учетом модели ослабления частиц.

Как только основная структурная модель определена, суммарные дозы можно получить для любого места на КА за короткое время (по сравнению с методами Монте–Карло). Для КА со строгим ограничением веса при использовании метода трехмерной трассировки луча требование суммарной дозы проекта может быть определено на уровне блока или устройства, что позволяет избежать ненужного использования дорогих или менее доступных радиационнотойких частей.

Оценки повреждения при замещении. Долговременное повреждение из-за замещения атомов (повреждение при замещении) ухудшает свойства элементов солнечных батарей, оптоэлектроники, отображающих устройства типа ПЗС, и небольшой части элементов с биполярной технологией. Повреждение при замещении вызвано воздействием протонов и электронов на электронные компоненты устройств. На геостационарной орбите степень угрозы такого повреждения бывает от умеренной до серьезной в зависимости от толщины экрана, окружающего электронные компоненты. Датчики, которые не имеют экрана, особенно восприимчивы к этому воздействию.

Повреждение при замещении оценивается комбинированием энергетического спектра протонов при экранировании для материала и результатов лабораторного облучения устройств, чувствительных к замещению атомов. Уровень опасности сильно зависит от типа устройства. Важно иметь в виду, что некоторые оптоэлектронные устройства получают такие значительные повреждения за время одной большой солнечной вспышки, что могут выйти из строя.

Однократные эффекты, вызываемые тяжелыми ионами. Некоторые электронные устройства восприимчивы к однократным эффектам (SEE), например однократные перевороты битов, однократное нарушение срабатывания. Из-за возможности проникновения в чувствительные области электронных устройств и способности ионизировать материалы тяжелые ионы вызывают SEE прямым переносом заряда. Характеристикой, наиболее часто используемой для измерения способности ионов переносить заряд в устройства, является линейная передача энергии (LET). Влияние тяжелых ионов определяется суммарным спектром LET. Как только определенные компоненты выбраны для использования в схемах КА и в случае необходимости проведены лабораторные испытания, спектр LET для тяжелых ионов совместно с характеристиками устройства используется для вычисления уровней SEE.

Источниками тяжелых ионов, которые могут вызывать существенное число SEE, являются галактические космические лучи и солнечные вспышки.

Эффекты, вызываемые галактическими космическими лучами. Для вычислений данного воздействия используются плотности потоков космических лучей для элементов от водорода до урана.

Диапазон параметров космических лучей ограничивается экстремальными значениями в моменты минимальной и максимальной солнечной активности с учетом самых больших значений во время минимальной солнечной активности и самых маленьких значений при максимальной солнечной активности. При длительности полета космического аппарата около 12 лет самые высокие значения должны использоваться для анализа однократных эффектов. Значения плотности потока LET приводятся для самой активной и самой неактивной точек солнечного цикла.

Эффекты, вызываемые солнечными тяжелыми ионами. Тяжелые ионы от солнечных вспышек и массовых выбросов из короны могут также вызывать однократные эффекты. Плотности потоков для элементов от водорода до урана используются для каждодневного вычисления спектра LET в единицах средней величины потока LET в секунду. Интенсивность потоков меняется в течение солнечного события, поэтому значения усредняются за наихудшую неделю солнечного цикла, за самый худший день солнечного цикла и с учетом пика солнечной активности.

Однократные эффекты, вызываемые тяжелыми протонами. В некоторых устройствах однократные эффекты вызываются также и протонами. Протоны из захваченных радиационных поясов и от солнечных событий не вызывают ионизацию ($LET < 1 \text{ МэВ} - \text{см}^2/\text{мг}$), достаточную для переноса заряда, вызывающего SEE в большей части электронной аппаратуры. Чаще протоны вызывают однократные эффекты через вторичные частицы, возникающие при взаимодействии ядер, т.е. через продукты расщепления и распада. Поскольку энергия

протона (а не LET) определяет число вторичных частиц, которые вызывают SEE, чувствительность устройства к этим частицам обычно выражается как функция энергии протона, а не LET.

Эффекты, вызываемые захваченными протонами. На геостационарной орбите захваченные протоны имеют энергии < 2 МэВ, поэтому они не являются существенным фактором, влияющим или повреждающим микроэлектронные элементы.

Эффекты, вызываемые солнечными протонами. Протоны от солнечных событий также будут источником однократных эффектов, опасных для КА. Эти повышенные уровни протонов могут возникнуть в любое время в течение 12-летнего полета, но наиболее вероятно их возникновение во время максимальной солнечной активности. Как и для спектра LET тяжелых солнечных ионов, плотность потока солнечных протонов усредняется за наихудший день, самую плохую неделю и для пика солнечной активности [2].

Влияние на устройства и блоки фона частиц. Фон частиц вызывает увеличение уровней шума в приборах и другой электронике. Это может причинять беспокойство, если необходим низкий уровень шума, например для инструментальных наблюдений. Фон частиц на геостационарной орбите (ГСО) возникает от галактических космических лучей, захваченных электронов и солнечных частиц. Фон от галактических космических лучей довольно устойчив и изменяется медленно в течение солнечного цикла.

Среда захваченных электронов очень изменчива на высоте ГСО, и потоки электронов могут изменяться на несколько порядков за период около месяца. Выбросы частиц от Солнца обычно длятся от нескольких дней до нескольких недель. Потоки частиц во время этих событий изменяются непрерывно во времени и могут достигнуть значений, которые сопоставимы с потоками захваченных электронов. Долговременный поток не учитывается при оценке событий от солнечных частиц, потому что события происходят в короткие периоды времени по сравнению с длительностью полета КА. Такой долговре-

менный поток не имеет существенного влияния. Однако влияние частиц во время солнечных событий вызывает беспокойство, так как оно может воздействовать на инструментальные наблюдения. Чтобы представить более реалистическую картину изменений потока солнечных частиц, нужно использовать данные по потоку солнечных протонов от космического мониторинга среды.

Электростатические эффекты для КА. Поверхностный заряд и диэлектрические эффекты должны также быть оценены для всего времени полета КА. Космический аппарат может накапливать высокие уровни электрического заряда на своей поверхности (низкоэнергетичные электроны) и в диэлектриках (электроны высокой энергии). Профили накопления частиц должны быть проанализированы для возможных поверхностных и глубинных диэлектрических эффектов.

Хотя среду ГСО считают «умеренной», проектировщики обязательно должны учитывать влияние среды из-за ее очень переменного характера, вызванного активностью Солнца [3].

4.2. Воздействие факторов электризации на работу электронных устройств и блоков

При оценке воздействия факторов электризации на работу электронных устройств и блоков КА выделяют два основных механизма воздействия, обусловленного:

- развитием по поверхности КА электростатических разрядов;
- наведением между фрагментами конструкции КА статических разностей потенциалов и проникновением электрических полей в элементы бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА).

Абсолютная зарядка космического аппарата до высоких потенциалов сама по себе не представляет опасности для систем и аппаратуры. Негативное влияние на аппаратуру оказывают электрические разряды, являющиеся следствием дифференциальной и объемной зарядки конструкции КА.

При аккумуляции в диэлектрике зарядов от электронного и протонного излучений космического происхождения возникают электрические пробой и сопутствующие им электромагнитные помехи в широком частотном диапазоне. Эти помехи создают сбои в работе электронного оборудования и могут привести к необратимым повреждениям электронных компонентов радиоэлектронной аппаратуры.

Воздействие электрических разрядов на работоспособность аппаратуры целесообразно разбить на три категории в зависимости от уровня влияния и механизма проникновения:

- 1) электромагнитное излучение, сопровождающее любой разряд на КА;
- 2) помеховый сигнал в аппаратуре, который может возникать при передаче его по магнитному полю за счет существования паразитных индуктивных связей;
- 3) непосредственное воздействие на КА разрядов, возникающих между диэлектриком и электрической цепью либо между диэлектрическими покрытиями спутника и корпусом КА.

Источником электромагнитного излучения (ЭМИ) служит любой электрический разряд. Излучателем переменного электромагнитного поля является плазменный канал разряда. Высокочастотный ток вблизи канала мал, волновое сопротивление – велико. В структуре поля преобладает электрическая компонента. Величина наводимой от ЭМИ помехи зависит от конструктивных особенностей бортовой аппаратуры и параметров ее кабельной сети.

Блоки электронной аппаратуры, как правило, заключены в цельные металлические корпуса, поэтому при рассматриваемых частотах излучаемого поля ослабление его металлическими замкнутыми экранами можно считать бесконечно большим.

Единственными местами, через которые помеховые сигналы могут проникать в БРЭА, являются разрывы экранирования в конструкции кабелей.

1. Уровень помехового сигнала от ЭМИ, возникающего за счет возбуждения электродвижущей силы (ЭДС) в электрической цепи, имеющей разрывы в экране, не превышает десятых долей вольта. При передаче помехового сигнала магнитным полем суммарная ЭДС, наводимая в контуре, достигает величины пикового значения помехового сигнала до нескольких вольт.

2. При помеховых сигналах за счет паразитных емкостных связей считается, что источником помехового сигнала является разряжающая емкость C , которая образована заряженным слоем в диэлектрике.

Значение величины пикового напряжения по полезной нагрузке не зависит от значения полезной нагрузки, величина которой оказывает влияние только на временную зависимость помехового сигнала.

По проведенным оценкам максимальная амплитуда помехового сигнала при разряде в корпусе может составлять от единиц вольт (частично экранированные цепи) до нескольких сотен вольт (неэкранированные цепи).

3. Существует еще один механизм проникновения помехового сигнала в электронные цепи – разряд непосредственно в электрическую цепь.

По оценкам пиковое значение помехового сигнала может достигать единиц киловольт. Аналогичный эффект получается (т.е. проникновение высокочастотной помехи в систему электропитания) при развитии на поверхности солнечных батарей (СБ) электростатических разрядов.

Возникающая разрядка диэлектрических покрытий СБ за счет отсутствия гальванической связи между поверхностью СБ и корпусом КА приводит к возникновению значительных статических разностей потенциалов между шиной питания КА и корпусом объекта. В период солнечной суббури разность потенциалов между поверхностью СБ и корпусом КА может достигать единиц киловольт. За счет наличия между СБ, корпусом КА и шиной питания емкостных паразитных связей будет происходить перераспределение потенциалов, что может

привести к возникновению разности потенциалов между шиной питания и корпусом КА. Проведенные оценки показывают, что величина разности потенциалов сильно зависит от сопротивления утечки между шиной питания и корпусом космического аппарата и (у существующих конструкций КА) может изменяться в широких пределах от сотен вольт до единиц киловольт.

Таким образом, при разработке прогнозной модели электризации бортовой радиоэлектронной аппаратуры и КА и при исследовании на устойчивость к воздействию факторов электризации в наземных условиях необходимо предусмотреть следующие возможные механизмы воздействия факторов электризации:

- электромагнитное излучение плазменного канала электростатического разряда, что соответствует наиболее слабому уровню воздействия, которое имитирует влияние на БРЭА электромагнитных полей, создаваемых разрядом без непосредственной инжекции токов в конструкцию;
- индуктивная наводка, обусловленная токами, протекающими по близлежащим элементам конструкции при развитии на них электростатических разрядов;
- индуктивная помеха, создаваемая при протекании токов непосредственно по испытываемым элементам конструкции;
- емкостная наводка, наводимая в электрических цепях и электронных схемах БРЭА при изменениях потенциалов поверхностей, происходящих при переносе накопленного заряда с одних участков поверхности на другие в результате электростатических разрядов;
- электромагнитная помеха, создаваемая при электростатических разрядах с близлежащих участков поверхности непосредственно на корпус испытываемой БРЭА;
- наведение между шинами питания и корпусом КА статической разности потенциалов, возникающей в результате дифференциальной зарядки поверхностей СБ и корпуса КА;

– зарядно-разрядные процессы, происходящие в объеме диэлектрического покрытия панелей СБ.

Прогнозная модель электризации КА должна учитывать ряд факторов:

- Положение космического аппарата на орбите. Например, орбита ГСО (высота $H \approx 36\,000$ км), лежащая в магнитосфере Земли, характеризуется в отличие от орбит, расположенных в ионосфере, очень низкими концентрациями и высокими температурами частиц. Электростатическая обстановка на КА отличается большой изменчивостью, связанной с его переходами из одной магнитосферной области в другую, заходами в тень Земли, возможными выходами за пределы магнитосферы, а также воздействием на аппарат суббуревых потоков высокоэнергетичных частиц.

- Концентрации и температуры электронов и протонов на ГСО могут существенно различаться. Условия «наихудшего» случая с точки зрения зарядки соответствуют, по результатам измерений, следующим характеристикам электронов:

- концентрация $n_e \approx 1 \text{ см}^{-3}$,
- температура $T \approx 12 \text{ кэВ}$

и ионов:

- концентрация $n_i \approx 0,2 \text{ см}^{-3}$,
- температура $T \approx 3 \text{ кэВ}$.

- Длительность суббурь. Может составлять от нескольких минут до 2–3 суток, кратковременные суббури могут следовать друг за другом через несколько часов. Во время суббурь концентрация плазмы может упасть до 1–10 частиц/м³, а температура – возрасти до 50 кэВ. Наибольший по величине отрицательный потенциал КА был зарегистрирован на американском космическом аппарате ATS-6 и составлял ≈ 19 кВ. В процессах электризации КА на ГСО существенную роль играют фотоэлектронная и вторично-электронная эмиссии. Сильная изменчивость условий, в которых находится КА, способствует возникновению на нем электростатических разрядов.

На основе полученных электризационных моделей необходимо выявить наиболее «слабые» части КА, способные усиленно деградировать, давать сбой или отказывать при возникновении электростатических разрядов, с целью выбора дополнительных пассивных мер защиты либо принятия решения об использовании системы активной защиты изделий (САЗИ).

Принято считать, что пробой между дифференциально заряженными участками поверхности могут возникать при разности потенциалов ≈ 500 В и более, а в объеме диэлектрика – при напряженности электрического поля $E \geq 10^6 - 10^7$ В/см. Для оценки объемной зарядки покрытий и «внутренней» зарядки КА можно принять тормозную способность типичных его материалов равной примерно 10^7 эВ/см (т.е. электроны с энергией 10 МэВ проникают в незаряженный материал на глубину около 2 мкм). Довольно значительные величины заряда (порядка микрокулон), высвобождаемые при разрядах в течение короткого времени (микросекунды), приводят к помеховым токовым импульсам в структурных элементах КА и электромагнитным помехам внутри него.

Разряды из изоляции кабеля непосредственно на проводник приводят к паразитным импульсам в цепях питания аппаратуры, логических цепях, каналах телеметрии. Пробои с выбросом материала диэлектрика в виде плазмы во внешнюю среду вызывают постепенную деградацию поверхностей в результате порчи приповерхностной структуры материала и загрязнений его поверхности. Необходимо также учитывать возможность инициирования отдельных интенсивных разрядных импульсов (даже при уровне зарядки меньше пороговой) в результате удара микрометеоритов о КА или прохождения через материал тяжелых ядер ГКЛ и СКЛ с энергиями порядка сотен мегаэлектрон-вольт и более.

Электризация КА в значительной мере определяется магнитосферой Земли. Магнитосфера Земли – полость в космическом пространстве, формируемая воздействием солнечного ветра на магнитное поле

Земли. Солнечный ветер, поток заряженных частиц, вытягивает магнитное поле, формируя протяженный хвост, простирающийся далеко за орбиту Луны (рис. 4.2).

Плазменное окружение КА в магнитосфере характеризуется двумя основными областями: плазмосферой и плазменным слоем.

Плазмосфера – это самая внутренняя область магнитосферы ($L < 5$), является естественным продолжением ионосферы. Она заполнена плазмой с концентрацией частиц $n_{e,i} \approx 100 \text{ см}^{-3}$ и температурой холодной плазмы порядка 5 эВ. Ионосфера Земли, начиная с высот 1000–2000 км, плавно переходит в плазмосферу – область, заполненную холодной плазмой, вращающейся с Землей под действием электрического поля коротации.

Плазмосфера с внешней стороны заканчивается плазмопаузой, отделяющей ее от плазменного слоя, в котором частицы плазмы движутся под действием конвекционного электрического поля.

В составе плазмы преобладают ионы H^+ , на ионы O^+ и He^+ приходится примерно 20 % общей плотности энергии. Источником этих

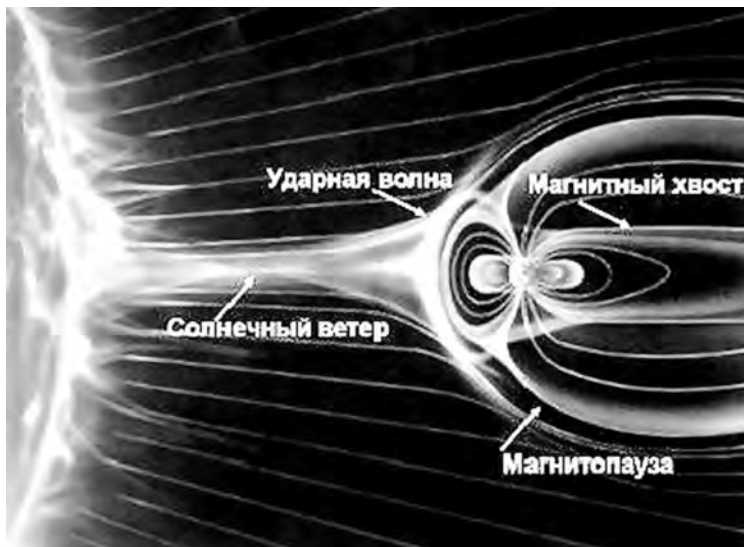


Рис. 4.2. Конфигурация геомагнитных силовых линий

ионов считается ионосфера. Вблизи границы плазмосферы, отделяющей ее от плазменного слоя, температура частиц повышается примерно до 10 эВ. За пределами плазмосферы плотность плазмы резко падает (почти в 10 раз) и становится примерно равной значению, характерному для межпланетного пространства.

В плазмосфере и дальше вплоть $L = 8 \div 10$ расположены радиационные пояса Земли. (Расстояния в магнитосфере принято измерять в единицах параметра Мак-Иллвайна, L . Он определяется соотношением $L = R \cdot \cos 2\theta$, где R – расстояние рассматриваемой точки от центра Земли, измеренное в земных радиусах, θ – магнитная широта.)

По мере удаления от Земли в экваториальной плоскости силовые линии пересекают поверхность Земли на более высоких широтах.

На широте $\theta \approx 66^\circ$ магнитного поля имеется авроральная зона (авроральная зона – это круговая зона, объединяющая все точки, угловые расстояния которых от любого магнитного полюса находятся между $20\text{--}30^\circ$ широты полуденной части данной зоны и равны $\approx 78^\circ$, а полуночной – около 70° . Геомагнитные силовые линии авроральной зоны уходят в плазменный слой хвоста магнитосферы.) Наиболее интенсивное излучение, известное как полярное сияние, происходит в верхних слоях атмосферы на высоте 80–100 км и связано с магнитными бурями и вспышками на Солнце.

Плазменный слой – это область за плазмопаузой, располагающаяся в окрестности экваториального сечения хвоста магнитосферы. Подобно кольцевому току он состоит из горячей разряженной плазмы с концентрацией заряженных частиц порядка $1\text{--}10 \text{ см}^{-3}$ и температурами $T_e \approx 1 \text{ кэВ}$, $T_i \approx 1 \div 10 \text{ кэВ}$. Плазменный слой простирается до $L \approx 6$. В спокойные периоды он состоит на 90 % из протонов и на 10 % из ионов O^+ и He^+ , в активные периоды в нем наблюдается повышенное (более 50 %) содержание O^+ . Этот слой является смешанной зоной, содержащей частицы как земного, так и солнечного происхождения.

В момент заходов космического аппарата в тень Земли и выходов из нее электростатическая обстановка на КА может существенно

меняться, особенно в том случае, если они находятся на высоких орбитах. Прекращение фотоэмиссии с поверхности КА приводит к сдвигу потенциала в отрицательную сторону на несколько киловольт. Этот процесс, однако, осуществляется не мгновенно, а занимает некоторое время, определяющееся видимыми с аппаратов размерами солнечного диска и рефракцией солнечных лучей в земной атмосфере.

На ГСО космический аппарат функционирует в среде магнитосферной плазмы, подвергаясь суббуревым возмущениям, вызванным солнечной активностью и связанными с ней крупномасштабными неоднородностями солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Характерные времена нерегулярности в солнечном ветре могут составлять от нескольких секунд до нескольких суток.

Детальный анализ экспериментальных данных о напряженности электрического поля у поверхности геостационарного КА показывает, что напряженность меняется вдоль орбиты, причем отмечаются как регулярные вариации напряженности, так и нерегулярные, спорадические его возмущения. Первые связаны с изменением условий освещенности участков поверхности КА солнечным ультрафиолетовым и рентгеновским излучением, а также изменением космической плазмы в окрестности аппарата в процессе его суточных переходов из одной структурной области магнитосферы в другую. Такими структурными областями перехода геостационарного КА являются плазмосфера и плазменный слой, границы которых медленно смещаются в периоды магнитосферных возмущений [3].

В периоды магнитосферных суббурь на регулярные суточные вариации потоков энергетичных частиц накладываются еще и суббуревые возмущения, отражающие процесс инжекции горячей плазмы в области ГСО. Космические исследования показали, что время от времени в магнитосфере Земли возникают мощные процессы с взрывообразным началом и с общей продолжительностью около часа, которые названы суббуриями. Именно магнитосферные суббури

порождают разнообразные и яркие картины в свечении верхней атмосферы Земли – мощные полярные сияния.

Геостационарный КА подвергается воздействию этих возмущений, как правило, находясь в плазменном слое магнитосферы, в котором часто появляются, обычно в ночном секторе местного времени, суббуревые потоки частиц.

Характерная длительность суббурь составляет 2–3 часа, однако при наложении одной суббури на другую возникают магнитные бури, охватывающие весь земной шар и длящиеся до нескольких суток. При этом возможны особенно сильные («аномальные») магнитосферные возмущения, связанные с выходом магнитопаузы на дневные участки ГСО. Суммарная доля таких магнитовозмущенных событий, в которых КА находится вне плазмосферы, составляет примерно 20 % от общего числа событий суббуревой инжекции.

Таким образом, изменение электроплазменной обстановки на геостационарном КА при его суточном движении по орбите складывается из следующих составляющих:

- регулярной, плавной суточной вариации;
- фиксированных по местному времени подспутниковой точки особенностей, вызванных резким изменением освещенности отдельных участков поверхности КА; сюда следует отнести как моменты захода КА в тень Земли и выхода из нее, так и затенение отдельных частей поверхности КА деталями его конструкции;
- возмущений, связанных с переходами КА через плазмопаузу и кромку плазменного слоя;
- возмущений, вызываемых изменением среды во время суббурь.

Сумма первых трех составляющих называется «спокойная суточная вариация». Первая из них вообще не представляет проблемы в смысле электроплазменной опасности для аппаратуры и бортовых систем КА. Вторая состоит, в свою очередь, из двух слагаемых, первое из которых существенно зависит от геометрии КА, а второе связано с периодами (в 3 – 4 недели) его нахождения в районах весеннего и

осеннего равноденствий. Наибольшая величина теневого времени геостационарного КА составляет примерно 72 мин.

Суточное давление на ГСО через структурные области спокойной магнитосферы осуществляется следующим образом. Начиная примерно от полуденного меридиана спутник движется в холодной плазме плазмосферы. Потенциалы его затененных поверхностей при этом отрицательны и по величине не превышают 10 В, тогда как на освещенных участках вследствие фотоэмиссии потенциалы могут быть и плюсовыми, но того же порядка величины.

В момент времени $t_1 \approx 24 - 1,7 Kp$ (где $Kp = \sum Kp/8$; $1 \leq Kp \leq 5$, Kp – индекс геомагнитной активности, определяемый наземными геомагнитными станциями) КА выходит из вечернего «выступа» плазмосферы, при этом плотность холодной плазмы резко уменьшается, потенциалы на затененных поверхностях аппарата растут по величине, а в материалах конструкции КА начинаются переходные электрические процессы.

В момент времени $t_2 \approx 25,5 - 1,5 Kp$ ($Kp < 5$) КА входит в плазменный слой, в это время отрицательные потенциалы затененных поверхностей могут достигать величин от сотен вольт до единиц киловольт. Эмпирических соотношений для определения моментов t_3 и t_4 , характеризующих соответственно моменты выхода КА из плазменного слоя и входа в плазмосферу в утреннем секторе, пока не установлено. Это, однако, не столь важно с точки зрения электростатической обстановки на КА, потому что, хотя в спокойных условиях моменты t_1, t_2, t_3, t_4 и характеризуют наиболее резкие изменения условий электризации спутника на ГСО, они, судя по результатам их замеров на космическом аппарате «Горизонт», не вызывают сильных изменений напряженности электростатического поля на нем. Данное обстоятельство, помимо принятых мер пассивной (конструктивной) электростатической защиты КА, может быть объяснено еще и тем, что потенциалы диэлектрических покрытий зависят в первую очередь от потоков электронов с энергией, превышающей некоторую пороговую

величину (10 – 30 кэВ), а в спокойных геомагнитных условиях таких частиц немного [3].

Однако в условиях суббурь, локализующихся в основном в ночном секторе орбиты примерно от 19⁰⁰ до 09⁰⁰ LT, переходы КА через плазмопаузу и кромку плазменного слоя решающим образом влияют на протекание электроразрядных процессов в поверхностных материалах космического аппарата.

В периоды суббуревых возмущений величина потоков энергетичных электронов и их влияние на эффективную температуру космической плазмы в области ГСО повышаются на несколько порядков. Если КА в это время находится внутри плазмосферы (т.е. в позднем утреннем, дневном или вечернем секторах орбиты), то холодная плазма «экранирует» изменение его потенциала. Если же КА в момент суббури находится вне плазмосферы (в околополуденном секторе орбиты), то потенциалы затененных поверхностей (а в тени Земли – и абсолютный потенциал КА) будут испытывать «всплеск» с амплитудой более 10 кВ.

На дневном участке орбиты, как уже говорилось, сильных возмущений электроплазменной обстановки на геостационарном КА можно ожидать лишь в периоды продолжительных возмущений магнитосферы (магнитных бурь), когда плазмосфера настолько сжата, что вся ГСО располагается вне ее.

Для анализа возможного вклада суббурь в циклограмму электростатической нагруженности КА на ГСО можно воспользоваться данными натурных экспериментов по регистрации годового количества инъекций и сбоев аппаратуры КА, связанных с влиянием на нее геомагнитной обстановки.

Приближенную оценку числа суббуревых событий за 11-летний цикл солнечной активности можно получить, используя данные о частоте событий СКЛ (в зависимости от фазы солнечного цикла, построенного на примере 19-го и 20-го циклов солнечной активности и учитывающей частицы с уровнем энергии $E \geq 1$ МэВ). Приняв во вни-

мание, что процентное распределение событий СКЛ по годам совпадает с процентным распределением суббуревых инъекций, получим суммарное время пребывания КА на ГСО в условиях суббури за 11-летний цикл, равное примерно 150 суткам при общем числе инъекций около 300 (из них 60 – двухсуточных и 240 – трехчасовых).

Наибольшая электростатическая опасность для КА на ГСО существует при одновременности двух событий: его нахождения в тени Земли и в условиях геомагнитной суббури. Общее время пребывания геостационарного КА в тени за 11-летний солнечный цикл составляет $\approx 82 \text{ ч/год} \times 11 \text{ лет} \approx 890 \text{ часов}$. В 11-летний период (4015 суток = 93360 ч) укладываются около 32120 трехчасовых суббуревых событий. Следовательно, математическое ожидание трехчасовой суббури $W_{3 \text{ час}} = 24013120 = 0,0075$, а двухсуточной бури $W_{2 \text{ сут}} = 60/2008 = 0,03$. Ожидаемое суммарное время нахождения геостационарного КА в тени Земли в условиях трехчасовой бури составляет $t_{3 \text{ ч}}^T = 890 \times 0,0075 = 6,7 \text{ часов}$. Ожидаемое суммарное (за солнечный цикл) время нахождения КА в тени Земли в условиях двухсуточной бури $t^T = 890 \times 0,03 = 26,7 \text{ часов}$. Ожидаемое полное время нахождения геостационарного КА в тени Земли в условиях сильных магнитных возмущений (за одностолетний солнечный цикл) $t^T \Sigma = 33 \text{ часа}$.

Значение радиационной электризации КА как фактора негативного влияния на работоспособность бортовой аппаратуры и бортовых систем, срок службы солнечных батарей, терморегулирующих покрытий, оптики и т.п. не только не снижается, но даже возрастает в связи с технологическим совершенствованием аппаратуры, расширением диапазона используемых орбит, класса решаемых задач, резким повышением требований к срокам активного существования КА. Несмотря на принимаемые защитные меры, аномалии в работе КА (особенно высокоорбитальных), связанные с воздействием статического электричества, продолжают иметь место. По зарубежным данным, более 50 % всех регистрируемых крупных аномалий в работе КА вызваны воздействием внешней среды, в которых так или иначе участвует статическое электричество.

Для того чтобы иметь возможность проанализировать уровни и динамику зарядки КА, следует адекватно спрогнозировать условия плазменной среды на орбите, т.е. необходимо составить прогнозную модель (физическую). Оценка орбитальных условий при этом должна базироваться на учете:

- вариаций параметров среды при изменении высоты полета КА и географической широты;
- времени полета КА по отношению к циклу солнечной активности, влияющему на суббуревую активность магнитосферы и авроральные высыпания электронов в полярных областях;
- изменений солнечного излучения в периоды заходов КА в зону тени;
- прохождения КА радиационных поясов;
- выхода геостационарных КА за пределы магнитосферы и перехода из одной магнитосферной области в другую;
- суточных и сезонных изменений угла падения солнечных лучей;
- орбитальных изменений ориентации КА по отношению к Солнцу.

Концентрация и температуры электронов и протонов на ГСО могут существенно различаться. В процессе электризации КА на ГСО важную роль играют фотоэлектронная и вторичная электронная эмиссия. Сильная изменчивость условий, в которых находится КА, способствует возникновению на нем электростатических разрядов.

Таким образом, проблема электризации КА, эксплуатируемых на геостационарных и высокоэллиптических орбитах, связана с воздействием космической плазмы во время и после геомагнитных бурь и суббурь, в результате чего выходят из строя БРЭА, СУ и навигационное оборудование [3].

Поверхность КА полностью покрыта диэлектрическими материалами. Отдельные участки могут оказаться частично или полностью в тени. Дифференциальное заряджение представляет наибольшую

опасность для функционирования БРЭА из-за возникновения электрических разрядов между отдельными участками поверхности и элементами конструкции и кабельной системой аппаратуры.

В области ГСО во время геомагнитных бурь значение общего потенциала КА, рассматриваемое как единое проводящее тело, составляет 10 – 20 кВ. Положительное заряджение КА происходит в режиме торможения уходящих с поверхности вторичных фотоэлектронов, поэтому положительный потенциал при общей зарядке КА при освещении Солнцем не превышает 10 В. Можно сделать вывод о том, что единственными причинами электростатического разряда (ЭСР) при электризации КА могут выступать локальные разности потенциалов между различными материалами, изолированными или заземленными металлическими деталями. Речь в таком случае идет о скользящем искровом разряде.

Воздействие электростатического разряда на работоспособность бортовой радиоэлектронной аппаратуры и бортовой кабельной сети (БКС) осуществляется:

- электромагнитным излучением, сопровождающим любой разряд на объекте;
- помеховым сигналом, проникающим в электрическую цепь при передаче его по магнитному полю за счет различных индуктивных связей между диэлектриком и корпусом КА, а также между диэлектриками и электрической сетью, передачей помеховых сигналов за счет емкостных связей;
- непосредственным воздействием разряда на кабель.

Уровень напряженности критического поля, при котором начинают возникать электростатические разряды в полимерных материалах поверхности КА, находящегося в околосредней космической плазме во время суббури, равен 2×10^7 В/м. Максимальное значение (2×10^8 В/м) электрического поля в экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ) на порядок превышает уровень критического поля. Это позволяет сделать вывод, что даже специально отобранные полимерные

материалы для поверхности КА не могут обеспечить исключение опасного случая ЭСР в натуральных условиях. В лучшем варианте эффективный полимерный материал способен лишь уменьшить частоту разрядов.

Полное исключение возникновения ЭСР путем подбора материала внешней поверхности КА в настоящее время невозможно. Удастся снизить частоту и мощность электростатических разрядов, но не исключить их полностью. Поэтому необходимо принимать дополнительные меры для безотказной работы электроники КА при воздействии ЭСР. Основными рецепторами импульсных помех от электростатических разрядов являются фрагменты БКС, проложенных по внешней поверхности КА. ЭСР моделируется импульсным источником тока с типичными характеристиками, соответствующими натуральным условиям (импульсный ток 100 А, время нарастания тока 10 нс, спад тока 100 нс).

4.3. Электромагнитная совместимость электронных устройств и блоков

Электромагнитная совместимость – это способность электронных устройств и блоков одновременно функционировать в реальных условиях эксплуатации с требуемым качеством при воздействии на них непреднамеренных радиопомех и не создавать недопустимые радиопомехи другим устройствам. Взаимные воздействия определяются электромагнитной обстановкой – совокупностью реальных электромагнитных явлений, существующих в данном месте, в частотном и временном диапазоне. При проектировании необходимо обеспечить и подтвердить при испытаниях электромагнитную совместимость электронных устройств и блоков, расположенных в отсеках КА [36], т.е. обеспечить способность электронных устройств и блоков эффективно функционировать с заданным качеством в конкретной электромагнитной обстановке, не создавая при этом недопустимых электромагнитных помех другим устройствам.

В зависимости от среды распространения электромагнитные помехи могут разделяться на индуктивные и кондуктивные. Индуктивными называются электромагнитные помехи, распространяющиеся в виде электромагнитных полей в непроводящих средах. Кондуктивные электромагнитные помехи представляют собой токи, текущие по проводящим конструкциям. Деление помех на индуктивные и кондуктивные условно. В реальности протекает единый электромагнитный процесс, затрагивающий проводящую и непроводящую среду. В ходе распространения многие помехи могут превращаться из индуктивных в кондуктивные и наоборот. С одной стороны, переменное электромагнитное поле способно наводить токи в соединительных кабелях, которые далее распространяются как классические кондуктивные помехи. С другой стороны, токи в кабелях сами создают электромагнитные поля, т.е. индуктивные помехи.

Различают кондуктивную эмиссию, излучаемую эмиссию, эмиссию или уровень излучения, устойчивость или восприимчивость к излучению. Предельно допустимые нормы соответствующих воздействий оговариваются в соответствующих нормативных положениях.

Требования к оборудованию и подсистемам, планируемым к применению, различают как:

- обязательные;
- ограниченные предельными значениями;
- определенные в соответствующих требованиях заказывающего органа;
- непредъявляемые.

Учет возможных электромагнитных излучений базируется на методах теории вероятности и математической статистики. Заданные в ТЗ на разработку оборудования требования по электромагнитной совместимости должны быть подтверждены на разработанном изделии экспериментально.

В этом разделе излагаются требования к электромагнитным воздействиям – излучению и восприимчивости и связанные с ними некоторые методы испытаний.

Можно сформулировать общий подход к организации процесса испытаний на электромагнитную совместимость:

- Выявляются характерные электромагнитные воздействия по месту воздействия, частотным характеристикам, амплитудам, формам импульсов.

- Определяются предельно допустимые нормы соответствующих воздействий. Например, устойчивость к излучаемым электромагнитным помехам определяется ГОСТ Р 51317.4.3-99 и ГОСТ Р 51317.4.1-2000, в которых устанавливаются требования к электротехническим, электронным и радиоэлектронным изделиям, оборудованию и системам по устойчивости к электромагнитным помехам и соответствующим видам испытаний применительно к условиям электромагнитной обстановки при эксплуатации технических средств. Устойчивость к кондуктивным помехам, наведенным радиочастотными электромагнитными полями, определяется ГОСТ Р 51317.4.6-99.

- Разрабатывается схема, реализующая только указанный вид воздействия. Схема должна позволять плавно увеличивать параметры воздействующего фактора.

- Проводится тестирование схемы совместно с испытуемым изделием с целью проверки достоверности испытаний.

- Проводятся испытания системы при плавном увеличении воздействий с целью определения уровня сигнала помехи.

- Уровень начала деградации (снижения показателей качества функционирования) испытуемого изделия будет предельным уровнем восприимчивости.

- Если уровень сигнала помехи в любом проводе на каком-либо участке изменения входного воздействия превышает заданный допустимый уровень, то испытуемое устройство не соответствует заданным требованиям. Данные измерений представляются в виде графиков.

Рассмотрим перечень некоторых видов эмиссии и методы экспериментального определения соответствующих воздействий.

1. Кондуктивная эмиссия для проводов питания (для частот от 10 kHz до 10 MHz). Эти требования распространяются в диапазоне от 10 kHz до 10 MHz на все силовые провода, включая обратные, которые подают энергию от внешних источников к испытываемому оборудованию. Уровень наведенной на силовые провода помехи не должен превышать требуемых значений.

2. Чувствительность к воздействию электромагнитных помех в силовых проводах (при изменении частот от 30 Hz до 150 kHz). Это требование применимо к оборудованию и подсистемам переменного тока с силой тока ≤ 100 А на фазу и подводящим силовым проводам, исключая обратные провода. Если оборудование питается от источника постоянного тока, это требование применяется в диапазоне частот от 30 Hz до 150 kHz. Если оборудование питается от источника переменного тока, это требование применяется в диапазоне начиная со второй частотной гармоники источника до 150 kHz.

3. Проверка чувствительности (устойчивости) к воздействию синусоидальных электромагнитных помех (в диапазоне частот от 10 кГц до 200 МГц) на все соединительные провода. Это требование применимо ко всем соединительным проводам, включая силовые кабели.

4. Чувствительность к воздействию электромагнитных помех, наводка на входные провода, импульсное возбуждение.

5. Чувствительность к воздействию электромагнитных помех, кратковременные затухающие синусоидальные помехи, кабели и силовые провода (в диапазоне частот от 10 kHz до 100 MHz).

6. Чувствительность к электромагнитному излучению, электрическому полю (в диапазоне частот от 10 kHz до 18 Hz). Это требование применяется к излучениям от оборудования и подсистем в экранирующих кожухах, всем соединительным кабелям и антеннам, разработанным для постоянной установки на оборудовании (приемники и передатчики в режиме готовности). Требование не применя-

ется к основным частотам передатчиков и вынужденно занятой полосе частот сигнала.

7. Оценка наводок на кабельные жгуты. Гармонические воздействия с помощью электромагнитных клещей подаются на линию питания испытуемого устройства. Это требование применимо ко всем соединительным кабелям космических аппаратов и наземных систем, включая силовые.

8. Чувствительность к воздействию электромагнитных помех, наводка на входные провода, импульсное возбуждение. Это требование применимо ко всем соединительным кабелям.

9. Чувствительность к воздействию электромагнитных помех, кратковременные затухающие синусоидальные помехи, кабели и силовые провода (для диапазона частот от 10 kHz до 100 MHz).

10. Воздействие электромагнитного излучения, электрического поля (в диапазоне частот от 10 kHz до 18GHz). Испытания проводятся в экранированной безэховой камере. Безэховость камеры необходима для исключения влияния на результат переотражения излучаемых полей.

Для каждого определения соответствующих воздействий проводятся испытания, для которых разрабатывается соответствующая методика и схема испытаний.

Рассмотрим **пример проведения испытания на кондуктивную эмиссию для проводов питания (для частот от 10 kHz до 10 MHz)**. Эти требования распространяются в диапазоне частот от 10 kHz до 10 MHz на все силовые провода, включая обратные, которые подают энергию от внешних источников к испытуемому оборудованию. Уровень наведенной на силовые провода помехи не должен превышать требуемых значений.

Целью испытания является проверка того, что уровень наводок на входные силовые провода, включая обратные, от испытываемого оборудования не превышает установленных пределов.

Для испытания необходимо следующее оборудование:



Рис. 4.3. Схема калибровки

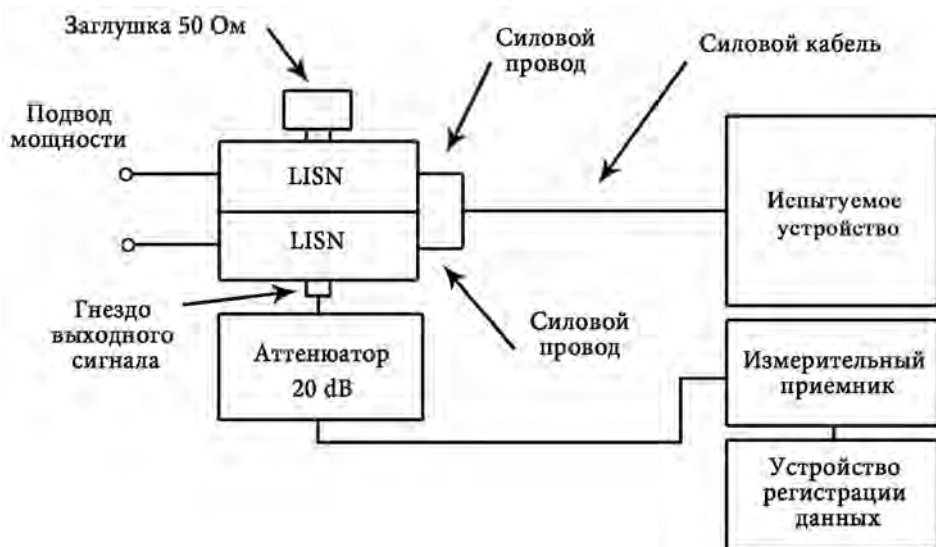


Рис. 4.4. Схема испытаний

- измерительный приемник;
- устройство регистрации информации;
- генератор сигналов;
- аттенюатор, 20 dB, 50 Ом;
- осциллограф;
- устройство стабилизации импеданса линии (LISN).

Последовательность действий на испытательной установке состоит из двух этапов – калибровки и собственно испытаний.

Калибровка. В процессе калибровки (проверки измерительной системы) по схеме (рис. 4.3) контролируются уровни известных сигналов, подаваемых с генератора и регистрируемых приемником.

В схеме применяется блок LISN – Line Impedance Stabilization Network – устройство стабилизации импеданса линии или эквивалент сети – устройство, необходимое для внесения в испытываемую сеть некоего комплексного сопротивления, используемого в качестве фильтра. Благодаря ему подавляющая часть вводимой энергии сигналов помех распространяется в сторону испытываемого устройства и практически не воздействует на источник питания.

Испытания оборудования. Для проведения испытаний собирается схема (рис. 4.4), при помощи которой измерительным приемником регистрируется уровень помех в каждом силовом проводе и сравнивается с допустимым уровнем. Приемник сканирует весь заданный диапазон частот в автоматическом режиме и формирует протокол результатов испытаний в сравнении с допустимым уровнем. Допустимый уровень может быть задан Заказчиком в аналитическом виде, в виде таблицы или просто ссылкой на соответствующий ГОСТ. Могут быть заданы пиковые значения сигнала помехи, квазипиковые или средние. В любом случае результаты испытаний оборудования оцениваются следующим образом: если уровень сигнала помехи, формируемый испытываемым изделием в каждом проводе питания во всем частотном диапазоне, не превышает заданный допустимый уровень, то испытываемое устройство соответствует заданным требованиям по

уровню кондуктивных помех в заданном частотном диапазоне. Если уровень сигнала помехи в любом проводе питания на каком-либо участке частотного диапазона превышает заданный допустимый уровень, то испытываемое устройство не соответствует заданным требованиям.

Данные измерений должны быть представлены следующим образом:

- непрерывно и автоматически вычерчивается график выходного сигнала в координатах «амплитуда – частота», данные, измеренные вручную, могут использоваться только для проверки графика;

- на каждом графике должны быть автоматически проставлены заданные пределы и все установки измерительного приемника, включая дату и время испытаний;

- на каждом графике при измерениях должно быть обеспечено минимальное разрешение, равное по амплитуде 1 дБ и по частоте 1 %, или удвоенной ширине полосы пропускания измерительного приемника, в зависимости от того, какая величина дает меньшую точность.

Пример проведения испытания чувствительности (устойчивости) к воздействию синусоидальных электромагнитных помех (в диапазоне частот 10 кГц до 200 МГц) на все соединительные провода. Это требование применимо ко всем соединительным проводам, включая силовые кабели.

При воздействии на оборудование калиброванными сигналами, уровень которых соответствует требованиям, в оборудовании не должны появляться неисправности, деградация характеристик, отклонения от установленных значений, выходящие за пределы допустимых отклонений, перечисленных в спецификациях на оборудование и подсистемы.

Это испытание проводится с целью проверки стойкости оборудования к РЧ-помехам, наводимым на присоединенную к оборудованию совокупность межблочных соединительных жгутов.

Для испытания требуется следующее оборудование:

- измерительные приемники;
- токовый инжектор (максимальные значения вносимых потерь задаются, минимальные значения потерь не нормированы и носят рекомендательный характер);
- токовые зонды;
- калибровочное приспособление: коаксиальная линия с импедансом 50 Ом, с коаксиальными соединителями на обоих концах и токовым зондом, расположенным в центральной части коаксиального проводника;

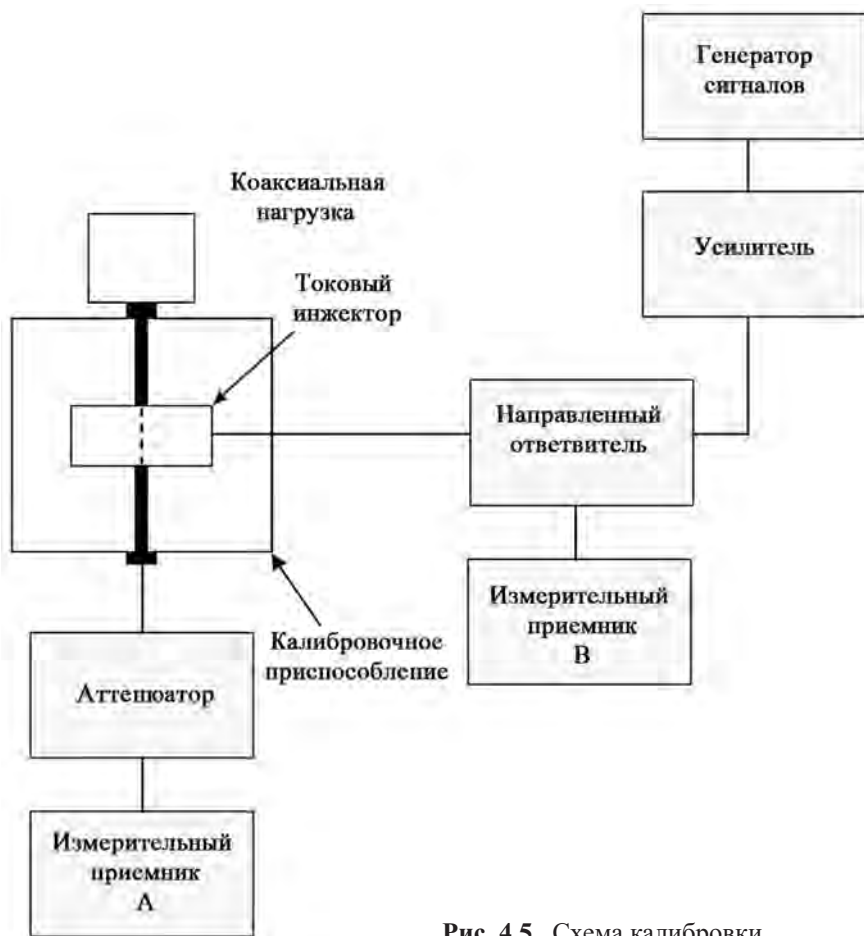


Рис. 4.5. Схема калибровки

- направленные ответвители;
- генераторы сигналов;
- графопостроитель;
- аттенюатор, 50 Ом;
- коаксиальная нагрузка, 50 Ом;
- усилитель мощности;
- устройство стабилизации импеданса линии (LISN).

Калибровка. Для калибровки схемы испытаний необходимо подготовить испытательное оборудование в соответствии с рекомендациями по их обслуживанию. Собрать измерительную схему в соответствии с рис. 4.5 для калибровки токовых инжекторов.

1. Поместить токовый инжектор в центральной части приспособления для калибровки.

2. Подключить один конец коаксиального кабеля калибровочного приспособления к коаксиальной нагрузке 50 Ом, подсоединить другой конец кабеля через аттенюатор к измерительному приемнику А.

Цель калибровки состоит в следующем: для каждой частоты заданного частотного диапазона подбирается такая величина выходного сигнала с задающего генератора, при которой в линии калибровочного приспособления амплитуда сигнала помехи соответствует требованиям. Амплитуда сигнала помехи контролируется измерительным приемником А через аттенюатор. На каждой частоте амплитуда сигнала на выходе генератора изменяется от минимальной в сторону увеличения. При достижении требуемой величины сигнала помехи фиксируется величина выходного сигнала задающего генератора измерительным приемником В. При таком подходе учитываются неоднородности линий связи, нелинейность характеристик усилителя и инжектора.

Испытание оборудования. Необходимо собрать измерительную схему для испытания оборудования в соответствии с рис. 4.6.

Последовательно изменяя частоту задающего генератора и устанавливая на его выходе величины выходных сигналов, определенные при калибровке, пройти весь частотный диапазон, контролируя работоспособность испытуемого оборудования.

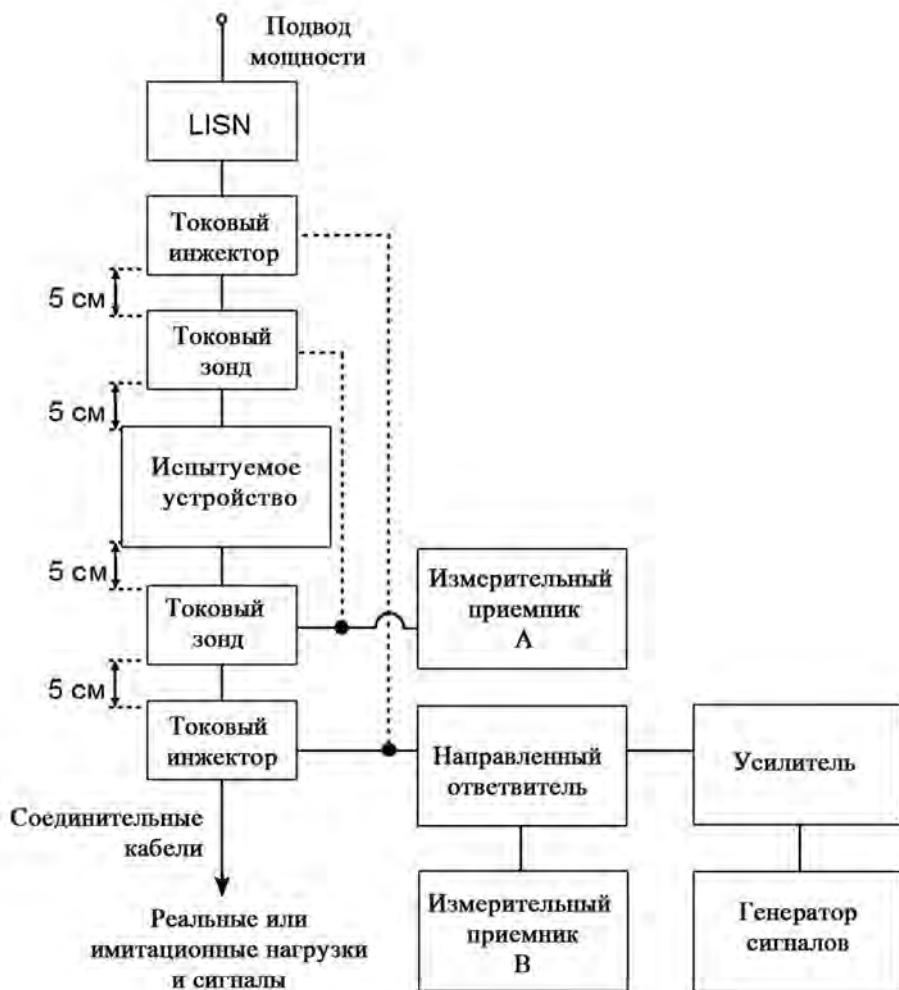


Рис. 4.6. Схема измерений

Данные, полученные в результате испытания, должны быть представлены в виде:

- графиков зависимости амплитуды от частоты для уровней мощности прямой волны, необходимых для достижения уровней калибровочных сигналов;

- таблиц с данными о сканированном диапазоне частот и заключения о соответствии требованиям оценки чувствительности в соответствии с требованиями для каждого интерфейсного соединителя.

Там же для заданного спецификациями диапазона частот должны быть представлены данные порогового значения «восприимчивость – частота» для всех диапазонов частот, где восприимчивость обнаружена.

5. ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Начиная с бортовой системы управления для космического аппарата «KazSat» [7] блоки силовой автоматики построены по двухуровневому принципу: на верхнем находится блок управления и контроля (БУК), имеющий собственную вычислительную систему (ВС), на нижнем – БУ1, БУ2, ..., и т.д., блоки управления различными смежными системами.

Программное обеспечение (ПО) систем организации вычислительных процессов (СОВП) бортовой цифровой вычислительной системы (БЦВС) и БУК построено по единой идеологии, представляет собой совокупность программных модулей, структурированную по иерархическому принципу (рис. 5.1), и подразделяется на программное обеспечение базовой операционной системы (БОС), системы контроля и диагностики (СКД) и модули системной логики (СЛ).

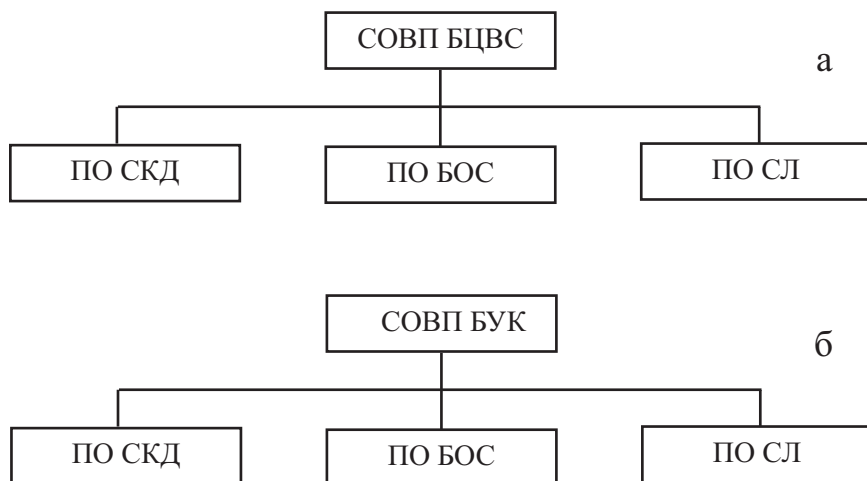


Рис. 5.1. Схемы деления систем организации вычислительных процессов
 а) БЦВС; б) БУК

Эти последние вызывают подчиненные им модули, которые сами могут являться диспетчерами алгоритмов следующего уровня.

В связи с тем, что многие режимы систем организации вычислительных процессов унифицированы, значительная часть модулей, входящих в состав СОВП БУК, заимствуется из состава модулей СОВП БЦВС. Основная часть модулей, обеспечивающих организацию вычислительного процесса и формирование для функционального программного обеспечения (ФПО) достоверной входной информации, находится в процессоре ввода-вывода (ПВВ). В центральном процессоре (ЦП) находится только диспетчер цикла БОС, модуль системы контроля и диагностики, участвующий в работе режима реконфигурации, и модули СЛ, осуществляющие обмен входной и выходной информацией ФПО между процессором ввода-вывода и центральным процессором.

5.1. Алгоритмы системы организации вычислительного процесса

Базовые операционные системы (БОС БЦВС и БОС БУК) решают задачи верхнего уровня по организации вычислительного процесса во всех режимах работы бортовой системы управления (БСУ) космическим аппаратом (КА).

В состав базовой операционной системы входят:

- программа работы до начала циклического режима;
- первичная обработка векторов прерываний;
- драйверы приема и выдачи информации;
- расширенный, циклический и фоновый тесты;
- бортовой диспетчер цикла;
- исходные таблицы моментов вызовов диспетчеров функциональных задач и соответствующих им адресов, диспетчера системы контроля и диагностики, модулей системной логики и модулей БОС для всех режимов работы программного обеспечения как в ПВВ, так и в центральном процессоре;

– таблицы командных слов, адреса оконечных устройств абонентов мультиплексного канала обмена (МКО), адреса входных и выходных массивов, массива запросов на обмен для драйвера МКО, массива слов интегральной оценки качества обмена по МКО, массива слов завершения обмена по МКО, которые либо используются, либо формируются драйвером МКО;

– таблицы адресов устройств в исполнительных платах (ИП) блока управления и контроля, таблицы запросов на обмен с ИП, адреса входных и выходных массивов для каждой ИП, которые либо используются, либо формируются драйвером ИП;

– адреса входных и выходных массивов для драйверов обмена по каналу межпроцессорного обмена.

На этапе работы до начала циклического режима базовая операционная система обеспечивает:

– установку начальных значений регистров, управляющих работой аппаратуры, и начальных значений параметров БОС;

– проведение расширенного теста вычислительной системы с анализом результатов тестов в каждом процессоре и формированием признаков, характеризующих состояние аппаратуры каждой грани ВС, ее исправность и готовность к работе, с последующим выводом в систему телеметрических измерений;

– формирование сигнала на запуск устройства формирования цикла (УФЦ) для начала выдачи прерываний по $T_{\text{цикла}}$ ($T_{\text{цикла}} = 100$ мс).

В циклическом режиме базовая операционная система обеспечивает:

– формирование счетчика циклов выполнения вычислений;

– контроль стека и восстановление его в начале цикла;

– зарядку программируемого таймера на время, заданное в таблице в соответствии с информационным вектором циклограммы, перед каждой передачей управления на функциональные диспетчеры, диспетчер СКД, модули СЛ или модули БОС.

Под информационным вектором здесь и далее будем понимать установленную временную связь программных модулей.

После перехода в циклический режим БОС обеспечивает проведение теста встроенного контроля цикла (ТВКЦ) мультиплексного канала обмена по ГОСТ Р 52070-2003, межпроцессорного обмена (МПО), двухпортового оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) в БЦВС и канала обмена с исполнительными платами БУК. После этого БОС совместно с системой контроля и диагностики начинает работу по штатной циклограмме (наземной – принимаемой БОС от наземного комплекса, или полетной – формируемой БОС при отсутствии связи с наземным комплексом).

В процессе вычислений БОС обеспечивает проведение фонового теста в циклическом режиме работы ВС. Фоновый тест – это тест ОЗУ процессора ввода-вывода и центрального процессора, выполняется в оставшееся время в цикле после решения задачи управления космическим аппаратом.

В циклическом режиме БОС обеспечивает диспетчеризацию вычислений в соответствии с информационным вектором заданной циклограммы, определяющим время и последовательность вызовов диспетчеров ФПО, диспетчера системы контроля и диагностики, модулей СЛ и модулей БОС в вычислительном цикле БСУ КА.

В соответствии с информационным вектором БОС обеспечивает инициализацию и вызов драйверов приема и выдачи информации по каналу МКО. По запросам ФПО драйвер формирует командное слово, анализирует ответное слово и формирует для системы контроля и диагностики признак аппаратной достоверности принятой/выданной информации. При отрицательном результате обмена драйвер переключается на работу по резервной шине и обеспечивает повторный прием/выдачу информации.

По вызову диспетчера межпроцессорного обмена драйверы обеспечивают прием и выдачу информации по каналу МПО между гранями ВС. Специальные модули БОС обеспечивают режим записи ПО и служебной информации в репрограммируемом постоянном запоминающем устройстве (РПЗУ). Специальные модули БОС, работающие по командам от наземного комплекса, обеспечивают процесс загрузки

ПО в РПЗУ на стендах и на технической позиции. Модули БОС (вектора прерываний) обеспечивают обработку штатных и «несанкционированных» прерываний.

5.2. Алгоритмы контроля, диагностики и реконфигурации вычислительных систем

Системы контроля и диагностики вычислительных систем БСУ КА (БЦВС и БУК) предназначены для контроля работоспособности, формирования признаков аппаратной и функциональной исправности, формирования достоверных массивов входной и выходной информации и для реконфигурации ВС в случае обнаружения отказа какой-либо грани любой из вычислительных систем.

В зависимости от режима, в котором работает БСУ, система контроля и диагностики выполняет различные функции. Соответственно система контроля и диагностики включает в свой состав три группы программных модулей, обеспечивающих работу системы контроля и диагностики в следующих режимах:

- режим начального включения,
- штатные режимы (полетный и наземные),
- режим реконфигурации ВС при отказе одной из активных граней.

Одной из основных функций СКД, выполняющейся во всех режимах, является формирование слова конфигурации ВС, которое характеризует текущее состояние граней с точки зрения их статуса, т.е. функций, которые они выполняют на внутренней (а для БЦВС и на внешней) шине мультиплексного канала обмена.

В слове конфигурации для БЦВС система контроля и диагностики определяет, какая грань будет «контроллером» на внутренней шине МКО, какая грань будет «оконечным устройством» (ОУ) на внешней шине МКО, какая грань будет «монитором» на внутренней шине и ОУ с запретом выдачи на внешней шине, какая из активных граней должна быть выключена в случае отказа, какая грань находится в «холодном резерве» и какая грань окончательно выключена по причине двух повторных отказов (статус «2 отказа»).

В слове конфигурации для вычислительной системы блока управления и контроля СКД определяет, какая грань будет ведущей ОУ на внутренней шине МКО, какие грани будут работать в режиме ОУ с запретом выдачи, какая грань находится в «холодном резерве» и какая грань выключена по причине одного или двух отказов.

Анализируя слово конфигурации, драйвер МКО определяет, в каком режиме должна работать микросхема МКО в конкретной грани, и в соответствии с этим режимом проводит ее инициализацию. Кроме того, в вычислительной системе БУК система контроля и диагностики формирует массив масок доступных граней, который определяет для драйвера последовательного канала связи с исполнительными платами, какая грань ВС БУК должна взаимодействовать с какой ИП.

Структура слов конфигурации БЦВС и ВС БУК, а также массива масок доступных граней, кодировка состояния граней (т.е. статус каждой грани) и коды масок доступных граней для обмена с ИП по внутренней шине БУК приведены на рис. 5.2, 5.3 и 5.4 соответственно.

В режиме «Включение БСУ КА» (как в БЦВС, так и в ВС БУК) основной функцией системы контроля и диагностики является формирование слова конфигурации, определение, было ли включение первым или проведено повторное включение, и формирование достоверного номера циклограммы, в которую следует перевести БСУ КА либо для штатной работы, либо для работы в режиме реконфигурации.

После завершения теста временного контроля цикла (ТВКЦ) система контроля и диагностики организует обмен по каналу межпроцессорного обмена словами состояния каждой из четырех граней, сформированными БОС по результатам расширенного теста встроенного контроля (РТВК) и теста временного контроля цикла, и, после

Разряды

15	12 11	8 7	4 3	0
Тетрада 3-й грани	Тетрада 2-й грани	Тетрада 1-й грани	Тетрада 0-й грани	

Рис. 5.2. Структура слова конфигурации БЦВС и ВС БУК

анализа в каждой грани результатов РТВК и ТВКЦ, формирует слово исходной конфигурации (в БЦВС и БУК).

Если анализ признаков РТВК и ТВКЦ показал исправность всех четырех граней, то система контроля и диагностики принимает решение об отключении грани с наименьшим приоритетом (старшая по номеру грань), в БЦВС присваивает статус «контроллера» внутренней шины и ОУ внешней шины грани с наивысшим приоритетом (младшая по номеру грань) и остальным граням присваивает статус «монитор» на внутренней шине и «ОУ с запретом выдачи» на внешней шине, а в ВС БУК грани с наивысшим приоритетом присваивается статус «ведущее ОУ», а остальным граням присваивается статус «ОУ с запретом выдачи».

Статус каждой грани фиксируется системой контроля и диагностики в соответствующих тетрадах слова конфигурации (рис. 5.2). После межпроцессорного обмена словами конфигурации и их мажоритирования система контроля и диагностики формирует в каждой грани одинаковые достоверные значения слов конфигурации бортовой цифровой вычислительной системы и блока управления и контроля.

На рис. 5.3 приведены примеры штатной конфигурации БЦВС и ВС БУК при положительных результатах тестирования всех четырех граней. Если тестирование одной или нескольких граней БЦВС или ВС БУК дало отрицательные результаты, то СКД при формировании слова конфигурации аналогичным образом присваивает статусы исправным граням, а неисправным граням присваивает статус «1-й отказ».

Описанная выше функция выполняется алгоритмом «Формирование слова конфигурации при начальном включении» и реализуется соответствующим программным модулем. В штатных режимах формирование слова конфигурации производится СКД на основе анализа достоверных признаков функциональной исправности активных граней, которые формируются в БЦВС по результатам контроля выходной информации ФПО, а в БУК – по результатам контроля как входной, так и выходной информации.

Статус активной грани ВС БУК	Коды состояния граней
Ведущее ОУ	7 (0111)
ОУ с запретом выдачи	4 (0100)
Статус отказавшей грани ВС БУК	
1-й отказ	1 (0001)
2-й отказ	0 (0000)
Статус активной грани ВС БЦВС	Коды состояния граней
Контроллер на внутренней шине и ведущее ОУ на внешней шине	9 (1001)
Монитор на внутренней шине и ведущее ОУ на внешней шине	7 (0111)
Контроллер на внутренней шине и ОУ с запретом выдачи на внешней шине	8 (1000)
Монитор на внутренней шине и ОУ с запретом выдачи на внешней шине	6 (0110)
Статус отказавшей грани БЦВС	
1-й отказ	1 (0001)
2-й отказ	0 (0000)

Например:

- после включения и при всех четырех исправных гранях слово конфигурации БЦВС будет иметь вид 2669h;
- после включения и при всех четырех исправных гранях слово конфигурации ВС БУК будет иметь вид 2447h.

Разряды

15	12 11	8 7	4 3	0
3-я грань	2-я грань	1-я грань	0-я грань	
Слово конфигурации БЦВС				
0010 (2)	0110 (6)	0110 (6)	1001 (9)	
Слово конфигурации ВС БУК				
0010 (2)	0100 (4)	0100 (4)	0111 (7)	

Рис. 5.3. Коды статуса граней БЦВС и ВС БУК

№ элемента массива	Содержание байта	Значение маски при всех исправных гранях
0	Маска 0-й грани	1 (01h)
1	Маска 1-й грани	2 (02h)
2	Маска 2-й грани	4 (04h)

Приведенные коды означают, что нулевая грань ВС БУК осуществляет обмен информацией с первой ИП, первая грань – со второй ИП, вторая грань – с третьей ИП, третья грань либо выключена, либо не может обмениваться с ИП.

Рис. 5.4. Массив масок доступных граней
 для связи с исполнительными платами

Если признаки функциональной исправности равны 1, т.е. выходная информация, сформированная ФПО в ЦП, совпадает во всех активных гранях, то грани БЦВС считаются исправными. Также считаются исправными грани БУК, если входная информация, принятая по МКО от БЦВС, и выходная информация, сформированная ФПО блока управления и контроля для выдачи в БЦВС, совпадают во всех гранях, то грани БУК считаются исправными. В этом случае слово конфигурации как в БЦВС, так и в БУК не изменяется.

Если же какой-либо из этих признаков становится равным 0 и не меняет своего значения в течение 30 циклов, то грань считается неисправной и ее функции (если она была контроллером или ведущим ОУ) передаются исправной грани, имеющей высший приоритет, статус неисправной грани понижается до статуса «1-й отказ», грань выключается, и начинается процедура реконфигурации.

Описанная выше функция выполняется алгоритмом «Формирование слова конфигурации» и реализуется соответствующим программным модулем.

Следующая функция системы контроля и диагностики – контроль входной информации от абонентов МКО бортовой системы управления КА и БУК.

Контроль входной информации проводится:

1. Путем анализа признаков, сформированных драйвером МКО по результатам анализа ответного слова абонента МКО.

2. При положительном значении этих признаков система контроля и диагностики проводит дополнительный контроль принятой информации путем подсчета контрольных сумм массивов слов, принятых от каждого датчика, и сравнения контрольной суммы, вычисленной СКД, с контрольной суммой, присланной во входном массиве от датчика.

3. Из входных массивов, прошедших контроль, описанный в п. 1 и п. 2, система контроля и диагностики процессора ввода-вывода грани-контроллера формирует общий массив для передачи по каналу МПО в грани-мониторы.

Этот массив формируется по общей для всех обменов по МПО структуре, в которой первые пять слов являются служебными и предназначены для контроля исправности передачи информации по каналу МПО. Остальная информация представляет собой последовательность блоков, каждый из которых содержит массив входной информации от одного из датчиков БСУ, количество слов в блоке и контрольную сумму этого блока.

Система контроля и диагностики БУК формирует такие же массивы и из сформированной ФПО выходной информации.

Структура выходного массива для обмена по каналу МПО приведена на рис. 5.5.

Поскольку в соответствии с циклограммой работы ПО БЦВС прием информации от разных датчиков БСУ производится в разных точках циклограммы, то алгоритм «Формирование выходного массива для МПО» содержит ряд ветвей, каждая из которых реализуется отдельным программным модулем, которые объединяются общим диспетчером.

4. После формирования массива для обмена по каналу МПО система контроля и диагностики процессора ввода-вывода в грани-



Примечание: Здесь k – количество датчиков, информация от которых должна приниматься/выдаваться при i -ом обмене по МПО.

Рис. 5.5. Структура закодированного массива, передаваемого по МПО с целью получения достоверных входных и выходных массивов

контроллере организует передачу этого массива в остальные активные грани, а система контроля и диагностики ПВВ активных граней принимает эту информацию.

Функция управления этим обменом по МПО выполняется алгоритмом «Диспетчер МПО для входной информации» и реализуется программным модулем.

5. После формирования массива для обмена по МПО массивами выходной информации система контроля и диагностики ПВВ и БУК организуют обмен между всеми активными гранями путем вызова диспетчера МПО, который последовательно в 4-х циклах обмена в одной из граней, начиная с младшей по номеру, вызывает драйвер выдачи информации в канал МПО, а в остальных гранях вызывает драйвер приема информации по каналу МПО.

Функция управления обменом по каналу межпроцессорного обмена выполняется алгоритмом «Диспетчер МПО» и реализуется соответствующим программным модулем.

Следующая функция системы контроля и диагностики – формирование достоверной входной информации для ФПО. Эта функция выполняется в несколько этапов:

1. Проводится контроль исправности передачи входной информации по каналу межпроцессорного обмена путем подсчета контрольной суммы переданного по каналу межпроцессорного обмена массива и сравнения подсчитанной СКД контрольной суммы с контрольной суммой, переданной из грани-контроллера.

2. Проводится проверка исправности передачи всех блоков, составляющих входной массив, путем подсчета контрольной суммы каждого из них и сравнения ее с контрольной суммой соответствующего блока, переданной по каналу межпроцессорного обмена.

3. При положительном результате контроля по пунктам 1 и 2 формируются предварительные признаки достоверности принятой информации.

4. Проводится обмен по каналу межпроцессорного обмена предварительными признаками достоверности, формирование путем мажоритирования признаков достоверности и перепись достоверной информации в ЦП во входной массив.

Следующая функция системы контроля и диагностики – формирование достоверной выходной информации ФПО для передачи по МКО датчикам и исполнительным органам БУК, а также в систему телеметрических измерений. Эта функция выполняется теми же алгоритмами, которые описаны в пунктах 2 и 3, отличие состоит только в том, что:

- при формировании массивов МПО в выходной массив ФПО для каждого абонента МКО заносится его контрольная сумма;
- обмен выходной информацией по каналу МПО производится между всеми гранями, а не только из грани-контроллера;
- при обработке входных массивов достоверная информация заносится во входной массив ФПО, а при обработке выходных массивов ФПО достоверная информация заносится в буфер драйвера выдачи в МКО.

Текущий контроль состояния аппаратуры БЦВС и БУК, а также соответствующего программного обеспечения осуществляют следующие алгоритмы СКД и БОС: фоновый тест и контроль штатного завершения ПО в вычислительном цикле БСУ.

Фоновый тест проверяет состояние постоянного запоминающего устройства (ПЗУ) и оперативного запоминающего устройства (ОЗУ), на основании этого процессор формирует признаки исправности блоков вычислителей. Фоновый тест реализуется во всех вычислителях, входящих в вычислительное ядро БСУ КА, и полностью выполняется за несколько вычислительных циклов.

Контроль штатного завершения задач в каждом вычислительном цикле БСУ КА осуществляется путем установки разряда, соответствующего каждой штатно завершенной задаче, т.е. задаче,

вернувшей управление в вызвавший ее диспетчер цикла до истечения отведенного ей времени решения. В конце цикла производится сравнение установленных в процессе выполнения ПО бит с константой, содержащей все разряды, которые должны были быть установлены в текущей циклограмме. Если установленные разряды совпали с заданными в константе, то алгоритм формирует признак «Штатное завершение ПО», в противном случае этот признак обнуляется.

Эта функция выполняется в БЦВС и вычислительной системе БУК, описывается алгоритмом «Контроль штатного завершения ПО» и реализуется соответствующим программным модулем.

На основании анализа признаков, сформированных алгоритмами СКД и БОС, реализуется функция СКД по формированию признаков тестовой исправности каждой активной грани БЦВС и ВС БУК.

Алгоритм «Формирование тестовой исправности» реализуется в диспетчере системы контроля и диагностики.

Признаки тестовой исправности граней используются для выбора достоверных выходных массивов только в том случае, если ни одна пара выходных массивов, контролируемых при обмене по каналу МПО, не совпала, и в силу этого СКД сформировала нулевые признаки функциональной исправности для всех граней.

Особыми функциями в СКД БЦВС являются:

- формирование массива служебной информации в режимах «Запись ПЗ» и «Корректировка ПО»;
- формирование признаков отказа обмена с ОУ;
- обеспечение устойчивой работы контура стабилизации.

Массив служебной информации формируется системой контроля и диагностики из частных служебных массивов, содержащих три слова и формируемых программой записи в РПЗУ функциональной подсистемы системы взаимодействия бортовой аппаратуры командно-измерительной системы.

В отличие от штатной процедуры формирования достоверных массивов, описанной выше, система контроля и диагностики, произ-

ведя обмен по каналу межпроцессорного обмена частными служебными массивами и проконтролировав их по контрольным суммам, формирует один массив из 12 слов, в который последовательно занесены частные служебные массивы, переданные всеми активными гранями, и частный служебный массив, сформированный программой записи в РПЗУ своей грани. Кроме того, в отдельном слове формируются четыре признака достоверности каждого частного массива.

Алгоритм этой функции – «Контроль РПЗУ» реализуется соответствующим программным модулем.

Формирование признаков отказа обмена с оконечным устройством производится системой контроля и диагностики на основе анализа признаков отказов каждого конкретного обмена, которые формируются драйвером МКО по результатам каждого обмена с каждым датчиком по первому и второму форматам.

Если драйвер МКО три раза подряд сформировал признак отказа обмена с каким-либо датчиком по любому формату, то алгоритм системы контроля и диагностики формирует свой признак отказа ОУ по этому формату. Если же обмен с датчиком не проходит по всем форматам, то СКД формирует признак полного отказа датчика. Этот алгоритм также реализуется соответствующим программным модулем.

Ввиду особой важности поддержания устойчивой работы контура стабилизации система контроля и диагностики в каждом вычислительном цикле анализирует признаки, формируемые в ФПО алгоритмами контроля информации гироскопического измерителя вектора угловой скорости (ГИВУС) и комплекса управляющих двигателей-маховиков (КУДМ).

В случае появления признаков, говорящих об отказе информации ГИВУС, система контроля и диагностики формирует команду для драйвера МКО на замену основной шины резервной, и если признак отказа информации гироскопического измерителя вектора угловой скорости не снимается, то СКД формирует признак, по которому системная логика начинает выдавать команды в БУК, из которого поступает в БЦВС информация ГИВУС, на смену ведущего ОУ (БУК).

В случае появления признаков, говорящих об отказе информации комплекса управляющих двигателей-маховиков, система контроля и диагностики формирует команду для драйвера МКО на замену основной шины резервной, и если признак отказа информации КУДМ не снимается, то СКД формирует признак, по которому системная логика начинает выдавать команды на переключение ОУ (КУДМ) и, если признак отказа информации КУДМ не снимается, то СКД передает функции контроллера в слове конфигурации другой грани.

Если признаки отказа информации гироскопического измерителя вектора угловой скорости и/или комплекса управляющих двигателей-маховиков не снимаются и в этом случае, то СКД формирует признак в цифровой телеметрической информации (ЦТМИ) для наземного комплекса управления (НКУ) на необходимость переключения БСУ.

Задачей системы контроля и диагностики, поддерживающей вычислительные системы (БЦВС и ВС БУК) в состоянии, которое позволяет формировать достоверную входную и выходную информацию, является реконфигурация вычислительной системы.

Алгоритмы «Реконфигурация ВС» (в БЦВС и ВС БУК) в каждом цикле анализируют результаты работы функции «Формирование слова конфигурации» и при достижении счетчиком сбоев какой-либо грани значения «30» отключают эту грань и присваивают ей в слове конфигурации статус «1-й отказ».

Затем производится анализ статусов отключенных граней и на грань, имеющую высший статус, или, в случае равных статусов, имеющую высший приоритет, подается питание.

При подаче питания включенная грань переходит в режим РТВК и по его завершении в циклограмме «0» путем «прослушивания» каналов мультиплексного и межпроцессорного обмена определяет, что она включена из резерва, после чего переходит в специальную циклограмму для начала реализации процедуры реконфигурации.

Работа системы контроля и диагностики в режиме «Реконфигурация» осуществляется в три этапа. На первых двух этапах активные

границы продолжают работать в штатной циклограмме (ЦГ), в которой алгоритмы реконфигурации вызываются строго в отведенное для них время. Грань, включенная из резерва, на каждом этапе работает по своей ЦГ, проводя обмен информацией с активными гранями по каналу межпроцессорного обмена в те интервалы времени, в которые в активных гранях работают алгоритмы реконфигурации.

На первом этапе грань, включенная из резерва, после завершения расширенного теста встроенного контроля и определения в ЦГ «0», что она включена в режиме реконфигурации, переходит в ЦГ «02-0», в которой передает в активные грани результаты РТВК.

Активные грани, после приема информации из включенной грани, обмениваются ею по МПО и формируют достоверное значение принятой информации. Результаты РТВК включенной грани передаются функциональным программным обеспечением ведущей грани для выдачи в НКУ в массиве ЦТМИ.

Если слова состояния расширенного теста встроенного контроля положительны, то система контроля и диагностики активных граней формирует служебный массив для синхронизации включенной грани с активными, в который входят ряд необходимых параметров системы организации вычислительных процессов.

Поскольку процедура реконфигурации используется и при коррекции программного обеспечения в активных гранях для того, чтобы откорректировать ПО в грани, находящейся в резерве, то в массиве, который передается во включенную грань для синхронизации, содержится и номер откорректированной страницы РПЗУ. Анализируя этот номер, грань, включенная из резерва, определяет, находится ли она в режиме «Реконфигурации» или в режиме «Коррекции ПО».

После синхронизации с активными гранями СКД включенной грани обнуляет сектор РПЗУ, соответствующий заданному режиму, для приема из ведущей грани начальной управляющей информации или откорректированного ПО как в активном, так и в пассивном банках, после чего формирует массив с квитанцией о завершении обнуления

для передачи по МПО в активные грани и переходит в циклограмму «02-1» для приема в РПЗУ информации из ведущей грани.

Получив ответное слово о достоверном приеме включенной гранью служебного массива и завершении обнуления РПЗУ, ведущая грань начинает последовательно передавать по МПО фрагменты информации из РПЗУ по 64 слова. Каждая посылка сопровождается контрольной суммой, что позволяет контролировать принимаемую информацию во включенной грани.

Принятый фрагмент информации контролируется во включенной грани дважды. Первый раз контрольная сумма (КС) подсчитывается при приеме информации в процессор ввода-вывода.

Если подсчитанная КС не совпадает с принятой по каналу межпроцессорного обмена, то в ведущую грань сразу отправляется отрицательная квитанция и передача того же фрагмента повторяется до трех раз. После того как включенная грань трижды не приняла передаваемый фрагмент, она выключается ведущей гранью. Если же подсчитанная и принятая контрольная сумма совпали, то принятый фрагмент записывается в РПЗУ, после чего подсчитывается контрольная сумма записанного фрагмента.

Если контрольные суммы снова совпали, то в ведущую грань отправляется положительная квитанция, получив которую, ведущая грань отправляет следующий фрагмент.

После получения положительной квитанции о приеме последнего фрагмента репрограммируемым постоянным запоминающим устройством из включенной грани ведущая грань анализирует признаки, формируемые функциональным программным обеспечением, которые разрешают замораживание работы ФПО для переписи ОЗУ.

При отсутствии этих признаков алгоритм реконфигурации переходит в режим ожидания и активные грани продолжают работу в штатной циклограмме. При этом включенная грань после отправки положительной квитанции о приеме последнего фрагмента РПЗУ

переходит в циклограмму «02-2» и ожидает получения из ведущей грани по каналу межпроцессорного обмена фрагмента ОЗУ.

Если же разрешающие признаки функционального программного обеспечения имеются, то активные грани обмениваются им по каналу межпроцессорного обмена, получают его достоверное значение и переходят в ЦГ «02-2», в которой работа ФПО замораживается и работает только алгоритм системы контроля и диагностики, заносащий в выходной массив МПО фрагменты ОЗУ ФПО по 250 слов, номер фрагмента и слово с признаками передачи. СКД дополняет информацию функционального программного обеспечения служебными словами и КС всего массива, затем передает сформированный массив по каналу МПО во включенную грань.

Включенная грань принимает присланный массив и заносит его в соответствующую присланному номеру фрагмента область оперативного запоминающего устройства функционального программного обеспечения. После чего подсчитывается контрольная сумма занесенного в оперативное запоминающее устройство фрагмента и сравнивается с присланной с этим фрагментом КС. Если контрольные суммы совпали, в ведущую грань отправляется положительная квитанция и включенная грань переходит к ожиданию следующего фрагмента, при несовпадении отправляется отрицательная квитанция и ведущая грань до трех раз повторяет посылку этого фрагмента. Если фрагмент ОЗУ не принимается, то включенная грань выключается. Во время работы ЦГ «02-1» и «02-2» алгоритмы реконфигурации ведомой грани находятся в ожидании получения из ведущей грани номера следующей циклограммы. После успешного завершения переписи ОЗУ во всех работающих гранях устанавливается новая конфигурация, в которой включенной грани в бортовой цифровой вычислительной системе присваивается статус «Монитор» (статус режима «ОУ с запретом выдачи» в ВС БУК), в соответствии с новой конфигурацией БОС проводит инициализацию драйвера мультимплексного канала обмена и все грани переводятся в штатную ЦГ, из которой активные грани перешли в режим реконфигурации.

В блоке управления и контроля и в бортовой цифровой вычислительной системе алгоритм «Реко конфигурация ВС» реализуется соответствующими программными модулями.

Выполнение всех вышеперечисленных функций в заданных точках циклограммы объединяет «Диспетчер СКД», который также реализуется определенным программным модулем.

5.3. Алгоритмы системной логики

Алгоритмы системной логики бортовой системы управления предназначены для организации взаимодействия систем организации вычислительных процессов с функциональным программным обеспечением и формирования для ФПО бортовой шкалы времени.

В процессе организации вычислительного процесса алгоритмы системной логики решают следующие задачи:

- осуществляют одновременный переход в штатные циклограммы бортовой цифровой вычислительной системы и блока управления и контроля после включения вычислительной системы КА;
- по запросам функционального программного обеспечения формируют запросы для драйверов мультиплексного канала обмена и исполнительных плат на прием/выдачу информации абонентов МКО и исполнительных плат;
- по признакам, формируемым системой контроля и диагностики, обеспечивают переключение оконечного устройства БУК и КУДМ;
- по данным собственного счетчика формируют и по данным наземного комплекса управления корректируют значение бортовой шкалы времени в БЦВС и БУК;
- в бортовой цифровой вычислительной системе обеспечивают обмен информацией между ПВВ и ЦП через оперативное запоминающее устройство двойного доступа.

6. ОРГАНИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

При разработке бортовых систем управления (БСУ) в техническом задании (ТЗ) задается достаточно широкий перечень задач, которые должна решать система управления. Их возможный перечень приводится ниже:

- управление движением вокруг центра масс космического аппарата (КА);
- демпфирование начальных угловых скоростей КА;
- управление двигательной установкой для выдачи корректирующих импульсов и «разгрузки» двигателей-маховиков;
- управление работой средств обеспечения теплового режима;
- управление работой пиропатронов двигательной установки, солнечных панелей, антенн бортового ретрансляционного комплекса и целевой аппаратуры;
- управление ориентацией солнечных панелей;
- контроль правильности работы приборов БСУ и процессов управления движением вокруг центра масс КА;
- автоматическое парирование последствий отказов или отклонений в управлении;
- формирование телеметрической информации о состоянии аппаратуры БСУ, процессах управления и характеристиках движения вокруг центра масс КА.

На отдельные требования в техническом задании указываются конкретные параметры, которые должна обеспечивать БСУ (например, требуемые точности поддержания угловой ориентации КА в штатных режимах работы). Некоторые сложные или комплексные требования (такие как требуемые циклограммы управления КА на типовых участках полета или протоколы электрического, функционального или информационного взаимодействия БСУ с другими системами)

более детально описываются в отдельных документах, прикладываемых к основному ТЗ.

Все перечисленные выше задачи невозможно решать автоматически (или с минимальным участием наземного комплекса управления) без применения бортовых цифровых вычислительных средств.

В состав типовых систем автоматического управления различными объектами входит большой перечень элементов: датчики, исполнительные органы, цифровые вычислители, устройства цифроаналогового и аналого-цифрового преобразования, блоки силовой автоматики, кабельные сети и т.д.

Основой цифровых бортовых систем управления летательных аппаратов (космических аппаратов, разгонных блоков, атмосферных беспилотных летательных аппаратов) является бортовая цифровая вычислительная машина (БЦВМ) с заложенным в нее программно-алгоритмическим обеспечением (ПАО). БЦВМ – это главный связующий и управляющий элемент для всех составных частей системы управления.

Все циклограммы управления космическим аппаратом и обеспечение выполнения целевой функции КА (с учетом согласованной работы всех приборов БСУ и целевой аппаратуры КА) реализуются бортовым программным обеспечением (БПО) бортовой цифровой вычислительной машины.

Бортовое программное обеспечение представляет собой совокупность программ, предназначенных как для решения задачи организации непосредственно вычислительного процесса (в частности, организация диспетчеров цикла, контроль работоспособности граней вычислителя, обмена с абонентами по цифровым каналам связи и т.п.), так и расчета текущих управляющих воздействий на исполнительные органы в реальном масштабе времени по информации от датчиков и в соответствии с заданной наземным комплексом управления программой полета. Первую задачу решает часть БПО, называемая системой обеспечения вычислительного процесса (СОВП). Вторую

задачу решает часть, называемая функциональным программным обеспечением (ФПО).

Бортовое программное обеспечение разрабатывается для применения на конкретном бортовом вычислительном устройстве. В БСУ разработки МОКБ «Марс» широко используется архитектура бортовых вычислителей на основе процессора типа Intel-196. Это 16-разрядный процессор с фиксированной точкой (все переменные являются целочисленными параметрами, для всех операций используется целочисленная арифметика), с хорошей летной историей и достаточной вычислительной мощностью, имеет радиационнотойкое исполнение и разрешен к применению в различных изделиях. Соответственно, получаемые в процессе работы специального компилятора для данного типа процессоров двоичные (машинные) коды программ принципиально отличаются от программ, исполняемых на бытовых персональных компьютерах, имеющих 32- или 64-разрядную архитектуру с плавающей точкой (с вещественной арифметикой). Это накладывает свои ограничения на возможности отладки БПО на вычислительных средствах, отличных от БЦВМ.

6.1. Особенности разработки и отработки бортового программного обеспечения

Разработчик сдает заказчику систему управления в составе аппаратных блоков и их программного обеспечения, проводя наземные предварительные испытания на реальных блоках, т.е. все зачетные испытания проводятся на реальной аппаратуре и, соответственно, в режиме реального времени. Однако работа БСУ в замкнутом контуре в полетных циклограммах (например, в режиме выдачи корректирующего импульса) при наземных испытаниях чрезвычайно затруднительна. Так, для имитации режима разворота КА с задействованием информации реального блока гироскопов необходимо использовать динамический поворотный стол с установленным на нем блоком датчиков. Но даже в этом случае управлять подвесками стола необходимо

с помощью специального технологического вычислителя, имитирующего движение КА вокруг центра масс. Так как воспроизвести достоверный вращающийся массогабаритный макет КА с установленными датчиками и исполнительными органами (создающими близкие к реальным управляющие моменты) практически невозможно, а некоторые исполнительные органы не могут работать в наземных условиях (например, плазменные двигатели работают только в вакууме).

Наземные предварительные испытания системы управления включают в себя проведение большого количества испытаний непосредственно аппаратуры БСУ и ее программного обеспечения для подтверждения всех требований технического задания на разработку БСУ и выдачи заключения о ее готовности к летным испытаниям.

При проведении предварительных испытаний огромное внимание уделяется проверке работоспособности бортовой аппаратуры (аппаратной составляющей БСУ) как в штатных режимах работы БСУ, так и в расчетных нештатных ситуациях.

Под расчетными нештатными ситуациями понимаются указанные в ТЗ и учтенные разработчиком БСУ (в том числе и сверх требований ТЗ) отказы аппаратуры, которые парируются автоматически самой системой управления (по заложенной бортовой логике) либо с помощью радиокоманд от наземных комплексов управления (по логике, указанной в эксплуатационной документации на систему управления). При этом возможно переключение резервов бортовой аппаратуры, изменение логики работы или структуры БСУ, отключение (потеря) некоторых функций БСУ для исключения возможности дальнейшего распространения отказов. Обычно в ТЗ указывается необходимость парирования системой управления одного отказа в каждом блоке (вычислителе, датчике, исполнительном органе).

Например, для парирования отказа одного из двигателей-маховиков в состав комплекса управляющих двигателей-маховиков (КУДМ) входят четыре маховика с разнонаправленными осями вращения: при отказе одного из них БСУ перераспределяет требуемый управляющий

момент на оставшиеся три маховика, продолжая выполнять задачу управления трехосной ориентацией КА. Отказ же двух и более маховиков будет нерасчетной нештатной ситуацией, при которой БСУ (в случае отсутствия дополнительных исполнительных органов) теряет функцию управления ориентацией КА, что может привести к аварийной ситуации с потерей КА.

Необходимость проведения большого количества наземных испытаний аппаратной составляющей БСУ обусловлена отсутствием возможности серьезного изменения структуры БСУ на этапе летных испытаний и штатной эксплуатации объекта управления («в полете»).

Некоторую гибкость при попытке парирования нерасчетной нештатной ситуации (в части отказов аппаратуры) дает возможность коррекции в полете бортового программного обеспечения БСУ, для чего разработчик должен предусмотреть специальные процедуры с использованием дополнительных резервов вычислительной системы (например, буферной памяти в ОЗУ и дополнительного РПЗУ на время перезаписи части кода БПО) и соответствующей циклограммы работы с наземным комплексом управления. Таким образом можно изменить логику комплексирования информации от различных датчиков (например, при отказе гироскопического датчика ориентации КА пытаться определять ориентацию и угловые скорости с помощью астродатчика), использовать для управления ориентацией и положением изделия в пространстве исполнительные органы, исходно предназначенные для решения других задач (например, вместо отказавших плазменных двигателей коррекции орбиты КА использовать газовые двигатели, предназначенные для стабилизации ориентации КА вокруг центра масс и для «разгрузки» управляющих двигателей-маховиков), и т.п.

Однако далеко не все аппаратные отказы в БСУ КА можно парировать путем изменения бортовой математики. Поэтому при разработке и наземной отработке должен обеспечиваться максимально возможный запас прочности по аппаратуре.

Принципиальным отличием БСУ КА от БСУ РБ в части обеспечения требуемой надежности работы БСУ на больших интервалах времени (годы для космического аппарата и часы для разгонного блока) является необходимость дополнительного резервирования аппаратуры БСУ КА и наличия двусторонней связи «борт–Земля–борт» с КА (в том числе для обеспечения возможности коррекции бортового ПО). Причем коррекцией БПО можно как парировать нерасчетные нештатные ситуации (хотя это выходит за рамки требований ТЗ, но для спасения дорогого и «долгоиграющего» КА Заказчик может договориться с разработчиком БСУ о проведении таких дополнительных работ), так и устранять выявленные на этапах летно-конструкторских испытаний (ЛКИ) или штатной эксплуатации ошибки в работе самого бортового программного обеспечения.

В отличие от проверок аппаратных частей БСУ, которые могут проводиться относительно автономно (например, автономные испытания (АИ) и проверочные включения (ПВ) блоков), проверка функционирования БПО должна проводиться «в комплексе», при работе всех составляющих БСУ.

С учетом большого количества аппаратуры и режимов функционирования БСУ, а также необходимости отработки различных нештатных ситуаций, процесс разработки и отработки БПО является весьма трудоемким и требующим длительного времени на всестороннюю отработку БСУ.

Выполнение части требований ТЗ по согласованию с Заказчиком может подтверждаться математическим моделированием с выпуском соответствующих отчетов: например, если процедура существенной коррекции орбиты КА для доведения КА в заданную точку стояния проводится с использованием маломощных плазменных двигателей, то она может растягиваться на месяцы реального полета. Разумеется, проводить наземные испытания такой циклограммы работы БСУ в реальном времени (с повторными прогонами после устранения обнаруженных ошибок в работе программного обеспечения) нет никакой возможности.

Кроме этого, проведение моделирования работы бортового программного обеспечения на стендах математического моделирования (СММ) является первым и обязательным этапом разработки и отработки БПО, позволяющим на обычных персональных компьютерах в режиме «ускоренного времени» провести быструю и достаточно тщательную отработку БПО (с использованием удобных инструментов отладки) для выявления алгоритмических и программных ошибок без учета некоторых специфических нюансов работы БПО на реальном вычислителе (например, превышения выделенного времени работы алгоритма в цикле вычислителя).

6.2. Основные испытательные стенды

Проводимые разработчиком БСУ на своей материально-технической базе наземные испытания системы управления любого КА делятся на:

- испытания отдельных блоков БСУ на специальных рабочих местах;
- испытания блоков БСУ на комплексном стенде (КС);
- испытания БПО с реальным вычислителем на автоматизированном цифровом комплексе (АЦК);
- испытания БПО на стендах математического моделирования (СММ).

Испытания отдельных блоков БСУ на специальных рабочих местах включают в себя термовакуумные, вибрационные, электростатические и др. испытания блоков (подробно рассмотрены в разделах 4 и 8), проводимые максимально автономно.

Комплексный стенд представляет собой аппаратный стенд с максимально возможным количеством блоков реальной аппаратуры (вычислители, блоки силовой автоматики, исполнительные платы, реальные приборы или имитаторы датчиков/исполнительных органов) со штатной кабельной сетью и штатным бортовым ПО. Также в состав стенда входит аппаратура и ПО наземной контрольно-прове-

рочной аппаратуры (НКПА), с помощью которой проводятся непосредственно испытания бортовой аппаратуры. Данный стенд позволяет проводить:

- автономные испытания блоков БСУ и смежных систем;
- проверку полярностей трактов управления БСУ;
- режим имитации полета;
- частные программы проверки различных трактов управления.

На комплексном стенде в основном проводятся «электрические» испытания – проверка правильности коммутации блоков, снятие характеристик с аналоговых сигналов управления БСУ, проверка реализации протоколов электрического взаимодействия блоков и т.п.

Помимо «электрических» проверок на этом стенде (как наиболее полно реализующем штатную структуру БСУ) также проводятся испытания СОВП – с реальной аппаратурой эту часть БПО можно проверить в полном объеме (в режимах реконфигурации вычислителей, перезаписи РПЗУ, имитации различных отказов и сбоев по обменам и т.п.).

Проводить полноценные испытания функционального программного обеспечения в замкнутом контуре на комплексном стенде по указанным ранее причинам невозможно. К примеру, при отсутствии динамического поворотного стола бортовые алгоритмы навигации не имеют возможности достоверно интегрировать значения угловых скоростей от гироскопических датчиков и рассчитывать угловую ориентацию КА, т.е. контур управления не может быть замкнут по сигналам «живых» приборов. Поэтому на данном стенде испытания функционального программного обеспечения при работе в «полетной» циклограмме не проводятся, из всего ФПО задействуется часть, работающая в «наземной» циклограмме и обеспечивающая проверку прохождения электрических сигналов по конкретным трактам управления. Для таких проверок обычно используется принцип программного управления, когда управляющие сигналы формируются по заложенной в БПО жесткой логике или полученной от НКПА (через изменение параметров бортовых алгоритмов) временной циклограмме работы алгоритмов БСУ.

Основная проверка ФПО осуществляется на автоматизированном цифровом комплексе (АЦК), представляющем из себя объединенный в комбинированную компьютерную сеть набор бортовых и имитационных вычислителей. АЦК позволяет проводить в реальном времени проверку функционирования большей части бортового ПО на реальных вычислителях в режиме «замкнутого контура».

Под термином «математическое моделирование» обычно понимается процедура имитации какого-либо процесса в замкнутом контуре. Хотя решение так называемого «контрольного примера» для некоторого алгоритма или совокупности алгоритмов, когда задаются значения всех входных параметров алгоритма и рассчитываются значения всех выходных параметров (т.е. решается статическая задача на конкретном срезе входных параметров), тоже можно назвать моделированием работы алгоритма, но обычно под моделированием понимается динамическая отработка алгоритмов бортового программного обеспечения системы управления в «замкнутом» контуре с имитацией движения объекта управления, обработкой информации датчиков и формированием управляющих воздействий органами управления, входящими в систему управления.

Динамическая отработка БПО позволяет всесторонне и качественно оценить работоспособность всего комплекса алгоритмов системы управления: проверка диапазонов изменения значений промежуточных параметров, обеспечение требуемых запасов по времени работы алгоритмов в цикле работы бортовой вычислительной машины, выполнение всех заданных циклограмм работы системы управления, полнота и качество информационного обмена между функциональными подсистемами и т.д.

Для обеспечения возможности динамической отработки бортового ПО в замкнутом контуре создается имитационное программное обеспечение (ИПО), в состав которого входит набор моделей, имитирующих работу всех датчиков и исполнительных органов, а также рассчитывающих движение как центра масс изделия, так и угловое движение изделия вокруг центра масс.

Типовая структурная схема стенда АЦК для отработки ПО БСУ космических аппаратов приведена на рис. 6.1.

В состав стенда входят: основной бортовой вычислитель (БЦВМ), решающий максимальное количество функциональных задач, несколько цифровых имитаторов (например, имитаторы гироскопического измерителя вектора угловой скорости (ГИВУС), комплекса управляющих двигателей-маховиков (КУДМ) и т.д.) и основная моделирующая машина с имитационным ПО и моделью объекта.

Применение БЦВМ (в штатной комплектации с многогранным исполнением и штатной кабельной сетью) определяет работу всего стенда АЦК в режиме реального времени.

Основным связующим звеном стенда АЦК является моделирующая машина с ИПО, выполненная на базе персонального компьютера. На машине ИПО оператор стенда задает начальные условия (НУ) и непосредственно запускает режим моделирования. Данная машина также может содержать в составе своего ПО имитатор блоков силовой автоматики – отдельных специализированных вычислителей из состава БСУ, основной задачей которых является цифроаналоговая стыковка «вычислительного центра» (БЦВМ) с «периферией» (датчики, исполнительные органы, пиротехника и т. п.). В машине ИПО реализованы все модели, необходимые для отработки ПО БСУ. Исключением могут являться случаи, когда модели каких-либо особо сложных устройств (например, астродатчиков) требуют достаточно большого времени для своей работы. Тогда часть ИПО, имитирующая работу прибора, может располагаться непосредственно в машине цифрового имитатора (например, имитатора астродатчика).

Цифровые имитаторы устройств также выполняются на основе персональных компьютеров, в состав которых входят специализированные платы расширения, обеспечивающие двунаправленный обмен по штатным бортовым линиям связи (в соответствии со стандартизованным протоколом обмена). Дополнительно в каждом имитаторе устанавливаются обычные сетевые интерфейсы для обмена информа-

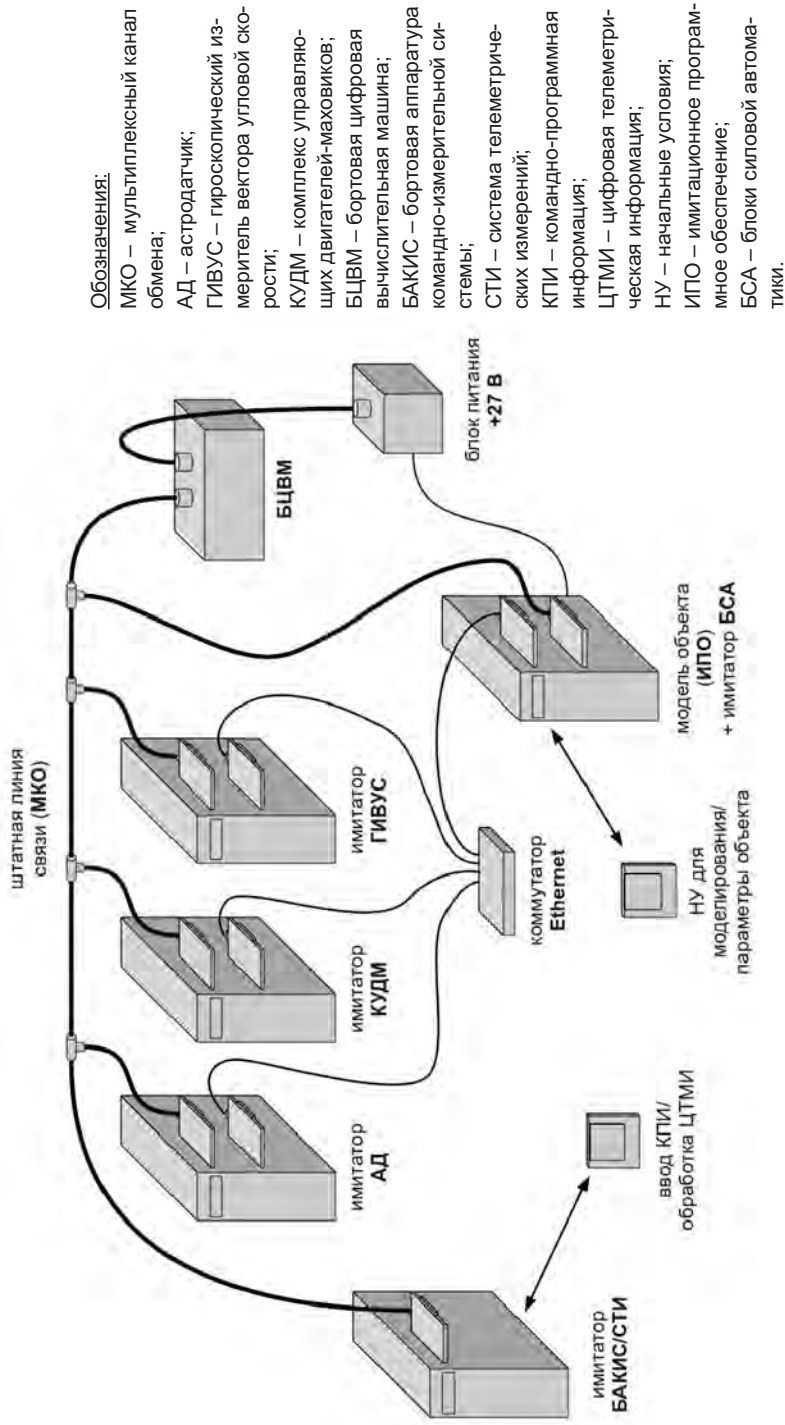


Рис. 6.1. Типовая структура стенда АЦК

цией с главной моделирующей машиной (машиной ИПО) по протоколу Ethernet. Главной задачей имитаторов является обеспечение информационных обменов между БЦВМ и абонентами бортовой сети при четком выдерживании протоколов обменов как по составу массивов, так и во временных рамках.

В начале режима по отдельной команде от машины ИПО со специального блока питания подается напряжение на БЦВМ, которая после включения и проведения внутреннего тестирования переходит в циклический режим работы и становится доступной для обменов по стандартному интерфейсу обмена (для космических аппаратов стандартным является мультиплексный канал обмена, МКО). После этого БЦВМ переходит к отработке циклограммы первого включения (с самого начала полета на участке отделения от разгонного блока) либо циклограммы повторного включения.

7. ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БОРТОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Бортовое программное обеспечение (БПО) представляет собой совокупность программ для обеспечения нормального функционирования летательного аппарата (ЛА). К числу рассматриваемых в настоящем пособии ЛА относятся космические аппараты (КА), разгонные блоки (РБ) и атмосферные беспилотные летательные аппараты (БПЛА).

В зависимости от функций, выполняемых программным обеспечением (ПО), можно выделить общесистемное (система организации вычислительных процессов, см. раздел 5) программное обеспечение и прикладное (функциональное) программное обеспечение с сопроводительной документацией.

К общесистемному программному обеспечению относятся ПО базовой операционной системы реального времени, ПО системы контроля и диагностики и ПО системной логики (см. раздел 5).

Функциональное программное обеспечение (ФПО) представляет собой совокупность программ, разработанных для управления движением центра масс ЛА, движением относительно центра масс ЛА, для обработки информации с датчиков, для управления смежными системами, а также системой телеметрических измерений.

Функциональное программное обеспечение – программное обеспечение бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ), предназначенное для решения всех функциональных задач системы управления, заданных техническим заданием на разработку системы управления.

Применительно к космическим аппаратам можно выделить следующий круг основных функциональных задач:

1. Определение текущей ориентации связанных осей космического аппарата в базовых системах координат. В качестве базовых

систем координат обычно применяются орбитальная система координат и инерциальная (неподвижная в пространстве) система координат.

2. Расчет заданной ориентации связанных осей космического аппарата в базовых системах координат.

3. Стабилизация углового положения космического аппарата (ориентации связанных осей КА) относительно заданного углового положения (заданной ориентации КА).

4. Переориентация космического аппарата из одного заданного углового положения в другое заданное угловое положение.

5. Расчет параметров орбитального движения (бортовой прогноз), т.е. расчет радиус-вектора и вектора скорости КА в текущий момент времени в проекциях на оси инерциальной системы координат.

6. Управление бортовыми системами КА для обеспечения их функционирования на протяжении срока существования КА (управление ориентацией антенн, солнечных батарей, управление системой электроснабжения, системой обеспечения тепловых режимов и др.).

7. Прием и исполнение командно-программной информации от наземного комплекса управления (НКУ) по командной радиолинии: полетных заданий, кодовых команд, массивов изменяемых программ и др.

8. Формирование и передача в НКУ текущей телеметрической информации о состоянии бортовых систем и параметрах движения космического аппарата.

Кроме названных основных могут быть и другие функциональные задачи, в том числе связанные со специальным назначением космического аппарата.

Учитывая специфику решения разных задач, комплексы ФПО, как правило, структурируют, выделяя функциональные программные системы, каждая из которых специализируется на решении определенных задач. Это повышает технологичность разработки, дает возможность проводить автономную предварительную отладку

программного обеспечения частной системы до сборки и отработки ФПО в целом.

Типичными функциональными программными системами ФПО являются:

- а) система информационного обеспечения;
- б) система управления движением;
- в) система стабилизации и ориентации;
- г) система управления бортовыми системами;
- д) система взаимодействия с командной радиолинией;
- е) система управления целевой аппаратурой;
- ж) система телеметрической информации.

Все системы имеют собственные частные программы-диспетчеры, выстраивающие необходимый порядок обращения к программным модулям в соответствии с алгоритмом решения задачи системы.

Частные программы-диспетчеры размещаются в цикле БЦВМ и работают под управлением диспетчера цикла в заданной последовательности, обеспечивая в каждом цикле формирование решения всех функциональных задач системы управления.

Функциональное программное обеспечение несет основную смысловую нагрузку при выполнении технических требований к системе управления. Поэтому особую важность приобретает надежность его работы или, другими словами, отсутствие отказов ФПО на протяжении срока службы космического аппарата. Под отказом программного обеспечения будем понимать событие, заключающееся в проявлении в процессе эксплуатации ошибки ПО, не выявленной на этапах его отработки и испытаний.

Надежность ПО обеспечивается технологией разработки, отладки и объемом тестирования (испытаний).

Ниже приводится рассмотрение этих вопросов исходя из опыта создания систем управления (СУ) для различных космических аппаратов, выполненных в МОКБ «Марс».

7.1. Типовое распределение ресурсов по задачам

Аппаратная часть систем управления космическим аппаратом изменяется значительно реже программной. Цифровые вычислители в составе СУ космическим аппаратом по современным меркам имеют низкое быстродействие и небольшие объемы памяти. Однако круг решаемых задач с использованием ограниченного набора датчиков и исполнительных органов позволяет обходиться прежними наработками по аппаратной части.

Требования унификации по аппаратной части СУ (по массогабаритным характеристикам, по соответствию разработанным ранее интерфейсам и протоколам обмена информацией в комплексах) вынуждают решать новые задачи в основном за счет изменения бортового программного обеспечения. Таким образом, основные временные затраты на разработку и отработку модернизируемых систем управления космическим аппаратом приходится на модернизацию бортового программного обеспечения.

Ввиду небольшого количества разработчиков и большого числа разноплановых тем работы становится крайне актуальной задача максимальной унификации подходов к процессу разработки и отработки программного обеспечения системы управления.

Опыт унификации структуры бортового программного обеспечения космических аппаратов (например, по обособливанию системы организации вычислительного процесса, разделению функций диспетчерского и функционального ПО, выделению подсистемы обработки и передачи цифровой телеметрической информации и др.) активно перенимается и для систем управления других летательных аппаратов.

Применение однотипных решений и использование коллективов разработчиков по похожим задачам повышает как производительность труда при разработке, так и отработанность частей БПО (в основном за счет унификации).

Однако какими бы унифицированными ни были алгоритмы для различных изделий, конкретные требования по их применению чаще всего заставляют корректировать программное обеспечение, взятое за основу от предыдущих разработок. И делать это приходится все быстрее и быстрее.

Уже много лет применяемая в МОКБ «Марс» технология отработки бортового программного обеспечения (для всех разрабатываемых систем управления) представлена на рис. 7.1.

Традиционная маршрутная технология разработки и отработки бортового программного обеспечения, применявшаяся в МОКБ «Марс», включала в себя длительные этапы разработки ПО для отработки на стендах математического моделирования (рис. 7.2). Практически все операции проводились «вручную», а найденные ошибки (неважно, алгоритмические или программные) приводили к отбрасыванию на несколько этапов назад и опять-таки к «ручной» работе.

Основными этапами для формирования программной сборки БПО, пригодной для отработки на автоматизированном цифровом комплексе (АЦК) и комплексном стенде (КС), являлись:

- разработка технических требований (ТТ) на программирование (в бумажном виде, без ведения единой базы данных переменных);
- ручное кодирование прототипов БПО;
- изолированная отладка Си-аналогов для поиска программных ошибок на рабочих местах алгоритмистов;
- сборка и отработка версии ПО на стенде математического моделирования (СММ);
- коррекция ТТ на программирование, формирование контрольных примеров и передача на бортовое программирование;
- ручное кодирование бортовых модулей;
- изолированная отладка бортовых модулей для поиска программных ошибок на рабочих местах программистов;
- сборка и отработка версии БПО на комплексном математическом стенде (КМС);

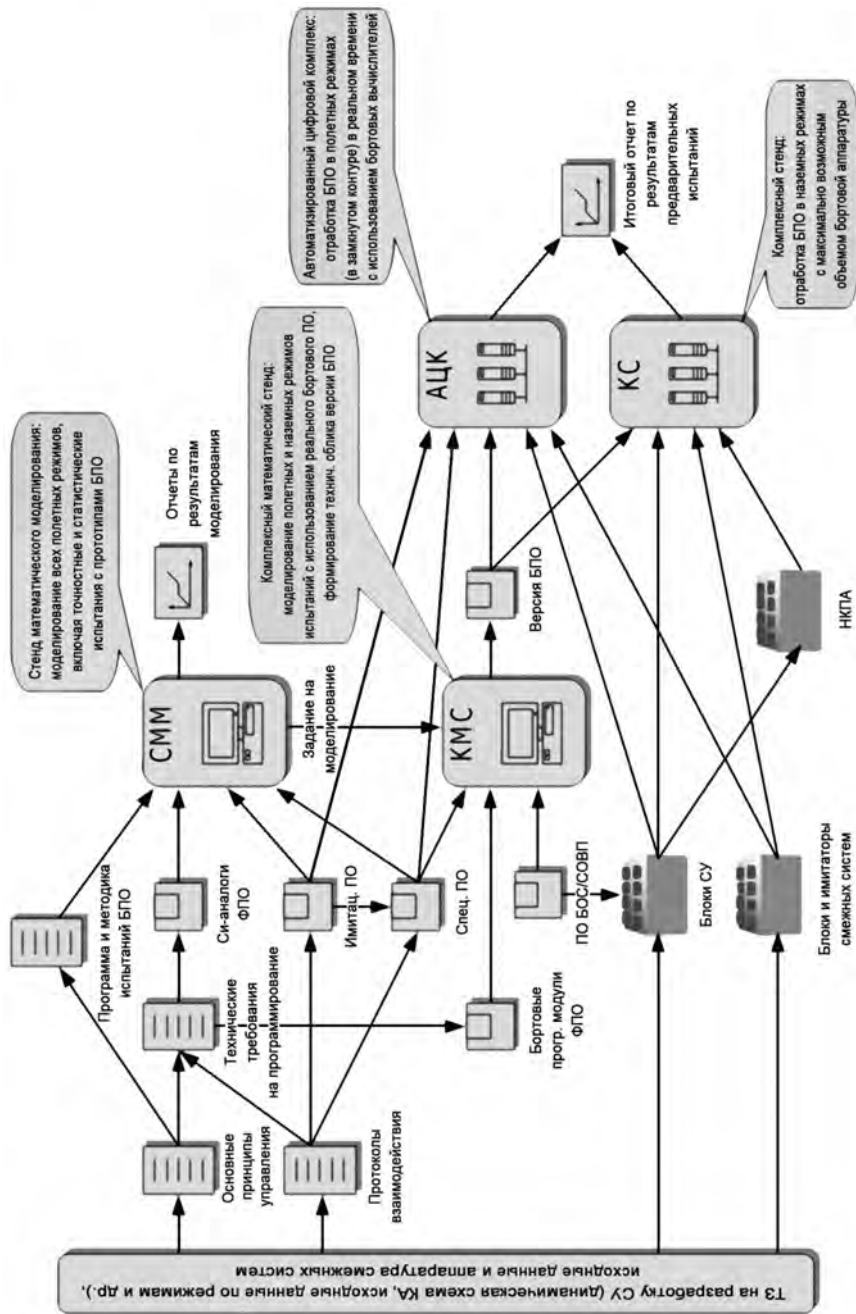
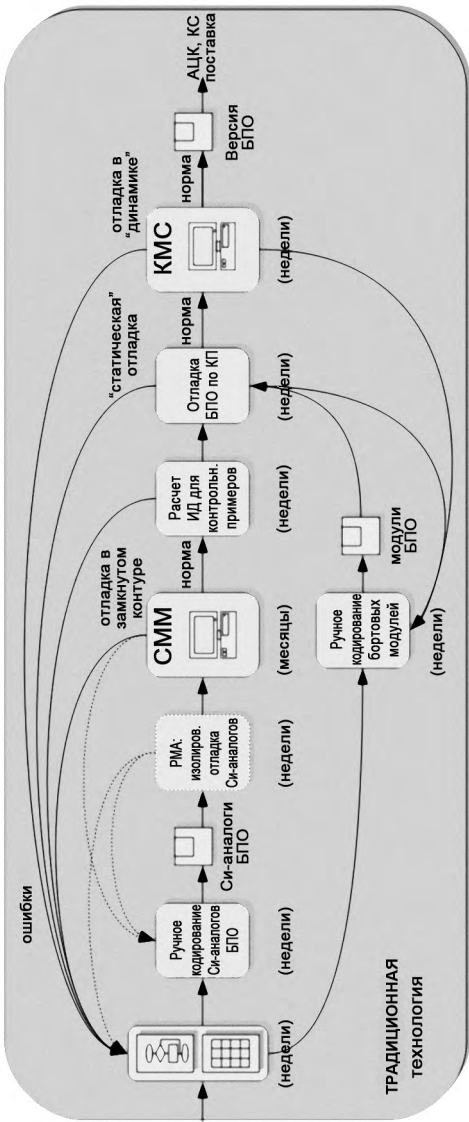
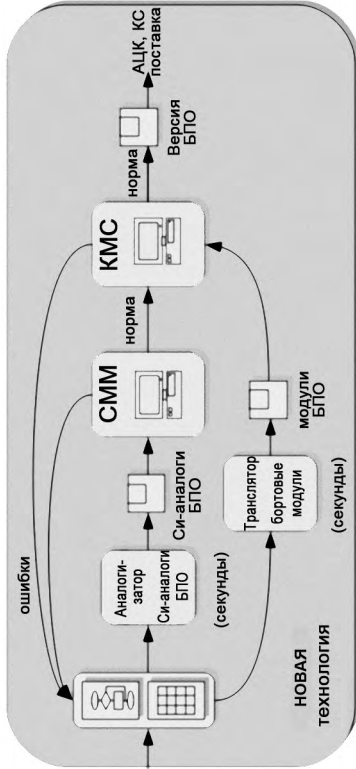


Рис. 7.1. Маршрутная технология разработки БПО

Т3 на разработку СУ, основные принципы управления, протоколы взаимодействия



РМА – рабочее место алгоритмиста
 КП – контрольные примеры
 ИД – исходные данные



Ключевые особенности новых технологий разработки БПО:

- многократное увеличение скорости разработки БПО;
- увеличение объема испытаний взамен потерь времени на "ручные" операции;
- четкое соответствие кода программных модулей программной документации;
- существенное ускорение отладки программных модулей за счет исключения человеческого фактора;
- более полная унификация и стандартизация технической документации и программных модулей;
- общее повышение качества и отработанности БПО.

Рис. 7.2. Традиционная и новая технологии разработки БПО

- передача версии для дальнейшей отработки на стендах АЦК и КС с будущими летными экземплярами вычислителей.

Весь цикл формирования работоспособной версии бортового программного обеспечения от начала работ на СММ до выхода на стенд АЦК занимал (в чистом времени – без учета работ над параллельными темами) как минимум несколько месяцев. Большая часть ошибок на разных этапах формирования программных сборок обусловлена «человеческим фактором» и является причиной неоправданной (с точки зрения проверки функционального программного обеспечения) потери времени.

Наличие узких мест в маршрутной технологии разработки и отработки бортового ПО, приводящих к непроизводительным тратам времени и так небольшого коллектива разработчиков, является огромной помехой для предприятия в условиях постоянно увеличивающейся требуемой скорости разработки разнообразных систем управления.

Алгоритмистами и программистами достаточно долго велись (с разной степенью успешности) поиски путей автоматизации процесса разработки БПО. В итоге была создана «новая» технология разработки БПО. Ее суть заключается в формировании исходных данных для программирования в виде, пригодном для последующей машинной обработки.

Алгоритмист создает технические требования на программирование в виде блок-схем, выполненных на персональном компьютере в обычном графическом редакторе, и описывает используемые переменные в единой базе данных переменных. Вся работа выполняется в электронном виде. Бумажная копия требуется только для передачи документации в архив (хотя проводятся работы по созданию электронного архива, в этом случае технология будет полностью безбумажной). Применяемые шаблоны соответствуют требованиям ГОСТ, и бумажная копия не отличается от документов, выполненных ранее вручную.

Электронные версии ТТ на программирование пропускаются через две части новой САПР: на выходе первой получаются готовые к употреблению на СММ Си-аналоги бортовых программ, на выходе второй – готовые к отработке на КМС бортовые модули.

Основой разработанных компонент является типизация используемых переменных, четко ограниченный набор алгоритмических блоков, перекрывающий весь требуемый спектр логических и вычислительных операций, и использование библиотеки стандартных функций и операций, подходы к формированию которой сложились за долгие годы «ручной» работы бортовых программистов.

Источником информации для всех этапов машинного программирования является одна и та же блок-схема алгоритма. Разночтения алгоритмистов и бортовых программистов, а также ошибки «ручного» программирования и этап отработки готовых модулей по контрольным примерам исчезают за ненадобностью. Скорость формирования бортовых сборок теперь лимитируется только скоростью разработки блок-схемы алгоритмистом (а также его навыками при работе в графическом редакторе) и увеличивается на порядки.

Машинная обработка позволяет также формировать целые библиотеки программных модулей, предлагающих готовые решения для различных систем управления – степень унификации и отработанности при этом, естественно, возрастает.

Однако без участия программиста получить версию БПО, целиком и полностью собранную с использованием новых технологий, невозможно. Неохваченными новой технологией являются, в основном, модули бортовой операционной системы, работающие с аппаратной составляющей вычислителей. Например, специализированные драйверы по-прежнему пишутся на ассемблере и не поддаются высокоуровневому описанию.

Ключевыми особенностями новых технологий разработки БПО являются:

- многократное увеличение скорости разработки БПО;

- увеличение объема испытаний взамен потерь времени на ручные операции;
- четкое соответствие кода программных модулей программной документации;
- существенное ускорение отладки программных модулей за счет исключения человеческого фактора;
- более полная унификация и стандартизация технической документации и программных модулей;
- общее повышение качества и отработанности БПО.

Другое достоинство новых технологий (в ближайшей перспективе) – безболезненный переход от одной аппаратной платформы системы управления к другой (со сменой бортовых вычислителей и даже архитектур центральных процессоров) – путем коррекции программных элементов САПР можно будет добиться работоспособности большинства ранее созданных по новым технологиям программных модулей даже без коррекции технических требований на программирование.

Одним из основных условий при разработке элементов новой САПР являлось требование возможности совмещения в единой программной сборке как модулей, созданных с применением новых технологий, так и старых, заимствованных из ранее отработанных модулей, по разным причинам не требующих изменений.

Разработанные программные элементы САПР уже имеют положительную летную историю: с применением новых технологий были проведены коррекции БПО системы управления космическим аппаратом «Монитор-Э» (до сих пор работающего на орбите), в СУ которой большая часть функционального программного обеспечения была создана с использованием новых технологий.

Учитывая вышесказанное, можно утверждать, что в современных условиях основным этапом модернизации или разработки новой системы управления является разработка и качественная отработка бортового ПО.

Для быстрой и качественной наземной отработки бортового ПО требуется максимально полное и достоверное описание всех элементов, входящих в состав изделия, для чего необходим очень плотный рабочий контакт смежных и головных разработчиков.

Ускоренный процесс разработки и отработки бортового ПО, достоверность применяемых математических моделей и высокое качество программного продукта можно обеспечить путем автоматизации операций на максимально возможном количестве этапов маршрутной технологии разработки БПО.

Однако насколько бы глубоко ни была внедрена автоматизация на предприятии, никакое ПО не заменит на 100 % знаний и умений человека-разработчика.

7.2. Организация бортового программирования и отладки модулей функционального программного обеспечения

Первый и самый важный этап создания и отработки алгоритмических решений – разработка стенда математического моделирования, представляющего собой комплекс программного обеспечения на обычном персональном компьютере. На этом стенде разработчики-алгоритмисты в замкнутом контуре с помощью имитационного программного обеспечения отрабатывают прототипы бортового программного обеспечения, выполненные в виде текстов программ на языке высокого уровня.

Под термином «математическое моделирование» понимается динамическая отработка алгоритмов бортового программного обеспечения системы управления в замкнутом контуре с имитацией движения объекта управления, обработкой информации датчиков и формированием управляющих воздействий органами управления, входящими в систему управления.

Как указывалось выше, динамическая отработка БПО позволяет всесторонне и качественно оценить работоспособность всего комплекса алгоритмов системы управления.

Для обеспечения возможности динамической отработки БПО в замкнутом контуре создается имитационное программное обеспечение (ИПО), в состав которого входит набор моделей, имитирующих работу всех датчиков и исполнительных органов, а также рассчитывающих движение как центра масс изделия, так и угловое движение изделия вокруг центра масс.

Прототипы бортового программного обеспечения выполняются на языке программирования Си (Си-аналоги) с использованием формата представления данных с плавающей точкой. Традиционно прототипы писали сами алгоритмисты, что в «ручной технологии» приводит к существенным временным затратам и множеству «ручных» ошибок программирования.

На СММ отрабатываются все возможные полетные режимы работы системы управления, включая точностное и статистическое (при необходимости) моделирование. На данном стенде проверяются все требования технического задания (ТЗ), а также подготавливаются «эталонные» реализации для последующих проверок уже реального бортового ПО на стендах с реальными вычислителями.

По результатам отработки прототипов на стенде математического моделирования (это самый продолжительный этап во всей маршрутной технологии отработки БПО) алгоритмисты оформляют технические требования на программирование бортовых модулей в виде блок-схем алгоритмов и описания используемых параметров. Дополнительно алгоритмисты должны были для каждого программного модуля формировать пакет контрольных примеров для верификации работы созданного бортовыми программистами бортового программного модуля.

Работа программистов, создающих БПО по выданным алгоритмистами техническим требованиям, также являлась ручной с присутствующими такой технологии временными затратами и ошибками программирования. Из-за специфики используемых бортовых вычислителей (целочисленная арифметика с малой разрядностью представ-

ления данных) бортовой код (хотя и выполняется в большей степени так же, как и Си-аналоги на языке программирования Си) существенно отличается от прототипов и содержит помимо замасштабированных представлений параметров огромное количество специальных макросов/функций для выполнения обычных математических операций. По объему кода (в текстовом представлении) бортовые программы могут в несколько раз превышать прототипы, выполненные в вещественной арифметике.

Огромным шагом вперед в процессе отработки БПО явилось создание комплексного математического стенда – так называемого Си-стенда. Этот стенд, как и СММ, является программным комплексом, работающим на обычном персональном компьютере. Ключевая особенность данного стенда – возможность отработки в замкнутом контуре реальных модулей БПО. Под реальными модулями БПО понимаются бортовые программные модули, разработанные с учетом масштабирования параметров, целочисленной арифметики, разрядности представления данных в ОЗУ бортового вычислителя и с задействованием библиотеки бортовых макросов (или функций). С использованием того же имитационного ПО, как и на СММ, на КМС можно провести полноценную отработку во всех режимах полета почти всего БПО, за исключением специфических частей бортовой операционной системы, работающей напрямую с аппаратной частью вычислителей (хотя часть функций бортовой операционной системы (БОС) и имитируется на комплексном математическом стенде).

На КМС имитируются реальная бортовая циклограмма работы БПО, обмены с абонентами по цифровым и аналоговым интерфейсам. Данный стенд позволяет имитировать работу БПО на реальном вычислителе, совмещенную с удобством отладки программ на персональном компьютере и в ускоренном времени (в зависимости от мощности используемого персонального компьютера время «полета» на КМС на порядки меньше реального). Существенным моментом является регистрация на КМС штатной цифровой телеметрии КА, что

позволяет оптимизировать структуру информационных кадров цифровой телеметрической информации (ЦТМИ) и отработать программное обеспечение вторичной обработки, не дожидаясь получения результатов реальных полетов. Отработка версии БПО на КМС позволяет дать 95 %-ю гарантию нормативной работы БПО на стендах с реальными вычислителями. Оставшиеся пять процентов – это особенности БОС и ограничения по времени работы модулей в цикле вычислителя, которые можно гарантированно проверить только на реальном вычислителе. По мере развития возможностей КМС эти 5 % постоянно уменьшаются, в скором времени можно будет говорить о практически 100 %-й отработанности БПО только на математических стендах, проверки на полунатурных стендах останутся этапом подтверждения соответствия математических моделей подсистем СУ, используемых в КМС, соответствующим реальным элементам системы управления.

7.3. Типовая технология разработки, отладки и испытаний функционального программного обеспечения

Технология программирования – это система методов, способов и приемов разработки и отладки программ.

В соответствии с обычным значением слова «технология» под **технологией программирования** понимают совокупность производственных процессов, приводящую к созданию требуемого программного средства (ПС), а также описание этой совокупности процессов.

Другими словами, технологию программирования можно понимать в широком смысле как технологию разработки программных средств, включая в нее все процессы с момента поступления технического задания.

Современная индустриальная технология проектирования программ включает в себя комплекс мероприятий, руководящих документов и автоматизированных средств, предназначенных для

системного анализа, разработки, отладки, документирования, управления работой специалистов.

Для уменьшения стоимости изготовления ПС и повышения производительности труда программистов используются методы, регламентирующие высокую профессиональную культуру написания программ независимо от языка, от системы, ЭВМ и решаемой задачи. Такие методы получили общее название – технологии программирования.

Хорошая технология дает возможность получить высокий экономический эффект при ее использовании, существенный рост производительности труда программистов повышает качество программного продукта. Для примера рассмотрим:

- Формальные преобразования. Этот подход включает разработку формальных спецификаций ПС и превращение их в программы путем корректных преобразований. На этом подходе базируется компьютерная технология (CASE-технология) разработки ПС.

- Сборочное программирование. Этот подход предполагает, что ПС конструируется, главным образом, из компонент, которые уже существуют.

Должно быть некоторое хранилище (библиотека) таких компонент, каждая из которых может многократно использоваться в разных ПС. Такие компоненты называются повторно используемыми. Процесс разработки ПС при данном подходе состоит скорее из сборки программ из компонент, чем из их программирования.

Стадия разработки программного средства состоит из этапа его внешнего описания, этапа конструирования ПС, этапа кодирования (программирование в узком смысле) ПС и этапа аттестации ПС. Всем этим этапам сопутствуют процессы документирования и управления ПС. Этапы конструирования и кодирования часто перекрываются, иногда довольно сильно. Это означает, что кодирование некоторых частей программного средства может быть начато до завершения этапа конструирования.

Этап внешнего описания программного средства включает процессы, приводящие к созданию некоторого документа, который мы будем называть внешним описанием ПС. Этот документ является описанием поведения ПС с точки зрения внешнего по отношению к нему наблюдателя с фиксацией требований относительно его качества. Внешнее описание ПС начинается с анализа и определения требований к ПС со стороны пользователей (заказчика), а также включает процессы спецификации этих требований.

Конструирование ПС охватывает процессы: разработку архитектуры ПС, разработку структур программ ПС и их детальную спецификацию.

На этом этапе определяется потребность в ПС, его назначение и основные функциональные характеристики, оцениваются затраты и возможная эффективность применения такого комплекса программ.

Кодирование ПС включает процессы создания текстов программ на языках программирования, их отладку с тестированием ПС.

На этапе аттестации программного средства производится оценка его качества. Если эта оценка оказывается приемлемой для практического использования программного средства, то и его разработка считается законченной. Это обычно оформляется в виде некоторого документа, фиксирующего решение комиссии, проводящей аттестацию программного средства.

Программное изделие (ПИ) – экземпляр или копия разработанного программного средства.

Изготовление ПИ – это процесс генерации и/или воспроизведения (снятия копии) программ и программных документов ПС с целью их поставки пользователю для применения по назначению.

Производство ПИ – это совокупность работ по обеспечению изготовления требуемого количества ПИ в установленные сроки. Стадия производства программного изделия в жизненном цикле ПС, по существу, несущественна, так как представляет рутинную работу, которая может быть выполнена автоматически и без ошибок. Этим она

принципиально отличается от стадии производства различной техники. В научной литературе эту стадию, как правило, не включают в жизненный цикл ПС.

Стадия эксплуатации программного средства охватывает процессы хранения, внедрения ПС, а также транспортировки и применения ПИ по своему назначению. Она состоит из двух параллельно проходящих фаз: фазы применения ПС и фазы сопровождения ПС.

Применение программного средства – это использование программного средства для решения практических задач на компьютере путем выполнения программ.

Сопровождение программного средства – это процесс сбора информации о качестве программного средства в эксплуатации, устранения обнаруженных в нем ошибок, его доработки и модификации, а также извещения пользователей о внесенных в него изменениях.

7.4. Формирование сборок функционального программного обеспечения и комплексная отладка на стендах

Структура стенда математического моделирования и комплексного математического стенда (в том числе и по информационным потокам) очень схожа. На обоих стендах используется одно и то же имитационное ПО, но у каждого стенда (дополнительно к различному виду представления бортовых программных модулей на СММ – Си-аналоги с «плавающей точкой», а на КМС – бортовые модули с целочисленной арифметикой) свое специальное программное обеспечение (СПО), определяющее функционирование стенда в целом.

На схеме, приведенной на рис. 7.3, приняты следующие обозначения:

- СПО – специальное программное обеспечение;
- ВЦ – вычислитель центральный;
- ВП – вычислитель периферийный;
- ИПО – имитационное программное обеспечение;



Рис. 7.3. Адресное пространство СММ

ПОИ – предварительная обработка информации (алгоритм);
 БИНС – бесплатформенная инерциальная навигационная система;
 НАП – навигационная аппаратура потребителя;
 ДУ – двигательная установка.

Адресное пространство – область доступа адресов для данного компьютера.

Стенды математического моделирования обладают следующими бесспорными достоинствами:

- возможность пошаговой отладки бортовых программ с доступом к любой ячейке памяти бортового вычислителя;

– удобные средства накопления, отображения и совместной обработки любой информации (как бортовых параметров, так и параметров ИПО), превышающие возможности бортовой телеметрии – формирование подробных протоколов изменения признаков и команд, построение графиков изменения параметров;

– ускоренный режим моделирования, когда скорость имитации полета не привязана к реальному времени, а зависит от мощности моделирующей машины и результаты моделирования становятся доступны на порядки быстрее по сравнению со стендами полунатурного моделирования.

Дополнительным преимуществом является возможность оперативного контроля процесса полета с помощью трехмерной визуализации, позволяющей практически мгновенно реагировать на неверное исполнение программы полета и еще больше сократить временные потери в процессе отработки БПО.

Удобство отработки БПО на персональных компьютерах и близкая к 100 % отработанность БПО во всех режимах работы СУ в большой степени зависят от точности имитации работы всех блоков (датчиков, исполнительных органов, вычислителей и др.), входящих в состав системы управления, и достоверного описания характеристик объекта управления (аэродинамические и массо-инерционные характеристики, параметры двигательной установки и т.п.).

На стендах СММ и КМС за имитацию работы бортовых вычислителей, организацию обменов в соответствии с реальными циклограммами работы отвечает специальное программное обеспечение (СПО). Имитацию работы приборов (включая всевозможные отказы и разбросы параметров) и объекта управления (с различными сочетаниями разбросов) осуществляет имитационное программное обеспечение (ИПО).

СПО на математических стендах должно корректно имитировать работу многогранных вычислителей (применяемых в СУ космических аппаратов) или многомашинных систем, организовывать в ресурсах

одного персонального компьютера разные области с адресными пространствами для каждого вычислителя, обеспечивать изолированное (для исключения пересечения по переменным) выполнение программ из состава БПО и ИПО, корректную последовательность вызовов бортовых модулей в соответствии с циклограммами диспетчеров циклов, циклограммы и состав информационных массивов в обмене между приборами и пр. При разработке СПО важнейшее значение имеют корректное техническое описание приборов (включая электрическое взаимодействие) и полнота протоколов информационного взаимодействия.

Самое важное при разработке ИПО КА – корректность описания аэродинамических и массо-инерционных характеристик объекта управления, от которой существенно зависит настройка контуров управления и жизнеспособность изделия в целом при контрольных пусках на этапе летно-конструкторских испытаний. Однако не менее важна достоверная имитация работы всех приборов (особенно в отказных ситуациях и при разбросах параметров).

Таким образом, полное и достоверное описание характеристик всего изделия – наиважнейшее условие качественной отработки БПО еще на этапе наземных испытаний (в том числе сокращающее издержки головного разработчика на этапе летных испытаний), в которых стенды СММ и КМС являются центральными звеньями.

7.5. Отладка и испытания функционального программного обеспечения на автоматизированном цифровом комплексе

«Выходными» стендами для проверки программного обеспечения и аппаратуры системы управления космическим аппаратом являются автоматизированный цифровой комплекс и комплексный стенд. На этих стендах проводятся сдаточные испытания ПО и аппаратуры СУ.

Комплексный стенд представляет собой аппаратный стенд с максимально возможным количеством блоков реальной аппаратуры (вычислители, блоки силовой автоматики, исполнительные платы, реальные приборы или имитаторы датчиков/исполнительных органов)

со штатной кабельной сетью и штатным бортовым ПО. Также в состав стенда входит аппаратура и программное обеспечение наземной контрольно-проверочной аппаратуры (НКПА), с помощью которой проводятся непосредственно испытания бортовой аппаратуры. Данный стенд позволяет проводить:

- автономные испытания блоков СУ и смежных систем;
- проверку полярностей трактов управления СУ;
- режим имитации полета;
- частные программы проверки различных трактов управления.

На комплексном стенде в основном проводятся «электрические» испытания – проверка правильности коммутации блоков, снятие характеристик с аналоговых сигналов управления СУ, проверка реализации протоколов электрического взаимодействия блоков и т.п.

Помимо «электрических» проверок на этом стенде (как наиболее полно реализующем штатную структуру СУ) также проводятся испытания системы организации вычислительного процесса (СОВП) с реальной аппаратурой. Эту часть БПО можно проверить в полном объеме (в режимах реконфигурации вычислителей, перезаписи РПЗУ, имитации различных отказов и сбоев по обменам и т.п.).

Проводить полноценные испытания БПО в замкнутом контуре на комплексном стенде невозможно. К примеру, при отсутствии динамического поворотного стола бортовые алгоритмы навигации не имеют возможности достоверно обрабатывать датчиковую информацию, т. е. контур управления не может быть замкнут по сигналам реальных приборов. Поэтому на данном стенде испытания БПО при работе в полетной циклограмме не проводятся, из всего БПО задействуется часть, работающая в наземной циклограмме и обеспечивающая проверку прохождения электрических сигналов по конкретным трактам управления. Для таких проверок обычно используется принцип программного управления, когда управляющие сигналы формируются по заложенной в БПО жесткой логике или полученной от НКПА (через

изменение параметров бортовых алгоритмов) временной циклограмме работы алгоритмов СУ.

Основная проверка бортового программного обеспечения осуществляется на **автоматизированном цифровом комплексе (АЦК)** или стенде полунатурного моделирования (СПНМ), представляющем из себя объединенный в комбинированную компьютерную сеть набор бортовых и имитационных вычислителей. АЦК позволяет проводить в реальном времени проверку функционирования большей части бортового программного обеспечения на реальных вычислителях в режиме замкнутого контура.

В состав стенда входят: основной бортовой вычислитель (БЦВМ), решающий максимальное количество функциональных задач, несколько цифровых имитаторов (например, имитаторы гироскопического измерителя вектора угловой скорости, комплекса управляющих двигателей-маховиков и т.д.) и основная моделирующая машина с имитационным программным обеспечением.

Применение БЦВМ (в штатной комплектации с многогранным исполнением и штатной кабельной сетью) определяет работу всего стенда АЦК в режиме реального времени.

Основным связующим звеном стенда АЦК является моделирующая машина с ИПО, выполненная на базе персонального компьютера.

Цифровые имитаторы устройств также выполняются на основе бытовых компьютеров, в состав которых входят специализированные платы расширения, обеспечивающие двунаправленный обмен по штатным бортовым линиям связи (в соответствии со стандартным протоколом обмена).

Применение цифровых имитаторов вместо реальных блоков на стендах АЦК и КС продиктовано как дороговизной заказа дополнительных комплектов аппаратуры, так и сложностями в применении блоков собственной разработки на стенде – например, для работы блоков силовой автоматики потребуются достаточно сложные имитаторы нагрузки (чаще всего аналоговой). Поэтому стыковка аппаратуры в

полном объеме происходит обычно либо на комплексном стенде (если Заказчик предусматривает временное использование смежных блоков), либо уже на стендах Заказчика.

Основное условие качественной отработки БПО – полная идентичность параметров математических моделей датчиков, исполнительных элементов и изделия в целом параметрам соответствующих подсистем реального изделия. Проверка совпадения параметров модели и реальных устройств может быть осуществлена только при сравнении результатов моделирования с результатами испытательных полетов и пусков изделий с реальной системой телеметрии .

Эффективность уточнения параметров моделей датчиков связана также с использованием в качестве эталона навигационной информации приемника спутниковых сигналов объекта.

Традиционная технология проверки соответствия параметров математических моделей датчиков заключается в анализе близости текущих координат и проекций вектора скорости, измеряемых датчиками, соответствующим эталонным параметрам. Эта технология достаточно трудоемка, поэтому она, как и разработка бортовых программ, нуждается в автоматизации.

В ряде случаев в состав бортового ПО входят целые программные подсистемы, разработанные по техническим требованиям смежных предприятий (например, управление и контроль двигательной установки на космических аппаратах). И в этих случаях, когда технические требования выполняются в соответствии с требованиями машинной обработки, программные компоненты новой технологии разработки ПО позволяют существенно сократить время формирования программных сборок и повысить начальную степень отлаженности БПО за счет автоматизации процесса программирования.

При использовании формализованного описания алгоритмов существенно упрощается процесс общения разработчиков разных предприятий, специалистам других фирм не требуется глубоко вникать в особенности и возможности бортового программирования, ис-

ключается долгий этап обмена исходными данными и результатами расчета контрольных примеров для выявления «ручных» ошибок программирования. Положительным побочным эффектом такого подхода является возможность получения разработчиками-смежниками прототипов бортовых программных модулей, выполненных на языке высокого уровня и пригодных для автономной отладки и поиска логических ошибок еще до получения окончательных технических требований.

Таким образом, многократно сокращается время до момента стыковки и отладки (в поисках именно логических, а не программных ошибок) программных подсистем разных фирм-разработчиков.

8. ОРГАНИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ АППАРАТУРЫ БОРТОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Увеличение срока активного существования (САС) космических аппаратов (КА) с 2–3 лет до 10–15 лет влечет за собой необходимость увеличения надежности КА. Как следствие, это обуславливает увеличение надежности блоков и устройств, входящих в состав КА, что приводит к созданию блоков с системой троирования и четверирования, а это в свою очередь – к значительному удорожанию КА. Сейчас стоимость КА, предназначенных для поддержания связи и телекоммуникаций, достигает 0,5 млрд долларов, а стоимость специализированных военных спутников – 1-2 млрд долларов. Вследствие такой высокой стоимости КА, а также высокой стоимости ракет-носителей (РН) появляется необходимость создания аппаратуры с высокой степенью надежности и качества изготовления, что приводит к необходимости проведения различных видов испытаний, подтверждающих высокую надежность и качество изготовления блоков. Для примера можно привести величину надежности системы управления телекоммуникационного спутника «KazSat» – она равна 0,998.

Для подтверждения требований по надежности, а также требований технического задания (ТЗ) и ГОСТов [29] разработаны различные виды испытаний аппаратуры.

8.1. Виды испытаний аппаратуры

Вся гамма испытаний аппаратуры делится на:

1. Конструкторско-доводочные испытания. Это те виды испытаний (механические – вибрация, удары, линейные ускорения, тепловые – воздействие отрицательных температур, положительных температур, термоциклирование – от максимальной отрицательной температуры до максимальной положительной), при проведении которых подтверждается правильность выбранного конструктивного решения.

2. Отработочные испытания (лабораторные отработочные испытания – ЛОИ, совместные отработочные испытания – СОИ). При проведении данных видов испытаний подтверждается правильность выбранного схмотехнического решения на уровне отдельных устройств, входящих в блок (ЛОИ), и правильность выбранного схмотехнического решения на уровне блока (СОИ).

3. Приемно-сдаточные испытания (ПСИ).

При проведении данного вида испытаний происходит подтверждение соответствия изготовленных блоков и устройств техническим условиям (ТУ) на эти блоки и устройства. Как правило, в состав этого вида испытаний входят:

- вибрационные испытания с перегрузками и временем воздействия 0,5 от требований ТЗ;
- термовакуумные испытания, при которых проверяется работоспособность блоков при воздействии вакуума до 10^{-6} мм рт. ст. и воздействии температур (положительных и отрицательных).

4. Предварительные испытания (ПИ).

При проведении данного вида испытаний происходит подтверждение соответствия приборов требованиям ТЗ по внешним воздействующим факторам (ВВФ) и ГОСТам. В состав данного вида испытаний входят:

- Испытания на вибрацию (прочность, устойчивость) при выведении РН в космос.
- Испытания на воздействие ударов или виброударов (прочность, устойчивость) при срабатывании пиропатронов, при разделении ступеней РН, обтекателя и самого КА.
- Испытания на воздействия линейных ускорений (прочность, устойчивость) при выведении РН в космос и коррекция выведения КА.
- Термовакуумные испытания на воздействие космического пространства (разряжение до 10^{-6} мм рт. ст. и воздействие различных по знаку температур от $+125^{\circ}\text{C}$ до -125°C). Как правило, такие большие

температуры задаются очень редко, так как целевая аппаратура и аппаратура управления располагаются на КА на панелях системы обеспечения теплового режима (СОТР), которая поддерживает температуру в пределах от -20°C до $+40^{\circ}\text{C}$.

– Испытания на надежность.

– Испытания на ресурс (ускоренный ресурс). В форсированном режиме проводятся испытания на подтверждение ресурса аппаратуры. Указанный вид испытаний позволяет значительно сократить время испытаний аппаратуры с 10–15 лет до 5–7 лет.

– Испытания на радиационную стойкость. Подтверждается, что воздействие протонов, электронов и тяжелых заряженных частиц космического пространства не выводит аппаратуру из строя в течение всего срока активного существования.

– Испытания на электромагнитную совместимость. Выявляется уровень помех по цепям питания (кондуктивные помехи), а также уровень электромагнитных помех, которые выделяет испытуемый блок, и уровень электромагнитных помех, при которых испытуемый блок не будет сбоять. Одновременно проверяется взаимное влияние одного блока на другой, т.е. проверяется, приведут ли к сбоям помехи, возникающие в одном из блоков на другие блоки.

– Испытания на воздействие электростатического разряда (ЭСР). Проверяется воздействие ЭСР, возникающего под воздействием солнечного ветра на КА, на работоспособность блока. Величина ЭСР может достигать 14–20 кВ.

– Испытания на транспортирование. Производится имитация транспортирования всеми видами транспорта (авиационный, морской, железнодорожный, автомобильный как по асфальтированным дорогам, так и по грунтовым). Данный вид испытаний может проводиться как на вибрационном стенде, так и на специализированном стенде имитации транспортирования, на котором воспроизводятся все виды воздействий на транспорте.

– Испытания на потерю массы изделия. Проверяется потеря массы блока при воздействии высокого разряжения и температуры (дегазация прибора).

– Испытания на воздействие компонентов топлива РН. Проверяется устойчивость работы блока при воздействии компонентов топлива РН.

5. Летные испытания (ЛИ). Проверяется работоспособность блока в реальных условиях космического полета.

8.2. Испытательное оборудование

Приведенный выше перечень испытаний проводится с использованием аппаратуры различного вида и назначения. Далее показаны общий вид и укрупненные характеристики части специализированного испытательного оборудования (рис. 8.1–8.6).

Приведенные иллюстрации позволяют сделать выводы:

- испытательное оборудование требует достаточно больших площадей для своего размещения;
- требуется достаточно мощное электрообеспечение;
- требуется высокий уровень подготовки обслуживающего персонала.

Вибрационный стенд ВЭДС-1500 представлен на рис. 8.1. Этот стенд позволяет проводить испытания в диапазоне частот 5–2500 Гц с тяговым усилием $P = 1500$ кг. На данном стенде можно задавать как синусоидальную вибрацию, так и широкополосную случайную вибрацию, а также виброудары.

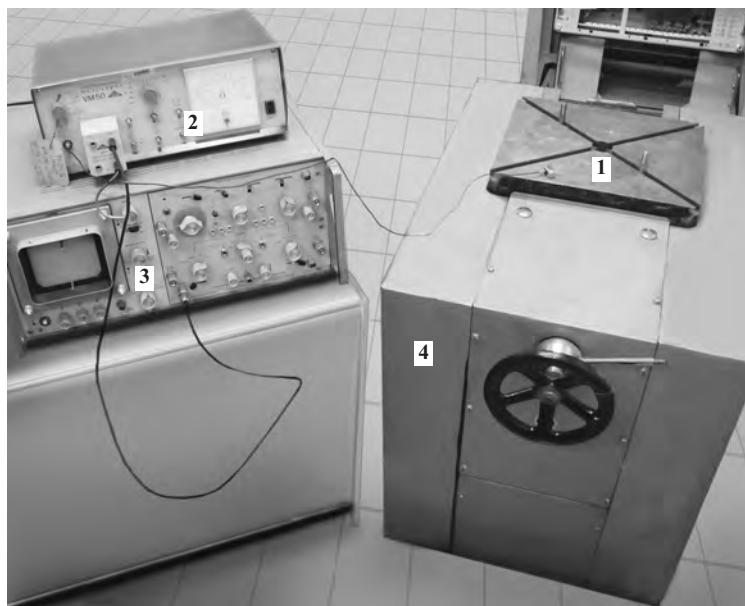
Ударный стенд STT-500 представлен на рис. 8.2. На данном ударном стенде можно задавать ударные перегрузки с амплитудой до 500 g и длительностью действия удара от 0,1 мс до 50 мс.

На рис. 8.3 представлена **центрифуга**. На центрифуге проверяется работоспособность и прочность разрабатываемых изделий с линейными перегрузками, достигающими $n = 50 g$.



1. Стол
2. Электрические усилители
3. Измеритель перегрузки
4. Генератор частоты
5. Вибробочка
6. Задачик широкополосной случайной вибрации

Рис. 8.1. Вибрационный стенд ВЭДС-1500



- | | |
|-------------------------|--|
| 1. Стол | 3. Измеритель длительности воздействия |
| 2. Измеритель амплитуды | 4. Силовая часть стенда |

Рис. 8.2. Ударный стенд STT-500

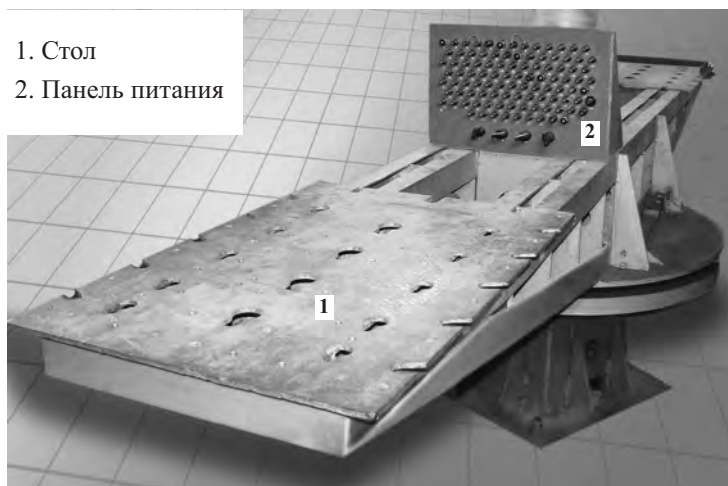
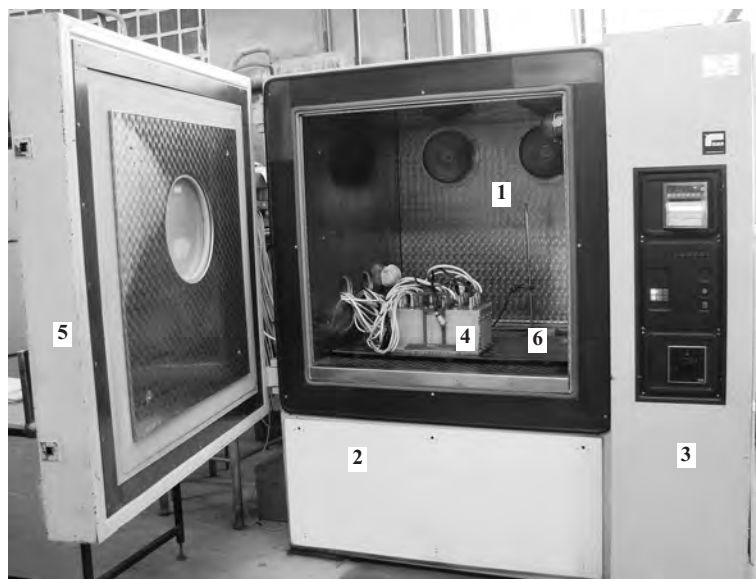
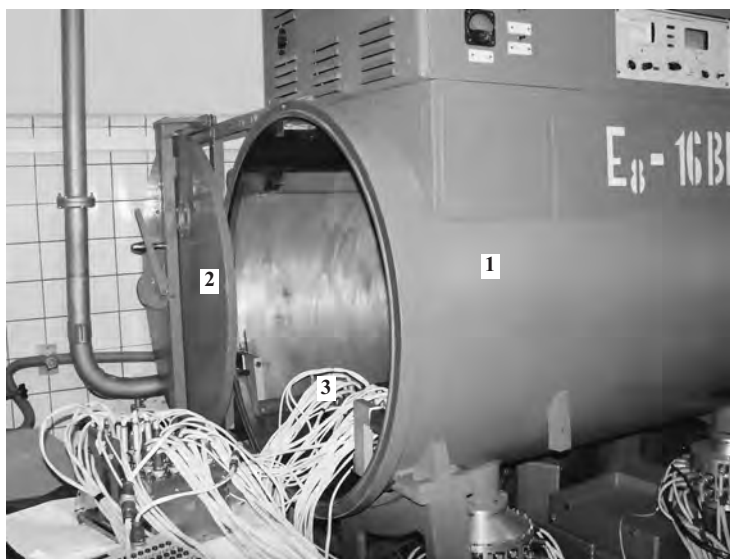


Рис. 8.3. Центрифуга



1. Термокамера с термоизолированными стенками
2. Компрессоры
3. Панель управления
4. Испытуемое устройство
5. Термическая дверь
6. Панель СОТР

Рис. 8.4. Климатическая камера ТВВ-2 00



1. Корпус 2. Крышка 3. Коммутационная панель

Рис. 8.5. Вакуумная камера с полезным объемом 2 м³



1. Камера 3. Коммутационная панель
2. Крышка 4. Панель СОТР

Рис. 8.6. Вакуумная камера с полезным объемом 0,5 м³

На рис. 8.4 представлена **климатическая камера TBV-2000**. Эта камера позволяет проводить испытания изделий в диапазоне температур от -70°C до $+120^{\circ}\text{C}$ и пониженном давлении до 10 мм рт. ст. Полезный объем до 2 м^3 .

На рис. 8.5 и 8.6 представлены **вакуумные камеры с полезным объемом 2 м^3 и $0,5\text{ м}^3$** . Данные камеры позволяют достичь максимального уровня разряжения 10^{-6} мм рт. ст. и подать на основание испытуемых изделий температуру в диапазоне $\pm 50^{\circ}\text{C}$.

Климатическая и вакуумная камеры комплектуются системой обеспечения теплового режима, аналогичной по функциям СОТР космического аппарата.

Камера влажности. Внешний вид камеры влажности аналогичен климатическим камерам (рис. 8.4). Эта камера имеет объем 1 м^3 , в котором достигается относительная влажность до 98 % и температура окружающей среды $+40^{\circ}\text{C}$.

Стенд имитации транспортирования. Стенд позволяет имитировать различные виды транспортирования: авиационный, железнодорожный, морской, автомобильный (с различными скоростями движения и различными видами покрытия дорог – грунтовая дорога, асфальтированная дорога).

Экранированная комната. Экранированная комната позволяет изолировать разрабатываемое изделие от воздействий внешней среды во всем техническом диапазоне частот (100 Гц – 300 мГц), а также позволяет производить замеры электромагнитных полей, создаваемых самим изделием, исключая влияние окружающей среды.

Камера комплексных воздействий обеспечивает одновременно: вибрационные воздействия, температурные воздействия, воздействие влажности и воздействия пониженного давления.

8.3. Требования по внешним воздействующим факторам, предъявляемые к летательным аппаратам

Формирование требований по внешним воздействующим факторам (ВВФ) происходит при определении класса исполнения аппаратуры, а затем при определении группы исполнения аппаратуры внутри соответствующего класса.

Аппаратура, устанавливаемая на технических объектах, подразделяется на шесть классов исполнения.

Рассмотренные в настоящем пособии бортовая цифровая вычислительная система (БЦВС), блоки силовой автоматики (БСА) и датчики устанавливаются на изделиях, относящихся к четаертому (ракетная техника) и пятому (космическая техника) классам. Для данных двух классов существует разделение аппаратуры на группы исполнения по месту расположения (головная зона, центральная зона, в том числе в приборных герметизированных или негерметизированных отсеках, зона двигателей).

К аппаратуре, в зависимости от класса и группы исполнения, предъявляются различные требования согласно ГОСТ РВ 20.39304-98.

В табл. 8.1 представлен весь спектр внешних воздействующих факторов, характерных для указанных классов и групп исполнения аппаратуры. Отметим, что при разработке конкретных приборов и устройств, в зависимости от расположения рядом стоящих приборов, данные ВВФ могут корректироваться.

Основным документом, определяющим виды и уровни воздействий, является техническое задание. В нем конкретно перечисляются все виды ВВФ, которые отличаются от указанных в ГОСТ РВ 20.39304-98, а все остальные задаются в соответствии с классом аппаратуры и группой ее исполнения.

Остановимся более подробно на пятом классе аппаратуры, которая подразделяется на следующие группы исполнения:

1. Аппаратура, предназначенная для установки в бытовых отсеках и отсеках с повышенной защитой КА.

Таблица 8.1

Требования к аппаратуре ракетной и космической техники

Воздействующий фактор	Характеристика воздействующего фактора
Случайная широкополосная вибрация	Среднеквадратичные значения ускорения, $\text{м/с}^2(g)$
	Диапазон частот, Гц
Акустический шум	Уровень звукового давления, дБ
	Диапазон частот, Гц
Механический удар одиночного действия	Пиковое ударное ускорение, $\text{м/с}^2(g)$
	Длительность действия ударного ускорения, м·с
Механический удар многократного действия	Пиковое ударное ускорение, $\text{м/с}^2(g)$
	Длительность действия ударного ускорения, м·с
Сейсмический удар	Ускорение, $\text{м/с}^2(g)$
Линейное ускорение	Значение ускорения, $\text{м/с}^2(g)$
Виброудар одиночного действия	Ускорение, $\text{м/с}^2(g)$
	Время достижения максимального значения, м·с
	Длительность воздействия, м·с
Виброудар многократного действия	Ускорение, $\text{м/с}^2(g)$
	Время достижения максимального значения, м·с
	Длительность воздействия, м·с
Атмосферное пониженное давление	Значение при эксплуатации, Па (мм рт. ст.)
Изменение атмосферного давления	Скорость изменения давления, Па/с (мм рт. ст./с)

Таблица 8.1 (окончание)

Воздействующий фактор	Характеристика воздействующего фактора
Повышенная температура среды	Рабочая температура, °С
	Предельная температура, °С
Пониженная температура среды	Рабочая температура, °С
	Предельная температура, °С
Изменение температуры среды	Диапазон изменения температуры, °С От пониженной предельной температуры среды до повышенной предельной температуры среды
Повышенная влажность воздуха	Относительная влажность, %
	Температура, °С
Пониженная влажность воздуха	Относительная влажность, %
	Температура, °С
Атмосферные выпадающие осадки (дождь)	Верхнее значение интенсивности осадков при эксплуатации, мм/мин
Атмосферные конденсированные осадки (иней и роса)	
Соляной (морской) туман	
Статическая пыль (песок)	
Динамическая пыль (песок)	
Среда заполнения:	Объемная доля, %, до...
азот	
кислород	
водород	
углекислый газ	
гелий (аргон)	
прочие газы	

2. Аппаратура, предназначенная для установки в приборных отсеках и контейнерах КА.

3. Аппаратура, предназначенная для установки в негерметизированных приборных отсеках, а также на внешней поверхности КА с применением мер защиты.

4. Аппаратура, предназначенная для установки на внешней поверхности КА без применения мер защиты.

Аппаратура групп 1–4 по принципу управления КА подразделяется на:

- применяемую на пилотируемых КА;
- применяемую на автоматических КА.

Аппаратура групп 1–4 в зависимости от срока активного существования (САС) КА подразделяется на:

- А – кратковременный САС до 10 тыс. час;
- Б – средний САС от 10–30 тыс. час;
- В – длительный САС от 30–70 тыс. час;
- Г – сверхдлительный САС свыше 70 тыс. час;
- Д – работающие в сеансном режиме.

8.4. Методика проведения испытаний на широкополосную случайную вибрацию

Широкополосная случайная вибрация характерна для полета КА в составе ракеты-носителя и разгонного блока (РБ), а также при разделении ступеней и отделении элементов РН и РБ. Данное воздействие имеет место при работе бортовой аппаратуры во время космического полета. Все это относится и к необходимости испытаний на воздействие виброударов и линейных ускорений.

Методика проведения испытаний на широкополосную случайную вибрацию состоит из такой последовательности действий.

На стол вибростенда (рис. 8.1) помещается жесткостной габаритно-массовый макет испытываемого изделия и устанавливается за-

дающий вибродатчик. С помощью установки, задающей случайную вибрацию, устанавливаются дисперсии, соответствующие требованиям ТЗ (или соответствующего ГОСТа) во всем диапазоне задающих частот (20–2000 Гц). После того как необходимые дисперсии установлены, задается действующая вибрация на жесткостной габаритно-массовый макет испытуемого изделия и с помощью задающего вибродатчика проверяется суммарная дисперсия, которая была определена предварительно путем расчета. Убедившись, что задающая вибрация соответствует требованиям ТЗ, задающая перегрузка снимается, и габаритно-массовый макет замещается на испытуемое изделие. Такой заменой габаритно-массового эквивалента на испытуемый прибор исключается возможность скачкообразного возрастания вибрации при наличии существенного различия жесткости вибростенда и испытуемого изделия. Жесткостная модель макета должна максимально соответствовать жесткостной модели испытуемого изделия. Крепления макета и испытуемого изделия на рабочем столе вибростенда должны быть идентичны.

После того как вибронегрузка установлена в соответствии с ТЗ, задаются время воздействия и вид испытаний (виброустойчивость или вибропрочность). При проведении испытаний на виброустойчивость испытуемое изделие подключается к питанию и проводится проверка работоспособности по ТУ. В случае проведения испытаний на вибропрочность подаются вибрационные воздействия, после которых проверяется работоспособность изделия в соответствии с требованиями ТУ.

В случае проведения предварительных заводских испытаний после их завершения оформляется акт. При проведении приемо-сдаточных испытаний заполняется технологический паспорт, который является сопроводительным документом к изделию.

8.5. Методика проведения испытаний на виброудар

Методика проведения испытаний на воздействие виброудара (удара) состоит из следующей последовательности действий.

На стол ударного стенда (рис. 8.2) помещается жесткостной габаритно-массовый макет испытуемого изделия и устанавливается задающий вибродатчик (этот вид воздействия можно воспроизвести и на вибростенде).

С помощью установки, задающей параметры виброудара, устанавливается амплитуда виброудара, длительность и дисперсия, соответствующая требованиям ТЗ во всем диапазоне частот (20 + 200 Гц). После того как все необходимые параметры виброудара (удара) заданы, подается несколько импульсов виброудара и по задающему датчику через измеритель ударного импульса ВМ-50 и запоминающий осциллограф С8-В проверяется правильность установки виброударного импульса.

Задающая величина виброудара (удара) замеряется, и производится замена габаритно-массового макета на испытуемое изделие. Такой заменой исключается возможность скачкообразного возрастания виброудара при наличии существенного различия жесткости ударного стенда и испытуемого изделия. Крепление испытуемого изделия на ударном стенде производится аналогично креплению в изделии, куда будет входить испытуемый блок.

При проведении испытаний на воздействие виброудара испытуемое изделие подключается к питанию и проводится проверка работоспособности по ТУ.

В случае проведения предварительных заводских испытаний после их завершения оформляется акт. При проведении приемо-сдаточных испытаний заполняется технологический паспорт, который является сопроводительным документом к изделию.

8.6. Методика проведения испытаний на воздействие линейных ускорений

На столе центрифуги (рис. 8.3) устанавливается испытуемое изделие в полном соответствии с системой крепежа на летательном аппарате. После этого включается двигатель центрифуги и происходит

постепенное увеличение скорости вращения центрифуги и, следовательно, перегрузки до величины, соответствующей ТЗ на изделие. Когда величина перегрузки, соответствующей ТЗ, достигнута, задается отсчет времени воздействия линейной перегрузки. После того как время воздействия линейной перегрузки завершено, питание на центрифугу снимается, она останавливается, и производится проверка работоспособности изделия.

При проведении испытаний на воздействие линейных ускорений испытываемое изделие подключается к питанию и проводится проверка работоспособности по ТУ.

В случае проведения предварительных заводских испытаний после их завершения оформляется акт. При проведении приемо-сдаточных испытаний заполняется технологический паспорт, который является сопроводительным документом к изделию.

8.7. Методика проведения термовакуумных испытаний

В космосе окружающее давление изменяется от 10^{-3} до 10^{-9} мм рт. ст., температура меняется от -125°C до $+125^{\circ}\text{C}$, следовательно испытательное оборудование должно обеспечивать указанные условия по температуре и давлению на заданное в ТЗ время.

Испытуемый блок помещается в вакуумную камеру (рис. 8.5) и закрепляется на панели, полностью имитирующей панель системы обеспечения теплового режима на КА. Система крепежа блока аналогична системе крепления на КА. Камера закрывается герметичной дверью, и начинают снижать давление в барокамере до величины, заданной в ТЗ (как правило до 10^{-6} мм рт. ст.). Одновременно происходит снижение температуры в барокамере системой СОТР до величины, заданной в ТЗ (диапазон температур: $-125^{\circ}\text{C} \div +125^{\circ}\text{C}$). После того как температура в камере достигла заданной в ТЗ величины, производится стабилизация температуры блока путем его выдержки по времени (в соответствии с его массой). По окончании

выдержки блока на него подается питание и производится проверка работоспособности блока по ТУ.

Затем системой СОТР температура поднимается до величины, заданной в ТЗ, и опять производится стабилизация температуры блока, после чего проводится проверка работоспособности блока по ТУ.

В случае проведения предварительных заводских испытаний после их завершения оформляется акт. При проведении приемо-сдаточных испытаний заполняется технологический паспорт, который является сопроводительным документом к изделию.

8.8. Летные испытания

Летные испытания (ЛИ) представляют собой заключительный этап в серии разнообразных испытаний перед вводом конкретного спутника в штатную эксплуатацию. Отдельные подсистемы могут проходить летные испытания в составе предшествующих КА. Круг задач, решаемых в процессе ЛИ, значителен. На каждую систему РН, РБ и КА, и на их составляющие, а также на наземное оборудование имеются свои тактико-технические задания (ТТЗ) с конкретизируемыми требованиями, по объему немного уступающими ТТЗ на весь комплекс. Для выполнения этих многочисленных, сложных и, конечно же, необходимых требований разработчиками составляются программы испытаний, где буквально все «раскладывается по полочкам»: где и каким образом будет подтверждаться каждый пункт ТТЗ. Кроме основной программы испытаний выпускаются до 40–50 частных зачетных, межведомственных, конструкторских этапных программ и 50–100 методик этих испытаний, выполнение которых, как правило, предшествует допуску к госиспытаниям.

При летной отработке ракетного комплекса осуществляется натурная проверка функционирования всего большого и сложного комплекса агрегатов и систем.

Цель этапа летных испытаний ракеты-носителя или космического аппарата в части экспериментальной отработки системы управления СУ):

- подтверждение выполнения функциональных задач СУ;
- оценка функционирования СУ в реальных условиях полета;
- подтверждение реализованных в СУ принципов управления объектом и методов контроля функционирования СУ;
- проверка соответствия фактических характеристик объекта расчетным и уточнение исходных данных на проектирование;
- отработка эксплуатационной документации.

В процессе летных испытаний получается информация о функционировании системы управления в условиях реальной эксплуатации. Для достижения этой цели необходимы средства внешнетраекторных и телеметрических измерений, включающих бортовую аппаратуру сбора, хранения и передачи телеметрической информации (ТМИ) на Землю и аппаратуру приема на наземных пунктах. Основное условие для их начала – завершение всего объема наземной отработки изделия и его составных частей. Нужно отметить, что летные испытания могут начинаться и заканчиваться не в любой момент времени, а лишь на соответствующих плану запусков КА отрезках времени.

Работа системы управления от момента старта и до момента отделения КА или разгонного блока, длящаяся до 10 минут, проходит в зоне видимости наземных пунктов наблюдения, что позволяет принимать информацию о состоянии СУ в полном объеме и реальном масштабе времени.

Орбитальные полеты РБ и КА в основном проходят вне зоны прямой видимости наземных пунктов наблюдения. Время приема информации одним наземным измерительным пунктом (НИП) измеряется несколькими минутами. Для обеспечения приема ТМИ в течение 10–25 минут НИПы необходимо размещать по траектории движения КА с перекрытием зон радиовидимости. А так как функционирует СУ

непрерывно в течение полета, то возникает задача сбора и хранения ТМИ на борту КА при полете вне зон радиовидимости и ее передачи в определенные моменты времени на НИПы.

Существует устойчивая тенденция сокращения объема летных испытаний и переноса центра тяжести отработки систем КА на испытания в наземных условиях. Считается, что в полете должны отрабатываться лишь комплексные проблемы, решение которых невозможно в рамках наземно-стендовых испытаний. Основными аргументами в пользу такой точки зрения являются экономические, экологические и технические соображения. При огромных затратах на организацию и проведение натурных (летных) испытаний они зачастую оказываются менее информативными, чем наземные эксперименты, из-за ограниченного числа измерительных средств и радиотелеметрических каналов.

Основной принцип управления космическим аппаратом – выполнение целевой задачи. Окончательную оценку соответствия функционирования КА целевой задаче ставят летные испытания. Для этого в программе испытаний предусматривается тестирование режимов перед их штатным использованием. Задача тестовых включений – проверка функционирования приборного состава СУ в данном режиме – заключается в проверке:

- функционирования исполнительных органов;
- функционирования смежных систем.

На всех стадиях этапа летных испытаний КА, прежде всего на первых витках, особое внимание уделяют анализу функционирования элементов СУ:

- приборов СУ (бортового цифрового вычислительного комплекса, блоков автоматики и др.);
- командных приборов с учетом резервирования датчиков угловой скорости, приборов ориентации на Землю и Солнце, астроизмерительных приборов;
- исполнительных органов.

По результатам тестов оценивают работоспособность аппаратуры, определяют основные комплекты, которые будут включены при штатной работе либо по полетному заданию, либо по командам центра управления полетом.

Объектами оценки и подтверждения соответствия применительно ко всему космическому комплексу являются:

- космические системы и космические комплексы, воздушно-космические комплексы;
- составные части космических комплексов;
- ракеты-носители и их системы;
- разгонные блоки и их системы;
- сборочно-защитные блоки и головные обтекатели;
- космические аппараты (автономные и пилотируемые) и их системы;
- космические станции, орбитальные комплексы и их системы;
- технические и стартовые комплексы и их оборудование;
- научная и другая целевая аппаратура космических аппаратов, орбитальных комплексов, космических станций;
- информационные системы космических комплексов;
- программно-математическое обеспечение космических комплексов, их составных частей и объектов космической инфраструктуры;
- баллистико-навигационное обеспечение;
- комплектующие изделия и материалы;
- наземные комплексы управления (НКУ);
- наземные комплексы приема специальной информации с КА;
- измерительные системы космодромов и их программное обеспечение.

После каждого пуска производится анализ результатов с выпуском отчета о соответствии космического комплекса установленным требованиям по результатам проектирования, наземной экспериментальной отработки и летных испытаний. В итоге выдается сертифи-

ката соответствия в системе обязательной сертификации космической техники научного и социально-экономического назначения.

Законодательную и нормативную основу оценки подтверждения соответствия космических комплексов составляет, в частности, Положение о Государственной комиссии по проведению летных испытаний космических систем и комплексов, утвержденное постановлением Правительства Российской Федерации от 08.12.2002 г. № 90.

Подтверждение выполнения функциональных задач СУ, которые зависят от назначения КА, может быть представлено двумя массивами информации:

- выведение РН с КА на заданную траекторию с требуемыми параметрами по наклону, высоте в перигее, апогее, периоду обращения вокруг Земли;
- отделение КА (или разгонного блока) от РН с обеспечением требуемых начальных условий автономного полета КА.

Оценку функционирования СУ в реальных условиях полета можно разделить на два этапа:

- Оперативный – заключается в визуальном анализе на экране монитора значений основных параметров СУ в темпе приема ТМИ в сеансах связи с КА. Форма представления информации приводится в учебном пособии «Система управления разгонным блоком» [27].
- Детальный – заключается в анализе работы системы управления по данным ТМИ как в течение сеанса связи, так и вне его. Анализ проводят после сеанса связи с КА по формам представления информации с КА.

Подтверждение реализованных в системе управления принципов управления объектом и методов контроля функционирования СУ заключается в анализе выполнения законов управления движением. Для проведения анализа в бортовом программном обеспечении предусматривается контроль выполнения выбранных законов управления и определяется нахождение различных характерных параметров в заданных диапазонах:

- допустимого рассогласования между параметром управления и его программным значением в допустимом пределе;
- скорости изменения параметров в допустимых пределах;
- продолжительности включения исполнительных органов в допустимых пределах.

Превышение значений заданных критериев контроля в процессе полета вызывает необходимость ликвидации РН или РБ. Превышение значений заданных критериев контроля для СУ приводит либо к переходу СУ в режим функциональных проверок, либо к ее выключению. Последующий анализ летной ситуации позволяет организовать работу СУ с парированием причин, приведших к сбою.

В проверку соответствия фактических характеристик объекта управления расчетным и уточнение исходных данных на проектирование в части СУ входит:

- оценка эффективности исполнительных органов и величин возмущающих моментов;
- уточнение массово-инерционных характеристик на различных этапах полета (координаты центра масс относительно связанной системы координат, массы, моменты инерции);
- аэродинамические характеристики РН и РБ;
- упругие характеристики РН, РБ и КА.

Анализ соответствия фактических характеристик космического объекта расчетным характеристикам, которые получаются по данным ТМИ, позволяет оценить их соответствие исходным данным на проектирование СУ.

Реальные реакции КА на управляющие воздействия исполнительных органов поступают по каналам ТМИ уже после первых сеансов связи, что позволяет оценить:

- ускорения, создаваемые исполнительными органами;
- величины управляющих и возмущающих моментов;

- частоты, амплитуды и коэффициенты затухания упругих колебаний объекта в местах установки командных приборов.

Результаты анализа сравнивают с исходными данными по расчетам динамической схемы КА. При необходимости их можно уточнить в настройках СУ или в полетном задании.

Эксплуатация разгонных блоков «Бриз-М» началась летом 1999 г. 6 июня 2000 г. с космодрома Байконур был произведен первый успешный запуск РН «Протон-К» с РБ «Бриз-М»: полет ракеты-носителя прошел в штатном режиме, и разгонный блок доставил российский спутник «Горизонт» на заданную орбиту. Летные испытания разгонного блока «Бриз-М» подтвердили высокие качества нового изделия.

После успешного завершения летных испытаний, в 2002 г. ракеты-носители «Протон-К» и «Протон-М» с разгонными блоками «Бриз-М» стали использоваться для коммерческих пусков. Всего проведено более 40 пусков.

9. ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ

В книге «Бортовые системы управления космическими аппаратами» [6] показано, что базой для систем управления космическими аппаратами является бортовая цифровая вычислительная система (БЦВС). Ее вычислительные ресурсы обеспечивают решение всех функциональных задач системы управления, в том числе взаимодействие со смежными системами через блоки силовой автоматики (БСА). С технической точки зрения БЦВС и БСА состоят из отдельных, порой очень сложных, электронных устройств (см. раздел 1).

Повышение сложности электронных устройств привело к необходимости повышения эффективности их проектирования. До недавнего времени при проектировании электронных устройств использовались в основном два способа: расчет и экспериментальное исследование. Расчет производился на математических моделях (аналитических или графических), а экспериментальное исследование – на макете реального устройства. По результатам экспериментального исследования делалось заключение о соответствии макета требованиям технического задания к характеристикам электронного устройства. При их расхождении обычно производилась доработка макета. При этом зачастую не учитывались многие факторы: разброс параметров элементов, влияние изменения климатических условий, возможные отказы элементов и др.

Поскольку большинство электронных элементов являются существенно нелинейными, то проектирование электронных устройств практически полностью исключало применение простых аналитических расчетов. Это существенно затрудняло задачи проектирования на этапе расчета и возлагало повышенные требования к экспериментальным исследованиям макета. Высокая стоимость электронных элементов и их дефицитность в конце концов привели к тому, что разработчики электронной аппаратуры стали все чаще отказываться

от экспериментальных исследований, для которых к тому же была нужна специальная дорогостоящая измерительная аппаратура.

В таких условиях большое значение приобрели методы математического моделирования электронных устройств на компьютере. Основными целями такого моделирования электронных устройств могут быть:

- предсказание поведения устройства при стандартных и нестандартных ситуациях (например, поведение электронного устройства при отказе одного или нескольких элементов);
- изучение форм сигналов в различных местах электронного устройства при воздействии на него одного или нескольких сигналов (например, одновременное воздействие полезных сигналов и помех);
- обучение специалистов по разработке и проектированию электронных устройств.

Компьютерное моделирование электронных устройств имеет ряд преимуществ перед экспериментальным исследованием:

- стоимость моделирования на компьютере значительно меньше стоимости экспериментального макета;
- возможно моделирование поведения электронного устройства в критических ситуациях (например, при повышении или понижении питающих напряжений, при пробое конденсаторов или полупроводниковых элементов и др.);
- оптимизация параметров отдельных элементов устройств по заранее выбранному критерию (например, получение максимального усиления при изменении напряжения питания или сопротивления нагрузки);
- возможность масштабирования реального времени протекания процесса;
- возможность широкого применения специальных программ и моделей электронных элементов;
- возможность идентификации параметров моделей.

Математические модели электронных элементов и устройств можно разделить на следующие группы:

- линейные и нелинейные,
- статические и динамические,
- с сосредоточенными и распределенными параметрами,
- аналоговые, цифровые (дискретные) и аналого-цифровые.

При исследовании и моделировании линейных элементов и устройств используют системы линейных алгебраических или дифференциальных уравнений. При описании нелинейных моделей используются нелинейными алгебраическими или дифференциальными уравнениями.

Статические модели обычно используют при расчете и моделировании режимов по постоянному току или напряжению, а динамические модели находят применение при анализе переходных или частотных характеристик электронных устройств. В моделях с сосредоточенными параметрами используются обыкновенные дифференциальные уравнения, а в моделях с распределенными параметрами – уравнения в частных производных. Непрерывные модели могут иметь неограниченное множество значений токов и напряжений в заданном интервале их изменений, а дискретные модели могут находиться только в ограниченном (счетном) количестве состояний.

При моделировании электронных устройств пользуются моделями отдельных элементов (микромоделями) и моделями отдельных узлов (макромоделями), в состав которых входит ограниченное множество элементов. Это, например, модели операционных усилителей, компараторов, схем выборки и хранения, аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей.

При проектировании устройств, работающих на сверхвысоких частотах, в моделях учитываются распределенные параметры как самих элементов, так и их выводов. Кроме того, имеются специальные программы, в которых учитываются паразитные эффекты печатных плат: паразитные индуктивности и емкости.

Библиотека моделей электронных элементов непрерывно расширяется и совершенствуется. Крупнейшие отечественные и зарубежные фирмы уделяют большое внимание разработке моделей новых элементов электроники: мощных полевых транзисторов с изолированным затвором, мощных биполярных транзисторов с изолированным затвором (БТИЗ) и др.

Необходимость повышения производительности технологического проектирования и качества проектных решений привели к разработке систем автоматического проектирования (САПР) технологических процессов. Разработаны блоки САПР технологических процессов (ТП): моделирование изделия, диалоговая подсистема САПР ТП.

Развитие САПР привело к созданию проблемно-ориентированных пакетов прикладных программ для разработки радиоэлектронных устройств. К числу таких пакетов, используемых в МОКБ «Марс» при проектировании устройств бортовой автоматики, относятся Altium Designer [26] (раздел 10) и Quartus II (раздел 11).

9.1. Терминология в САПР. Цель и предмет САПР

Основными причинами создания автоматизированных систем проектирования являются:

1. Разрозненность отдельных методов автоматизации (подготовка документации, чертежей, моделирование технических систем, оптимизация параметров, организация экспертиз, обработка результатов, принятие решений при многокритериальной постановке задач) и отсутствие методологического единства, не позволяющие создать эффективную систему проектирования.

2. Выполнение большого объема работ в сжатые сроки.

3. Повышение требований к качеству проектов (изделий, машин и механизмов).

Удовлетворить эти противоречивые требования с помощью простого увеличения численности проектировщиков нельзя, так как возможность параллельного проведения проектных работ ограничена.

В связи с этим возникает задача автоматизации процессов проектирования.

Система автоматизированного проектирования – это совокупность средств проектирования, взаимосвязанных с коллективом разработчиков, выполняющих проектирование с рациональным распределением функций между проектировщиками и вычислительной машиной. Предполагается использование персонального компьютера (ПК) на большинстве этапов проектирования, т.е. САПР – это человеко-машинная система.

Каждая система состоит из некоторых устройств, которые в свою очередь также могут быть системой (например, летательный аппарат – бортовая система управления – блок силовой автоматики и т.д.).

Система может быть разбита на составные части или подсистемы. Причем подсистема может сама являться системой. Например, бортовая система управления состоит из бортовой цифровой вычислительной системы, блоков силовой автоматики и т.д. [6].

Задача проектирования технической системы – создание такой системы, которая наиболее точно отвечает выбранному комплексному критерию. Для технических систем показателями, составляющими критерий, являются:

- надежность;
- технологичность;
- степень стандартизации и унификации;
- экономические, эстетические, эргономические показатели.

Так как техническую систему можно разбить на подсистемы, то при проектировании имеет место системный подход. Это решение двух задач:

1) задача декомпозиции – разбиение сложной системы на составляющие ее части;

2) нахождение оптимального решения по каждой части с учетом связи между отдельными подсистемами, т.е. система более высокого уровня определяет технические требования к подсистеме.

Цель САПР – это повышение качества проектов, снижение материальных затрат, сокращение сроков проектирования и ликвидация тенденции к росту числа проектировщиков, а также повышение производительности их труда.

Для САПР характерно системное использование ПК при рациональном распределении функций между человеком и вычислительной машиной. С помощью ПК решаются задачи, поддающиеся формализации (решение системы уравнений).

Предмет САПР – это формализация проектных процедур, структурирование и типизация процессов разработки, модели, методы и алгоритмы решения проектных задач, способы построения технических средств, создания языков, описания программ, банков данных, а также вопросы их объединения в систему проектирования.

Для создания САПР необходимы:

- 1) совершенствование проектирования на основе применения математических методов и средств вычислительной техники;
- 2) автоматизация процесса поиска, обработки и выдачи информации;
- 3) использование методов оптимизации и многовариантного проектирования, применение математических моделей проектируемых объектов;
- 4) создание банков данных, содержащих сведения справочного характера;
- 5) повышение качества оформления проектной документации;
- 6) увеличение творческой доли труда проектировщиков за счет автоматизации нетворческих работ;
- 7) унификация и стандартизация методов проектирования;
- 8) подготовка и переподготовка специалистов в области САПР;
- 9) взаимодействие САПР с автоматизированными системами различного уровня.

9.2. Принципы создания САПР. Методы принятия решения в САПР

САПР – это комплекс средств автоматизации проектирования, взаимосвязанных с проектными организациями (пользователями системы). САПР включает технические средства, математическое и программное обеспечение, информационное обеспечение, лингвистическое обеспечение (специальные и проблемно-ориентированные языки).

При создании САПР учитываются принципы:

- **системного единства**, т.е. целостность системы, взаимосвязь между подсистемами и ее элементами;
- **совместимости**, т.е. обеспечиваются совместное функционирование составных частей САПР и открытость системы в целом;
- **типизации** (ориентирует на создание и использование типовых и унифицированных элементов САПР с последующей их модернизацией);
- **развития** (способствует совершенствованию и обновлению составных частей САПР, а также взаимодействию с автоматизированными системами различного уровня и функционального назначения);
- **иерархичности** (проектирование по уровням структуры САПР).

Использование САПР подразумевает получение множества вариантов реализации технической системы. У проектировщика появляются проблемы оценки альтернатив и принятия решения для продвижения разработки. Решение есть компромисс между противоречивыми требованиями. Принять правильное решение означает выбрать такую альтернативу из числа возможных, в которой с учетом разнообразных факторов будет оптимизирована общая ценность.

Процесс принятия решения является искусством, если он основан только на качественных факторах, и наукой, если основан на количественных оценках.

Процесс принятия решения является классической задачей управления. Ситуацию, в которой надо принять решение, характеризует:

- наличие цели;
- наличие альтернативных линий поведения (различная элементная база, типы энергоносителей);
- учет существующих факторов (зачастую субъективных).

Принимается решение только тогда, когда в наличии имеются все три вышеперечисленных фактора.

В процессе принятия решения используется ряд математических дисциплин:

- теория оптимизации;
- теория вероятности;
- математическая статистика.

Теория оптимизации предполагает определение значения регулируемых параметров при ограничениях, приводящих регулируемый параметр к экстремуму.

Теория вероятности является теорией недостоверных выводов, т.е. определяет степень неопределенности, в которой будет работать проектируемое изделие.

Математическая статистика оперирует числовыми данными, результатами наблюдений, полученными по итогам испытаний.

9.3. Виды обеспечения САПР

Обеспечение САПР имеет несколько видов: математическое, программное, информационное, техническое, лингвистическое, методическое, организационное.

Математическое обеспечение (МО) включает в себя:

- алгоритмы, по которым разрабатывается программное обеспечение;
- функциональные модели проектируемых объектов;
- методы численного решения задач;

- методы поиска экстремума.

МО САПР делится на:

- математические методы и построение на их основе математических моделей объектов проектирования;
- формализованное описание технологии автоматизированного проектирования.
- МО должно описывать во взаимосвязи объект, процесс и средства автоматизации проектирования.

Основные требования к математическим моделям (ММ):

- **Универсальность** характеризует полноту отображения в модели свойств реального цифрового устройства (например, ММ резистора в виде уравнений закона Ома характеризует свойство резистора пропускать электрический ток, но не отражает показатели резистора как детали: его цвет, механическую прочность, стоимость и т.п.).
- **Точность** ММ оценивается степенью совпадения значений параметров реального объекта и значений тех же параметров, рассчитанных с помощью оцениваемой ММ.
- **Адекватность** ММ – способность отображать заданные свойства объекта с погрешностью не выше заданной.
- **Экономичность** ММ характеризуется затратами вычислительных ресурсов (машинное время и память; размерность ММ, количество параметров).

Математические модели можно разделить на:

- аналитические (в виде уравнений);
- алгоритмические – модели, которые выражают связи выходных параметров с параметрами внутренними и внешними в форме алгоритма с численным методом решения;
- имитационные – алгоритмические модели, отражающие поведение вычислительной системы во времени при заданных внешних воздействиях на объект – это модели массового обслуживания, заданные в алгоритмической форме.

Методика составления ММ заключается в следующем:

1. Выбор свойств ВС, которые подлежат отображению в ММ. Этот выбор основан на анализе возможных применений модели и определяет степень универсальности ММ.
2. Сбор исходной информации о выбранных свойствах объекта (опыт и знания проектировщика, научно-техническая и справочная литература, описание прототипов).
3. Синтез структуры ММ. Структура ММ – общий вид математических соотношений модели без конкретизации числовых значений параметров (в виде графа, схемы, формул).
4. Расчет числовых значений параметров ММ (минимизация погрешностей модели заданной структуры).
5. Оценка адекватности ММ, т.е. сравнение расчетных значений с реальными (экспериментальными) данными.

Программное обеспечение (ПО) – это совокупность всех программ и эксплуатационной документации к ним, необходимых для выполнения автоматизированного проектирования. ПО делится на общесистемное и специальное (прикладное).

Общесистемное ПО создано для организации функционирования технических средств, т.е. планирования и управления вычислительным процессом распределения имеющихся ресурсов. Оно включает в себя операционные системы, управляющие оболочки, трансляторы с языков программирования, пакеты программ для обработки графической информации, утилиты, программы, обслуживающие внешние периферийные устройства (драйверы).

Специальное ПО реализует математическое обеспечение для непосредственного выполнения проектных процедур. Специальное ПО, или прикладное ПО, реализуется в виде пакетов прикладных программ (ППП), примеры которых описаны в разделах 10 и 11.

Уровни программного обеспечения: машинный код, язык Ассемблер, языки высокого уровня.

Информационное обеспечение (ИО) – это такие данные, которыми пользуется проектировщик в процессе своей деятельности для выработки проектного решения. Это справочные данные о комплектующих изделиях, типовых проектных решениях, параметрах элементов, сведения о состоянии текущих разработок в виде промежуточных и окончательных проектных решений, структур и параметров проектируемых объектов. Совокупность данных, используемых в САПР, составляет информационный фонд. Основная функция ИО – это ведение фонда, обновление, сохранение и организация доступа к данным.

В состав ИО САПР входят:

- программные модули;
- исходные и результирующие данные для программных модулей;
- нормативно-справочная проектная документация, государственные и отраслевые стандарты, руководящие материалы и указания, типовые проектные решения, текущая проектная документация, отражающая ход и состояние выполнения проекта.

Различают следующие способы ведения ИО САПР:

- использование файловой системы;
- построение библиотек;
- использование БД.

Применение файловой системы и построение библиотек широко распространено, так как поддерживается средствами операционной системы. Эти способы применяются при хранении программных модулей, диалоговых сценариев поддержки процесса проектирования, при вводе крупных масштабов исходных данных, хранении текстовых документов. Однако они мало пригодны при оперативной обработке справочных данных.

Лингвистические средства системы управления базами данных изменяются от языков программирования до языков, ориентированных на конкретного пользователя.

Базой данных (БД) называется структурированная совокупность связанных данных конкретной предметной области разнообразного назначения, в которой отражается состояние объектов, их свойства и взаимоотношения.

Данные несут информацию об объектах, которые могут быть материальными (схема, плата) и нематериальными (методы оптимизации). Каждый объект характеризуется **атрибутами**. Например, объект ПК можно характеризовать скоростью вычисления, объемом оперативной памяти, числом элементарных операций, числом процессоров, габаритными размерами, количеством мультиплексных каналов. Сведения, содержащиеся в каждом атрибуте, называют **значениями данных**. Каждый объект характеризуется рядом основных атрибутов (**элементов данных**). Среди элементов данных выделяют ключевые, по которым можно определить другие атрибуты объекта. Объединение значений связанных атрибутов называют записью данных (Ф.И.О., должность). Упорядоченную совокупность записей данных называют **файлом данных** или **набором данных**.

База данных – совокупность файлов, отображающая состояние объектов и их отношений в условиях САПР, совокупность файлов специально организованная и обрабатываемая с целью создания массивов данных, их обновление и получение справок (СУБД). Основное различие между БД и файлом данных состоит в том, что файл данных имеет несколько назначений, но соответствует одному представлению хранимых данных, а база данных также имеет несколько назначений, но соответствует различным представлениям о хранимых данных.

Требования к БД:

- целостность данных – их непротиворечивость и достоверность;
- организация БД должна обеспечивать согласование времени выборки данных прикладными программами с частотами их использования прикладными программами САПР;
- универсальность, т.е. наличие в БД всех необходимых данных и возможность доступа к ним в процессе решения проектной задачи;

- открытость БД для внесения в нее новой информации;
- наличие языков высокого уровня взаимодействия пользователей с БД;
- секретность, т.е. невозможность несанкционированного доступа к информации и ее изменения;
- оптимизация БД – минимизация избыточности данных.

Программное обеспечение, которое позволяет прикладным программам работать с БД без знания конкретного способа размещения данных в памяти ПК, называют системой управления базой данных – СУБД (рис. 9.1).

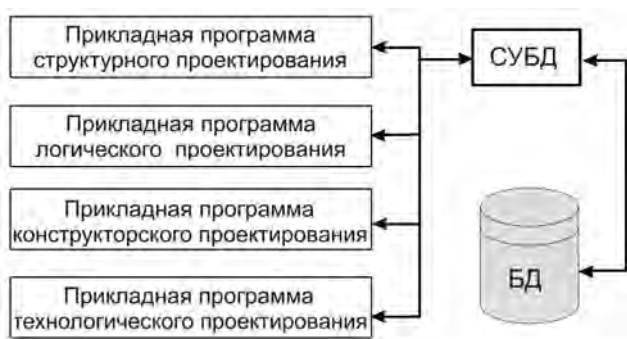


Рис. 9.1. Состав программного обеспечения

Основные функции СУБД:

- создание схемы базы данных;
- организация хранения данных;
- защита целостности БД;
- поддержание загрузки БД;
- предоставление пользователям доступа к БД.

СУБД выступает как совокупность программных средств, предназначенных для создания, ведения и совместного использования БД многими пользователями. СУБД должна обеспечивать простоту физической реализации; возможность централизованного и децентрали-

зованного управления БД; минимизацию избыточности хранимых данных; предоставление пользователю по запросам непротиворечивой информации; простоту разработки, ведение и совершенствование прикладных программ; выполнение различных функций.

СУБД реализует два интерфейса:

- 1) между логическими структурами данных в программах и в БД;
- 2) между логической и физической структурами БД.

Порядок работы СУБД в одном из режимов:

- программа запрашивает возможность чтения данных у СУБД, она передает необходимую информацию о программисте, типе записи;
- программа осуществляет поиск описания данных, на которые выдан запрос;
- программа определяет, какого типа логические и физические записи необходимы;
- программа выдает операционной системе (ОС) запрос на чтение требуемой записи;
- ОС взаимодействует с физической памятью;
- ОС записывает запрошенные данные в системные буферы;
- ОС выделяет требуемую логическую запись, выполняя необходимые преобразования;
- ОС передает данные из системных буферов в программу пользователя, а затем программе пользователя – информацию о результатах выполнения запроса;
- прикладная программа обрабатывает полученные данные.

Межмодульный интерфейс реализуется с помощью информационных программ. В САПР, программы которых оперируют с большим числом данных (входных, промежуточных, результирующих), области обмена удобно организовать в виде некоторого банка данных. Это позволяет часть функций, выполняемых адаптером, возложить на СУБД, что сокращает время на разработку информационного и программного обеспечения. Адаптер выполняет совокупность операций

по организации информационного взаимодействия между программными модулями.

Один из принципов построения САПР – информационная согласованность частей ее программного обеспечения, т.е. пригодность результатов выполнения одной проектной процедуры для использования другой проектной процедуры без их трудоемкого ручного преобразования пользователем. Отсюда вытекают следующие условия информационной согласованности:

- использование программами одной и той же подсистемы САПР единой БД;
- использование единого внутреннего языка для представления данных.

Техническое обеспечение (ТО) системы автоматизированного проектирования совместно с программным обеспечением является инструментальной базой САПР, в среде которой реализуются другие виды обеспечения САПР.

Основой технического обеспечения является персональный компьютер с комплектом периферийных устройств:

- графические мониторы с высокой разрешающей способностью;
- планшетные кодировщики;
- полномасштабные графопостроители;
- устройства вывода на магнитную ленту либо перфоленту для программирования контроллеров или станков с числовым программным управлением (ЧПУ).

Автоматизированные рабочие места (АРМ) реализуются на базе стандартных ПК.

Совокупность компонентов ТО образует комплекс технических средств (КТС). Требования к составу и структуре КТС формируются из:

- общих требований к структуре САПР;
- эффективного решения выделенного класса задач проектирования;
- активного включения пользователя в процесс проектирования;

– возможности работы с графическим материалом, включает процессы ввода, вывода, обработки информации.

КТС САПР объединены в группы взаимодействия оборудования. Группа **базовой конфигурации** – это максимальный состав, позволяющий решать задачи определенного класса. Основным компонентом базовой конфигурации является АРМ.

Режимы работы КТС зависят от задач, решаемых в САПР. По характеру вычислительного процесса задачи решаются без участия пользователя и с участием пользователя.

9.4. Классификация САПР

САПР характеризуют следующие признаки:

- тип, разновидность, сложность объекта проектирования;
- уровень, комплексность автоматизации проектирования;
- характер, число выпускаемых проектных документов;
- число уровней в структуре технического обеспечения САПР.

Тип, разновидность и сложность объекта проектирования отражают особенности объектов проектирования. Уровень, комплексность автоматизации проектирования, характер и число выпускаемых проектных документов отражают возможности систем. Число уровней в структуре технического обеспечения САПР отражают особенности технической базы САПР.

Тип объекта проектирования. ГОСТ 23501.108-85 [8] предусматривает деление САПР на группы:

1. САПР изделий машиностроения.
2. САПР изделий приборостроения.
3. САПР технологических процессов в машино- и приборостроении.
4. САПР программных изделий.
5. САПР организационных систем.

Разновидность объектов проектирования. ГОСТ требует указания обозначений на объекты проектирования и кодирования в

соответствии с системой обозначения документации на объекты, проектируемые САПР.

Сложность объектов проектирования:

- 1) простые – с числом составных частей до 10^2 ;
- 2) средние – до 10^3 ;
- 3) сложные – до 10^4 ;
- 4) очень сложные – до 10^5 ;
- 5) самые сложные – свыше 10^6 .

Составной частью объекта проектирования, представляющего технический комплекс, является деталь (микросхема).

Уровень автоматизации проектирования:

- 1) низкоавтоматизированный – до 25% проектных процедур;
- 2) среднеавтоматизированный – до 50%;
- 3) высокоавтоматизированный – свыше 50%.

Чтобы отнести САПР к третьей группе, в ней должны быть использованы методы многовариантного оптимального проектирования.

9.5. Основные достоинства САПР

После краткого обзора проблемы сформулируем преимущества, которые несет с собой система автоматического проектирования.

1. Скорость выполнения чертежей. Конструктор, использующий САПР, выполняет чертежи в три раза быстрее, чем традиционно.

2. Повышение точности выполнения чертежей. Точность чертежа, выполненного вручную, определяется остротой зрения конструктора и толщиной грифеля карандаша. На чертеже, выполненном с помощью САПР, любое место точки определено точно, а для более детального просмотра его элементов любая часть чертежа может быть увеличена.

3. Повышение качества выполнения чертежей. Качество изображения на обычном чертеже полностью зависит от мастерства кон-

структура, тогда как плоттер САПР рисует линии и тексты независимо от индивидуальных способностей человека.

4. Возможность многократного использования чертежа. Память ПК хранит библиотеку символов, стандартов, геометрических форм. В состав чертежа входит ряд компонентов, имеющих одинаковую форму. Запоминание этих компонентов и многократное их использование позволяют повысить эффективность проектирования.

5. Специальные чертежные средства. Исследование объекта в трехмерном пространстве, в динамике.

6. Ускорение расчетов и анализа при проектировании. Разнообразное математическое обеспечение позволяет произвести расчет заранее.

7. Высокий уровень проектирования. Средства ПК позволяют оптимизировать объект проектирования, перебрать варианты.

8. Сокращение затрат на усовершенствование. Средства имитации и анализа в САПР позволяют усовершенствовать прототип.

9. Интеграция проектирования с другими видами деятельности:

- АСНИ – автоматизированная система научных исследований;
- ГАП – гибкое автоматизированное производство;
- АСТПП – автоматизированная система технологической подготовки производства, включающая станки с ЧПУ, гибкие производственные системы (ГПС), средства автоматизированного тестирования.

Указанные преимущества, вносимые в процесс проектирования, реализуются в многочисленных специализированных по различным отраслям деятельности пакетах, в числе которых можно отметить Altium Designer, Quartus II и другие. Это новое поколение САПР для проектирования электронных устройств, которое составляет существенную долю затрат при проектировании систем управления космического аппарата.

В системе Altium Designer впервые реализован принцип сквозного проектирования, который подразумевает передачу результатов одного

этапа проектирования на следующий этап в единой проектной среде. Изменения, вносимые на любом этапе, должны отображаться во всех частях проекта. Такой принцип позволяет разработчику контролировать целостность проекта, отслеживать изменения и синхронизировать их. Важным шагом в достижении нужного результата при создании проекта электронного устройства является процесс отладки работы схемы устройства еще до его воплощения «в железо», поэтому в состав Altium Designer включена программа моделирования, которая позволяет разработчику сразу по окончании создания принципиальной схемы проводить ее анализ, в том числе статистический, и изменять параметры.

Средство разработки Quartus II – следующий шаг в проектировании устройств с высокой степенью интеграции, включая разработку законченных систем на одном программируемом кристалле (System-on-a-programmable-chip (SOPC)). Quartus II объединяет в себе синтез, размещение элементов, трассировку соединений и верификацию, связь с системами проектирования других производителей. Создание систем на кристалле требует от разработчиков эффективной командной работы. Программное обеспечение Quartus II – это наиболее комплексная среда для разработки систем на кристалле SOPC, доступная в настоящее время.

10. СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ALTIUM DESIGNER

Altium Designer представляет собой систему автоматизированного проектирования (САПР), отладки и выполнения комплектной документации для электронных изделий. Эта система в комбинации с современными возможностями управления проектными данными позволяет принимать законченные проектные решения при разработке электронных средств.

В 2005 г. права на продукты компании Protel перешли к фирме Altium Ltd. (Австралия), и в настоящее время версия Protel DXP, получившая определенное развитие, вышла на рынок под именем Altium Designer. Это современная мощная «сквозная» САПР, превосходящая многие другие по эффективности.

Ее отличительная особенность – возможность проектировать функциональные узлы на микросхемах программируемой логики (ПЛИС или FPGA). Для этого используется как обычный, схемный ввод исходных данных, так и ввод описания логики на языке описания схем VHDL, что позволяет модернизировать проекты, ранее разработанные на микросхемах малой и средней степени интеграции, выполнив их на ПЛИС. Допускается также импорт входных данных из других САПР, например P-CAD, OrCAD, PADS. Фирма Altium Ltd., обладающая также правами на продукты P-CAD, в 2006 г. приняла решение прекратить развитие продуктов P-CAD и полностью перейти на Altium Designer, в дальнейшем развивая только этот продукт.

10.1. Состав и основные функции Altium Designer.

Типы документов. Маршрут проектирования

Основной особенностью САПР Altium Designer является наличие единой проектной среды. В основе такой среды находится **программная платформа Design Explorer (DXP)**, объединяющая в себе работу всех модулей, т.е. запуск любого модуля осуществляется из од-

ного рабочего окна. Состав команд главного и всплывающих меню меняется в зависимости от вида текущего проекта и активности соответствующего редактора. Благодаря такому подходу в программе можно создавать и вести следующие типы проектов:

1. Проект печатной платы (файлы – *.PrjPCB) – построение схемы на основе библиотек, моделирование, создание конструкции печатной платы, получение производственных файлов (ODB++, Gerber, NC Drill).

2. Интегрированная библиотека (*.LibPkg, *.IntLib) – компиляция компонентов библиотечного пакета в единый файл интегрированной библиотеки.

3. Проект логического ядра (Core Project – *.PrjCor) – создание элементов логической структуры проекта ПЛИС.

4. Проект ПЛИС (FPGA Project – *.PrjFpg) – формирование схем или HDL-описания логики, ввод ограничений, компиляция заданной логики в формат обмена EDIF.

5. Встроенный проект (Embedded Project – *.PrjEmb) – проектирование программного приложения на языках Си или Assembler.

6. Скрипт-проект (*.PrjScr) – автоматизация с использованием интерфейса программирования приложений API на скрипт-языках (DelphiScript, EnableBasic, VB Script, JavaScript и др.).

В состав САПР Altium Designer входят следующие модули, позволяющие произвести полный цикл проектирования электронных устройств:

– Графический редактор электрических схем **Schematic**. Предназначен для графического ввода принципиальной электрической схемы, создания библиотеки с условными графическими обозначениями элементов, подготовки спроектированной электрической схемы к схемотехническому моделированию.

– Модуль **EditVHDL**. Позволяет осуществить ввод проекта или отдельных его частей с помощью VHDL-описаний.

– Модуль моделирования **Berkeley SPICE3f5/XSPICE**. Предназначен для моделирования аналоговых и цифровых схем и их комбинаций. Поддерживаемые типы анализов моделирования: частотный анализ в режиме малого сигнала, анализ переходных процессов, анализ влияния изменений значений параметров элементов схемы и температуры на работу схемы, анализ передаточных функций по постоянному току и др.

– Графический редактор печатных плат **PCB Layout**. Предназначен для проектирования топологии печатной платы на основе созданной принципиальной электрической схемы. Процесс проектирования включает в себя создание топологических посадочных мест, прорисовку контура печатной платы или его импорта из каких-либо ECAD/MCAD-систем, задание правил для разработки топологии, размещение компонентов в заданной области, трассировку проводников, проверку спроектированной печатной платы на наличие ошибок (верификация проекта), формирование набора файлов для фотошаблонов (Gerber-файлы) и файла сверловки (NC Drill-файл).

– Модули автоматического размещения компонентов **Cluster Placer** (менее 100 компонентов) и **Statistical Placer** (более 100 компонентов). Предназначены для автоматического размещения компонентов: Cluster Placer размещает компоненты согласно заданным правилам в проекте, Statistical Placer размещает компоненты, исходя из критерия равномерного заполнения поля печатной платы при оптимальной плотности связей.

– Автотрассировщик **Situs**. Предназначен для автоматической трассировки как отдельно взятых проводников, так и всей печатной платы согласно заданным правилам на проект и выбранной стратегии трассировки (имеются стандартные стратегии, например, для двухслойных или многослойных печатных плат). Также в процессе ручной трассировки данный модуль позволяет интерактивно контролировать соблюдение правил проекта, автоматически корректирует прокладку трассы в критичных местах.

– Модуль анализа целостности сигнала **Signal Integrity**. Предназначен для проведения дополнительного анализа поведения сигналов с учетом реальной топологии, в частности искажения форм сигналов за счет паразитных эффектов отражений и взаимных наводок. Также имеется возможность предтопологического анализа целостности сигнала на базе спроектированной электрической схемы.

– Модуль подготовки файлов для фотошаблонов и сверловки **CAMtastic**. Предназначен для первичной подготовки сформированных в РСВ-редакторе Gerber- и NC-файлов к производству (например, произвести анализ топологии на некоторые технологические ошибки и тут же их устранить).

Функции Altium Designer позволяют синтезировать и промоделировать логику проекта, в результате чего формируются выходные данные в обменном формате EDIF. Эти данные передаются в специализированные САПР производителей компонентной базы ПЛИС (Vendor Tools) фирм Altera, Actel, Lattice, Sharp, Xilinx – в зависимости от выбранного для реализации проекта семейства ПЛИС. Результатом работы этих специализированных САПР являются данные о коммутации логических сигналов проекта на выводы выбранной ПЛИС и данные для программирования ПЛИС в аппаратуре пользователя или на программаторе. Эти данные возвращаются в Altium Designer, где выполняется окончательная проработка проекта – включение ПЛИС в состав полной электрической принципиальной схемы, размещение компонентов на монтажном поле и трассировка печатного монтажа.

В системе Altium Designer используются следующие типы документов:

- Schematic – схемный документ;
- PCB – файл проекта печатной платы;
- Schematic Library – библиотека схемных символов;
- PCB Library – библиотека топологических посадочных мест;
- CAM Document – документ САМ-программы;
- Output Job File – файл выходных данных для обработки;

- Database Link File – файл-указатель связи с базой данных;
- Text Document – текстовый документ;
- Other – прочие документы, которые в зависимости от типа проекта объединяются в иерархическую структуру. Образец такой иерархии на примере проекта печатной платы показан на рис. 10.1.



Рис. 10.1. Пример иерархической структуры проекта

Укрупненно маршрут проектирования цифрового устройства при вводе проекта с помощью графического редактора **Schematic** состоит из двух этапов (схемотехническое проектирование и проектирование печатной платы), которые в свою очередь состоят из следующей последовательности действий.

1. Ввод проекта.

2. Задание входных воздействий при помощи генератора и источников питания нажатием на пиктограммы или из библиотеки **Simulation Sources.IntLib**. Подача сигналов **VCC** и **GND** на соответствующие выводы источника.

3. Нумерация элементов (**Annotate schematic**).

4. Расстановка контрольных точек (**Net**).

5. Задание параметров моделирования, выбор цепей для вывода на экран с помощью программы для моделирования **Mixed Sim**.

6. Моделирование (**Mixed Sim**).

7. Если результаты моделирования не устраивают разработчика, то выполняется пункт 1.

8. Внесение изменений в схему для последующей синхронизации с платой.

9. Создание файла платы, формирование контура платы и перенос информации из схемы (**Update document**).

10. Установка необходимых элементов на плату.

11. Создание классов цепей.

12. Создание правил проектирования (**Rules**).

13. Трассировка проводников: в ручном (**Interactive routing**) и автоматическом (**Auto Route**) режимах.

14. Верификация проекта [28, 34].

10.2. Схемотехническое проектирование

Рассмотрим маршрут проектирования на примере разработки 4-разрядного счетчика Грея, синтезированного словарным методом. Принципиальная электрическая схема (Э3) на элементах низкой степени интеграции показана на рис. 10.2. Как следует из анализа схемы, используются элементы только трех типов: J-K-триггеры, двухвходовые элементы «ИЛИ» и трехвходовые элементы «И».

Используем таблицу соответствия между отечественными и импортными условными графическими изображениями (табл. 10.1).

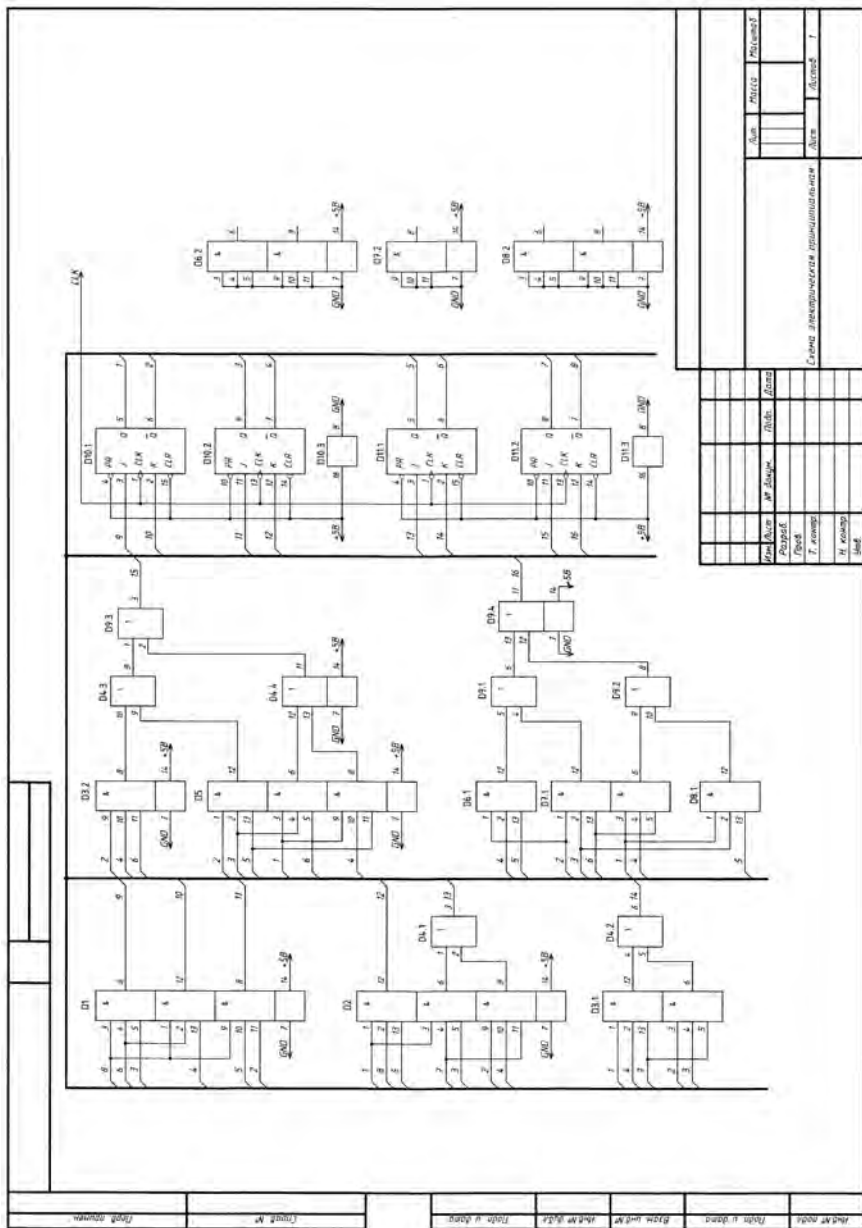
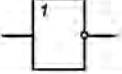
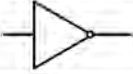
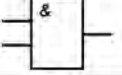
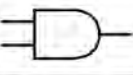
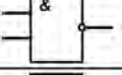
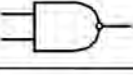
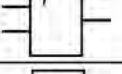

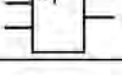
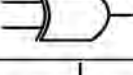
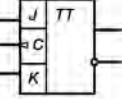
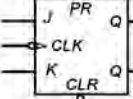


Рис. 10.2. Принципиальная электрическая схема 4-разрядного счетчика Грех

Таблица 10.1

Соответствие между российскими и западными стандартами
 условных графических отображений

Тип элемента	Российский стандарт (ГОСТ 2.743-91)	Западный стандарт (MIL/ANSI)
НЕ		
И		
НЕ-И		
ИЛИ		
СУММА ПО МОДУЛЮ 2		
J-K-триггер		

10.2.1. Создание проекта

После запуска САПР Altium Designer, по команде **File => New => Project => PCB project** в открытой панели Project появится новый проект (чтобы панель **Project** стала активной, в правом нижнем углу нужно навести курсор на вкладку **System**, нажать левую кнопку мыши и поставить галочку на **Project**).

Далее необходимо щелкнуть по названию проекта правой кнопкой мыши и выбрать **Save Project As** с указанием места сохранения. После этого внутри проекта надо создать страницу (последовательность действий **File => New => Schematic**) и сохранить ее тем же способом, что и проект. При этом появится основное поле со штампом для размеще-

ния элементов. В верхней части экрана доступными являются основные команды. Наиболее часто используемые команды дублируются пиктограммами (см. цветную вкладку рис. 10.3).

Далее необходимо провести выбор, подключение библиотек и размещение элементов.

Для разработки проекта 4-разрядного счетчика Грея потребуется две библиотеки. В установках Altium Designer по умолчанию эти библиотеки отсутствуют, поэтому понадобится подключить их самостоятельно.

Для этого необходимо щелкнуть правой кнопкой мыши в окне схем **Place** => **Place part**. В появившемся окне выбрать «...», как на рис. 10.4.

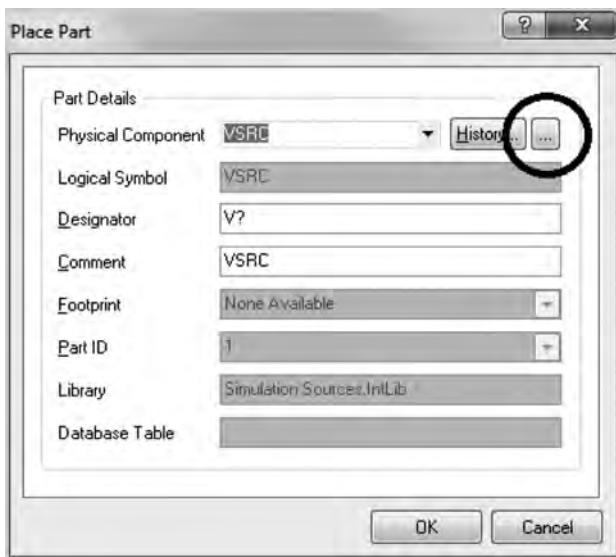


Рис. 10.4. Окно выбора компонентов

Откроется окно **Browse Libraries**. В правом верхнем углу следует также нажать «...».

Появится окно **Available Libraries**, в котором надо нажать **Install** (рис. 10.5).

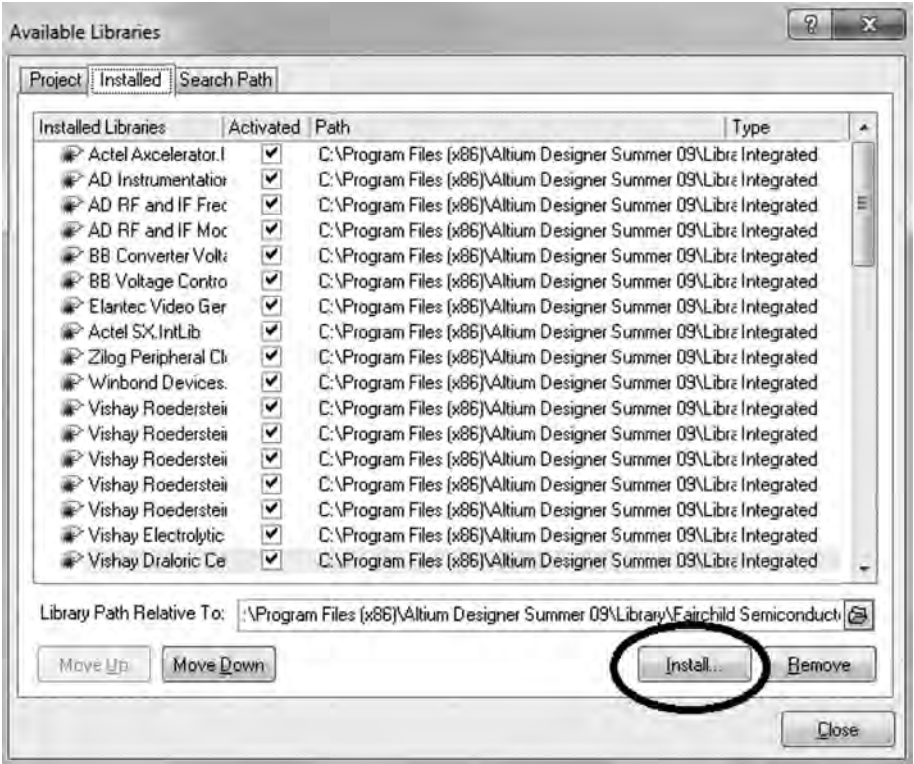


Рис. 10.5. Окно выбора библиотек

Отобразится окно, в котором нужно найти папку **Fairchild Semiconductor** (например, **C:\Program Files\Altium Designer Summer 09\Library\Fairchild Semiconductor**). Выбираем библиотеку **FSC Logic Flip-Flop. IntLib** и нажимаем **Ok**.

Произойдет возврат к окну **Available Libraries**. Для подключения второй библиотеки опять нажимаем **Install** и добавляем библиотеку **FSC Logic Gate.IntLib**. После чего – закрываем окно **Available Libraries**. Далее в окне **Browse Libraries** справа из выпадающего меню выбираем библиотеку **FSC Logic Flip-Flop**. В графе **Component name** появится список доступных элементов. Выберем микросхему **74F112PC**, в которую упаковано два триггера (рис. 10.6).

При выборе элемента важно знать, доступен ли он для моделирования (**Simulation**). Информация об этом отображается в левом нижнем углу окна **Browse Libraries** (рис. 10.6).

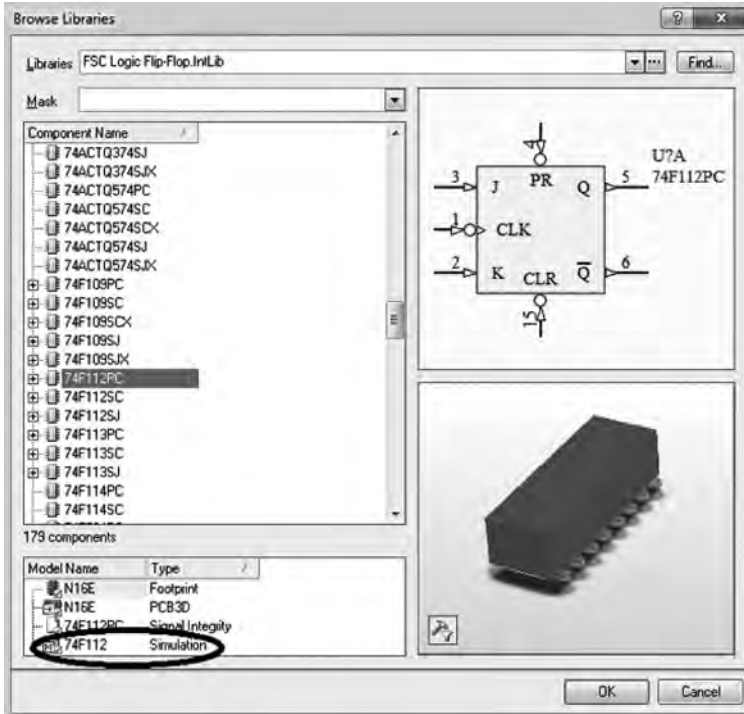


Рис. 10.6. Окно выбора триггеров библиотеки «FSC Logic Flip-Flop.IntLib»

Для реализации 4-разрядного счетчика Грея необходимо четыре триггера (т.е. две микросхемы, так как в каждой упаковано два триггера). После нажатия **OK** изображение триггера появится на странице **Schematic**. Размещение производится удержанием и последующим щелчком левой кнопки мыши. Для поворота условного графического отображения на 90° удобно использовать пробел.

Заново открываем окно **Browse Libraries** и из выпадающего меню выбираем **FSC Logic Gate**. Используем элементы DM54S11J (рис. 10.7) и 74AC32PC (рис. 10.8). Располагаем их на странице.

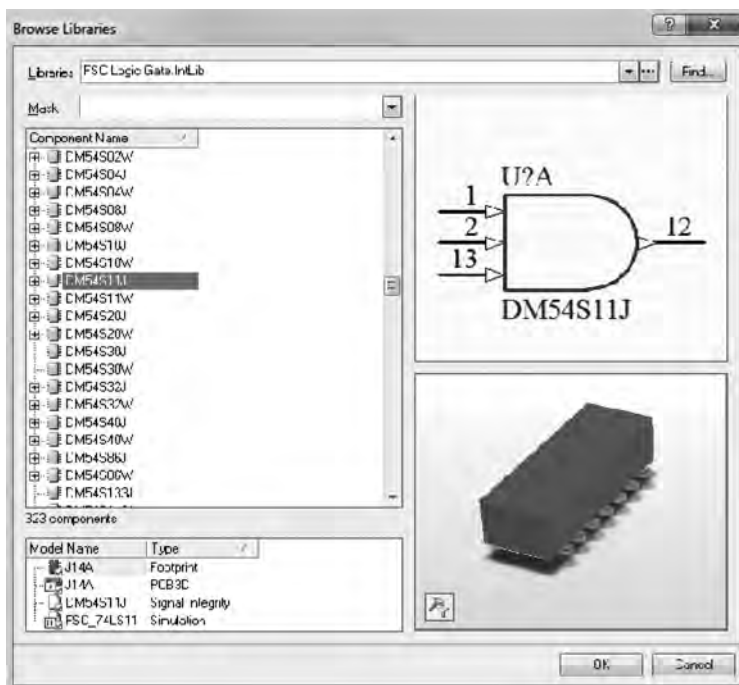


Рис. 10.7. Окно выбора элемента «И» библиотеки FSC «Logic Gate.IntLib»

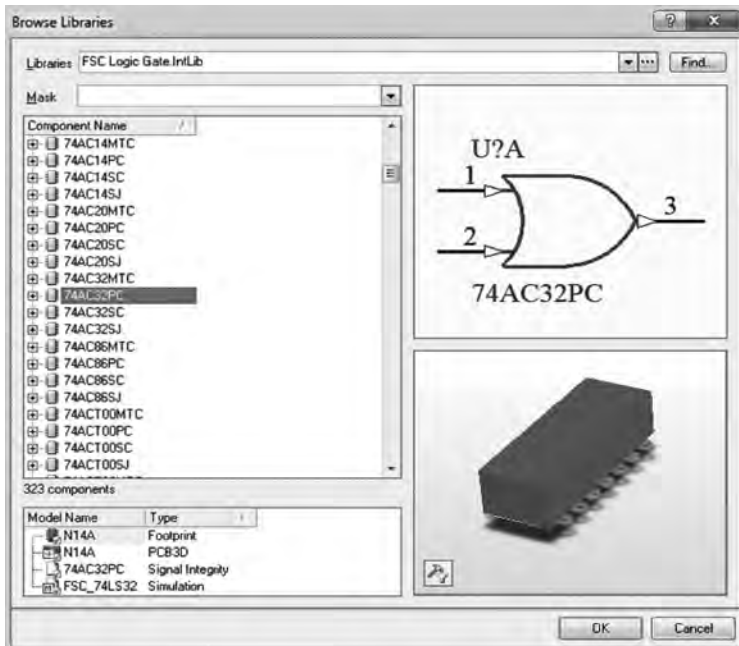


Рис. 10.8. Окно выбора элемента «ИЛИ» библиотеки FSC «Logic Gate.IntLib»

10.2.2. Задание входных воздействий

Далее формируется система входных воздействий. Для этого используются пятивольтовый источник питания и генератор прямоугольных импульсов (рис. 10.9). Подключение осуществляется с помощью панели инструментов в правом верхнем углу.

После установки элементов, источника питания и генератора прямоугольных импульсов на рабочем поле проводятся линии межсоединений с помощью команды **Wire**, доступной как с панели инструментов, так и при нажатии правой кнопки мыши (рис. 10.9).

На неиспользуемые входы PR, CLR всех триггеров следует подать сигнал VCC. На «минус» генератора импульсов подаем GND, «плюс» посылаем на CLK всех триггеров. Пятивольтовый источник размещаем внизу экрана, подаем на «плюс» VCC, на «минус» – GND (рис. 10.10).

Остальные связи проводим в соответствии со схемой, показанной на рис. 10.2.

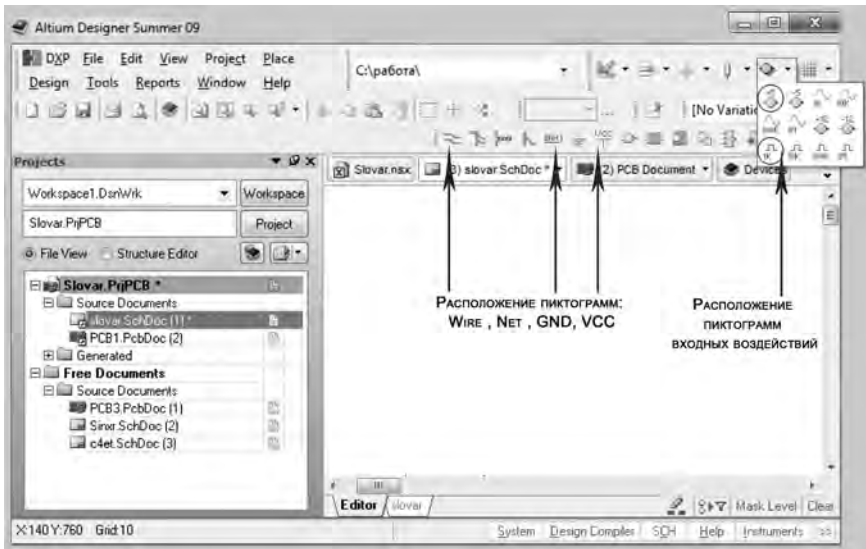


Рис. 10.9. Расположение пиктограмм: входных воздействий, Wire (линии соединений), Net (маркер названия цепей), GND, VCC



Рис. 10.10. Логика работы источника питания

Для последующего просмотра сигналов в ключевых точках нужно расставить метки. Это делается с помощью команды **Net**, доступной с панели инструментов. Если подвести курсор к какой-либо цепи и нажать левую кнопку мыши, увидим, что появляется точка с названием **out**, в которой впоследствии можно будет посмотреть напряжение при моделировании. Двойным щелчком на **out** открываем окно, где меняем название для каждой точки (например, **out1**, **out2**, **out3...**).

10.2.3. Нумерация элементов

Для проведения моделирования желательно произвести нумерацию элементов. Для этого вводим следующие команды: **Tools => Annotate Schematic**. Открывается окно **Annotate** (рис. 10.11), в графе **Order of Processing** которого из выпадающего меню выбираем **Down then across**. В правой половине, где находится список элементов, нажимаем правую кнопку мыши и выбираем **Part ID => Lock Selected Part ID**, справа внизу выбираем **Update Changes List** и в открывшемся окне изменений нажимаем **OK**. Затем в правом нижнем углу выбираем **Accept Changes**. Появится окно **Engineering Change Order**, в котором по очереди нажимаем **Validate Changes**, **Execute Changes** и **Close** [26]. В результате выполнения всех вышеописанных действий получилась принципиальная электрическая схема, показанная на рис. 10.12 цветной вкладки.

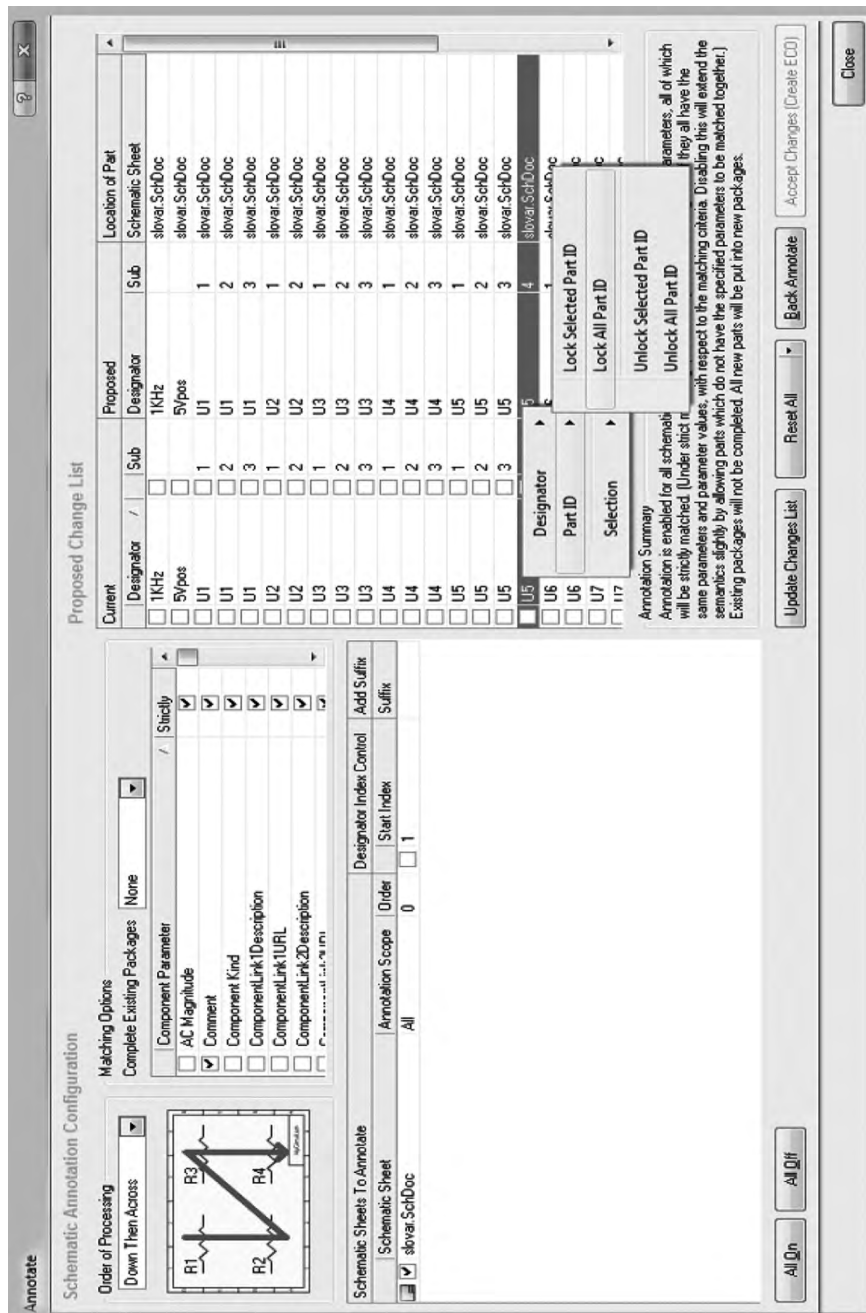


Рис. 10.11. Окно нумерации компонентов

10.2.4. Моделирование

Моделирование производится при помощи панели **Mixed Sim**, которая по умолчанию скрыта. Чтобы сделать ее доступной, необходимо щелкнуть на любом свободном месте панели инструментов правой кнопкой мыши и выбрать **Mixed Sim**. Появится маленькая панель, состоящая из трех пиктограмм: «симуляция», «настройка» и «отчет» (рис. 10.13). Для удобства использования эту панель можно перетащить на панель инструментов.

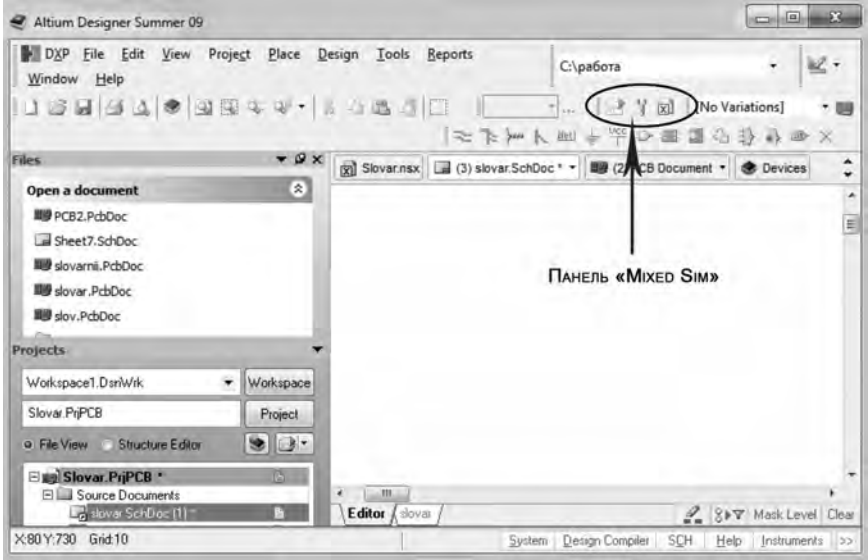


Рис. 10.13. Панель Mixed Sim

Нажав на третью пиктограмму, получим файл отчета об ошибках (рис. 10.14). В рассматриваемом случае ошибок нет, только предупреждения, но это не критично.

Перед началом моделирования необходимо задать параметры для генератора импульсов. Для этого двойным щелчком мыши открываем окно параметров генератора (**VPulse**), и в самом низу в правой части этого окна нажимаем **Edit**. Откроется окно **Sim model**, где в графе **Model Sub-Kind** должно стоять **Pulse**. Щелкаем на вторую вкладку **Parameters** и задаем нужные временные значения (рис. 10.15).

Class	Document	Source	Message	Time	Date	No.
[Warning]	slovar.SchDoc	Compiler	Adding items to hidden net GND	10:41:43	01.04.2011	1
[Warning]	slovar.SchDoc	Compiler	Adding items to hidden net VCC	10:41:43	01.04.2011	2
[Warning]	slovar.SchDoc	Compiler	Component U9 DM54S11J has unused sub...	10:41:43	01.04.2011	3
[Warning]	slovar.SchDoc	Compiler	Component U10 DM54S11J has unused su...	10:41:43	01.04.2011	4
[Warning]	slovar.SchDoc	Compiler	Component U11 DM54S11J has unused su...	10:41:43	01.04.2011	5
[Warning]	slovar.SchDoc	Compiler	Component U11 DM54S11J has unused su...	10:41:43	01.04.2011	6
[Warning]	slovar.SchDoc	Compiler	Component U11 DM54S11J has unused su...	10:41:43	01.04.2011	7
[Warning]	slovar.SchDoc	Compiler	Net Net1KHz_1 has no driving source (Pin ...	10:41:43	01.04.2011	8
[Start Output]		Output Ge...	Start Output Generation At 10:41:43 On 01...	10:41:43	01.04.2011	9
[Output]		Output Ge...	Name: Mixed Sim Type: AdvSimNetlist Fr...	10:41:43	01.04.2011	10
[Hint]	slovar.SchDoc	AdvSim	AU1A - Model found in: C:\Program Files (x...	10:41:45	01.04.2011	11
[Hint]	slovar.SchDoc	AdvSim	AU2A - Model found in: C:\Program Files (x...	10:41:45	01.04.2011	12
[Hint]	slovar.SchDoc	AdvSim	AU5A - Model found in: C:\Program Files (x...	10:41:45	01.04.2011	13
[Generated F...]		Output Ge...	Slovar.nsx	10:41:45	01.04.2011	14
[Finished Out...]		Output Ge...	Finished Output Generation At 10:41:45 On...	10:41:45	01.04.2011	15

Рис. 10.14. Файл отчета об ошибках

Sim Model - Voltage Source / Pulse

Model Kind | Parameters | Port Map | Characteristic Circuits

Component parameter

DC Magnitude	0	<input type="checkbox"/>
AC Magnitude	5	<input checked="" type="checkbox"/>
AC Phase	0	<input type="checkbox"/>
Initial Value	0	<input type="checkbox"/>
Pulsed Value	5	<input checked="" type="checkbox"/>
Time Delay	0.5us	<input checked="" type="checkbox"/>
Rise Time	1n	<input checked="" type="checkbox"/>
Fall Time	1n	<input checked="" type="checkbox"/>
Pulse Width	0.5us	<input checked="" type="checkbox"/>
Period	1us	<input checked="" type="checkbox"/>
Phase		<input type="checkbox"/>

@DESIGNATOR %1 %2 ? "DC MAGNITUDE" | DC @ "DC MAGNITUDE" | PULSE(? "INITIAL VALUE" / "&".

Netlist Template | Netlist Preview | Model File

OK Cancel

Рис. 10.15. Задание параметров на моделирование для генератора VPulse

Очень важно напротив всех измененных значений поставить галочку. Далее нажимаем **ОК**.

Переходим к настройкам моделирования. Для этого на панели **Mixed Sim** щелкаем вторую пиктограмму (настройка). Открывается окно **Analyses Setup**, в левой части ставим галочку напротив **Transient Analysis**. Устанавливаем значения, как показано на рис. 10.16.

Для установки параметров нужно предварительно снять галочку с **Use Transient Defaults**.

Открываем слева верхнюю строку **General Setup** и переносим с помощью курсора нужные сигналы из **Available Signals** в **Active Signals** (рис. 10.17). В рассматриваемом примере это сигналы Net1KHz_, OUT0, OUT1, OUT2, OUT3.

В левом нижнем углу окна настройки нажимаем на кнопку **Preferences**. Появляются доступные опции для файла отчета (рис. 10.18).

Запускаем моделирование, нажав первую пиктограмму панели **Mixed Sim**, и получаем результат (см. цветную вкладку рис. 10.19).

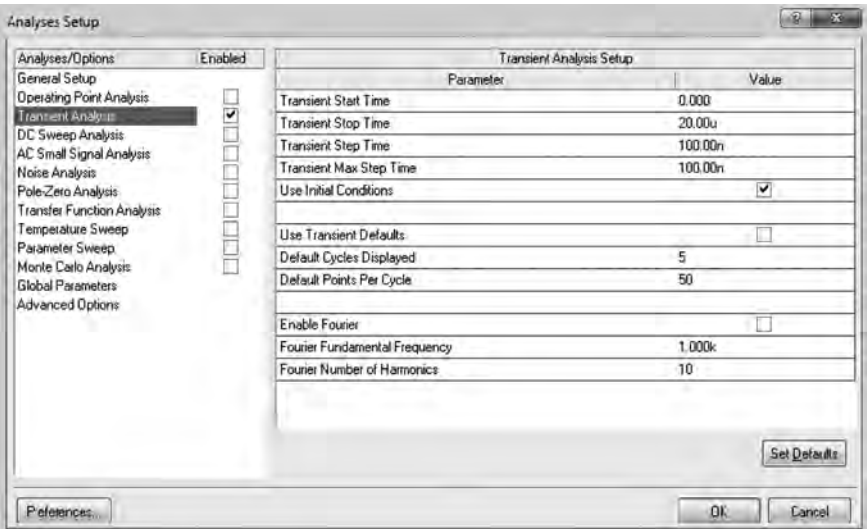


Рис. 10.16. Настройка параметров на моделирование переходных процессов

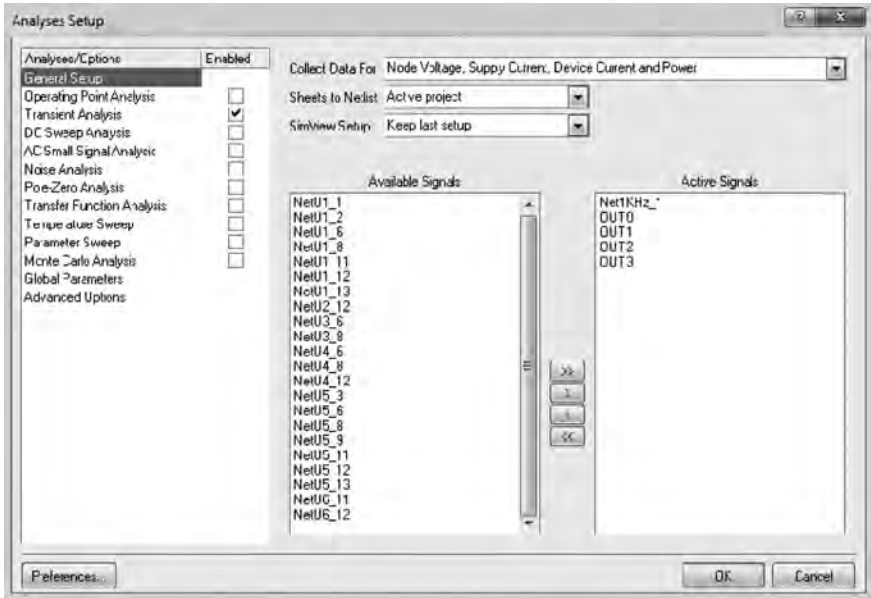


Рис. 10.17. Общая настройка на моделирование и указание сигналов, выводимых при моделировании

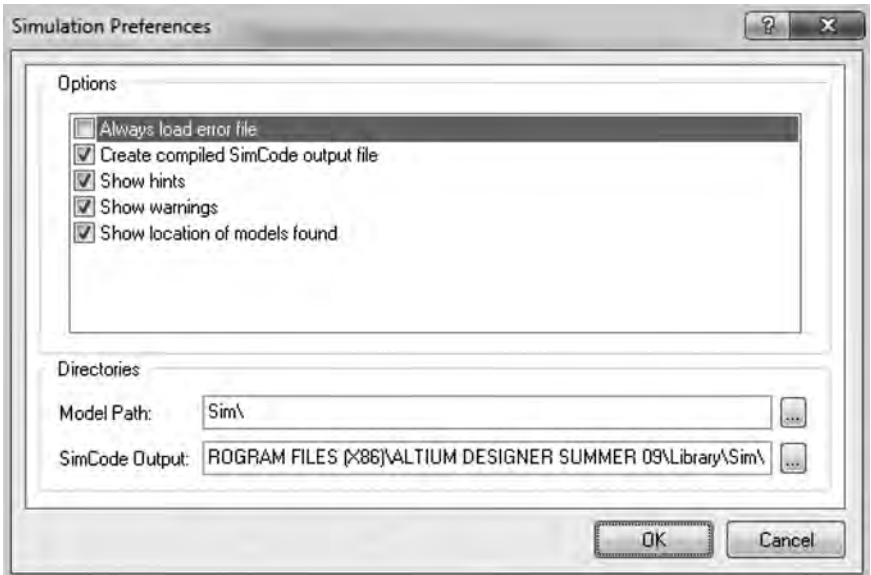


Рис. 10.18. Общие настройки для файла отчета

Анализ временной диаграммы подтверждает правильность работы спроектированного устройства.

10.3. Разработка печатных плат в среде Altium Designer

Достоинством пакета Altium Designer является тесная связь между электрической схемой цифрового устройства и разработанной для этой схемы печатной платой. Все изменения, вносимые в схему, сразу отражаются на работе платы, и наоборот. Поэтому прежде чем приступить к работе с редактором печатных плат, нужно преобразовать схему, заменив логические элементы, которые использовались для моделирования (генератор импульсов и источник питания) на реальные компоненты. К тому же, для уменьшения помех предполагается поставить конденсаторы на **7** и **14** выводы каждого элемента (подсоединяя к конденсаторам **VCC** и **GND**), см. раздел 10.3.1.

Если нет необходимости обеспечивать абсолютную идентичность схемы и платы или схема перегружена, есть возможность разместить эти элементы непосредственно на плате. Этот способ описан в разделе 10.3.4.

10.3.1. Подготовка схемы для создания печатной платы

1. Для установки 11 конденсаторов (по числу физических компонентов, которые будут располагаться на плате) воспользуемся библиотекой **Vishay => Vishay Roederstein Tantalum Radial-Lead Capacitor.IntLib**, подключив ее уже известным способом (рис. 10.5). Выбираем самый первый элемент (рис. 10.20) и размещаем в свободной области окна со схемой.

Затем присоединяем к его левому выводу сигнал **GND**, а к правому (+) – сигнал **VCC** и двойным щелчком мыши на конденсаторе открываем окно, где присваиваем ему номер. Получаем вид, приведенный на рис. 10.21. Делаем еще 10 копий такой сборки, это поможет при последующей разводке платы присоединить конденсаторы к соответствующим выводам физических компонентов.

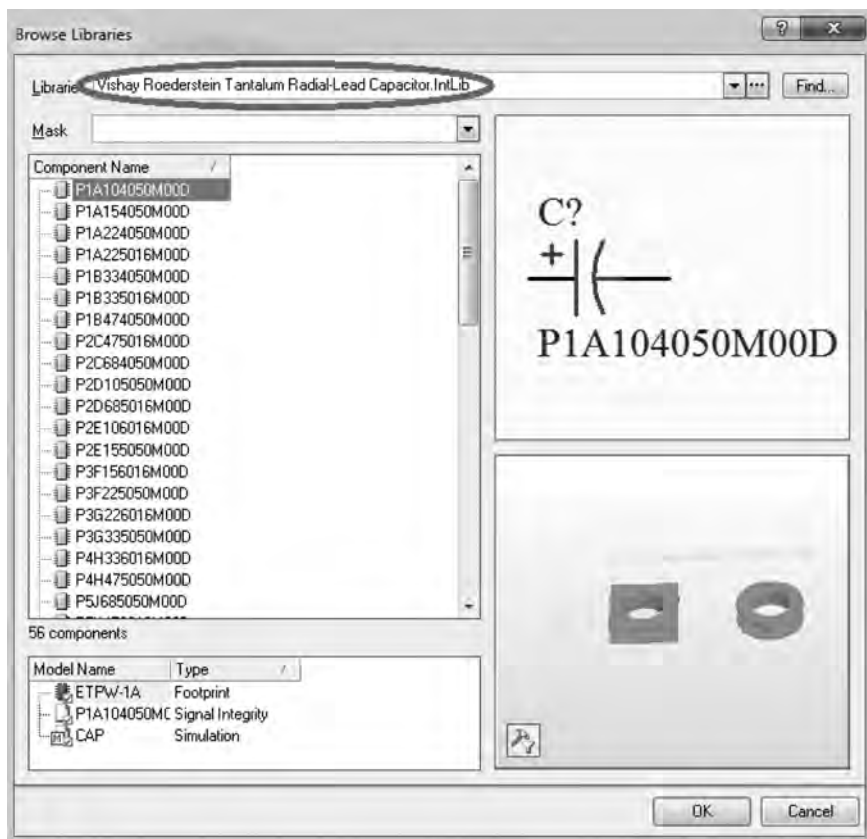


Рис. 10.20. Окно выбора конденсаторов библиотеки «Vishay Roederstein Tantalum Radial-Lead Capacitor.IntLib»

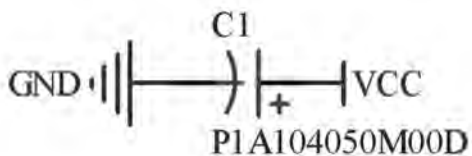


Рис. 10.21. Вид расположения конденсатора на схеме

2. На будущей плате также нужно отразить наличие питания и генератора импульсов, которые на схеме имеют лишь логическую природу. Для этой цели используем выходные разъемы.

Подключаем библиотеку **Miscellaneous Connectors.IntLib**, если ее нет в подключенных по умолчанию библиотеках, и выбираем элемент **Header 2H** (рис. 10.22).

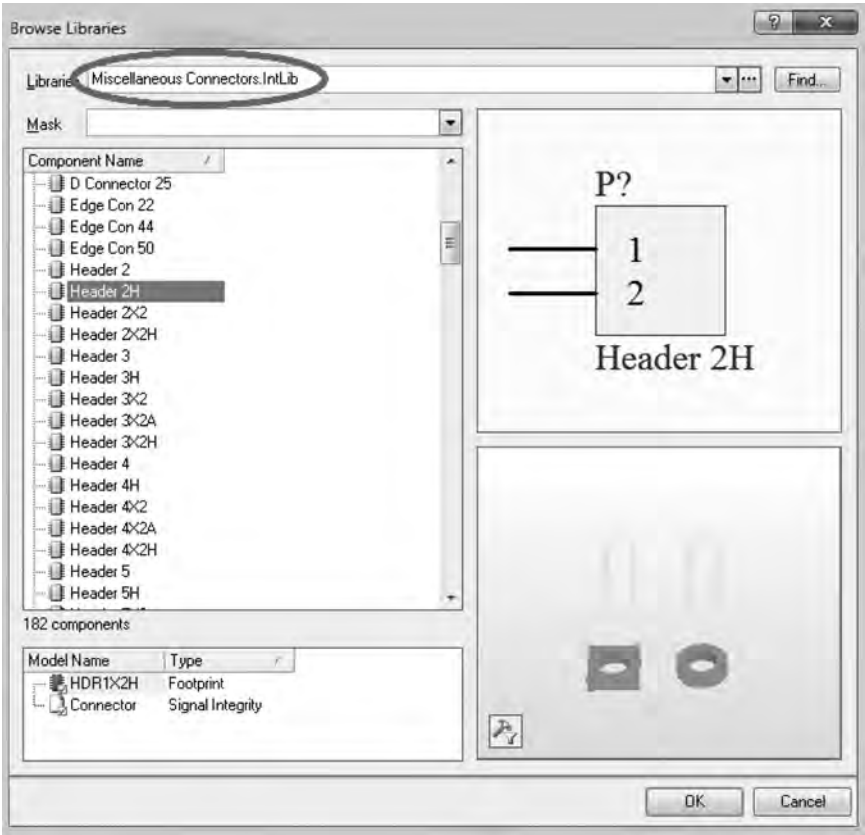


Рис. 10.22. Окно выбора входных разъемов библиотеки «Miscellaneous Connectors.IntLib»

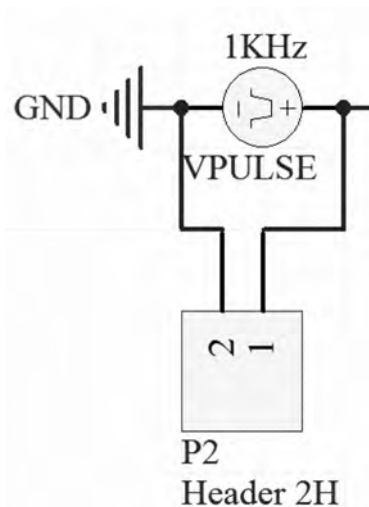


Рис. 10.23. Установка разъема для генератора импульсов в электрическую схему

Размещаем этот элемент на схеме параллельно генератору импульсов, соединяя вывод **1** с «+» генератора VPulse, а вывод **2** – с «-» (рис. 10.23).

На следующем шаге удаляем связку элементов рис. 10.11 и вместо нее ставим еще один разъем Header 2H, на вывод **1** которого подаем VCC, а на вывод **2** – GND (рис. 10.24).

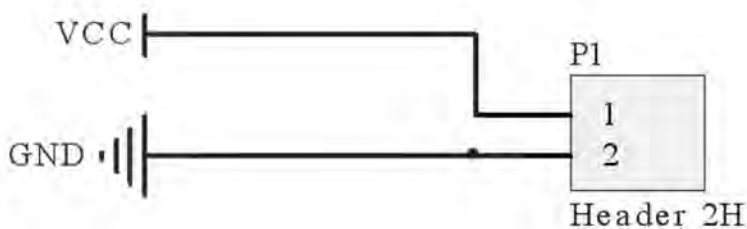


Рис. 10.24. Установка разъема под питание в электрическую схему

С вышеперечисленными изменениями схема принимает вид, показанный на рис. 10.25, и может приниматься как основа для печатной платы.

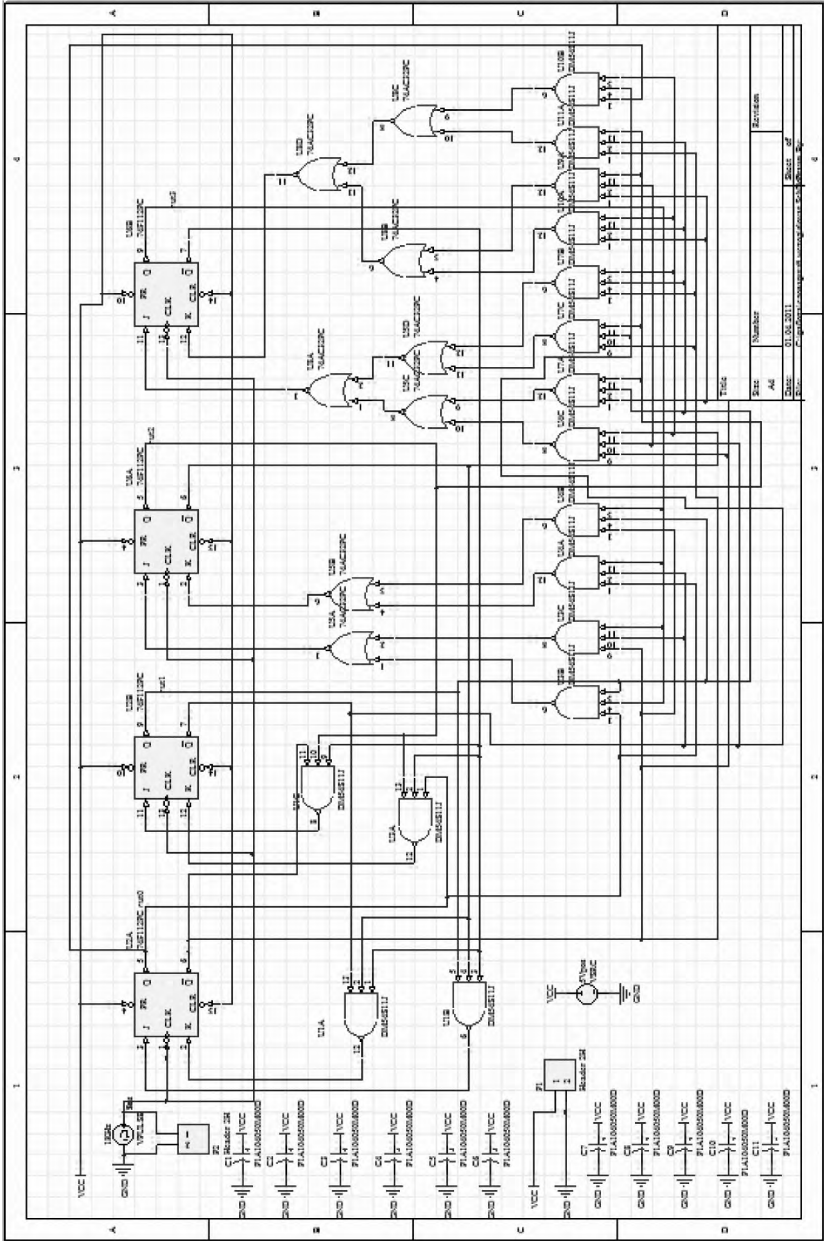


Рис. 10.25. Вид измененной электрической принципиальной схемы как основы для создания платы

10.3.2. Создание файла печатной платы и формирование контура платы

Для работы с редактором печатных плат среды Altium Designer предполагается использовать уже созданную и удачно откомпилированную схему. В левой области экрана должна быть открыта панель **Project** (в противном случае нужно нажать в правом нижнем углу экрана вкладку **System** и поставить галочку на **Project**). На панели **Project** находится папка с файлом схемы 4-разрядного счетчика Грея.

Создать новый файл платы можно двумя способами:

- 1) с помощью мастера создания печатных плат;
- 2) вручную.

Для первого способа в правом нижнем углу экрана выполняем последовательность действий **System** => **Files** => **New from template** => **PCB Board Wizard** (рис. 10.26 и 10.27).

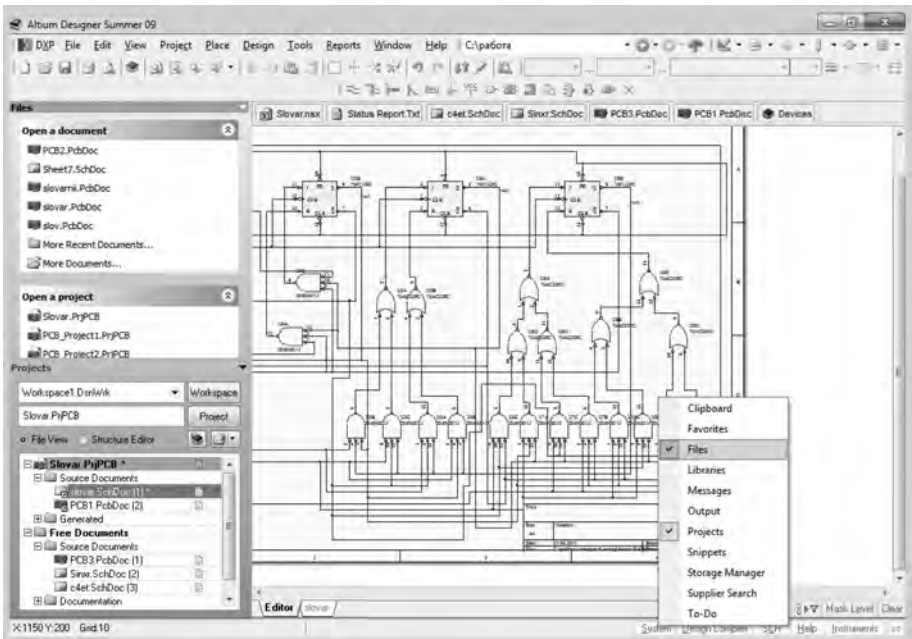


Рис. 10.26. Вызов панели Files

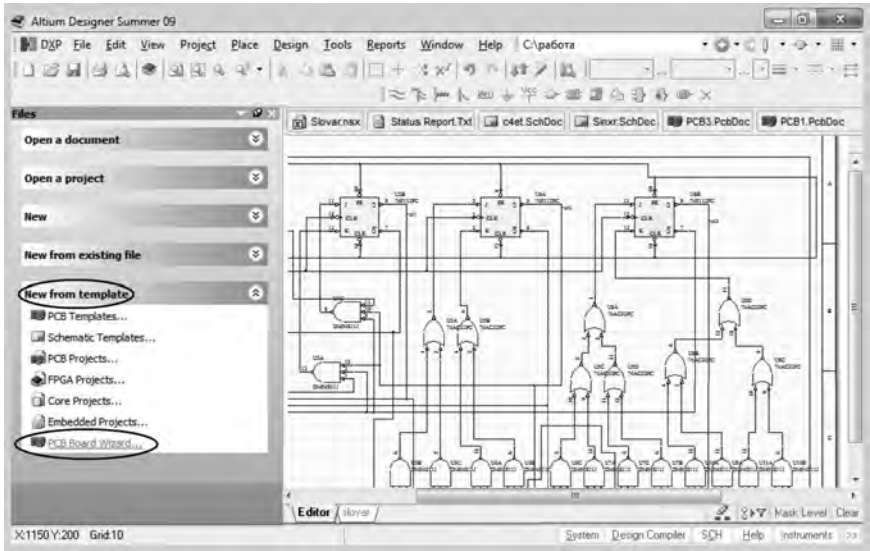


Рис. 10.27. Вызов мастера создания платы

Появившийся мастер **PCB Board Wizard** по этапам запрашивает информацию о печатной плате, которая потом выразится в виде конструктивных параметров и правил проектирования. В появившемся окне (рис. 10.28) нажимаем кнопку Next.

В следующем окне предложено выбрать систему измерения, метрическую или в милах. Напомним, что один мил равен одной тысячной дюйма.

Далее следует выбор из шаблонов стандартных промышленных печатных плат, используемых на предприятии. В данном случае готового шаблона нет, поэтому выбираем Custom (пустой бланк) двойным щелчком мыши. Появляется окно (рис. 10.29), в котором надо задать форму и размеры будущей платы. В правой части окна задается толщина линий прорисовки границы платы (Boundary Track Width) и размеры (Dimension Line Width), а также отступ от края платы (Keep out Distance from Board Edge).



Рис. 10.28. Окно запроса создания мастера печатной платы PCB Board Wizard

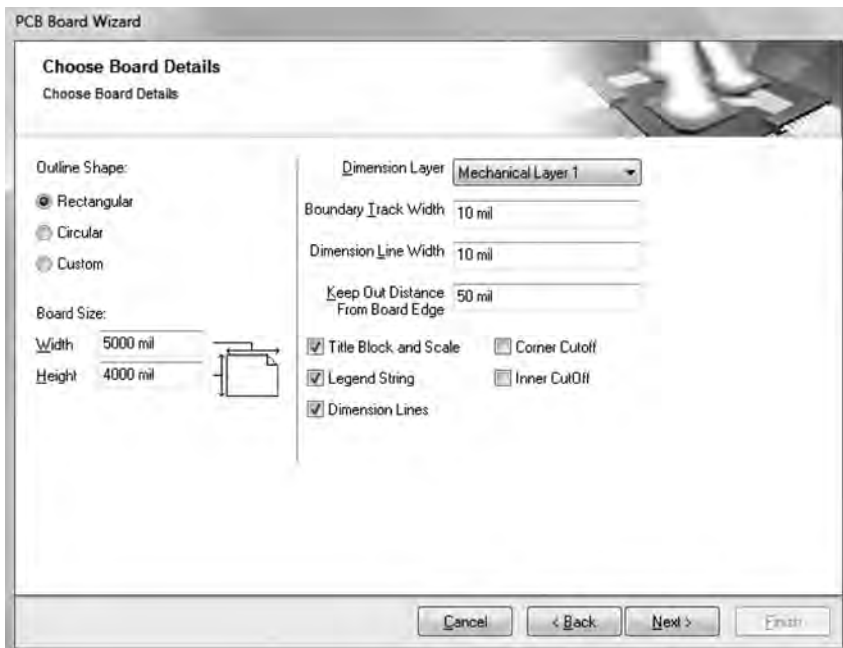


Рис. 10.29. Окно задания формы и размеров платы

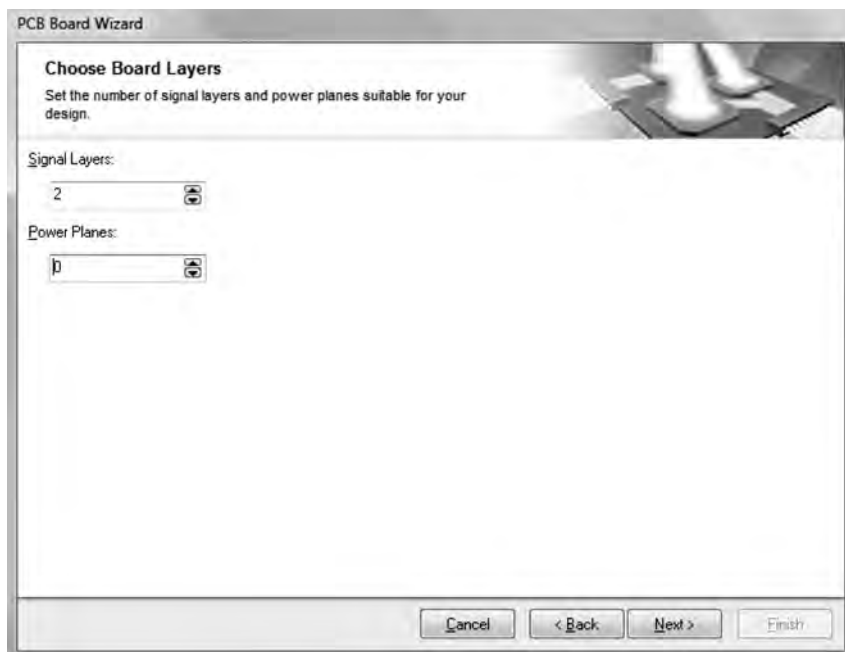


Рис. 10.30. Окно задания числа сигнальных слоев и слоев питания

При нажатии кнопки Next следующее окно даст возможность выбрать число сигнальных слоев, внутренних слоев питания и заземления (рис. 10.30). После ввода данных нажимаем Next.

Далее определяем тип переходных отверстий из двух предложенных вариантов:

- Thru-hole Vias only (сквозные переходные отверстия);
- Blind and Buried Vias only (слепые и глухие переходы).

В следующем окне необходимо выбрать преобладающую технологию монтажа компонентов – поверхностный монтаж или монтаж в отверстия. При выборе Surface-mount components указывается, разрешено ли двустороннее размещение компонентов на плате (рис. 10.31).



Рис. 10.31. Окно выбора способа расположения компонентов на плате



Рис. 10.32. Окно выбора допустимого числа проводников между смежными контактными площадками

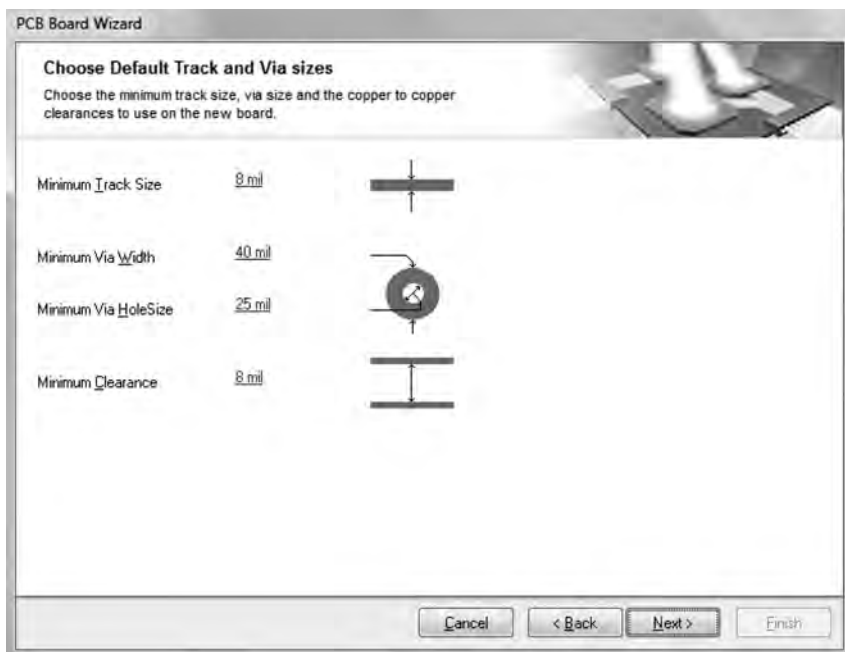


Рис. 10.33. Окно для указания минимально допустимых размеров

При выборе Through-hole components (преобладание монтажа в отверстия) указывается допустимое число проводников между смежными контактными площадками (рис. 10.32).

Следующим шагом указываются минимально допустимые:

- ширина проводника (Track size);
- диаметр площадки переходного отверстия (Via Width);
- диаметр переходного отверстия (Via hole size);
- зазор между проводниками (Clearance).

Эти параметры в дальнейшем будут преобразованы мастером в правила проектирования (рис. 10.33).

В последнем диалоговом окне появится сообщение о том, что завершено создание заготовки для платы (рис. 10.34).



Рис. 10.34. Окно уведомления о завершении создания шаблона платы

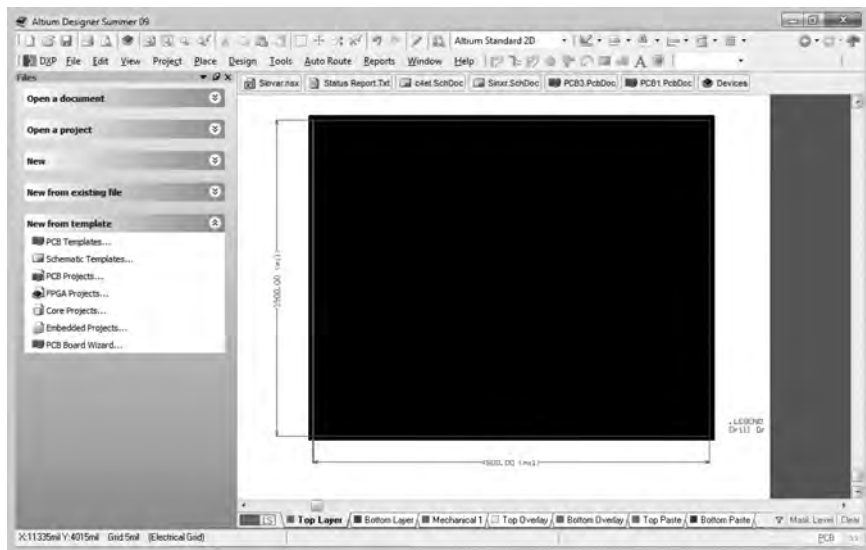


Рис. 10.35. Файл платы, созданный в результате работы мастера PCB Board Wizard

Здесь можно либо внести необходимые изменения в введенные данные (кнопка Back), либо нажать кнопку Finish, при этом откроется новый файл с заготовкой платы в редакторе PCB (рис. 10.35) [26].

Для создания файла печатной платой вручную выполняем **File => New => PCB**. В структуре проекта появляется новый файл, который нужно переименовать и сохранить, щелкнув на его названии правой кнопкой мыши и выбрав **Save As...** При переходе к созданному файлу откроется окно, где темная область экрана – это область платы, на которой будут размещаться компоненты. Если возникнет необходимость изменить ее контур, в программе Altium Designer предусмотрена возможность рисования контура вручную с помощью команд: **Design => Board Shape => Redefine Board Shape**. При этом курсор примет форму перекрестия и перейдет в режим рисования. Фиксируя левой кнопкой мыши углы контура платы, можно нарисовать новый контур. Для этого также надо знать линейные размеры платы.

В этом случае переход к метрической системе измерения осуществляется при помощи команд: **Design => Board Options...** Откроется окно, в котором можно изменить параметры сетки и систему измерений (рис. 10.36).

Описанные способы подходят только для формирования простых контуров. В более сложных случаях контур платы формируется в механических САПР, например в Autocad, а затем импортируется в Altium Designer.

При работе с печатными платами удобно использовать панель PCB. Для вывода ее на экран, находясь в рабочей области редактора плат, нужно щелкнуть в правом нижнем углу экрана на вкладке PCB и выбрать **PCB** (рис. 10.37).

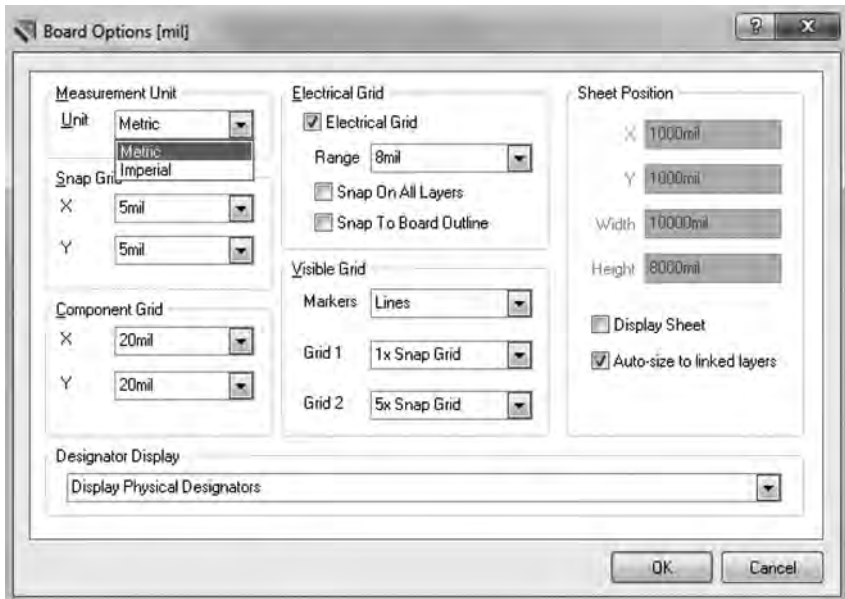


Рис. 10.36. Окно параметров для работы с платой

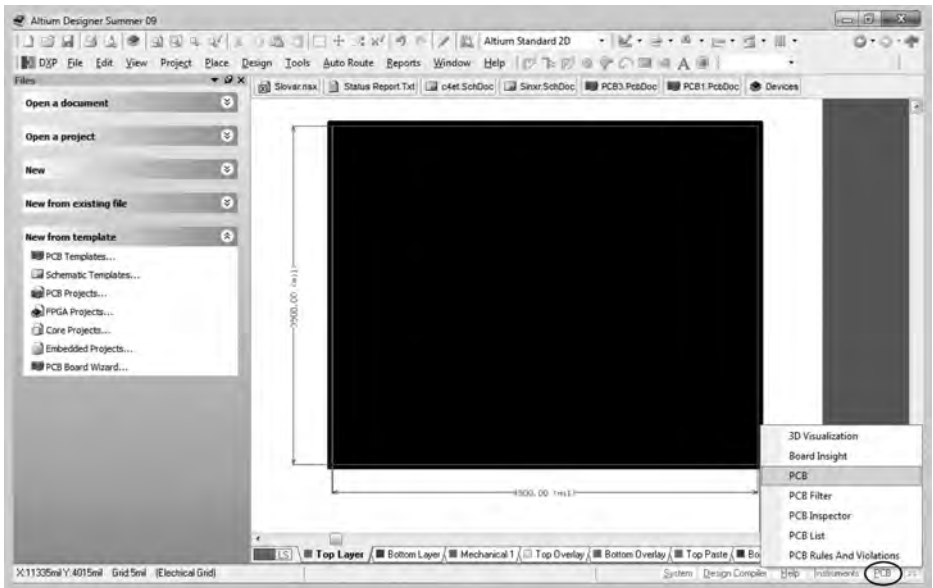


Рис. 10.37. Вызов панели PCB

10.3.3. Перенос информации из схемы на плату

Для переноса информации из схемы на плату открываем страницу со схемой и в меню сверху нажимаем **Design => Update PCB Document «имя файла».PcbDoc => ОК.**

Появляется окно, показанное на рис. 10.38, в котором нужно последовательно нажать **Validate Changes => Execute Changes => Close.**

Возвращаемся к файлу платы. Справа внизу появились элементы, расположенные в так называемой «комнате» (рис. 10.39 на цветной вкладке). «Комната» – это область платы, за которой закреплена некоторая группа компонентов. При передаче информации из схемы в плату, «комнаты» формируются автоматически. На рис. 10.39 красным выделено название «комнаты», оно совпадает с названием файла схемы (Slovar), которое также автоматически добавляется при переносе информации на плату.

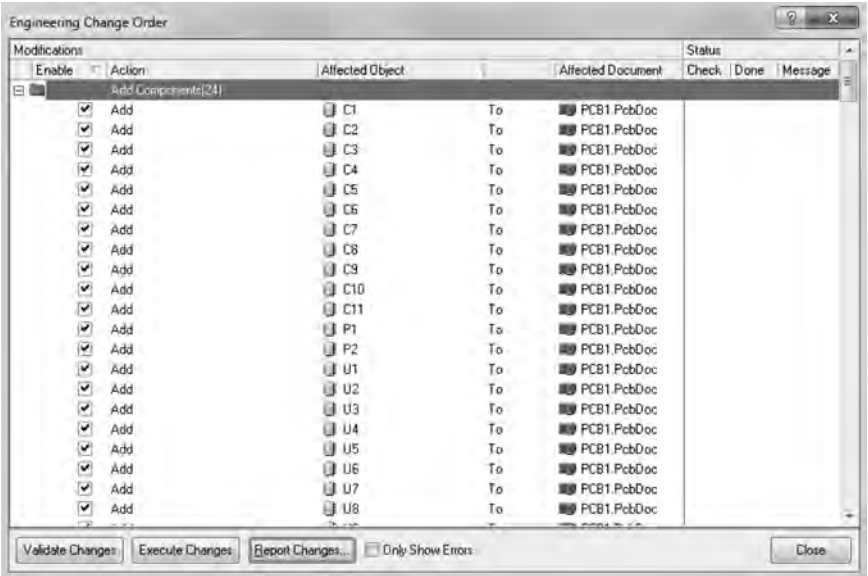




Рис. 10.38. Окно синхронизации информации схемы и платы

Выделяем «комнату» мышью, перетаскиваем на темную область экрана и производим расстановку, меняя контуры «комнаты» и расположение элементов (рис. 10.40 на цветной вкладке). При размещении компонентов удобно пользоваться интуитивной подсказкой в виде линий связи, цвет которой меняется от красного к зеленому при уменьшении суммарной длины цепей, отходящих от выбранного компонента [26].

10.3.4. Установка конденсаторов и разъемов на плату

При необходимости постановки на плату элементов, которых нет на схеме, после проведенного моделирования создается файл платы и выполняется операция синхронизации информации схемы (разделы 10.3.2, 10.3.3).

Для добавления конденсаторов необходимо щелкнуть на пиктограмме  (**Place component**). Откроется окно, в котором нужно нажать . Следующим шагом, при щелчке на вкладке **Libraries** в библиотеке **Vishay Roederstein Tantalum Radial-Lead Capacitor**

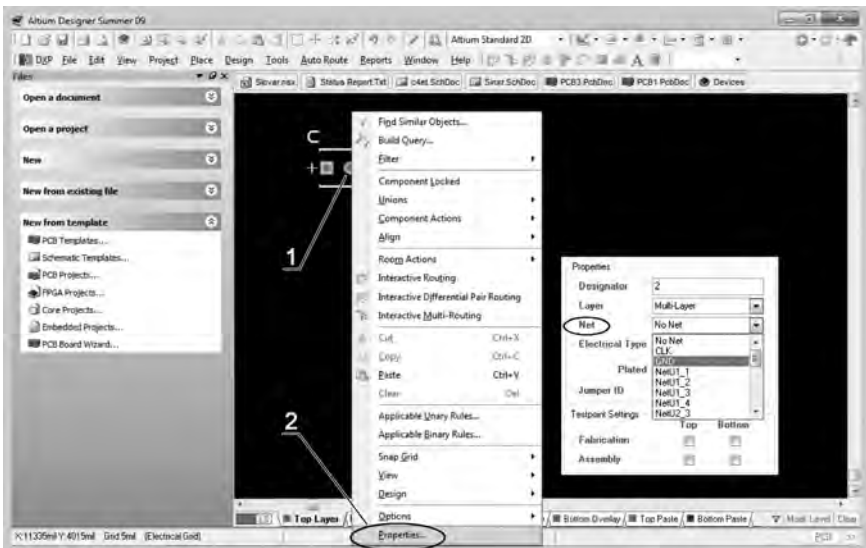


Рис. 10.41. Образование связи компонента и цепи

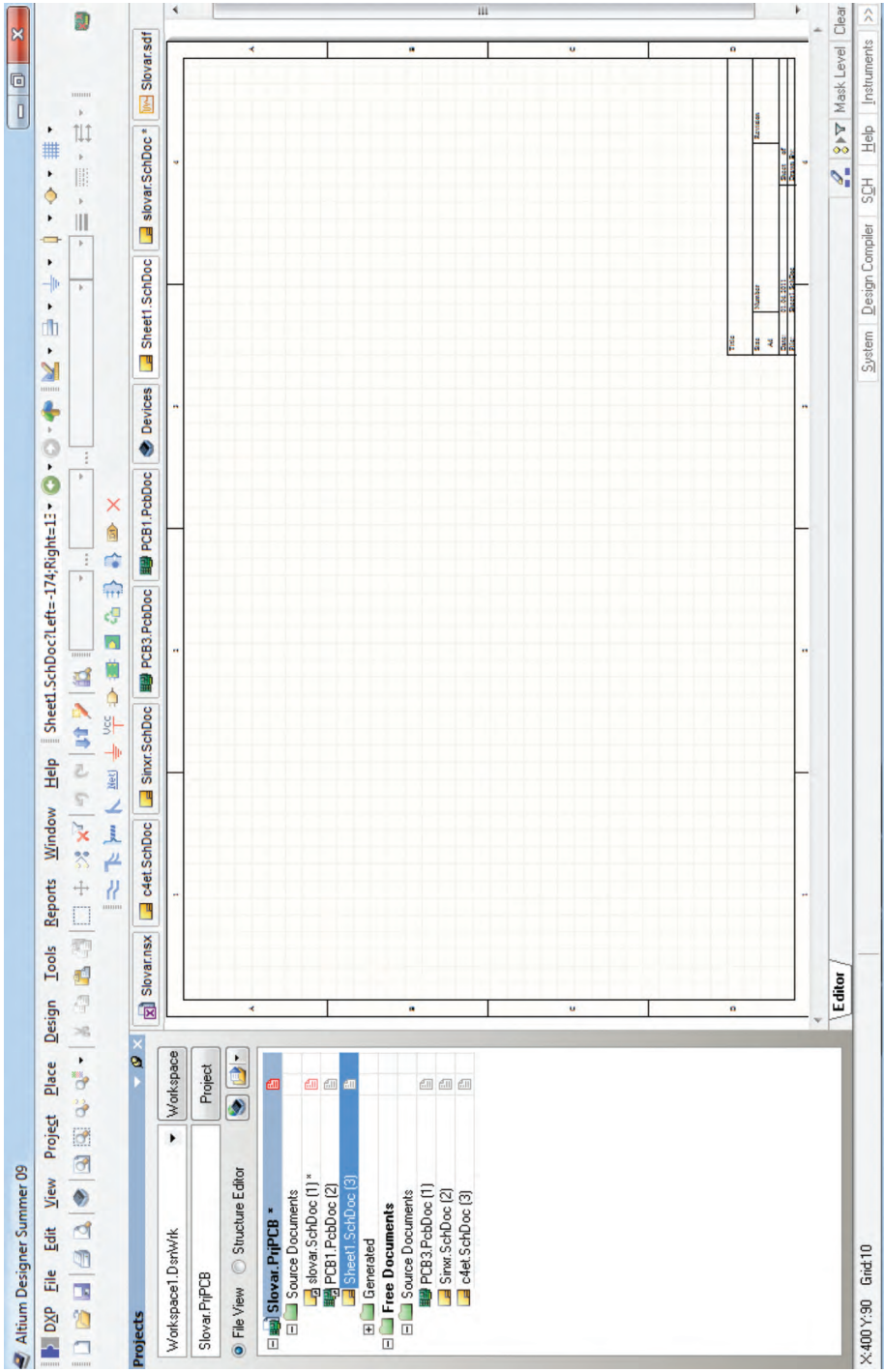


Рис. 10.3. Общий вид окна редактора схем (Schematic)

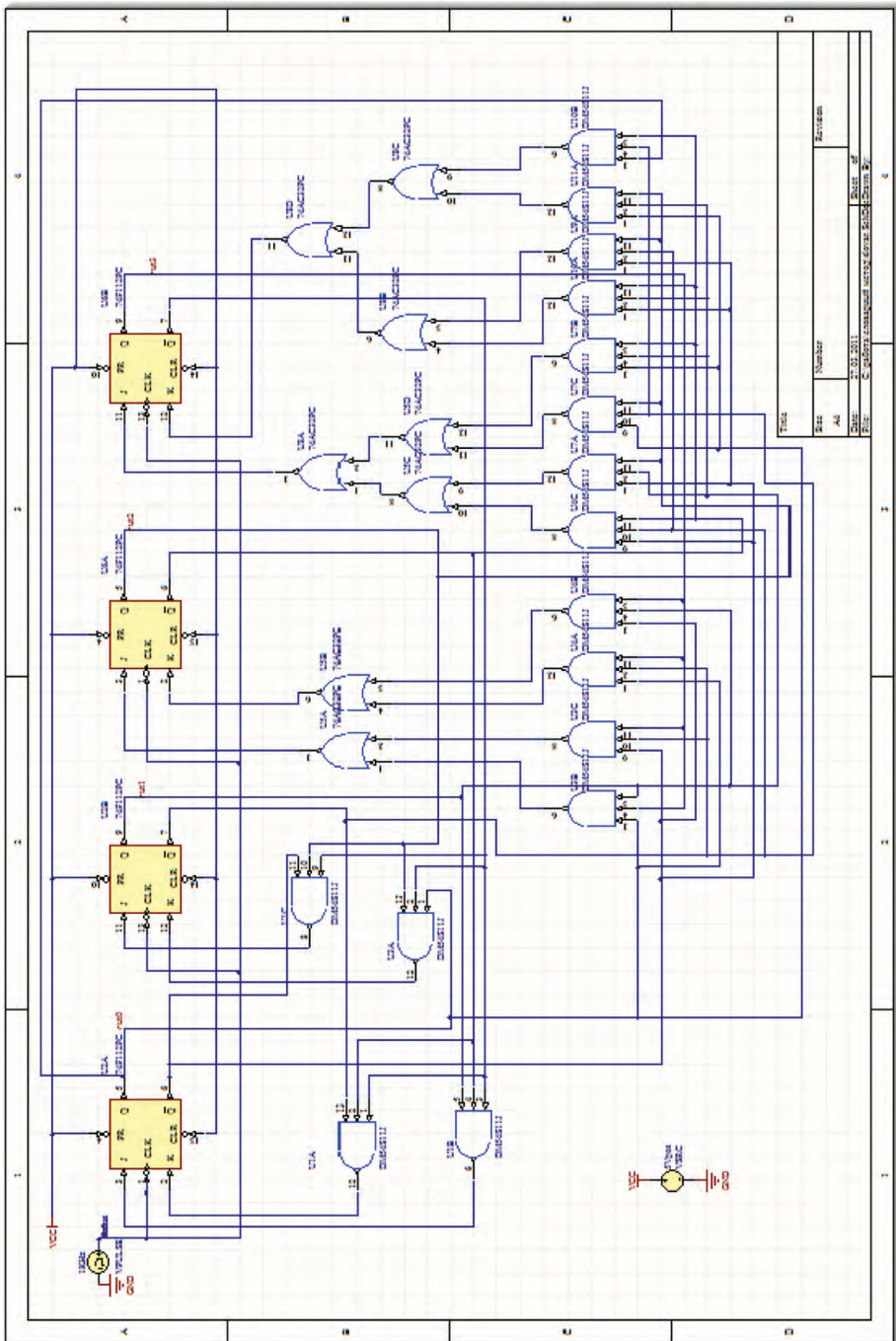


Рис. 10.12. Общий вид электрической принципиальной схемы для 4-разрядного счетчика Грея

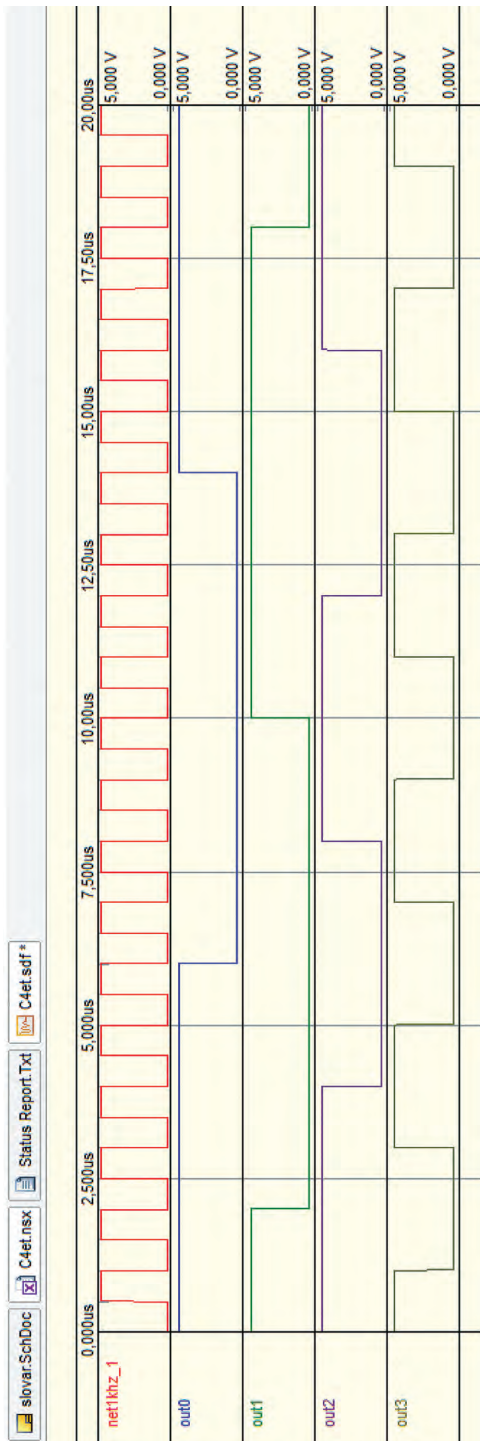


Рис. 10.19. Результаты моделирования электрической схемы 4-разрядного счетчика Грея

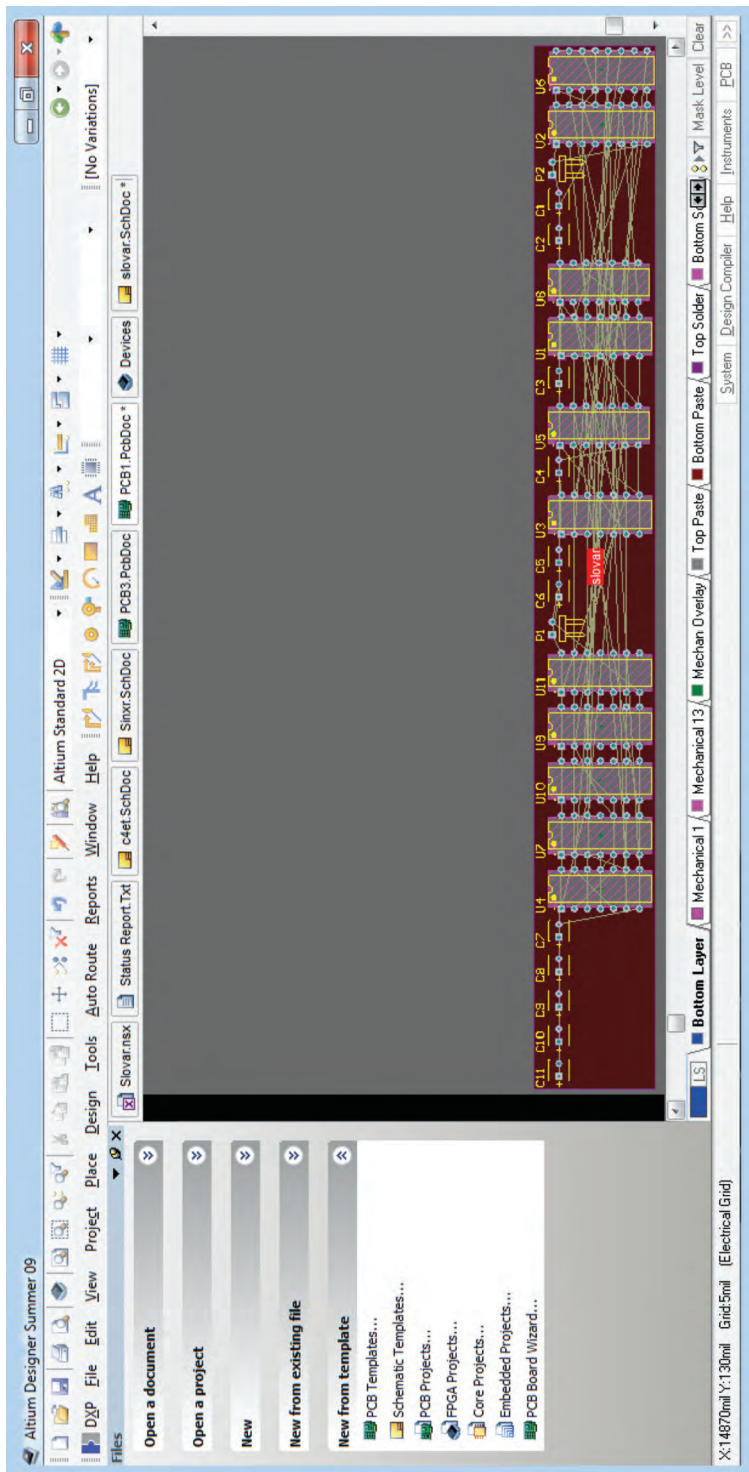


Рис. 10.39. Вид компонентов в «комнате»

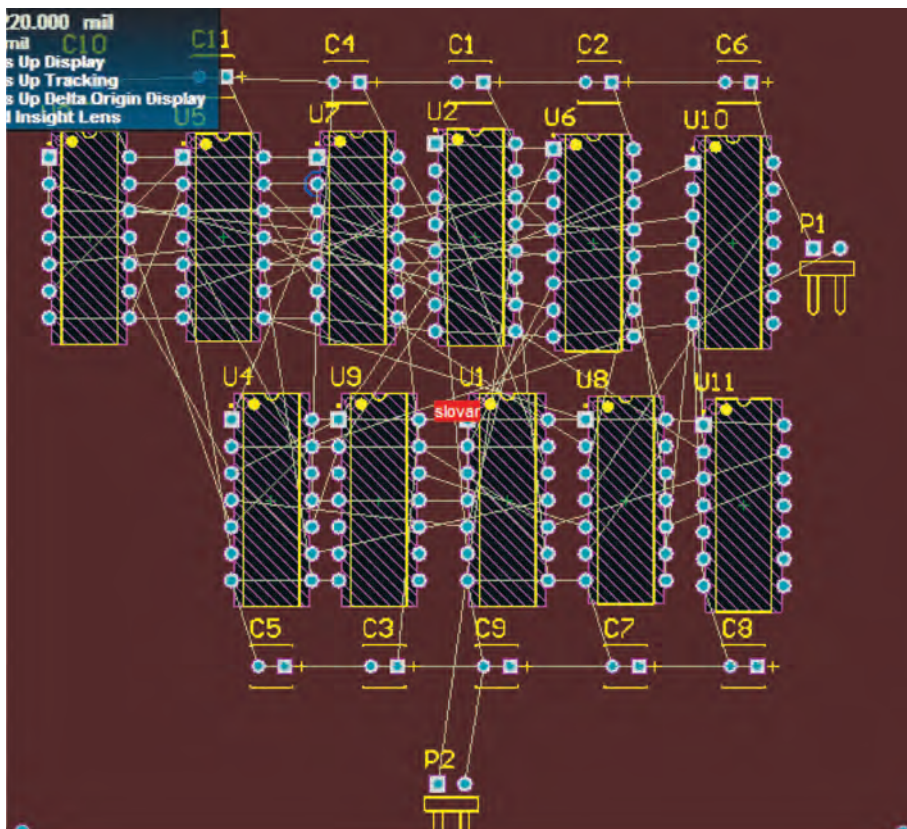


Рис. 10.40. Вид «комнаты», перенесенной в область платы, с измененным расположением компонентов

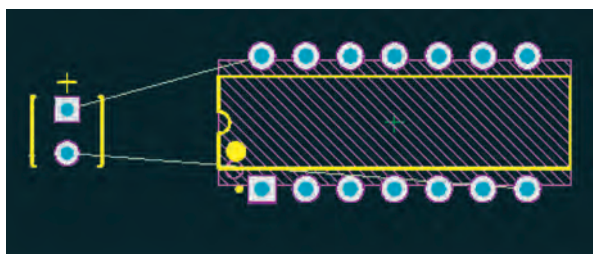


Рис. 10.42. Вид созданных линий связи

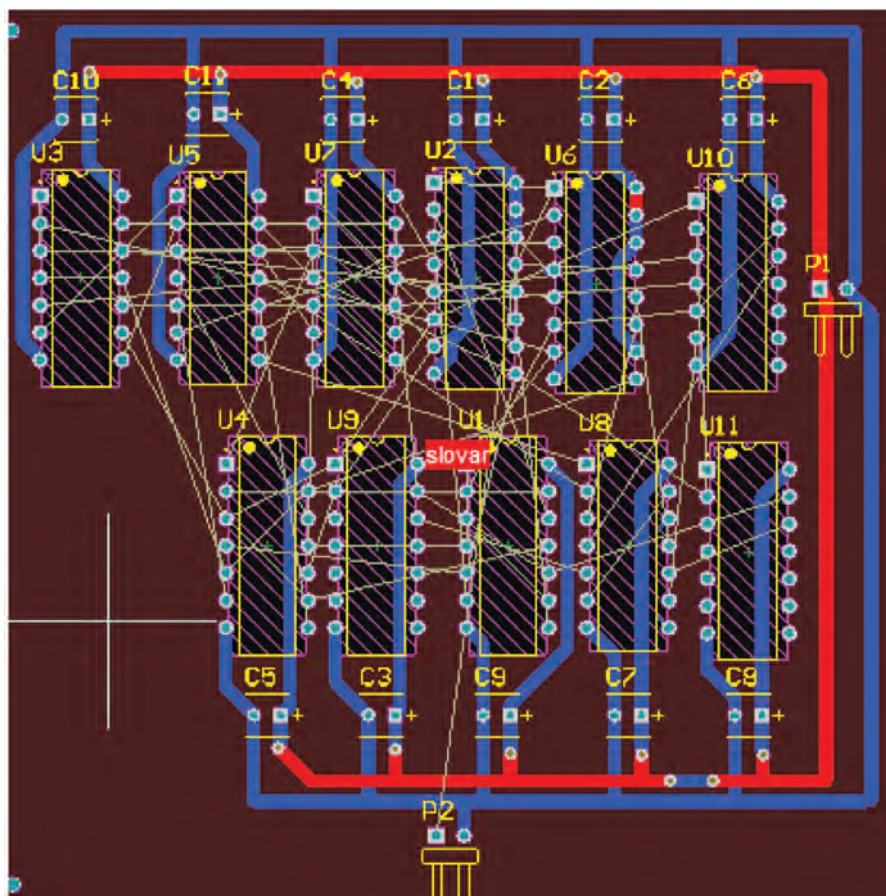


Рис. 10.49. Трассировка цепей питания

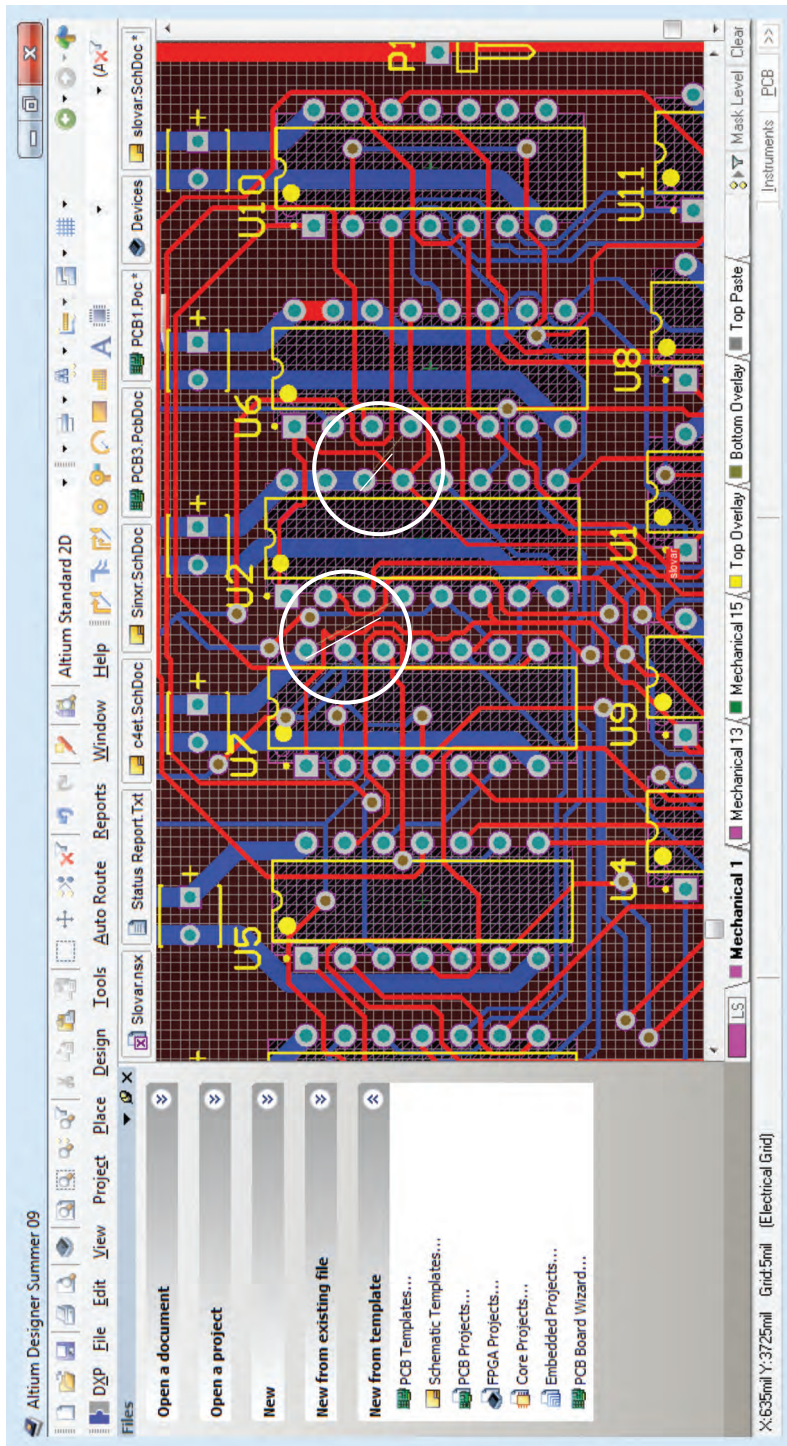


Рис. 10.52. Вид неразведенных связей после автоаттрасировки

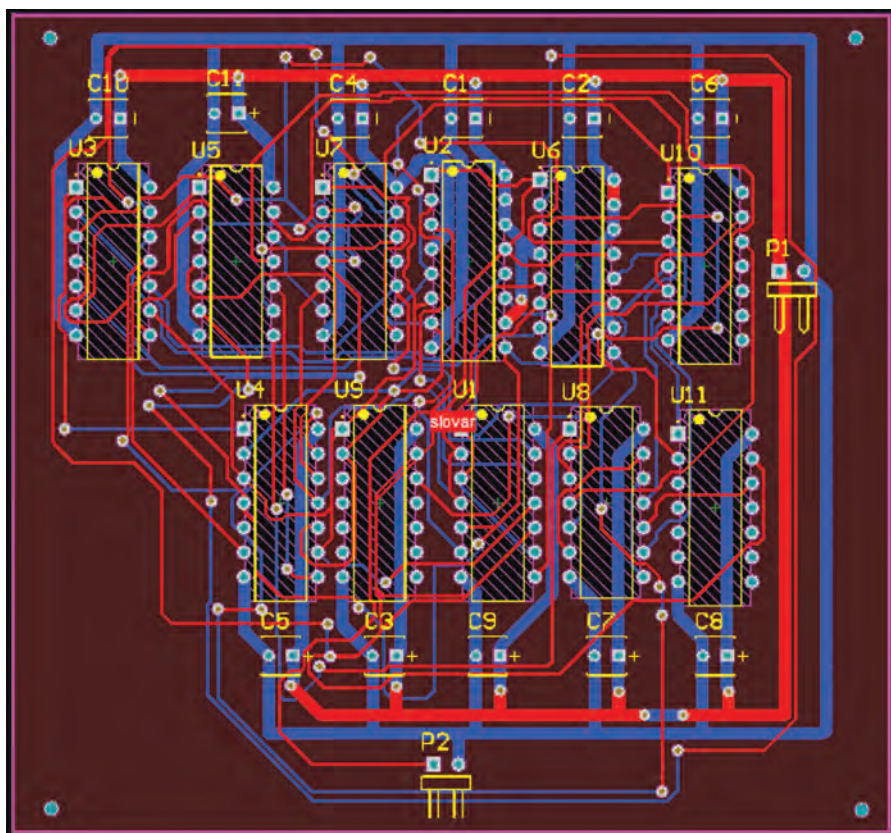


Рис. 10.56. Вид платы с прорисованным контуром и крепежными отверстиями

выбирается первый элемент (рис. 10.20). Далее присоединяем контакты к цепи. Для этого выделяем контактную площадку (1) (рис. 10.41) → правая кнопка мыши → **Properties...** (2). В поле **Net** выбираем из выпадающего списка строку с цепью, к которой надо подсоединиться. В результате образуется линия связи (рис. 10.42 на цветной вкладке).

Те же действия нужно произвести с разъемами **Header 2**, которые следует добавить в плату из библиотеки **Miscellaneous Connectors** (рис. 10.22).

10.3.5. Создание классов цепей

При работе с редактором плат целесообразно объединять сходные по назначению и свойствам цепи в так называемые классы. Это удобно при последующем задании правил проектирования, так как их можно будет задавать для всего класса, а не для каждой цепи в отдельности. В данном проекте предполагается использовать два класса: для цепей питания (**VCC**, **GND**) и для остальных информационных цепей.

Для этого в меню выбираем **Design => Classes...** Появится окно, изображенное на рис. 10.43. Правой кнопкой мыши нужно щелкнуть на **Net Classes** в левой области окна и выбрать **Add Class**.

В правой области окна появится новый класс с именем **New Class**, это название следует изменить, так как при закрытии Altium Designer класс будет удален. Щелкнув правой кнопкой мыши на **New Class**, выбираем **Rename Class** и вводим новое название, например «**GN**». При двойном щелчке мыши на этом названии откроется окно (рис. 10.44), в котором предлагается выбрать цепи для добавления в класс. Переносим с помощью курсора цепи **VCC** и **GND** и нажимаем **Close**.

Далее создаем второй класс цепей, воспользовавшись теми же командами (**Design => Classes =>...**).

Новый класс также переименовываем, назвав, например, «**a**». Перетаскиваем в правую область экрана все остальные цепи, кроме **VCC** и **GND** (рис. 10.45).

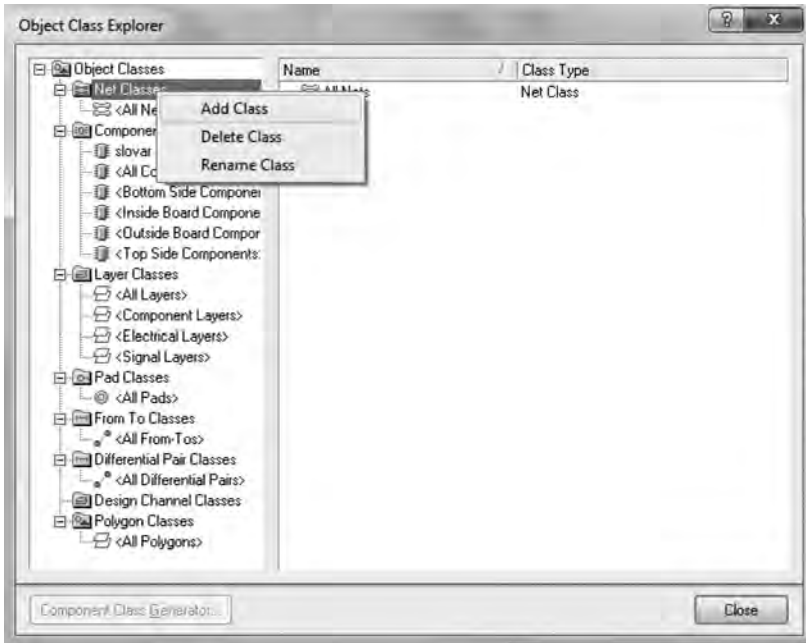


Рис. 10.43. Окно создания классов

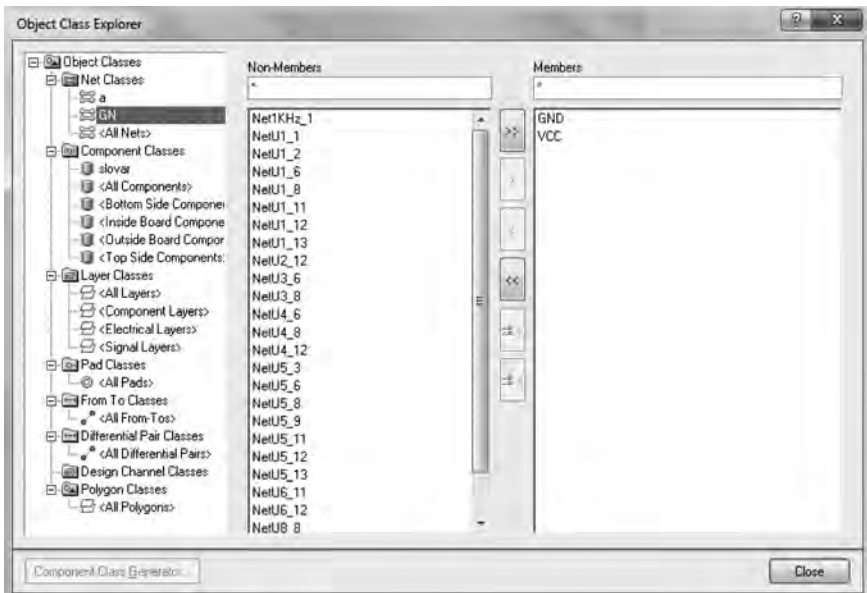


Рис. 10.44. Присвоение цепей классу «GN»

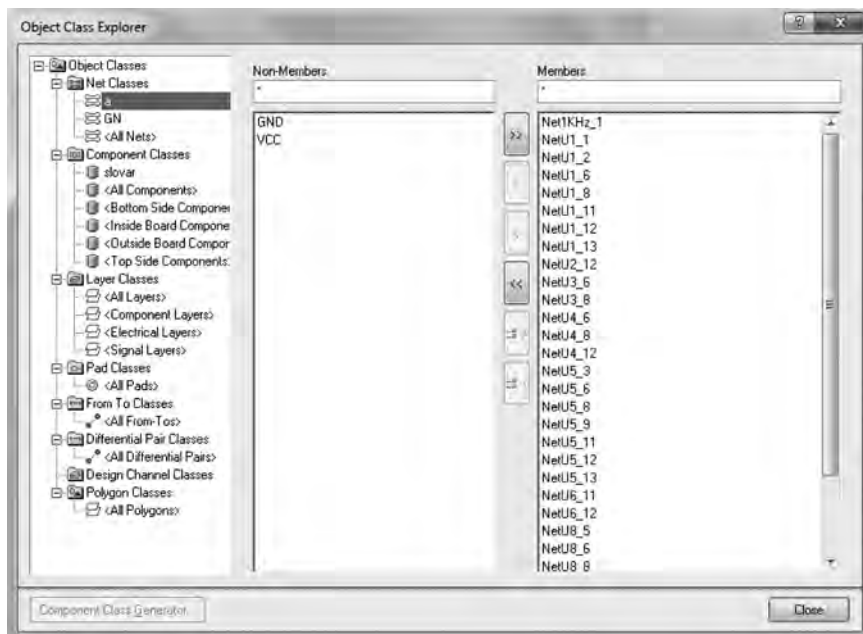


Рис. 10.45. Присвоение цепей классу «а»

Таким образом, были созданы два класса цепей.

10.3.6. Создание правил проектирования

Для задания различной толщины проводников при трассировке нужно определить необходимые правила для каждого из классов.

В меню **Design** нажать **Rules**. Появится окно (рис. 10.46), в левой области экрана которого находятся параметры, доступные для изменения. Нужно щелкнуть правой кнопкой мыши на параметре **Width** (толщина) и выбрать **New Rule**.

В списке добавится новое правило с названием **Width 1**, изменим название на **Width_a**. Щелкнув на нем, откроем окно для изменения ширины проводника. Ставим точку в **Net Class**, из выпадающего меню выбираем «а», меняем значения толщин проводников, как на рис. 10.47, и нажимаем **ОК**.

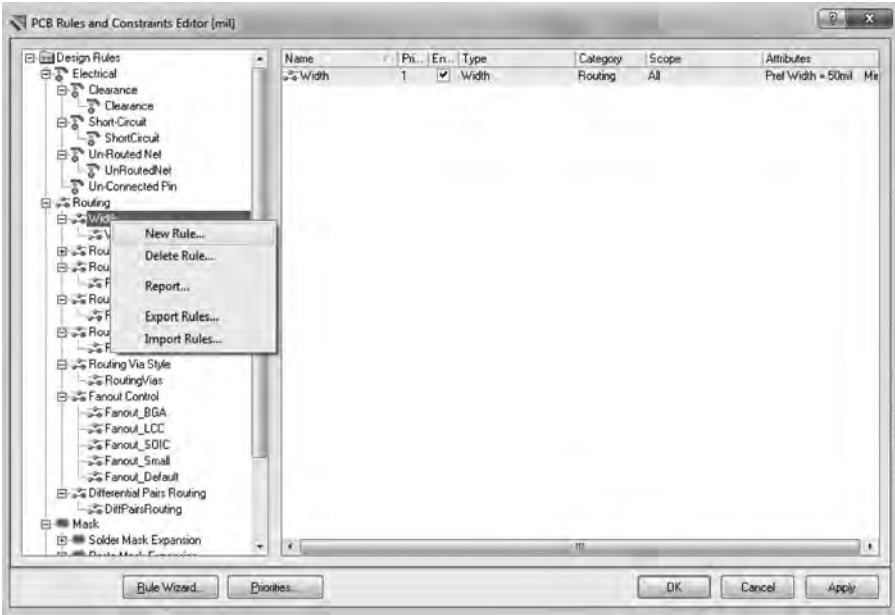


Рис. 10.46. Окно задания правил проектирования

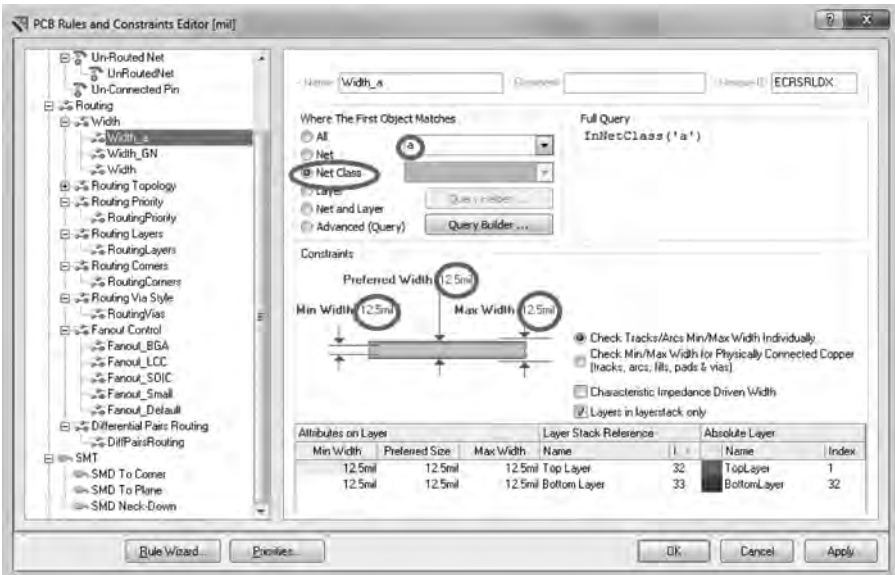


Рис. 10.47. Задание правил для класса «а»

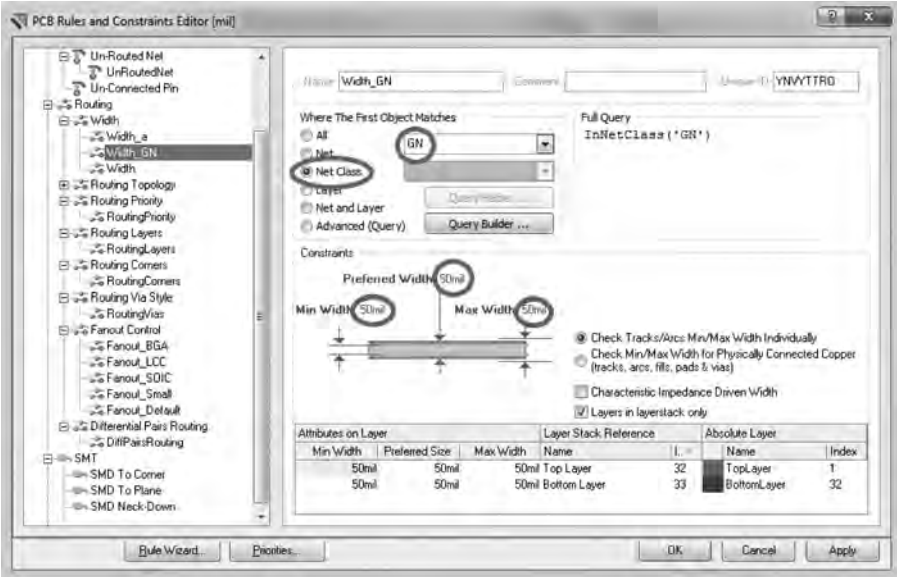


Рис. 10.48. Задание правил для класса «GN»

Создаем правила и для другого класса, повторив команды (**Design => Rules => ...**). Новое правило будет называться **Width_GN**. Устанавливаем параметры, как на рис. 10.48.

Следует обратить внимание, что толщины проводников в данном проекте задаются в милах (1 мил = 1/1000 дюйма), так как переход к метрической системе координат не осуществлялся.

Правила заданы, и объекты готовы к трассировке.

10.3.7. Трассировка проводников

1. В данном проекте будем использовать два способа трассировки проводников: автоматический и интерактивный.

Интерактивная разводка платы производится вручную. Данным способом будем пользоваться при начальной трассировке цепей класса «GN».

Так как в данном проекте используется двусторонняя плата, работа будет проводиться на двух слоях: **Top Layer** и **Bottom Layer**.

Переход с одного слоя на другой осуществляется нажатием соответствующих вкладок в нижней области рабочего окна.

При разводке используем следующие пиктограммы:



(Place=>Interactive Routing) – предназначена для ведения трассы, при этом левая кнопка мыши должна быть зажата.



(Place=>Pad) – размещение отверстия под крепеж.



(Place=>Via) – размещение сквозных отверстий для перехода с одного слоя платы на другой.

Place => Line (без пиктограммы) – используется для обрисовки контура платы.

После нажатия на любую из этих пиктограмм можно посмотреть и изменить при необходимости их свойства (ширину трассы, диаметр и др.), нажав клавишу **Tab**.

Перейдем непосредственно к трассировке. Вначале в одну цепь объединяем все 7-е выводы элементов (**GND**), проводя каждую трассу через соответствующий вывод конденсатора, и приводим эту цепь к разъему питания **P1**. Затем делаем вторую цепь, объединяя таким же образом 14-е выводы элементов (**VCC**), и тоже приводим ее к разъему. Заметим, что у разъема **P2** есть связь с цепью **GND**, проведем и ее (рис. 10.49 на цветной вкладке).

2. Для разводки остальных цепей воспользуемся возможностями автотрассировки.

Для этого в меню **Auto Route** выбираем **Net Class** (рис. 10.50).

Открывается окно, в котором из меню **Net Classes** выбираем «a» и нажимаем **OK** (рис. 10.51).

Появится файл отчета, куда будут заноситься данные о ходе трассировки, и через несколько секунд можно будет увидеть, как произведена разводка. Скорее всего, останется несколько неразведенных цепей (рис. 10.52 на цветной вкладке), и их нужно будет растрассировать вручную.

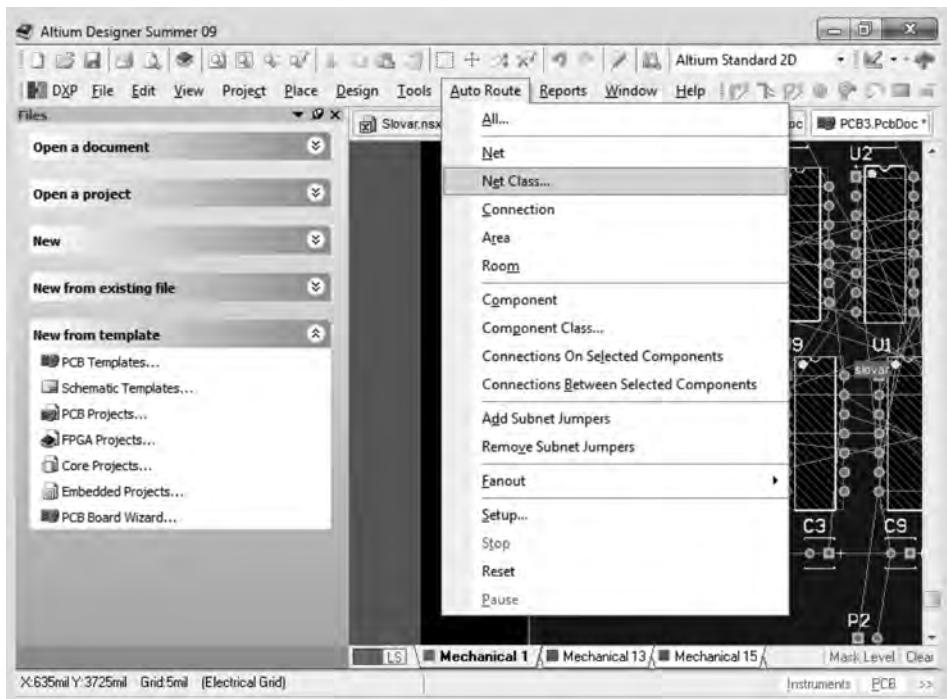


Рис. 10.50. Команды для автотрассировки класса

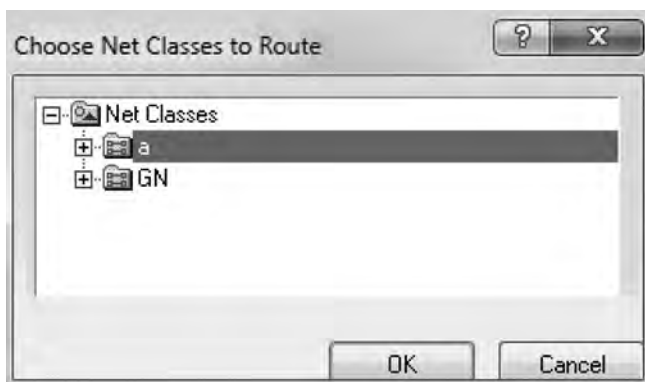


Рис. 10.51. Выбор класса «а» для автотрассировки

При трассировке удобно использовать панель PCB, в ней можно просматривать, сколько и в какой цепи осталось неразведенных мил (рис. 10.53).

По мере того как будет проводиться ручная трассировка, число мил неразведенных цепей будет уменьшаться и в конечном итоге должно стать равным нулю.

Еще один удобный инструмент позволяет выбирать конкретную цепь или элемент, с которым необходимо работать, затеняя при этом другие. Находится он в правом верхнем углу экрана в виде трех выпадающих меню (рис. 10.54). В первом указывается имя цепи, во втором – название компонента, в третьем – слой.

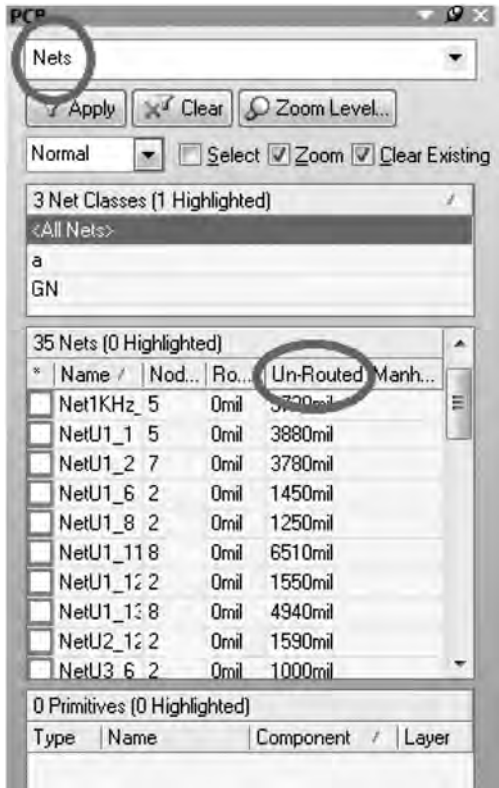


Рис. 10.53. Отображение неразведенных цепей в панели PCB

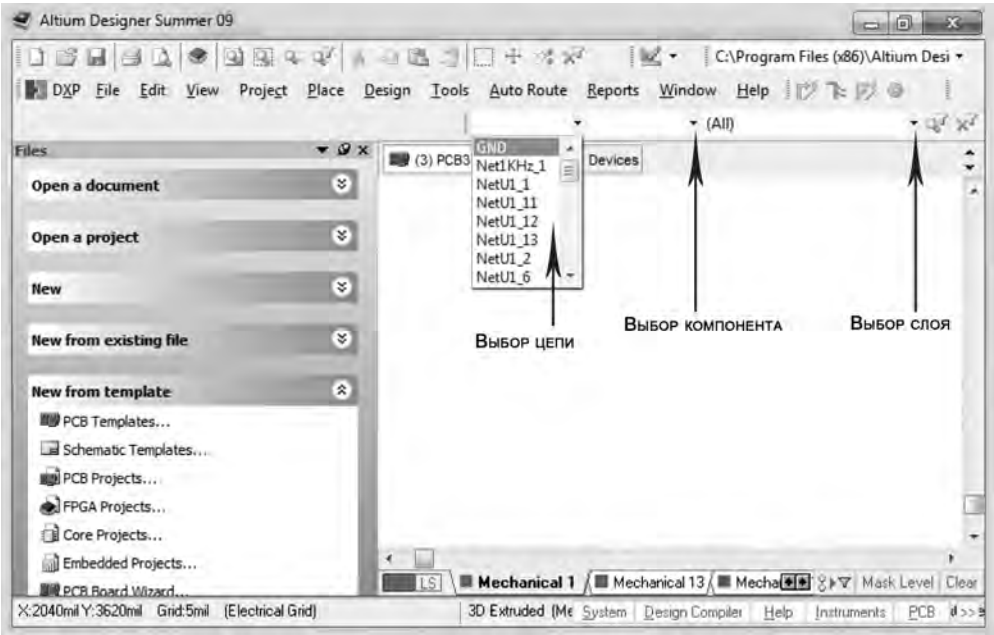


Рис. 10.54. Меню выбора цепи, компонента или слоя

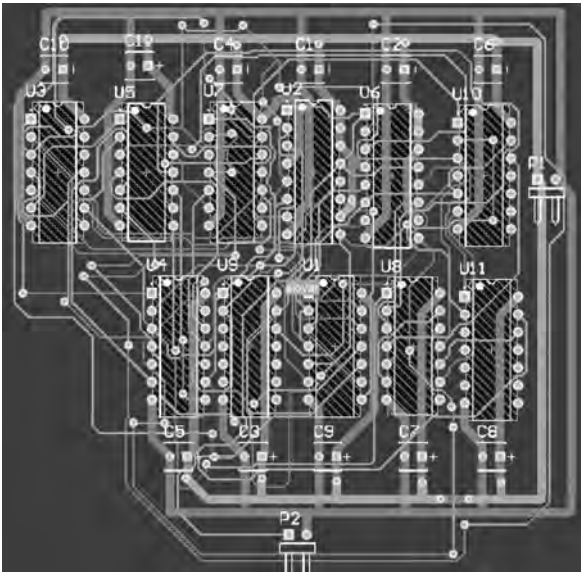



Рис. 10.55. Результат ручной и автоматической разводки платы

Вид платы после выполнения полной трассировки представлен на рис. 10.55.

10.3.8. Прорисовка контура платы

Контур платы рисуется с помощью слоя **Mechanical 1** (нужно сделать его активным, щелкнув на соответствующей вкладке внизу экрана) толщиной 12,5 мил. Выполняем команды **Place** => **Line** и обрисовываем контур. Для расположения крепежных отверстий используем кнопку .

В итоге получаем печатную плату с прорисованным контуром, показанную на рис. 10.56 цветной вкладки.

Для платы доступен режим 3D-просмотра. Для этого нужно нажать кнопку «3» на клавиатуре, это осуществит вход в 3D-режим. Управление платой при этом осуществляется правой кнопкой мыши: зажав ее, можно перемещать плату со всеми элементами, а чтобы

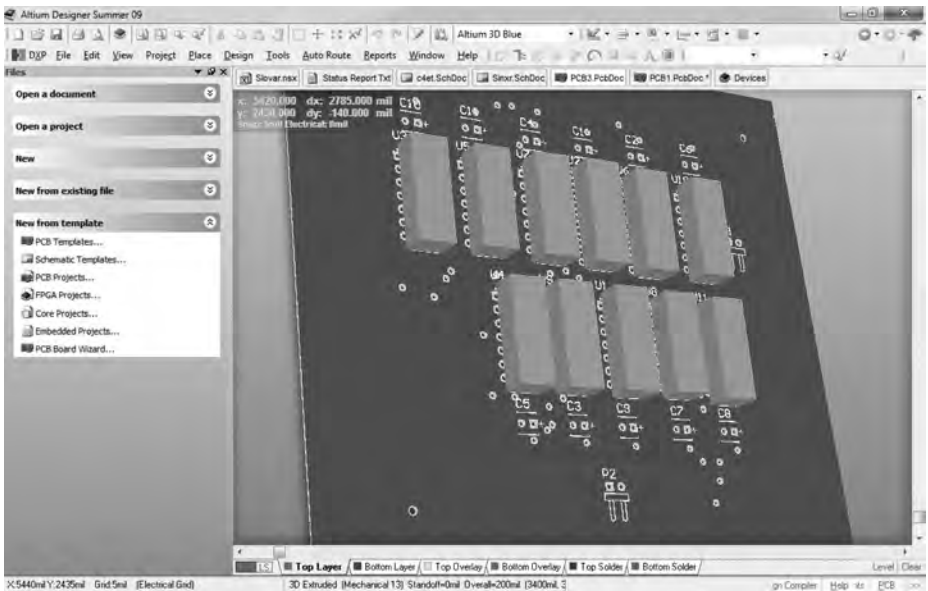


Рис. 10.57. Вид печатной платы в 3D-режиме

поворачивать ее, используется комбинация **Shift+прав. кнопка мыши** (рис. 10.57).

Выход из трехмерного режима производится нажатием кнопки «2» на клавиатуре.

По команде **Design => Board Layers and Colors** можно задать типовые цвета для платы.

10.3.9. Верификация PCB-проекта

Командой главного меню **Tools => Design rule Check** активизируется проверка выполнения правил проектирования, установленных для текущего проекта. Открывается диалоговое окно **Design Rule Checker** (рис. 10.58), в полях которого выполняется настройка опций текущей (**Online**) и пакетной (**Batch**) проверки.

В правом поле окна **DRC Report Options** устанавливаются области для проверки и формирования отчетов:

- Create Report File – создать файл отчета;
- Create Violations – формировать отчет о нарушениях;
- Sub-Net Details – детальная информация о сегментах цепей;
- Internal Plane Warnings – предупреждения, связанные с внутренними слоями класса Plane;
- Verify Shorting Copper – проверка на короткие замыкания участков металлизации;
- Report Drilled SMT Pads – отчет о просверленных контактных площадках;
- Report Multilayer Pads with 0 size Hole – отчет о многослойных контактных площадках с нулевым диаметром монтажного отверстия.

В левом поле окна приводится список категорий правил, выполнение которых подлежит проверке:

- Electrical – электрические (зазоры, короткие замыкания и др.);
- Routing – трассировочные (ширина проводников, стиль переходных отверстий и др.);

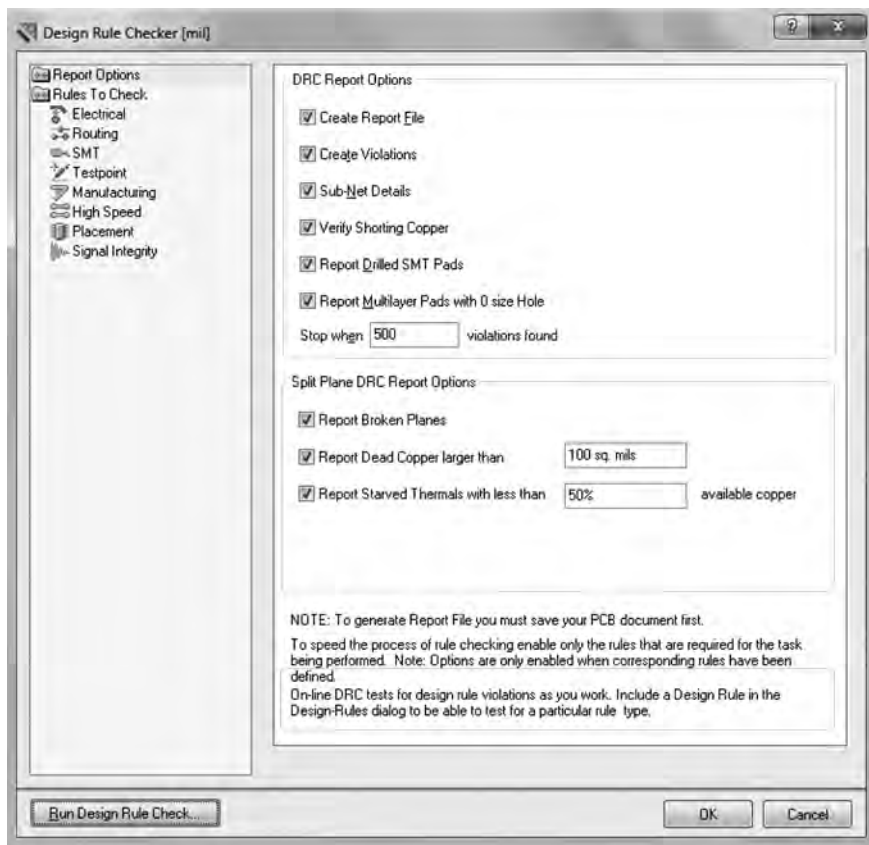


Рис. 10.58. Окно настройки верификации платы

- SMT – правила работы с планарными компонентами;
- Testpoint – контрольные точки;
- Manufacturing – правила, влияющие на возможность изготовления платы (изломы печатных проводников под острым углом, ширина кольца металлизации КП и др.);
- High Speed – правила проектирования высокоскоростных устройств;
- Placement – правила размещения компонентов;

• Signal Integrity – правила контроля целостности сигналов (волновое сопротивление, время распространения сигналов, фронты, выбросы и др.).

При указании курсором одной из категорий правое поле окна (рис. 10.59) видоизменяется: в нем разворачивается список правил выбранной категории.

При указании строки **Rules to Check** разворачивается полный список правил по всем категориям.

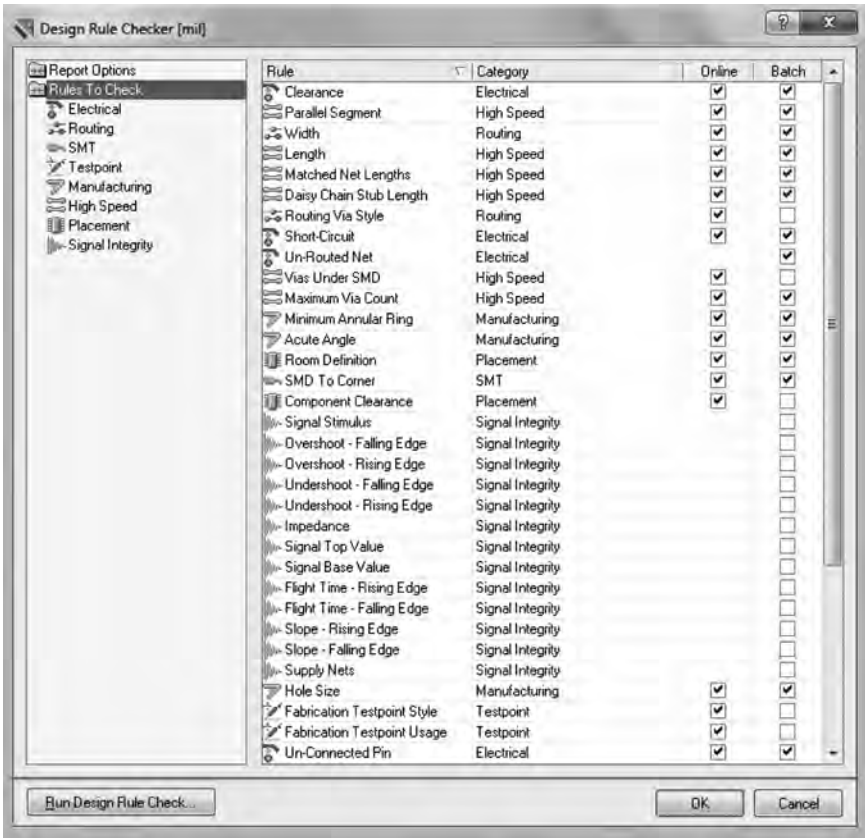


Рис. 10.59. Окно параметров верификации платы со списком правил

В колонках **Online** и **Batch** галочками активизируются правила, текущая и пакетная проверка которых должна выполняться в активном проекте.

Нажатием **Run Design Rule Check** дается старт пакетной проверки. В процессе проверки в плавающую панель **Messages** выводятся сообщения о ходе выполнения и результате проверки по всем пунктам назначенных правил. По окончании проверок в главном окне программы выводится итоговый отчет, озаглавленный **Design Rule Verification Report** – отчет о верификации правил проектирования.

Все обнаруженные нарушения отмечаются на плате подсветкой зеленого цвета [28].

10.3.10. Заключение

В результате проделанной работы был пройден полный маршрут проектирования с получением файла печатной платы. Но возможности Altium Designer позволяют продолжить работу и получить выходную документацию: Gerber-файлы, файлы сверловки, спецификации, а также файл сборочного чертежа.

В случаях работы с быстродействующими цифровыми платами, когда появляются помехи, в Altium Designer предусмотрена возможность подключения к анализатору Signal Integrity, где можно проверить отражение (звон) сигнала и поперечные шумы в процессе моделирования.

11. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ НА ПЛАТФОРМЕ ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИКИ

Сверхбольшие интегральные схемы программируемой логики, или программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), представляют собой цифровые микросхемы, имеющие программируемую (конфигурируемую) пользователем внутреннюю структуру. Типичные области применения сверхбольших интегральных схем программируемой логики: цифровая обработка сигналов, системы сбора данных, системы управления, телекоммуникационное оборудование, оборудование для систем беспроводной связи.

Для программирования используются программаторы и отладочные среды, позволяющие задать желаемую структуру цифрового устройства в виде принципиальной электрической схемы или программы на специальных языках описания аппаратуры: VHDL, Verilog, AHDL и др. Первые два относятся к языкам высокого уровня и не зависят от фирмы-производителя ПЛИС. Третий язык, напротив, является специализированным и может использоваться только для ПЛИС фирмы Altera.

Средствами языка VHDL возможно проектирование на различных уровнях абстракции (поведенческом или алгоритмическом, регистровых передачах, структурном) в соответствии с техническим заданием и предпочтениями разработчика. Заложена возможность иерархического проектирования, максимально реализующая себя в больших проектах с участием большой группы разработчиков.

Перед рассмотрением подробного маршрута проектирования цифрового устройства приведем краткие сведения по языку VHDL [21].

11.1. Язык описания аппаратуры VHDL

Язык описания аппаратуры (Hardware Description Language) является набором формальных записей, которые могут быть использованы на всех этапах разработки цифровых электронных систем.

Это возможно вследствие того, что язык легко воспринимается как машиной, так и человеком. Он может использоваться на этапах проектирования, верификации, синтеза и тестирования аппаратуры так же, как и для передачи данных о проекте, модификации и сопровождения.

Язык VHDL используется во многих САПР для моделирования цифровых систем, проектирования программируемых логических интегральных схем, базовых матричных кристаллов, заказных интегральных микросхем.

С точки зрения программиста, язык VHDL состоит как бы из двух компонент – общеалгоритмической и проблемно-ориентированной.

Общеалгоритмическая компонента VHDL – это язык, близкий по синтаксису и семантике к современным языкам программирования типа Паскаль, C++ и др. Язык относится к классу строго типизированных. Помимо встроенных (пакет STANDARD) простых (скалярных) типов данных, таких как целый, вещественный, булевый, битовый, данных типа время, данных типа ссылка (указатель), пользователь может вводить свои типы данных (перечисление, диапазон и др.).

Помимо скалярных данных можно использовать агрегаты: массивы `array`, в том числе и битовые векторы `bit_vector`, и символьные строки `string`, записи `record`, файлы `file`.

11.1.1. Основные операторы VHDL

С помощью операторов описываются алгоритмы, определяющие функционирование схемы. Они могут находиться в теле функции, процедуры или процесса. Рассмотрим основные операторы.

- **Wait until condition**

Этот оператор приостанавливает выполнение процесса до момента выполнения условия (`condition`).

- **Signal <= expression**

Оператор назначения устанавливает сигналу значение, равное выражению справа.

- **Variable** := *expression*

Оператор присваивания устанавливает значение переменной равным выражению справа.

- **Procedure_name** (*parameter* {, *parameter(s)*})

Оператор вызова процедуры состоит из имени процедуры и списка фактических параметров.

- **If**

```
\оператор if ::= if \условие 1\ then
    {последовательный оператор 1\}
    [{elseif \условие 2\ then
    {последовательный оператор 2\}]
    [else
    {последовательный оператор 3\}]
```

end if;

Оператор **if** используется для ветвления алгоритма по различным условиям.

- **Case**

```
\оператор case ::= case \простое выражение\ is
    when \альтернативы\ => {последовательный оператор\}
    {when \альтернативы\ => {последовательный оператор\}
    when others => {последовательный оператор\}}
```

end case;

Оператор **case** подобно оператору **if** задает ветвление алгоритма. Когда значение выражения встречается в одном из списков значений, выполняется соответствующая последовательность операторов. Если значение выражения не присутствует ни в одном из списков, то выполняется список операторов, соответствующий ветви **when others**.

- **Loop**

```
\оператор цикла ::= [метка:] [схема итерации] loop
    {последовательный оператор\}
    {next [метка] [when \условие\];}
    {exit [метка \] [when \условие\];}
```

```
end loop [\метка\];  
\схема итераций\ ::= while \условие\  
    \ for \переменная цикла\ in \диапазон\  
    ..  
    ..  
    ..
```

Оператор цикла позволяет многократно выполнить последовательность операторов. Диапазон значений задается в виде **value1 to value2**. Переменная цикла последовательно принимает значения из заданного диапазона. Количество итераций равно количеству значений в диапазоне.

- **Return expression**

Этот оператор возвращает значение из функции.

- **Null**

Пустой оператор, не выполняет никаких действий.

Операторы **VHDL** делятся на последовательные и параллельные.

Последовательно выполняемые (*последовательные*) операторы **VHDL** могут использоваться в описании процессов, процедур и функций. К этим операторам относятся:

- оператор присваивания переменной (:=);
- последовательный оператор назначения сигналу (<=);
- последовательный оператор утверждения (assert);
- условный оператор (if);
- оператор цикла (case);
- пустой оператор (null);
- операторы возврата процедуры (return);
- оператор последовательного вызова процедуры.

Язык поддерживает концепции пакетного и структурного программирования. Сложные операторы заключены в операторные скобки: if – end if; process – end process; case – end case; loop – end loop и т.д.

Различаются локальные и глобальные переменные. Область «видимости» локальных переменных ограничена пределами блока (про-

цессного, процедурного, операторного блока, оператора описания архитектуры).

Фрагменты описаний, которые могут независимо анализироваться компилятором и при отсутствии ошибок помещаться в библиотеку проекта (рабочую библиотеку – Work), называются проектными пакетами design unit. Такими пакетами могут быть объявление интерфейса объекта проекта (entity), объявление архитектуры (architecture), объявление конфигурации (configuration), объявление интерфейса пакета (package) и объявление тела пакета (package body).

Модули проекта в свою очередь можно разбить на две категории: первичные и вторичные. К первичным модулям относятся объявления пакета, объекта проекта, конфигурации. К вторичным – объявление архитектуры, тела пакета. Один или несколько модулей проекта могут быть помещены в один файл, называемый файлом проекта (design file).

Каждый проанализированный модуль проекта помещается в библиотеку проекта (design library) и становится библиотечным модулем (library unit).

Каждая библиотека проекта в языке VHDL имеет логическое имя (идентификатор). По отношению к сеансу работы с VHDL-системой существует два класса рабочих библиотек проекта: рабочие библиотеки и библиотеки ресурсов.

Рабочая библиотека – это библиотека, содержащая модули, ссылка на которые имеется в текущем проекте. В каждый конкретный момент времени пользователь работает с одной рабочей библиотекой и произвольным числом библиотек ресурсов.

Модули, как и в обычных алгоритмических языках, – это средство выделения из ряда программ и подпрограмм общих типов данных, переменных, процедур и функций, позволяющее упростить, в частности, процесс их замены.

Так же, как и в описаниях проектируемых систем разделяются описания интерфейсов и тел, в языке VHDL у пакета разделяются описания интерфейса и тела пакета. По умолчанию предусмотрено

подключение стандартных пакетов STANDARD и TEXT_IO. Пакет STANDARD, в частности, содержит описания булевых операций над битовыми данными и битовыми векторами. Нестандартные пакеты реализуются пользователями, желающими более точно отобразить свойства описываемых ими объектов. Например, можно в пользовательском пакете переопределить логические операции И, ИЛИ и НЕ и перейти от булевого (двухзначного) к многозначному (0, 1, X, Z) алфавиту моделирования.

Проблемно-ориентированная компонента позволяет описывать цифровые системы в привычных для разработчика понятиях и терминах. Сюда можно отнести:

- понятие модельного времени (now);
- данные типа time, позволяющие указывать время задержки в физических элементах;
- данные вида signal, значения которых изменяются не мгновенно, как у переменных, а с указанной задержкой, а также специальные операции и функции над ними;
- средства объявления объектов (entity) и их архитектур (architecture).

Если говорить про операторную часть проблемно-ориентированной компоненты, то условно ее можно разделить на:

- средства поведенческого описания аппаратуры (параллельные процессы и средства их взаимодействия);
- средства потокового описания (описания на уровне межрегистровых передач) – параллельные операторы назначения сигналам (\leq) с транспортной (transport) или инерциальной задержкой передачи сигналов;
- средства структурного описания объектов (операторы конкретизации компонент с заданием карт портов (port map) и карт настройки (generic map), объявление конфигурации и т.д.).

Параллельные операторы VHDL включают:

- оператор процесса (process);
- оператор блока (block);
- параллельный оператор назначения сигналу (<=);
- оператор условного назначения сигналу (when);
- оператор селективного назначения сигналу (select);
- параллельный оператор утверждения (assert);
- параллельный оператор вызова процедуры;
- оператор конкретизации компоненты (port map);
- оператор генерации конкретизации (generate).

Как видно из этого перечня, последовательные и параллельные операции назначения, вызова процедуры и утверждения различаются контекстно.

Базовым элементом описания систем на языке VHDL является блок. Блок содержит раздел описаний данных и раздел параллельно исполняемых операторов. В рамках описания архитектуры могут использоваться внутренние, вложенные блоки. Наряду со всеми преимуществами блочной структуры программы и ее соответствия естественному иерархическому представлению структуры проекта операторы блока языка VHDL позволяют устанавливать условия охраны (запреты) входа в блок. Только при истинности значения охранного выражения управление передается в блок и инициируется выполнение операторов его тела.

11.1.2. Алфавит языка

Как и любой другой язык программирования, VHDL имеет свой алфавит – набор символов, разрешенных к использованию и воспринимаемых компилятором. В алфавит языка входят:

- латинские строчные и прописные буквы – A, a; B, b; ..., Z, z;
- цифры от 0 до 9;
- символ подчеркивания «_» (код ASCII номер 95).

Из символов, перечисленных выше (и только из них!), могут конструироваться идентификаторы в программе. Написание идентификаторов должно подчиняться следующим правилам:

- идентификатор не может быть зарезервированным словом языка;
- идентификатор должен начинаться с буквы;
- идентификатор не может заканчиваться символом подчеркивания «_»;
- идентификатор не может содержать двух и более идущих подряд символов подчеркивания «_».

Примеры корректных идентификаторов: `cont`, `clock2`, `full_add`.

Примеры некорректных идентификаторов: `1clock`, `_adder`, `add_sub`, `entity`.

Следует отметить, что прописные и строчные буквы не различаются, идентификаторы `clock` и `CLOCK` эквивалентны. В алфавит языка также входят символ «пробел» (код ASCII номер 32), символ табуляции (код ASCII номер 9), символ новой строки (коды ASCII номер 10 и 13). Данные символы являются разделителями слов в конструкциях языка VHDL. Количество разделителей не имеет значения. Таким образом, следующие выражения для компилятора эквивалентны:

```

- Count:=2+2;
- Count := 2 + 2 ;
- Count := 2
+
  2;
```

Специальные символы, участвующие в построении конструкций языка, тоже входят в его алфавит:

```
+ 2 * / = < > . , : ; # ' " |
```

Составные символы

```
<= >= => := /=
```

воспринимаются компилятором как один символ. Разделители между элементами составных символов недопустимы.

Комментарии

Признаком комментария являются два символа тире «--», идущие подряд. Компилятор игнорирует текст, начиная с символов «--» до конца строки, комментарий может включать в себя символы, не входящие в алфавит языка (в частности, русские буквы).

Числа

В стандарте языка VHDL определены числа как целого, так и вещественного типов. Однако средства синтеза ПЛИС допускают применение только целых чисел. Целое число в языке VHDL может быть представлено в одной из четырех систем счисления: двоичной, восьмеричной, десятичной и шестнадцатеричной.

Конкретные форматы написания числовых значений будут описаны далее при рассмотрении различных типов языка. К разновидности числовых значений можно отнести также битовые строки.

Символы

Запись символа представляет собой собственно символ, заключенный в одиночные кавычки. Например: 'A', '*', ' '.

В средствах синтеза ПЛИС область применения символов ограничена использованием их в качестве элементов перечислимого типа.

Строки

Строки представляют собой набор символов, заключенных в двойные кавычки. Например: "A string".

Подобно высокоуровневым языкам программирования, VHDL является языком со строгой типизацией. Каждый тип данных в VHDL имеет определенный набор принимаемых значений и набор допустимых операций. В языке предопределено достаточное количество простых и сложных типов, а также имеются средства для образования типов, определяемых пользователем. Необходимо отметить, что в данном пособии рассматриваются не все типы данных, а только те, которые поддерживаются средствами синтеза ПЛИС.

11.1.3. Типы переменных

В языке VHDL используются следующие простые типы переменных:

- **BOOLEAN** (логический) – объекты данного типа могут принимать только два значения: FALSE (ложь) и TRUE (истина), причем FALSE эквивалентно 0, а TRUE эквивалентно 1.

- **INTEGER** (целый) – значения данного типа представляют собой 32-разрядные числа со знаком. Объекты типа INTEGER могут содержать значения из диапазона $-(2^{31}-1) : 2^{31}-1$ (-2147483647: 2147483647).

- **BIT** (битовый) – представляет один логический бит. Объекты данного типа могут содержать только значения «0» и «1».

- **STD_LOGIC** (битовый) – представляет один бит данных. Объекты данного типа могут принимать 9 состояний. Данный тип определен стандартом IEEE 1164 для замены типа BIT (см. примечание).

- **STD_ULOGIC** (битовый) – представляет один бит данных. Объекты данного типа могут принимать 9 состояний. Данный тип определен стандартом IEEE 1164 для замены типа BIT (см. примечание).

- **ENUMERATED** (перечислимый) – используется для задания пользовательских типов.

- **SEVERITY_LEVEL** – перечислимый тип, используется только в операторе ASSERT.

- **CHARACTER** – символьный тип.

Примечание. В действительности тип STD_ULOGIC является базовым для типа STD_LOGIC, объекты обоих типов могут принимать одно и то же множество значений и имеют одинаковый набор допустимых операций. Единственное различие между типами заключается в том, что для типа STD_ULOGIC не определена функция разрешения (resolving function). В языке VHDL функция разрешения используется для определения значения сигнала, имеющего несколько источников (драйверов).

Тип BOOLEAN

Все три типа объектов в VHDL (константы, переменные и сигналы) могут иметь тип BOOLEAN.

Операторы отношения. Значения типа BOOLEAN могут участвовать в выражениях. Операторы отношения ($=$, \neq , $<$, \leq , $>$, \geq) определены для операндов типа BOOLEAN и одномерных массивов, содержащих элементы типа BOOLEAN. Для всех перечислимых типов операции сравнения над одномерными массивами типа BOOLEAN производятся поэлементно, начиная с крайнего левого элемента.

Логические операторы. Для операндов типа BOOLEAN и одномерных массивов, содержащих элементы типа BOOLEAN, определены все логические операции (AND, OR, NAND, NOR, XOR и NOT). Тип и размер операндов должны быть одинаковыми. Тип и размер результата такой же, как тип и размер операндов.

Оператор конкатенации. Оператор конкатенации также определен для операндов типа BOOLEAN и одномерных массивов, содержащих элементы типа BOOLEAN. Результат выражения представляет собой одномерный массив, содержащий элементы типа BOOLEAN; размер массива равен сумме размеров операндов.

Другие операторы. Другие операции над операндами типа BOOLEAN не определены.

Тип INTEGER

Стандарт VHDL определяет тип INTEGER для использования в арифметических выражениях. По умолчанию объекты типа INTEGER имеют размерность 32 бита и представляют целое число в интервале $(2^{31}-1) : (2^{31}-1)$, т.е. от -2147483647 до 2147483647 . Стандарт языка позволяет также объявлять объекты типа INTEGER, имеющие размер меньше 32 бита, используя ключевое слово RANGE, ограничивающее диапазон возможных значений:

SIGNAL X : INTEGER RANGE -127 TO 127

Данная конструкция определяет X как 8-битовое число.

Можно определить целый тип, используя следующую конструкцию: TYPE имя_типа IS RANGE диапазон_индексов.

Диапазон индексов определяется следующим образом:

m TO n или **n DOWNTO m**,

где m, n – целочисленные константы, причем $m < n$.

Операторы отношения. Операторы отношения (=, /=, <, >, <=, >=) определены для операндов типа INTEGER и одномерных массивов, содержащих элементы типа INTEGER. Результат выражения имеет тип BOOLEAN.

Арифметические операторы. Операторы 1, 2, ABS допустимы в следующих случаях:

- если оба оператора являются константами (CONSTANT);
- если второй операнд является константой и его значение равно $2n$, где $n = 0, 1, 2, 3$.

Применение операторов *, /, MOD, REM недопустимо, если оба операнда являются сигналами (SIGNAL) или переменными (VARIABLE).

Оператор возведения в степень (**), как правило, не поддерживается средствами синтеза ПЛИС.

Другие операторы. Другие операции над операндами типа INTEGER не определены.

Тип BIT

Объект данного типа может принимать значение «0» (лог. 0) или «1» (лог. 1).

Стандартом IEEE 1164 определена замена типа BIT на более гибкий тип STD_LOGIC. Поэтому использование типа BIT в новых разработках не рекомендуется.

Операторы отношения. Значения типа BIT могут участвовать в выражениях. Операторы отношения (=, /=, <, >, <=, >=) определены для операндов типа BIT и одномерных массивов, содержащих элементы типа BIT. Результат выражения имеет тип BOOLEAN. Это спра-

ведливо для всех перечислимых типов. Операции сравнения над одномерными массивами типа BIT производятся поэлементно, начиная с крайнего левого элемента.

Логические операторы. Для операторов типа BIT и одномерных массивов, содержащих элементы типа BIT, определены все логические операции (AND, OR, NAND, NOR, XOR, NOT). Тип и размер операндов должны быть одинаковыми. Тип и размер результата такой же, как тип и размер операндов.

Оператор конкатенации. Оператор конкатенации также определен для операндов типа BIT и одномерных массивов, содержащих элементы типа BIT. Результат выражения представляет собой одномерный массив, содержащий элементы типа BIT. Размер массива равен сумме размеров операндов.

Другие операторы. Другие операции над операндами типа BIT не определены.

Тип STD_LOGIC

Тип STD_LOGIC является перечислимым типом. Объекты типа STD_LOGIC могут принимать 9 значений: «0», «1», «Z», «-», «L», «H», «U», «X», «W». Для синтеза логических схем используются только первые четыре:

- «0» – логический 0;
- «1» – логическая 1;
- «Z» – третье состояние;
- «-» – не подключен.

Операторы отношения. Значения типа STD_LOGIC могут участвовать в выражениях. Операторы отношения (=, /=, <, >, <=, >=) определены для операндов типа STD_OLGIC и одномерных массивов, содержащих элементы типа STD_LOGIC. Результат выражения имеет тип BOOLEAN. Как и для всех перечислимых типов, операции сравнения над одномерными массивами типа STD_LOGIC производятся поэлементно, начиная с крайнего левого элемента.

Логические операторы. Для операндов типа STD_LOGIC и одномерных массивов, содержащих элементы типа STD_LOGIC, определены все логические операции (AND, OR, NAND, NOR, XOR, NOT). Тип и размер операндов должны быть одинаковыми. Тип и размер результата такой же, как тип и размер операндов.

Оператор конкатенации. Оператор конкатенации также определен для операндов типа STD_LOGIC и одномерных массивов, содержащих элементы типа STD_LOGIC. Результат выражения представляет собой одномерный массив, содержащий элементы типа STD_LOGIC. Размер массива равен сумме размеров операндов.

Другие операторы. Другие операции над операндами типа STD_LOGIC не определены.

Тип Перечислимый

Перечислимый тип – это такой тип данных, при котором количество всех возможных значений конечно. Строго говоря, все описанные выше типы данных являются перечислимыми.

Применение перечислимых типов данных преследует две цели:

- улучшение смысловой читаемости программы;
- более четкий и простой визуальный контроль значений.

Наиболее часто перечислимый тип используется для обозначения состояний конечных автоматов.

Перечислимый тип данных объявляется путем перечисления названий элементов-значений. Объекты, тип которых объявлен как перечислимый, могут содержать только те значения, которые указаны при перечислении. Элементы перечислимого типа должны быть идентификаторами или символами, которые в свою очередь должны быть уникальными в пределах одного типа. Повторное использование названий элементов в других перечислимых типах разрешается.

Объявление перечислимого типа имеет вид:

```
TYPE имя_типа IS (название_элемента) ;
```

Операторы отношения. Значения определенных пользователем перечислимых типов могут участвовать в выражениях. Операторы отношения (=, /, <, <=, >, >=) определены как для перечислимых типов, так и для одномерных массивов, содержащих элементы этих типов. Результат выражения имеет тип BOOLEAN.

Оператор конкатенации. Оператор конкатенации определен для операндов, имеющих перечислимый тип, и одномерных массивов, содержащих элементы перечислимого типа. Оба операнда должны быть одного типа. Результат выражения представляет собой одномерный массив, тип элементов которого равен типу операндов; размер массива равен сумме размеров операндов.

Другие операторы. К операндам перечисленных типов применим оператор указания типа. Данный оператор используется для уточнения типа объекта в случае, если одно и то же название элемента используется различными типами.

Тип CHARACTER

Перечислимый тип. Значением объекта данного типа может быть любой символ из набора ASCII (128 первых символов).

В языке VHDL также используются сложные типы переменных.

Из всей совокупности сложных типов, определенных в стандарте языка, для синтеза логических схем используются только массивы (тип ARRAY) и записи (тип RECORD). Однако тип RECORD поддерживается не всеми средствами синтеза и в данном пособии не рассматривается.

Следующие типы-массивы являются предопределенными:

- **BIT_VECTOR** – одномерный массив элементов типа BIT.
- **STD_LOGIC_VECTOR** – одномерный массив типа STD_LOGIC.
- **STD_ULONGIC_VECTOR** – одномерный массив типа STD_ULONGIC.
- **STRING** – одномерный массив элементов типа CHARACTER.

Направление и границы диапазона индексов не содержатся в определении указанных типов и должны быть указаны непосредственно при объявлении объектов данных типов.

Массивы

Массив (тип «массив») является сложным типом. Массив представляет собой упорядоченную структуру однотипных данных. Массив имеет диапазон индексов, который может быть возрастающим либо убывающим. На любой элемент массива можно сослаться, используя его индекс. Несмотря на то, что стандартом языка допускается использование массивов любой размерности, для синтеза ПЛИС используются только одномерные (поддерживаются всеми средствами синтеза) и двумерные (поддерживаются ограниченным числом средств синтеза) массивы.

Также можно сослаться на часть одномерного массива, используя вместо индекса диапазон индексов.

Существуют две разновидности типа массив: ограниченный (constrained) и неограниченный (unconstrained).

Объявление ограниченного типа определяет границы диапазона индексов (число элементов массива) в каждом измерении при определении типа.

Объявление неограниченного типа не определяет границы диапазона индексов. В этом случае границы диапазона устанавливаются при объявлении конкретного экземпляра объекта данного типа.

Объявление ограниченного типа массив имеет вид:

```
TYPE имя_типа IS
  ARRAY (диапазон_индексов [ , диапазон_индексов ] )
  OF тип_элемента ;
```

Диапазон индексов может определяться двумя способами:

1. Явным заданием границ диапазона

m TO n или **n DOWNTO m**,

где *m*, *n* – целочисленные константы, причем $m \leq n$.

2. С использованием идентификатора ограниченного подтипа. В этом случае значения границ подтипа являются значениями границ индекса массива. Описание подтипов дано ниже.

Объявление неограниченного типа массив имеет вид:

`TYPE имя_типа IS ARRAY (тип_индекса [,тип_индекса]) OF тип_элемента;`

Тип индекса определяется следующим образом:

Подтип `RANGE <>`,

где подтип может быть:

- `INTEGER` – индекс находится в диапазоне $-(2^{31}-1):(2^{31}-1)$;
- `NATURAL` – индекс находится в диапазоне $0:2^{31}-1$;
- `POSITIVE` – индекс находится в диапазоне $1:2^{31}-1$;

Строки

Строки, битовые строки, агрегаты (`strings`, `bit strings`, `aggregates`) используются для конструирования значений объектов массивных типов. Они могут использоваться в любом месте, где допускается значение типа массив, например как начальное значение константы или операнд в выражении.

Строковая запись может быть использована для представления значений как объектов некоторых predefined типов (`string`, `bit_vector`, `std_logic_vector`), так и для любого одномерного массива, элементы которого имеют тип `character`, например:

```
TYPE bit6 IS ('U', '0', '1', 'F', 'R', 'X');...TYPE bit6_data
IS ARRAY (POSITIVE RANGE < >) of bit6;...SIGNAL data_bus :
bit6_data (15 DOWNT0 0);...data_bus <= "UUUUUUUUFFFFFFFF";
```

VHDL позволяет компактно описывать битовые строки (значения типа `bit_vector` или `std_logic_vector`) в базе 2, 8 и 16, например:

```
CONSTANT clear: bit_vector:= B"00_101_010"; CONSTANT
empty: bit_vector := O"052"; CONSTANT null: bit_vector:= X"2A";
```

Все три константы имеют одно и то же значение. Отметим, что символы подчеркивания могут использоваться в любом месте битовой строки для облегчения чтения. Расширенными цифрами (extended digits) для шестнадцатеричного представления являются буквы от А до F, причем как прописные, так и строчные.

Массивные агрегаты используются для присваивания объектам типа массив значений.

Агрегаты

Массивные агрегаты используются для присваивания объектам типа массив значений. Массивные агрегаты формируются при помощи позиционной (positional) записи, поименованной (named) записи или комбинации этих двух форм. Рассмотрим пример.

Предположим, что имеются описания

```
TYPE ArrayType IS ARRAY (1 TO 4) OF CHARACTER;
.....
VARIABLE Test: ArrayType;
```

и требуется, чтобы переменная Test содержала элементы «f», «o», «o», «d» в указанном порядке.

Позиционная запись имеет вид:

```
Test := ('f', 'o', 'o', 'd');
```

Агрегат в данном случае записывается как список значений элементов, разделенных запятыми. Первое значение назначается элементу с наименьшим значением индекса (крайнему левому).

Поименованная запись имеет вид:

```
Test := (1 =>'f ', 3 =>'o', 4 =>'d', 2 =>'o');
```

В этом случае агрегат также является списком, элементы которого разделены запятыми, однако элементы списка имеют формат:

позиция => значение

Порядок перечисления элементов при поименованной записи не имеет значения.

Комбинированная запись имеет вид:

```
Test := ('f', '0', 4 =>'d', 3 =>'o');
```

В этом случае сначала записываются элементы, присваиваемые с использованием позиционной записи, а оставшиеся элементы присваиваются с использованием поименованной записи.

При формировании агрегата с использованием поименованной (или комбинированной) записи вместо номера позиции можно указывать ключевое слово OTHERS, определяющее значение для всех элементов, которые еще не были описаны в агрегате. Например:

```
Test := ('f', 4 =>'d', OTHERS=>'o');
```

Подтипы

Использование подтипов позволяет объявлять объекты, принимающие ограниченный набор значений из диапазона, допустимого для базового типа.

Подтипы применяются в двух случаях:

1. Подтип может **ограничить диапазон значений** базового скалярного типа (ограничение по диапазону). В этом случае объявление подтипа выглядит следующим образом:

```
SUBTYPE имя_подтипа IS имя_базового_типа RANGE диапа-  
зон_индексов;
```

Диапазон индексов определяется следующим образом:

```
m TO n или n DOWNTO m,
```

где m, n – целочисленные константы, $m \leq n$.

Пример

Предположим, что разработчик желает создать сигнал А типа severity, и что А может принимать значения только OKAY, NOTE и WARNING.

```
TYPE severity IS (OKAY, NOTE, WARNING, FAILURE);  
SUBTYPE go_status IS severity RANGE OKAY TO WARNING;  
SIGNAL : go_status;
```

Базовый тип и ограничение диапазона могут быть включены непосредственно в объявление объекта. Объявление сигнала A, эквивалентное приведенному выше, будет выглядеть так:

SIGNAL : A severity RANGE OKAY TO WARNING;

2. Подтип может определять границы диапазона индексов для неограниченного (unconstrained) массивного типа. В этом случае объявление подтипа выглядит следующим образом:

SUBTYPE имя_подтипа IS имя_базового_типа (диапазон_индексов [, диапазон индексов]);

Диапазон индексов определяется следующим образом:

m TO n или **n DOWNTO m**,

где m, n – целочисленные константы, $m \leq n$.

Такое использование подтипа может быть удобно при наличии большого числа объектов некоторого типа с одинаковыми ограничениями на индексы.

11.1.4. Атрибуты. Компоненты. Выражения

Атрибуты (или иначе свойства) определяют характеристики объектов, к которым они относятся. Стандарт VHDL предусматривает как предопределенные, так и определяемые пользователем атрибуты, однако современные инструментальные средства в большинстве своем поддерживают только предопределенные атрибуты. Для обращения к атрибутам объекта используется символ апострофа «'» (например A1'left).

В VHDL определены следующие атрибуты:

- 'left – левая граница диапазона индексов массива;
- 'right – правая граница диапазона индексов массива;
- 'low – нижняя граница диапазона индексов массива;
- 'high – верхняя граница диапазона индексов массива;
- 'range – диапазон индексов массива;
- 'reverse_range – обращенный диапазон индексов массива;

- 'length – ширина диапазона индексов массива.

Объявление компонента определяет интерфейс к модели на VHDL (entity и architecture), описанной в другом файле. Обычно объявление компонента совпадает с соответствующим объявлением entity. Они могут различаться только значениями по умолчанию. Эти значения используются, когда какой-либо из выводов компонента остается не присоединенным (ключевое слово open) при установке компонента в схему.

Оператор объявления компонента может находиться внутри объявления architecture или в заголовке пакета (package). Соответствующие компоненту объявления entity и architecture не обязательно должны существовать в момент анализа схемы. В момент моделирования или синтеза должны существовать объявления entity и architecture для компонентов, которые не только объявлены, но и установлены в схему. Это позволяет, например, конструктору задать объявления библиотечных элементов, а реальное их описание (объявления entity и architecture) задавать по мере использования этих элементов в конструкции.

Объявление компонента записывается следующим образом:

```
Component name  

[port (port_list) ;]  

end component ;
```

Выражения могут содержать следующие операторы: преобразования типа, and, or, nand, nor, xor, =, /=, <, <=, >, >=, 1, 2, &, *, /, mod, rem, abs, not.

В зависимости от выбранной САПР при синтезе может поддерживаться подмножество приведенных выше операторов. Порядок вычисления выражений определяется приоритетом операторов:

- and, or, nand, nor, xor – самый низкий приоритет;
- =, /=, <, <=, >, >= ;
- 1, 2, & (бинарные);

- 1, 2, (унарные);
- *, /, mod, rem;
- abs, not – высший приоритет.

Операторы с более высоким приоритетом выполняются раньше. Чтобы изменить такой порядок, используются скобки.

При моделировании (но не при синтезе) схемы возможно также описание формы сигнала в виде выражения. Записывается оно так:

```
Value_expression [after time_expression] { ,value_expression
[after_expression] }
```

11.1.5. Структура программы на языке VHDL

Типовая структура программы на языке VHDL выглядит следующим образом.

```
LIBRARY ieee; – описание используемых модулей
USE ieee.std_logic_1164.all;
```

.....

```
ENTITY program IS – назначение выводов
```

```
  Port (
    a : IN STD_LOGIC;
    b : OUT STD_LOGIC;
    X, Y : IN STD_LOGIC_VECTOR(10 DOWNT0 0));
```

.....

```
END program;
```

```
ARCHITECTURE Behavior OF program IS
```

```
  SIGNAL Sum : STD_LOGIC_VECTOR(10 DOWNT0 0); – опи-
сание глобальных переменных (сигналов)
```

.....

```
BEGIN
```

.....

```
  Общий текст программы
```

.....

```

Process (a, X, Y) – отдельный процесс в программе
Variable i : natural; – описание локальных переменных
процесса
.....
    Begin
.....
        Текст программы процесса
.....
    End process;
END Behavior;
    
```

11.2. Проектирование цифровых устройств на основе ПЛИС фирмы Altera в среде разработки Quartus II

С учетом особенностей языка в данном разделе описывается методика проектирования цифровых устройств на основе ПЛИС типа Cyclone II корпорации Altera [30]. Описывается работа с демонстрационной платой и средствами, входящими в состав набора «Altera DE2», включающего в себя демонстрационную плату Altera DE2 с ПЛИС Cyclone II 2C35 и среду разработки **Quartus II Web Edition** [14]. Данный набор позволяет не только освоить методику проектирования цифровых устройств фирмы Altera, но и выполнить достаточно сложные проекты устройств. Язык VHDL является средством ввода проекта.

11.2.1. Набор Altera DE2

В состав набора Altera DE2 входят плата DE2, устройство программирования – bytebluster, адаптер питания и CD-диск со средой проектирования Quartus II.

Фотография платы DE2 показана на рис. 11.1, где видно размещение электрических разъемов и ключевых компонентов платы.

Плата DE2 имеет много возможностей, которые позволяют пользователям выполнять широкий диапазон задач – от создания простых схем до различных мультимедийных проектов. Плата DE2 снабжена следующими техническими средствами:

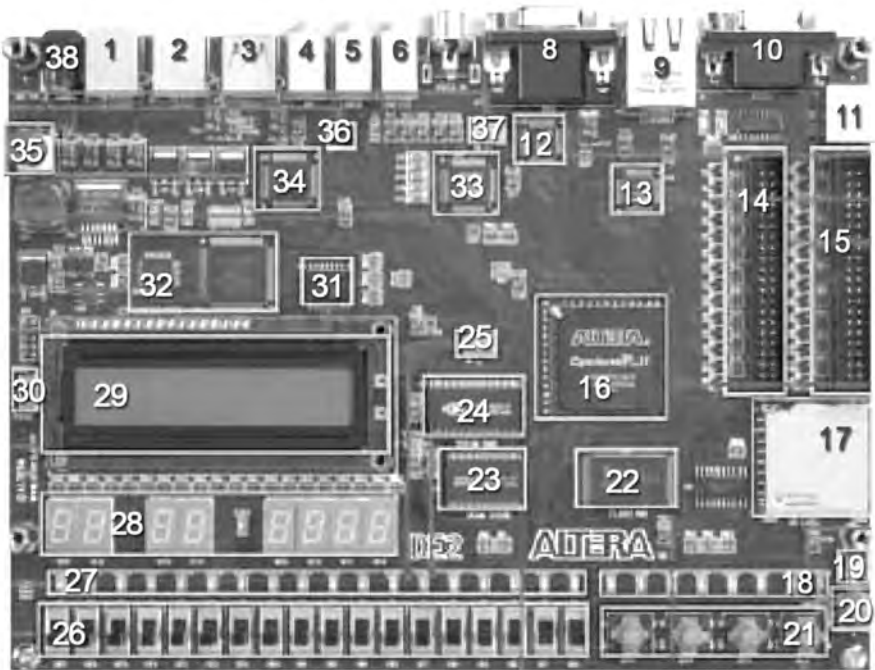


Рис. 11.1. Внешний вид платы DE2

1. USB Blaster Port (USB-бластер для программирования поддерживает два типа программирования – JTAG и Active Serial).
2. USB Device Port.
3. USB Host Port.
4. Mic In.
5. Line In. | 24-bit аудио карта с line-in, line-out и microphone-in.
6. Line Out.
7. Video In.
8. VGA Video Port.
9. Ethernet 10/100M Port.
10. RS-232 Port (9-pin параллельный порт).
11. PS/2 Keyboard/Mouse Port.
12. VGA 10-bit DAC (VGA DAC контроллер).
13. Ethernet 10/100M Controller.

14. Expansion Header 2 (JP2). | 40-pin расширители с диодной
15. Expansion Header 1 (JP1). | защитой (GPIO).
16. Altera Cyclone II FPGA (ПЛИС фирмы Altera Cyclone II 2C35).
17. SD Card Slot (вход для SD-карты).
18. 8 Green LEDs (8 зеленых световых индикаторов).
19. IrDa Transceiver (IrDA инфракрасный порт).
20. SMA External Clock.
21. 4 Debounced Pushbutton Switches (4 кнопочных переключателя).
22. 4-Mbyte Flash Memory (флеш-память объемом 4 Мбайта).
23. 512-Kbyte SRAM (статическое ОЗУ объемом 512 Кбайт).
24. 8-Mbyte SDRAM.
25. 50-MHz Oscillator (внешний генератор с частотой 50 МГц).
26. 18 Toggle Switches (18 триггерных переключателей).
27. 18 Red LEDs (18 красных световых индикаторов).
28. 7-Segment Displays.
29. 16x2 LCD Module.
30. RUN/PROG Switch for JTAG/AS Modes.
31. Altera EPCS16 Configuration Device.
32. Altera USB Blaster Controller Chipset.
33. TV Decoder (NTSC/PAL).
34. USB Host/Slave Controller with USB type A and type B connectors.
35. Power ON/OFF Switch.
36. 24-bit Audio Codec.
37. 27-MHz Oscillator (внешний генератор с частотой 27 МГц);
38. 9V DC Power Supply Connector.

В дополнение к этим техническим средствам плата DE2 поддерживает программное обеспечение для стандартных I/O-интерфейсов и удобную панель управления для доступа к различным компонентам. Также программным обеспечением предусмотрено большое количество наглядных примеров, которые иллюстрируют возможности платы DE2.

Для того чтобы использовать плату DE2, необходимо ознакомиться с маршрутом проектирования и программным обеспечением Quartus II.

11.2.2. Маршрут проектирования ПЛИС

Маршрутная технология является строго последовательным процессом в том смысле, что каждый следующий этап начинается только после успешного завершения предыдущего (при неудаче какого-либо этапа можно «откатиться» на один или несколько шагов назад). Как правило, каждый этап выполняется специализированным программным обеспечением. Поэтому основной упор при проектировании делается на этапы верификации.

При разработке проекта на ПЛИС [14] маршрут проектирования выглядит следующим образом:

1. Разработка устройства.
2. Разработка набора тестов.
3. Функциональная верификация (моделирование) проекта (моделирование до этапа синтеза).
4. Синтез.
5. Пост-синтез верификация (моделирование).
6. Трассировка.
7. Верификация (моделирование) после трассировки.
8. Изготовление файла прошивки.
9. Загрузка прошивки в ПЛИС.
10. Верификация устройства.

При использовании ПЛИС весь процесс разработки происходит в одном месте и каждая итерация при отладке занимает немного времени (минуты или часы по сравнению с месяцами при разработке специализированных заказных БИС). При работе, как правило, используются интегрированные средства и библиотеки от производителя ПЛИС. Цена ошибки невелика – новую версию проекта в процессе отладки всегда можно перезагрузить.

Значения этапов верификации в процессе проектирования трудно переоценить. Пропуск какого-либо из этапов верификации не упрощает процесс разработки, а оборачивается понижением надежности и увеличением времени на модификацию проекта.

11.2.3. Среда проектирования Quartus II

Среда проектирования Quartus II представляет собой оболочку, обеспечивающую сквозной маршрут проектирования для всех типов ПЛИС Altera. Оболочка организует совместную работу программных средств, разработанных как самой корпорацией, так и ведущими производителями средств САПР для проектирования интегральных схем.

В состав Quartus II v 6.0 Web Edition входят:

- **Hierarchy Display** (структура проекта).
- **Graphic Editor** (графический редактор) – позволяет выполнять схемный ввод проекта. Наряду с предоставляемыми фирмой Altera базовыми элементами (primitives), мегафункциями и макрофункциями, используемыми для построения стандартных блоков, можно использовать собственные созданные символы функциональных узлов.
- **Symbol Editor** (редактор символов) – позволяет редактировать существующие и создавать новые символы.
- **Text Editor** (текстовый редактор) – позволяет создавать, редактировать текстовые файлы проекта на уровне функционально-логического описания на языках AHDL, VHDL и Verilog HDL
- **Waveform Editor** (редактор временных диаграмм) – выступает в двух ролях: как инструмент ввода проекта и как инструмент для введения тестовых векторов и просмотра результатов моделирования.
- **Assignment Editor** (редактор физического размещения) – позволяет назначить размещение физических контактов микросхем и ресурсов логических ячеек, используя графическую среду.
- **Compiler** (компилятор) – производит логическую обработку проектов и размещение их на микросхемах семейств Altera.
- **Simulator** (симулятор) – позволяет тестировать логику работы и временные характеристики вашего цифрового устройства. Возможно функциональное моделирование, моделирование с учетом временных соотношений и моделирование проекта, выполненного на нескольких микросхемах.

- **Timing Analyzer** (временной анализатор) – анализирует временные характеристики цифрового устройства после компиляции.
- **Programmer** (программатор) – позволяет программировать микросхемы Altera и тестировать созданные устройства.
- **Message Processor** (процессор сообщений) – выводит на экран сообщения об ошибках, предупреждающие и информирующие сообщения о состоянии проекта и позволяет автоматически определить местоположение источника сообщения в исходных файлах проекта, во вспомогательных файлах и в назначениях физического уровня размещения.

11.2.4. Маршрут проектирования Quartus II Web Edition

Маршруты проектирования, реализуемые в Quartus, изображены на рис. 11.2.

Процесс проектирования начинается с создания исходных файлов. Эти файлы можно создать с помощью схемного редактора **Graphic editor**, текстового редактора **Text editor**, а также с помощью редактора временных диаграмм **Waveform editor**.

Затем приступают к этапу анализа и синтеза с помощью модуля **Analysis & Synthesis** компилятора (compiler). На выходе получается база данных проекта.

Далее следует проверить разработанное устройство с помощью симулятора. Для этого нужна специальная программа (тестбенч), которая может быть сгенерирована с помощью программы **Waveform Editor** или же написана вручную самим разработчиком.

Затем разработчику требуется задать все используемые выводы вручную, используя **Assignment editor** для успешного выполнения трассировки.

После этого производится компиляция проекта, включающая в себя этап анализа текста программы и синтез (**Analysis & Synthesis**), этап трассировки (**Fitter**), этап ассемблирования текста программы (**Assembler**) и этап анализа временных задержек.

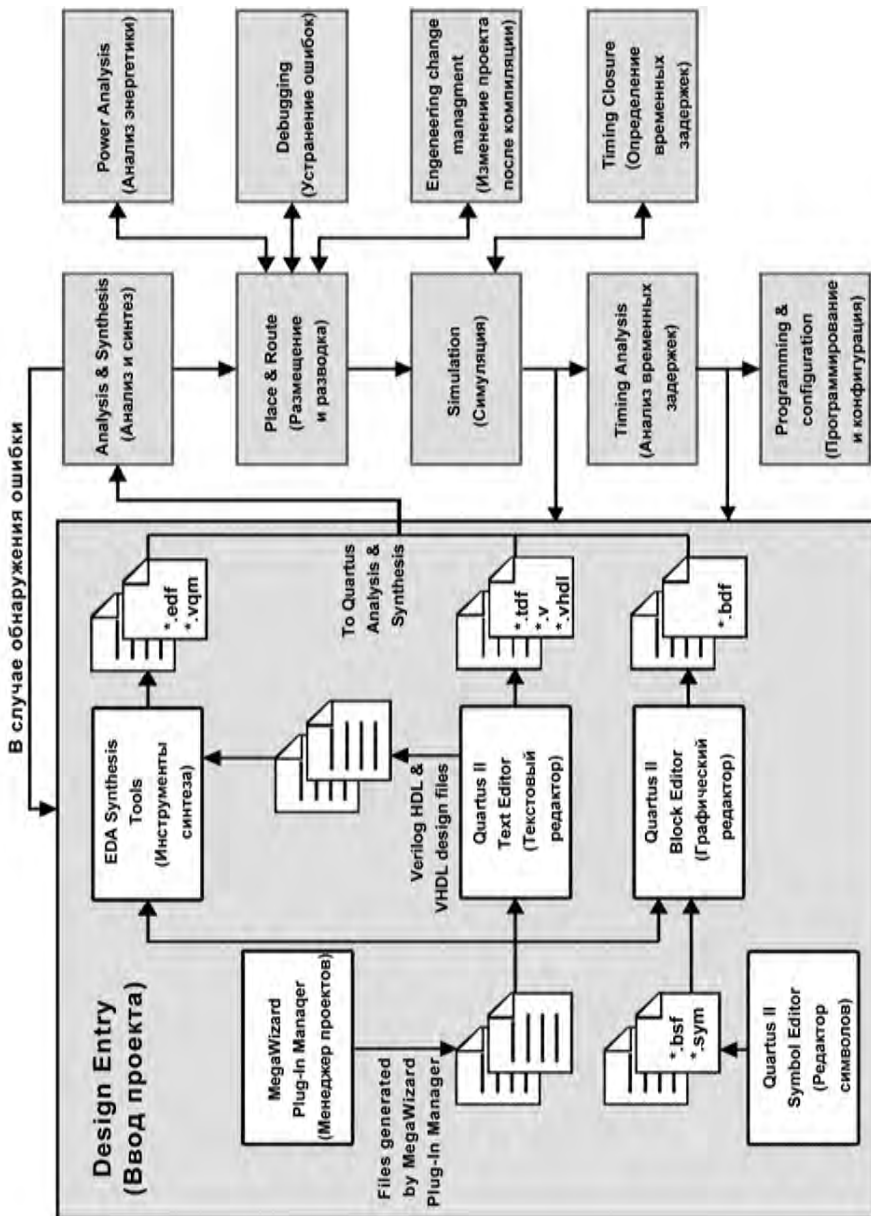


Рис. 11.2. Маршруты проектирования в Quartus

Рассмотрим маршрут проектирования более подробно на примере небольшого учебного проекта, реализующего 4-разрядный счетчик Грея.

Ввод проекта

После запуска Quartus II Web Edition выбираем **New Project Wizard** в меню **File**. Откроется окно **New Project**. При первом запуске окна отобразится окно заставки, где нужно нажать кнопку **Next** для перехода к окну первого этапа. В окне первого этапа создания проекта (**page 1 of 5**) указывается имя рабочего каталога проекта, текущее имя проекта и имя файла верхнего уровня иерархии (рис. 11.3). В строке ввода имени каталога необходимо указать каталог, содержащий файлы проекта. Если ввести имя несуществующего каталога, Quartus создаст его автоматически. Quartus также автоматически создает установки компиляции и моделирования для блока указанного в строке ввода имени файла верхнего уровня иерархии. После создания проекта

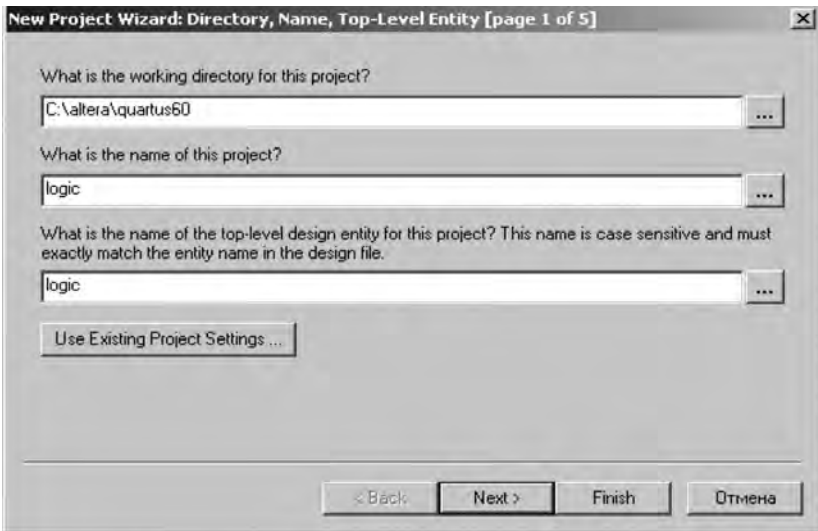


Рис. 11.3. Окно задания имени рабочего каталога проекта, текущего имени проекта и имени файла верхнего уровня иерархии

можно добавить другие объекты верхних уровней иерархии и создать для них установки компиляции и моделирования при помощи меню **Processing**.

После ввода всех необходимых данных нажимаем кнопку **Next**. Появится окно второго этапа создания проекта (**page 2 of 5**). Здесь необходимо выбрать все файлы, которые нужно включить в проект (рис. 11.4). При нажатии кнопки **Add All** в рабочий каталог добавляются все файлы. Если не имеется файлов проектов других каталогов или файлов, имя которых отлично от имени проекта, то добавлять файлы в этом окне не обязательно. Если ваш проект включает библиотеки специализированных функций, необходимо указать пути к ним.

Нажимаем кнопку **Next** для перехода к окну выбора модели ПЛИС (**page 3 of 5**). В данном примере в ниспадающем меню **Family** выбираем **Cyclone II**, а в списке **Available devices** – **EP2C35F672C6** и нажимаем кнопку **Next** (рис. 11.5).

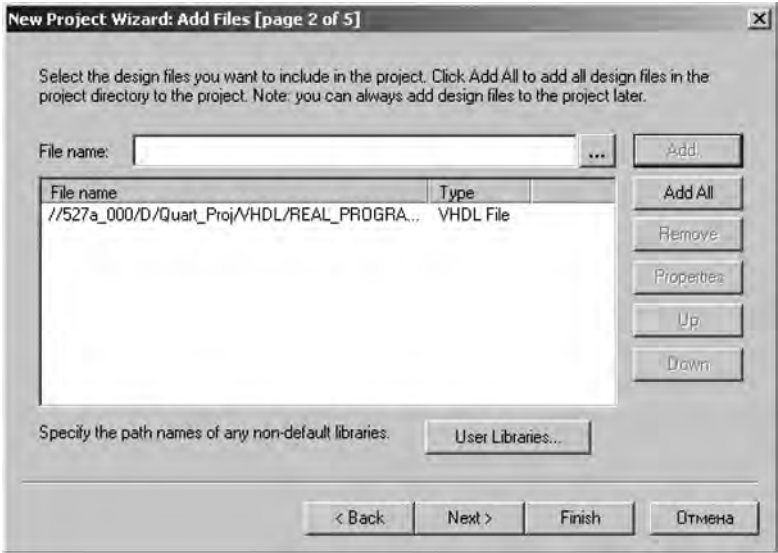


Рис. 11.4. Окно выбора файлов для включения в проект

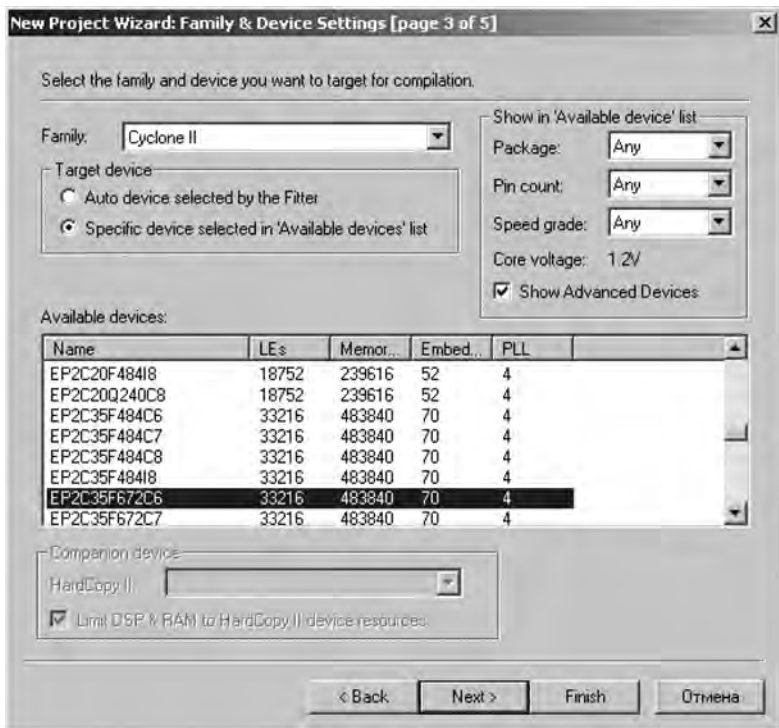


Рис. 11.5. Окно выбора модели ПЛИС

Следующее окно (page 4 of 5) при первом знакомстве с программой целесообразнее пропустить.

Нажимаем кнопку **Next** для перехода к окну сводных параметров проекта (**page 5 of 5**). Необходимо убедиться, что все установки верны, и нажать кнопку **Finish** для завершения создания проекта.

Разработка устройства

Для создания основного файла проекта можно использовать графический редактор, текстовый редактор или менеджер проектов. Можно создать файлы на языках AHDL, VHDL, Verilog HDL в текстовом редакторе или задать проект графически. Менеджер проектов помогает создавать файлы для специфических блоков высшего уровня.

Далее рассмотрено использование текстового редактора. Проект будет создан на языке VHDL.

В меню **File** нажимаем **New...** Появится окно **New**. Из приведенного списка выбираем **VHDL File** и нажимаем **OK**. Откроется поле текстового редактора, в который необходимо ввести текст вашей программы. Текст вводимой программы (4-разрядный счетчик Грея) приведен на рис. 11.6.

```

1  library IEEE;
2  use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3  use IEEE.STD_LOGIC_UNSIGNED.ALL;
4
5  entity grey_counter is
6  Port (
7  --inputs
8  clk      : in std_logic;  --clock
9  rst      : in std_logic;  --reset
10 --outputs
11 GREYOUT : out std_logic_vector(3 downto 0) --grey output
12 );
13 end grey_counter;
14
15 architecture Behavioral of grey_counter is
16     signal i : std_logic_vector(3 downto 0) := "0000"; --internal dec cnt
17     signal reset : std_logic := '0'; --reset flag
18 begin
19     -----MAIN COUNTER-----
20     cnt: process (clk, reset)
21     begin
22         if reset='1' then
23             i<="0000";
24             GREYOUT<="0000";
25         elsif rising_edge (clk) then
26             i<=i+1;
27             -----GREY CONVERTER-----
28             GREYOUT(0)<=i(1) XOR i(0);
29             GREYOUT(1)<=i(2) XOR i(1);
30             GREYOUT(2)<=i(3) XOR i(2);
31             GREYOUT(3)<=i(3);
32         end if;
33     end process;
34
35     -----RESET BLOCK-----
36     cntreset: process (clk, rst, i)
37     begin
38         if i="0000" then reset<='0';
39         elsif rising_edge (rst) then
40             reset<='1';
41         end if;
42     end process;
43
44 end Behavioral;
```

Рис. 11.6. Текст вводимой программы для 4-разрядного счетчика Грея

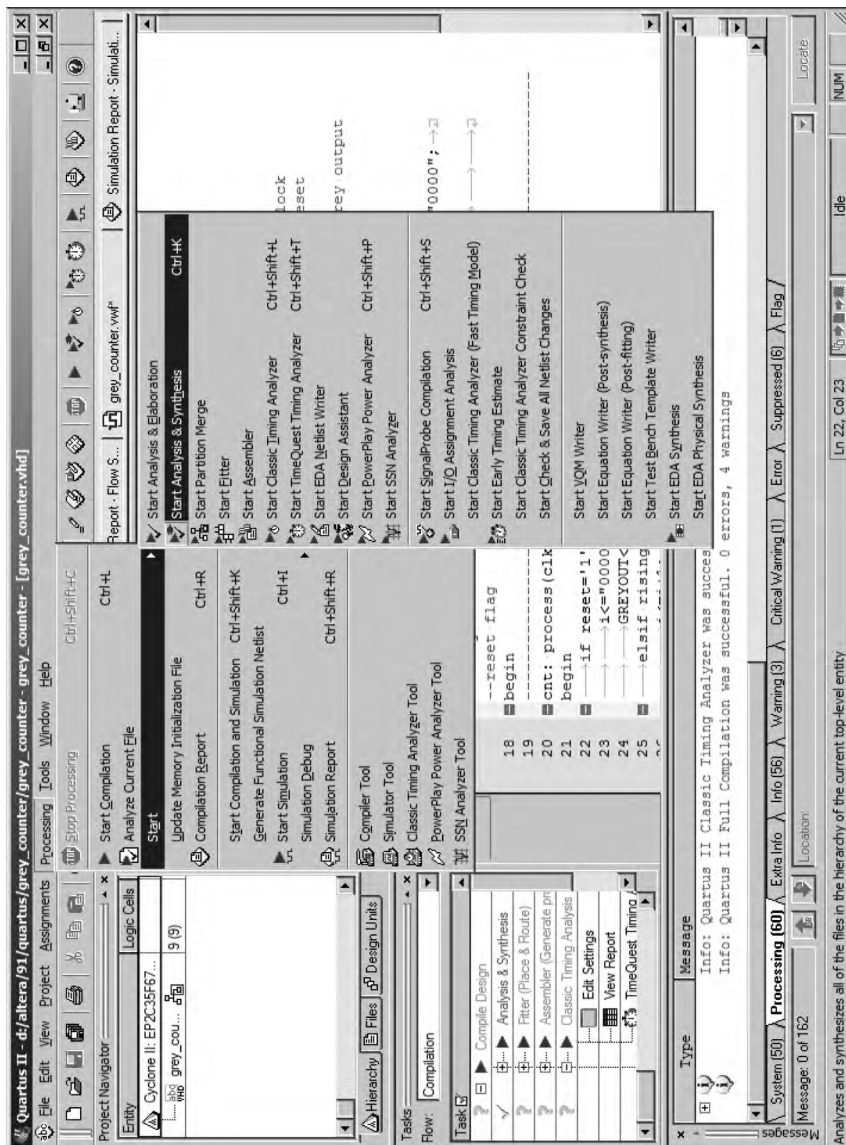


Рис. 11.7. Окно подготовки к анализу введенной программы

Следующий этап проектирования – анализ введенной программы. Для выполнения этого этапа в меню **Processing** перейдем на вкладку **Start** и выберем **Start Analysis & Synthesis** (рис. 11.7). В случае обнаружения ошибки в тексте **Message Processor** выдаст предупреждение об ошибке, и процесс анализа будет прерван.

После успешного завершения процесса анализа следует приступить к заданию выводов. Задание выводов осуществляется с помощью модуля **Assignment Editor**.

Откроем **Assignment Editor** в меню **Assignments** → **Pins**. В колонке **Location** выберем соответствующий вывод на ПЛИС (таблица выводов для ПЛИС Cyclone II 2C35 набора Altera DE2 дана в описании платы).

Далее производится моделирование. В меню **File** нажимаем **New...** и на вкладке **Verification/Debugging Files** выберем **Vector Waveform File**. Сохраним файл под названием текущего проекта. В открывшемся файле в левой колонке откроем контекстное меню и выберем **Insert Node or Bus**. В открывшемся окне нажимаем кнопку

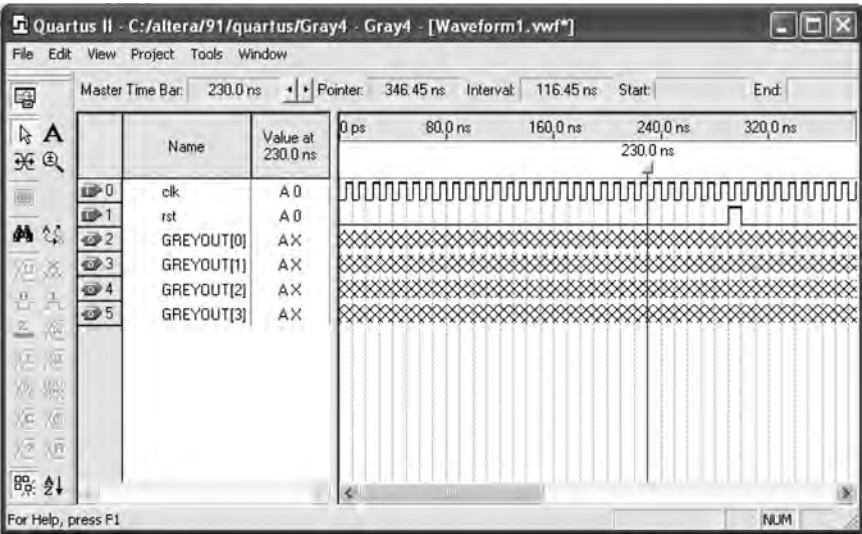


Рис. 11.8. Задание вектора входных воздействий

Node Finder. Нажимаем **List** и с помощью кнопок «>», «>>», «<<», «<<<» переносим из левого поля в правое необходимые имена выводов. На обоих окнах нажимаем **ОК**. Появляется окно временных диаграмм со списком входных и выходных сигналов. В данном случае это clk, rst, GREYOUT [3], GREYOUT [2], GREYOUT [1], GREYOUT [0], из которых первые два являются входными сигналами, а остальные четыре – выходными. Для задания входных сигналов необходимо последовательно каждый выделить цветом и, используя кнопки задания (левое поле), присвоить соответствующие значения. Выходные сигналы до моделирования находятся в неопределенном состоянии (рис. 11.8).

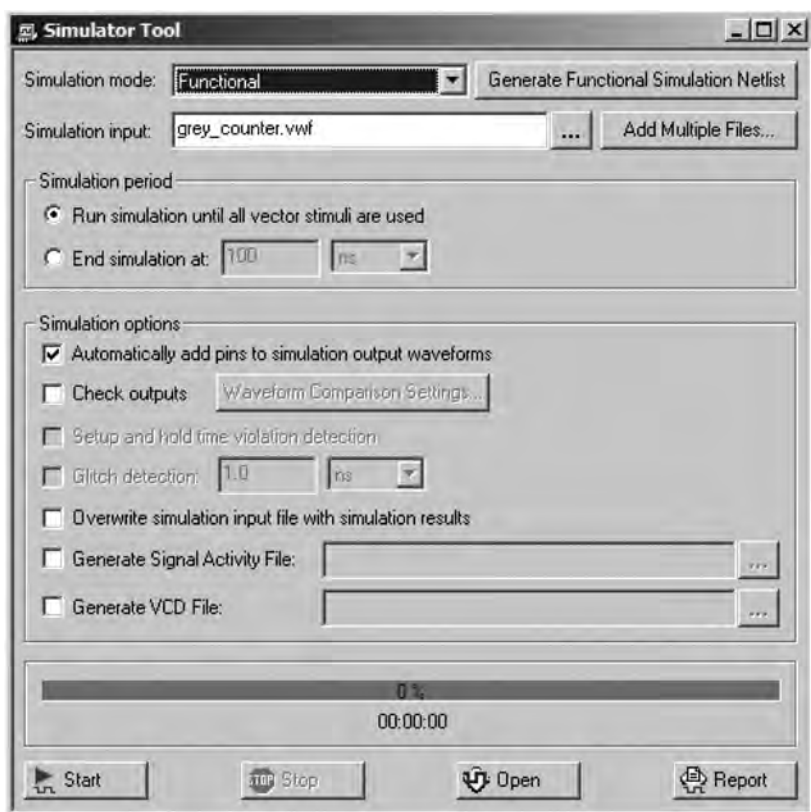


Рис. 11.9. Подготовка к моделированию

Заходим в меню **Processing** и выбираем **Simulator Tool**. В поле **Simulation Mode** выберем **Functional**. Нажимаем **Generate Functional Simulation Netlist**. Закрываем окно **Simulator Tool** и в окне **Simulation Waveforms** задаем значения входных выводов. Выбираем **Start Simulation** в меню **Processing** (рис. 11.9).

В результате моделирования появляется временная диаграмма для выбранных выше узлов (рис. 11.10). Если результаты моделирования устраивают, то можно перейти к следующему этапу – компиляции. Для этого выбираем **Start Compilation** в меню **Processing**. После компиляции выводится отчет. Если не возникло ошибок, можно приступить к программированию ПЛИС.

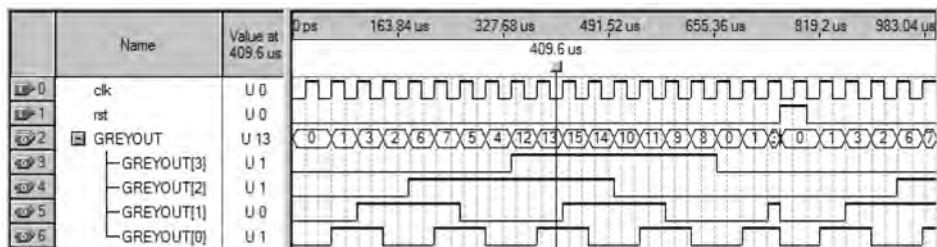


Рис. 11.10. Результат моделирования

Выбираем пункт **Programmer** в меню **Tools**. Подключаем плату Altera DE2 к питанию 9V и соединяем кабелем USB с компьютером. Включаем плату, нажав на кнопку ON/OFF. Открываем **Programmer** в меню **Tools** и в появившемся окне нажимаем кнопку **Hardware Setup** (рис. 11.11). В поле **Currently selected hardware** выбираем **USB-blaster** и нажимаем **Close** (рис. 11.12).

Устанавливаем переключатель **sw19** на плате в положение **Run** и используем режим программирования (Mode) JTAG для тестовой проверки проекта. Нажимаем кнопку **Add file...** и выбираем файл прошивки с расширением **#.sof**, если поле пустое. Ставим галочку в столбце **Program/Configure** и нажимаем кнопку **Start**.

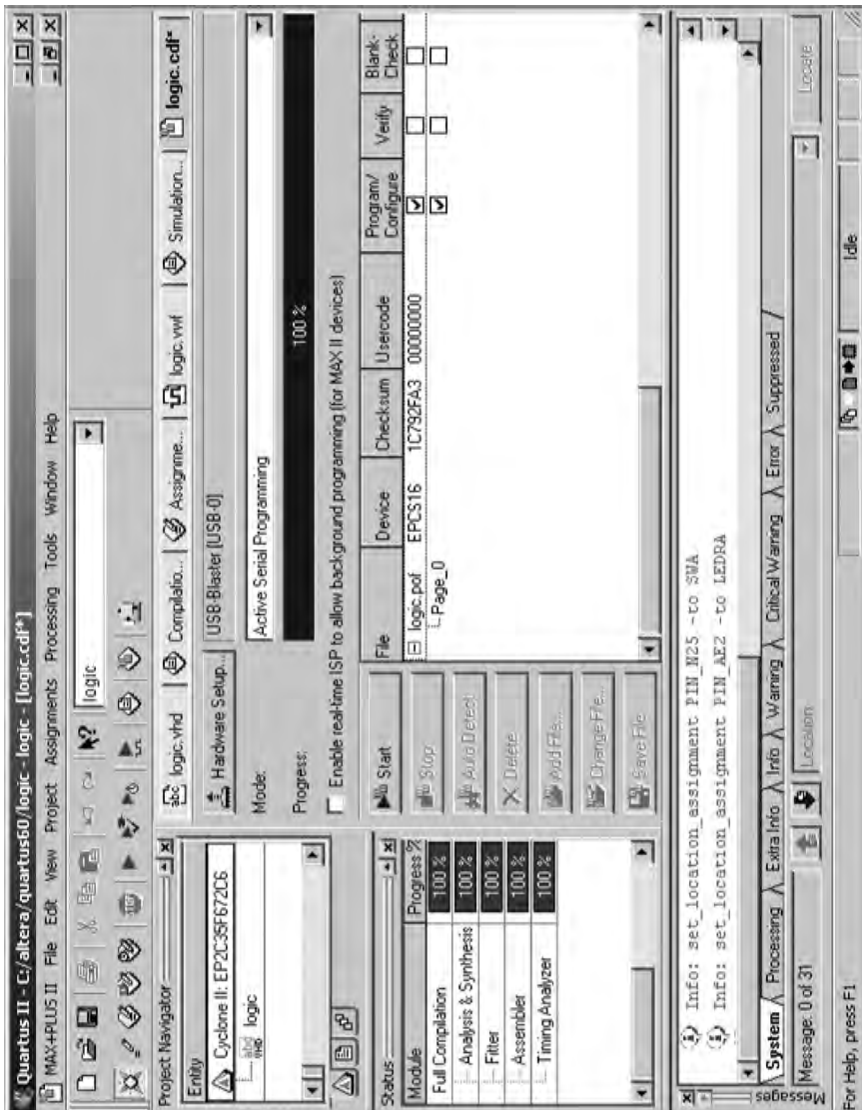


Рис. 11.11. Окно настройки программатора

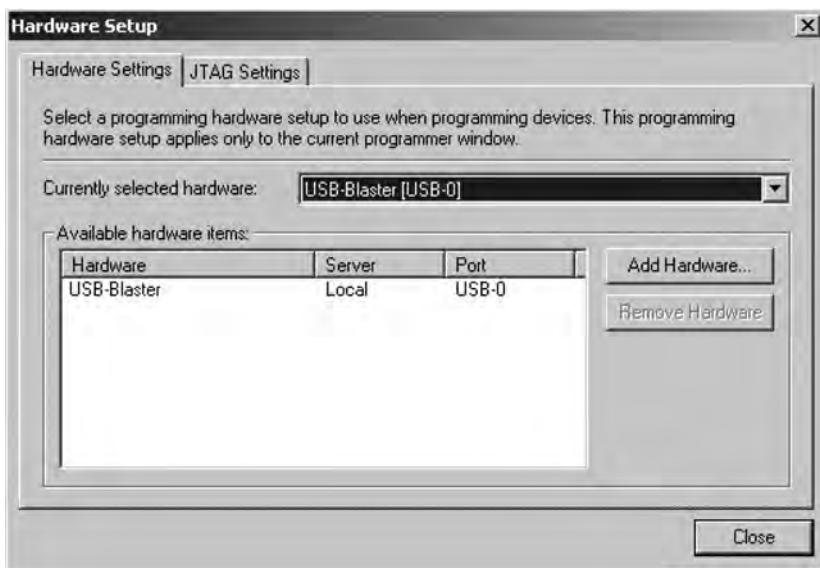


Рис. 11.12. Окно программирования

Устанавливаем переключатель **sw19** на плате в положение **Prog** и используем режим **Active Serial Programming** для прошивки проекта в ПЛИС. Нажимаем кнопку **Add file...** и выбираем файл прошивки с расширением **#.pof**. Ставим галочку в столбце **Program/Configure** и нажимаем кнопку **Start**.

При правильно выполненных действиях после этапа прошивки созданный проект будет функционировать на плате.

Таким образом, на примере 4-разрядного счетчика Грея рассмотрен маршрут проектирования цифрового устройства на основе ПЛИС в среде Quartus II.

ПРИЛОЖЕНИЕ**ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ****А**

- АД** **Астродатчик** – бортовой прибор, позволяющий определить ориентацию космического аппарата по астроориентире.
- АЛУ** **Арифметико-логическое устройство** – блок процессора, который под управлением устройства управления служит для выполнения арифметических и логических преобразований (начиная от элементарных) над данными, представляемыми в виде машинных слов.
- АПУ** **Аппаратура преобразования и управления.**
- АРМ** **Автоматизированное рабочее место.**
- АТМИ** **Аналоговая телеметрическая информация** – телеметрическая информация, получаемая с аналоговых и сигнальных датчиков и подвергаемая перед передачей на Землю аналого-цифровому преобразованию.
- АЦК** **Автоматизированный цифровой комплекс.**
- АЦП** **Аналого-цифровой преобразователь** – устройство, преобразующее входной аналоговый сигнал в дискретный код (цифровой сигнал).

Б

- БАКИС** **Бортовая аппаратура командно-измерительной системы** – аппаратура, которая обеспечивает управление космическим аппаратом, разовыми командами, программной и специальной информацией; принимает с космического аппарата телеметрическую информацию; измеряет текущие навигационные параметры движения космического аппарата; сверяет, корректирует и фазировает бортовую шкалу времени.

- БД** **База данных.**
- БИНС** **Бесплатформенная инерциальная навигационная система.**
- БИС** **Большая интегральная схема** – интегральная схема (см. ИС) с высокой степенью интеграции (число элементов в ней достигает 10000), используется в электронной аппаратуре как функционально законченный узел устройств вычислительной техники, автоматики, измерительной техники и др.
- БКС** **Бортовая кабельная сеть** – набор разъемов и кабелей, обеспечивающих соединение между собой блоков космического аппарата.
- БОС** **Бортовая операционная система** – комплекс программ, обеспечивающих выполнение вычислительных процессов в бортовой цифровой вычислительной системе, блоке управления и контроля, бортовой цифровой вычислительной машине.
- БПЛА** **Беспилотные летательные аппараты.**
- БРЭА** **Бортовая радиоэлектронная аппаратура** – основное радиооборудование на космической ракете может состоять из управляющего устройства, радиолокатора для самонаведения и других радиоустройств, предназначенных для приема команд с Земли и передачи на Землю данных бортовой аппаратуры. В управляющее устройство, являющееся «электронным мозгом» автоматической ракеты, поступает информация от различных приборов в виде электрических импульсов. После ее обработки из электронного устройства выходят управляющие сигналы также в виде электрических импульсов, электронное управляющее устройство содержит аппаратуру для запоминания данных, получаемых от различной научной

аппаратуры и телевизионных импульсов; все эти сигналы считываются и передаются на Землю в назначенное время.

- БСА** **Блоки силовой автоматики** – блоки преобразования маломощных информационных сигналов, формируемых бортовым цифровым вычислительным комплексом, в сигналы с уровнями, достаточными для управления смежными системами.
- БСУ** **Бортовая система управления** – программно-аппаратный комплекс управления космическим аппаратом.
- БУК** **Блок управления и контроля** – блок управления исполнительными устройствами через блоки-спутники.
- БЦВК** **Бортовой цифровой вычислительный комплекс** – комплекс, который получает информацию от датчиков и бортовых систем, обрабатывает ее в режиме реального времени между задачами и выдает управляющие сигналы на исполнительные органы и в бортовые системы.
- БЦВМ** **Бортовая цифровая вычислительная машина** – цифровые вычислительные средства в составе бортового оборудования самолетов и других подвижных средств. Появились на рубеже 60-х годов и за относительно короткий срок практически полностью заменили используемые ранее аналоговые вычислители, поскольку обеспечивали более высокую точность решения задач, характеризовались большей универсальностью применения и обладали широкими логическими возможностями.
- БЦВС** **Бортовая цифровая вычислительная система** – система, которая включает в себя бортовые цифровые вычислительные машины, работающие синхронно по одинаковым программам, фактически резервирующие друг друга и представляющие собой параллельные каналы.

В

- ВВФ** **Внешние воздействующие факторы** – явление, процесс или среда, внешние по отношению к изделию или его составным частям, которые вызывают или могут вызвать ограничение или потерю работоспособного состояния изделия в процессе эксплуатации.
- ВИП** **Вторичный источник питания** – устройство преобразования напряжения бортовой системы, необходимое для работы вычислительного комплекса.
- ВС** **Вычислительная система** – система по структуре подобна БЦВС, но имеет меньшие объемы памяти и некоторые отличия по интерфейсу.

Г

- ГИВУС** **Гироскопический измеритель вектора угловой скорости** – прибор, предназначенный для измерения приращений интегралов от проекции вектора угловой скорости космического аппарата на измерительные оси чувствительных элементов прибора за интервал времени между двумя последовательными опросами бортовой вычислительной системы.
- ГКЛ** **Галактические космические лучи** – космические лучи, состоящие из ядер различных химических элементов с кинетической энергией E более нескольких десятков МэВ/нуклон, а также электронов и позитронов с $E > 10$ МэВ. Эти частицы приходят в межпланетное пространство из межзвездной среды. Источником этих частиц являются сверхновые звезды нашей Галактики.
- ГПС** **Гибкие производственные системы.**
- ГСО** **Геостационарная орбита** – круговая орбита, расположенная в плоскости экватора Земли, находясь на которой,

космический аппарат обращается вокруг планеты с угловой скоростью, равной угловой скорости вращения Земли вокруг оси, и постоянно находится над одной и той же точкой на земной поверхности на высоте, приблизительно равной 35 786 км.

Д

ДЗЗ **Дистанционное зондирование Земли** – наблюдение поверхности Земли космическими средствами, оснащенными различными видами съемочной аппаратуры.

ДОЗУ **Оперативное запоминающее устройство памяти с двойным доступом.**

ДУ **Двигательная установка** – основной двигатель космического аппарата, отвечающий за изменение орбиты и ориентации космического аппарата.

И

ИИС **Информационно-измерительная система.** Измерительная система – совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, ЭВМ и других технических средств, размещенных в разных точках контролируемого пространства с целью измерений одной или нескольких физических величин, свойственных этому пространству. Измерительная система предназначена для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и/или использования в автоматических системах управления. В зависимости от назначения измерительные системы подразделяются на: измерительные информационные, измерительные контролируемые, измерительные управляющие и др.

- ИО** **1. Исполнительные органы.**
2. Информационное обеспечение.
- ИП** **Исполнительная плата** – устройство выдачи и приема сигналов и команд на датчики и исполнительные устройства смежных систем.
- ИПО** **Имитационное программное обеспечение.**
- ИС** **Интегральная схема** – электронная схема произвольной сложности, изготовленная на полупроводниковом кристалле (или пленке) и помещенная в неразборный корпус, или без такового, в случае вхождения в состав микросборки.

К

- КА** **Космический аппарат** – техническое устройство, используемое для выполнения различных задач в космическом пространстве, а также проведения исследовательских и иного рода работ.
- КБУК** **Контроллер БУК** – контроллер блока управления и контроля.
- КИС** **Контрольно-испытательная станция** – участок производства, предназначенный для проверки работоспособности и правильности функционального взаимодействия комплекса бортовых систем летательного аппарата с максимальным использованием методов математического и физического моделирования эксплуатационных условий.
- КМС** **Комплексный математический стенд.**
- КПИ** **Командно-программная информация** – закодированная последовательность воздействий на управление космическим аппаратом, осуществляемая с наземного комплекса управления.

КПУ **Коммутационно-преобразующее устройство** – один из блоков силовой автоматики, обеспечивающий управление исполнительными и смежными системами.

КС **1. Контрольная сумма** – некоторое значение, рассчитанное по набору данных путем применения определенного алгоритма и используемое для проверки целостности данных при их передаче или хранении. Также контрольные суммы могут использоваться для быстрого сравнения двух наборов данных на неэквивалентность: с большей вероятностью различные наборы данных будут иметь неравные контрольные суммы. С точки зрения математики контрольная сумма является хеш-функцией, используемой для вычисления контрольного кода – небольшого количества бит внутри большого блока данных, например сетевого пакета или блока компьютерного файла, применяемого для обнаружения ошибок при передаче или хранении информации. Значение контрольной суммы добавляется в конец блока данных непосредственно перед началом передачи или записи данных на какой-либо носитель информации. Впоследствии оно проверяется для подтверждения целостности данных.

2. Комплексный стенд – представляет собой «аппаратный» стенд с максимально возможным количеством блоков реальной аппаратуры (вычислители, блоки силовой автоматики, исполнительные платы, реальные приборы или имитаторы датчиков/исполнительных органов) со штатной кабельной сетью и штатным бортовым программным обеспечением. Также в состав стенда входит аппаратура и программное обеспечение наземной контрольно-проверочной аппаратуры, с помощью которой проводятся непосредственно испытания бортовой аппаратуры.

КСК **Контроллер системных каналов.**

- КТС** **Комплекс технических средств.**
- КШ** **Контроллер шины** – устройство интерфейса, управляющее обменом информацией в интерфейсе.
- КУДМ** **Комплекс управляющих двигателей-маховиков** – комплекс из трех, четырех или шести двигателей-маховиков и управляющего устройства.

Л

- ЛА** **Летательный аппарат.**
- ЛИ** **Летные испытания** – испытания летательного аппарата, проводящиеся в натуральных условиях (в полете) для оценки характеристик испытываемого летательного аппарата, сравнения полученных показателей с заданными (нормируемыми), выработки мероприятий по их улучшению при необходимости.
- ЛОИ** **Лабораторные отработочные испытания** – комплекс исследовательских испытаний, определяющих качество разработки составных частей средств вычислительной техники на стадии разработки рабочей документации и изготовления опытного образца.

М

- МДМ** **Модуляция/демодуляция.** *Модуляция* – изменение информативных параметров некоторых первичных физических процессов (сигналов), рассматриваемых как носители информации, в соответствии с передаваемой (включаемой в сигнал) информацией. *Демодуляция* – восстановление величин, вызвавших изменение параметров носителей при модуляции. Выполняется на принимающей стороне при известных условиях модуляции на передающей стороне.

- МКО** **Мультиплексный канал обмена** – магистральный последовательный интерфейс (мультиплексный канал передачи данных) согласно ГОСТ Р 52070-2003 (Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей. Общие требования) – совокупность технических средств и правил, обеспечивающих обмен информацией между абонентами интерфейса последовательным биполярным фазоманипулированным кодом по общей информационной магистрали.
- ММ** **Математическая модель.**
- МО** **Математическое обеспечение.**
- МОП** **МОП структура** – (*МОП – Металл – Оксид – Полупроводник*) наиболее широко используемый тип полевых транзисторов.
- МПО** **Межпроцессорный обмен** – обмен информацией между вычислительными машинами в многомашинном синхронном вычислительном комплексе.

Н

- НИП** **Наземный измерительный пункт** – наземная станция, принимающая по эфиру информацию, передаваемую бортовым измерительным комплексом.
- НКУ** **Наземный комплекс управления** – совокупность наземных радиотехнических и вычислительных средств с соответствующим методическим и математическим обеспечением, предназначенных для управления полетом космического аппарата и контроля работы его бортовых систем. НКУ функционирует в период орбитального полета КА от момента отделения его от ракеты-носителя до прекращения активного существования. Основные целевые задачи НКУ: поддержание орбитальной структуры

космической системы, управление и контроль выполнения динамических операций в космосе, управление функционированием бортовой аппаратуры КА, контроль и диагностика ее состояния, взаимодействие с комплексами.

НУИ **Начальная управляющая информация** – информация, заложенная в бортовую цифровую вычислительную машину в космическом аппарате и разгонном блоке и предназначенная для управления на начальном этапе полета.

О

ОЗУ **Оперативное запоминающее устройство** – память, часть системы памяти ЭВМ, в которую процессор может обратиться за одну операцию. Предназначено для временного хранения данных и команд, необходимых процессору для выполнения им операций.

ОС **1. Ответное слово** – ответные слова содержат поле адреса оконечного устройства (см. ОУ) и различные признаки.

2. Операционная система.

ОС РВ **Операционная система реального времени** – операционная система, в которой успешность работы любой программы зависит не только от ее логической правильности, но и от времени, за которое она получила этот результат. Если система не может удовлетворить временным ограничениям, должен быть зафиксирован сбой в ее работе.

ОУ **Оконечное устройство** – программно-аппаратное устройство, обеспечивающее первичную обработку сообщения или сигнала, преобразование сообщений из вида, в котором их предоставляет источник (речь, изображение и т.п.), в сигнал (на стороне источника, отправителя) и обратно (на стороне получателя).

П

- ПВВ** **Процессор ввода-вывода** – процессор, специализирующийся на автономной обработке данных, связанной с обменом данными между частями компьютера и с вводом и выводом данных.
- ПЗС** **Прибор с зарядовой связью** – общее обозначение класса полупроводниковых приборов, в которых применяется технология управляемого переноса заряда в объеме полупроводника.
- ПЗУ** **Постоянное запоминающее устройство** – энергонезависимая память, используемая для хранения массива неизменяемых данных.
- ПИ** **Предварительные испытания** – контрольные испытания опытных образцов и (или) опытных партий продукции с целью определения возможности их предъявления на приемочные испытания.
- ПЛИС** **Программируемая логическая интегральная схема** – полузаказная большая интегральная схема для реализации сложных функциональных блоков.
- ПО** **Программное обеспечение** – совокупность программ и данных, предназначенных для решения задач управления космическим объектом и хранящихся в репрограммируемом запоминающем устройстве (см. РПЗУ) бортовой машины.
- ПОИ** **Предварительная обработка информации.**
- ППЗУ** **Программируемое постоянное запоминающее устройство** – постоянное запоминающее устройство «однократного» программирования.
- ППП** **Пакет прикладных программ.**
- ПСИ** **Приемо-сдаточные испытания** – испытания, которые проводят для принятия решения о пригодности продук-

ции к поставке или ее использованию. Испытаниям подвергают каждую изготовленную единицу или выборку из партии. Испытания проводит служба технического контроля изготовителя. При наличии на предприятии государственной приемки приемо-сдаточные испытания проводят ее представители. При испытаниях контролируют значения основных параметров и работоспособность изделия. Контроль установленных в нормативно-технической документации показателей надежности изделий может осуществляться косвенными методами. Порядок испытаний установлен в государственном стандарте общих технических требований или технических условиях, а для продукции единичного производства – в техническом задании.

Р

- РАЛУ** **Регистровое арифметико-логическое устройство** (см. АЛУ).
- РБ** **Разгонный блок** – последняя ступень ракеты-носителя, предназначенная для перевода космического аппарата с опорной орбиты на целевую орбиту искусственного спутника Земли.
- РН** **Ракета-носитель** – аппарат, действующий по принципу реактивного движения и предназначенный для выведения полезной нагрузки в космическое пространство.
- РПЗ** **Радиационные пояса Земли** – внутренние области земной магнитосферы, в которых магнитное поле Земли удерживает заряженные частицы (протоны, электроны, альфа-частицы), обладающие кинетической энергией от десятков кэВ до сотен МэВ.
- РПЗУ** **Репрограммируемое запоминающее устройство** – постоянное запоминающее устройство, в котором информа-

ция может неоднократно изменяться с помощью специальных средств стирания и записи.

РТВК **Расширенный тест встроенного контроля** – самоконтроль бортового цифрового вычислительного комплекса (аппаратуры) на этапе эксплуатации, предназначенный для получения более полной информации о его состоянии.

С

САЗИ **Система активной защиты изделий.**

САПР **Система автоматического проектирования.**

САС **Срок активного существования** – непрерывный период времени, в течение которого космический аппарат должен полностью соответствовать характеристикам, указанным в контракте на космический аппарат. Данный период начинается с момента приема космического аппарата в эксплуатацию.

СБ **Солнечная батарея** – один из генераторов альтернативных видов энергии, превращающих солнечное электромагнитное излучение в электричество.

СВВ **Схемы ввода-вывода.**

СДП **Солнечный датчик положения** – датчик, который показывает положение Солнца относительно космического аппарата.

СИ **Система интернациональная** – международная система единиц, современный вариант метрической системы. Наиболее широко используемая система единиц в мире как в повседневной жизни, так и в науке и технике. Принята в качестве основной системы единиц большинством стран мира и почти всегда используется в области техники, даже в тех странах, в которых в повседневной жизни используются традиционные единицы.

- СКД** **Система контроля и диагностики** – программный комплекс контроля и коррекции системы управления космического аппарата.
- СКЛ** **Солнечные космические лучи** – потоки ускоренных заряженных частиц, эпизодически появляющиеся в межпланетном пространстве на фоне галактических космических лучей (см. ГКЛ) после некоторых солнечных вспышек.
- СЛ** **Системная логика** – набор микросхем, обеспечивающих подключение ЦПУ к ОЗУ и контроллерам периферийных устройств.
- СММ** **Стенд математического моделирования** – представляет собой комплекс программного обеспечения на обычном персональном компьютере. На этом стенде разработчики-алгоритмисты в замкнутом с помощью имитационного программного обеспечения контуре отработывают прототипы бортового программного обеспечения.
- СОИ** **Совместные отработочные испытания.**
- СОВП** **Система организации вычислительных процессов** – программный комплекс, обеспечивающий выполнение вычислительного процесса.
- СОТР** **Средства обеспечения теплового режима** – система, предназначенная для поддержания температур на всех элементах конструкции аппарата, приборах и агрегатах в допустимых диапазонах на всех этапах штатного функционирования.
- СП** **Стартовая позиция** (стартовая площадка) – участок космодрома с подъездными путями и инженерными коммуникациями, на котором размещают технологическое оборудование и сооружения с техническим оборудова-

нием стартового комплекса; включает одну пусковую установку.

- СПМ** **Соединитель пакетный магистральный** – устройство, предназначенное для стыковки функциональных плат внутри блоков системы управления между собой.
- СТИ** **Система телеметрических измерений** – программно-аппаратный комплекс сбора и выдачи в НКУ телеметрической информации.
- СУ** **Система управления** – совокупность устройств и программ, осуществляющих управление, и связей между ними.
- СУБД** **Система управления базой данных.**
- СЭС** **Система электроснабжения** – аппаратный комплекс системы электроснабжения космического аппарата.

Т

- ТВКЦ** **Тест встроенного контроля цикла.**
- ТДС** **Точный датчик Солнца** – бортовой прибор точной ориентации космического аппарата на Солнце.
- ТЗ** **Техническое задание** – исходный документ для проектирования космического аппарата, разгонного блока, содержащий технико-экономическое обоснование разработки, основные технические требования, предъявляемые к сооружению или изделию, или исходные данные для разработки; в техническом задании указываются назначение объекта, область его применения, стадии разработки конструкторской документации, ее состав, сроки исполнения и т.д., а также особые требования, обусловленные спецификой самого объекта либо условиями его эксплуатации.

- ТЗЧ** **Тяжелые заряженные частицы** – ядра атомов, частично или полностью лишенные электронов.
- ТКС** **Телекомандная система** – совокупность технических средств, обеспечивающих связь космического аппарата и наземного комплекса управления.
- ТМИ** **Телеметрическая информация** – информация, полученная при помощи телеметрии.
- ТО** **Техническое обеспечение.**
- ТП** **1. Техническая позиция** – комплекс сооружений с общетехническими и специальными технологическим оборудованием и подъездными путями, обеспечивающий прием, хранение и сборку ракеты-носителя (РН) и космических объектов (КО), их испытания, заправку и пристыковку КО к РН.
- 2. Технологический процесс.**
- ТТЗ** **Тактико-техническое задание** – исходный технический документ Заказчика на выполнение необходимого комплекса научно-исследовательских и экспериментальных работ в подтверждение выбранной концепции и облика нового (модернизированного) образца вооружений, военной и специальной техники и в обеспечение реализации его основных тактико-технических характеристик в установленные сроки.
- ТУ** **Технические условия** – документ, устанавливающий технические требования, которым должны удовлетворять конкретное изделие, материал, вещество и пр. или их группу. В них должны быть указаны процедуры, с помощью которых можно установить, соблюдены ли данные требования.

У

- УГР** **Узел гальванической развязки.**
- УКП** **Унифицированная космическая платформа** – унифицированная космическая платформа «Яхта» создается как базовая часть КА, обеспечивающая размещение целевой аппаратуры и условия ее функционирования на всех этапах эксплуатации КА. В основу платформы заложен комплекс бортового оборудования, который может быть адаптирован под решение различных целевых задач. В зависимости от функционального назначения КА, комплекс бортового оборудования УКП может иметь различную конфигурацию, предусмотренную построением платформы. Это позволяет в заданных границах изменять характеристики КА, определяющие схемы полета, орбиты функционирования, срок активного существования на орбите, управление движением при решении целевой задачи, а также размещение, энергоснабжение и схемы работы целевой аппаратуры. В состав УКП входят: интегрированная система управления, система электроснабжения, телекомандная система, двигательная установка, средства обеспечения тепловых режимов. Структура УКП предусматривает низкоорбитальную и высокоорбитальную модификации ее бортового оборудования. Для высоких орбит, включая ГСО, и длительных сроков функционирования УКП комплектуется оборудованием с повышенной радиационной стойкостью. Для низкоорбитальных космических аппаратов УКП оснащается бортовой аппаратурой спутниковых систем навигации GPS и ГЛОНАСС.
- УФЦ** **Устройство формирования цикла** – устройство, задающее циклический режим работы бортового цифрового вычислительного комплекса.

Ф

ФПО **Функциональное программное обеспечение** – часть программного обеспечения, реализующая алгоритмы выполнения функциональных задач.

ФППЗ **Фоточувствительный прибор с переносом заряда** – фотоэлектрические приемники света, способные преобразовывать принятую информацию в электрические заряды и обрабатывать ее в зависимости от области применения.

Ц

ЦА **Целевая аппаратура** – аппаратура космического аппарата, предназначенная для выполнения его целевых функций.

ЦАП **Цифроаналоговый преобразователь.**

ЦГ **Циклограмма** – цикловая диаграмма, графическое изображение циклического процесса. Циклограмма строится на основании опытных или расчетных данных и используется для определения или уточнения элементов цикла.

ЦП **Центральный процессор** – часть аппаратного обеспечения бортового компьютера, отвечающая за выполнение операций, заданных программами.

ЦПУ **Центральное процессорное устройство** – см. центральный процессор.

ЦТМИ **Цифровая телеметрическая информация** – телеметрическая информация, полученная цифровым методом.

Ш

ШИМ **Широтно-импульсно модулированный сигнал** – сигнал, у которого изменяются длительности импульсов

импульсного переносчика, при этом виде модуляции ширина импульса пропорциональна амплитуде модулирующего сигнала.

Э

- ЭВТИ** **Экранно-вакуумная теплоизоляция** – многослойное покрытие из фольги и полимерных материалов. Часто применяется как наружное покрытие космических аппаратов, стекловолоконный холст, представляющий собой рулонный нетканый материал из хаотически расположенных стеклянных штапельных волокон, скрепленных синтетическим связующим.
- ЭДС** **Электродвижущая сила** – физическая величина, характеризующая работу сторонних (непотенциальных) сил в источниках постоянного или переменного тока.
- ЭМИ** **Электромагнитное излучение** – распространяющееся в пространстве возмущение (изменение состояния) электромагнитного поля (т.е. взаимодействующих друг с другом электрического и магнитного полей).
- ЭРИ** **Электрорадиоизделие** – комплектующее для создания космического аппарата и т.д.
- ЭСР** **Электростатический разряд** – быстрая однократная сильноточная передача заряда между двумя объектами с разными электрическими потенциалами.
-

- DMA** **Direct memory access** – прямой доступ к памяти.
- EEPROM** **Electrically erasable programmable read-only memory** – электрически стираемое перепрограммируемое ПЗУ.
- LISN** **Line impedance stabilization network** – устройство стабилизации импеданса линии, или эквивалент сети.
- LET** **Linear energy transfer** – линейная передача энергии.
- MBU** **Multiple bit upset** – множественный сбой битов; многобитовые ошибки.
- Mflop** **Million of floating point operations per second** – миллион операций с плавающей точкой в секунду.
- MIPS** **Million instructions per second** – величина, показывающая, сколько миллионов инструкций выполняет процессор в секунду.
- OBSC** **On board space computer** – одноплатный компьютер для космического применения.
- PROM** **Programmable read-only memory** – постоянное запоминающее устройство «однократного» программирования.
- P_CAD** Пакет прикладных программ для автоматизированной разводки печатных плат.
- RAM** **Random-access memory** – запоминающее устройство с произвольным доступом.
- RH** **Radiation hardened** – радиационностойкий.
- ROM** **Read-only memory** – постоянное запоминающее устройство.
- SEB** **Single event burnout** – вторичный сбой от воздействия ядерных частиц.
- SEE** **Single event effect** – эффект от отдельных ядерных частиц. Повреждения при замещении и однократных эффектах.

SEGR	Single event gate rupture – «прокол» подзатворного тонкого диэлектрика.
SEL	Single event latchup – эффект «защелкивания», потеря функционирования из-за повышенного уровня электрического тока.
SETs	Single event transients – переходные процессы от воздействия отдельных частиц.
SEU	Single event upset – единичный сбой, изменение состояния или переходный процесс в устройстве, вызванный потоком частиц высокой энергии.
SHE	Single hard error – фатальный сбой.
SRAM	Static random access memory – статическая оперативная память с произвольным доступом.
TID	Total ionization doze – суммарная ионизирующая доза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Аваев Н.А.* Электронные приборы: Учебник для вузов / Н.А. Аваев, Г.Г. Шишкин; под ред. проф., д.т.н. Г.Г. Шишкина. – М.: Изд-во МАИ, 1996. – 541 с.
2. *Бабакин Г.В.* Активная защита КА от статического электричества в орбитальных условиях: Справочное руководство для конструкторов / Г.В. Бабакин, Е.П. Морозов. – М.: ЦНИИмаш, 2000. – 284 с.
3. *Бабакин Г.В.* Геофизическое прогнозирование уровня радиационной электризации космических аппаратов в орбитальных условиях / Г.В. Бабакин, О.С. Графодатский, В.И. Дегтярев и др.; под ред. д.ф-м.н. Г.В. Попова, к.т.н. Г.В. Бабакина. – М.: ЦНИИмаш, 1993. – 69 с.
4. *Бабакин Г.В.* Наземные стендовые испытания космических аппаратов на стойкость к радиационной электризации: Руководство для конструкторов / Г.В. Бабакин, В.Н. Белинский, В.И. Верхотуров и др. – М: ГОНТИ, 1992. – 155 с.
5. *Безуглов Д.А.* Цифровые устройства и микропроцессоры: Учеб. пособие / Д.А. Безуглов, И.В. Калиенко. – Ростов-н/Д.: Изд-во Феникс, 2008. – 469 с.
6. Бортовые системы управления космическими аппаратами: Учеб. пособие / Бровкин А.Г., Бурдыгов Б.Г., Гордийко С.В. и др.; под ред. д.т.н., проф. А.С. Сырова. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. – 304 с.
7. ГКНПЦ имени М.В. Хруничева [Электронный ресурс] – URL: <http://www.khrunichev.ru/>. Дата обращения: 20.02.2011.
8. ГОСТ 23501.108-85. Системы автоматизированного проектирования. Классификация и обозначения; введ. 01.01.86. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 15 с.
9. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения; введ. 15.11.89. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 32 с.

10. ГОСТ Р 52070-2003. Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей. Общие требования; введ. 01.01.2004. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 27 с.

11. *Гуров В.В.* Архитектура микропроцессоров: Учеб. пособие. – М.: Изд-во Бином. Лаборатория знаний, Интернет-Университет информационных технологий ИНТУИТ, 2010. – 272 с.

12. *Ершова Н.Ю.* Микропроцессоры: Учеб. пособие [Электронный ресурс] / Н.Ю. Ершова, О.Н. Ивашенков, С.Ю. Курская. – URL: <http://dfe3300.karelia.ru/koi/posob/microspru/index.html/>. Дата обращения: 20.02.2011.

13. *Киселев А.В.* Современные микропроцессоры / А.В. Киселев, В.В. Корнеев. – 3-е изд. перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 448 с.

14. *Комолов Д.А., Мяльк Р.А., Зобенко А.А., Филиппов А.С.* ПЛИС фирмы Altera-Max + PLUS II и Quartus II. – М.: РадиоСофт, 2002.

15. Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина [Электронный ресурс] – URL: <http://www.laspase.ru/rus/index.php/>. Дата обращения: 20.02.2011.

16. *Новиков Ю.В.* Основы микропроцессорной техники / Ю.В. Новиков, П.К. Скоробогатов. – 4-е изд., испр. – М.: Изд-во Бином. Лаборатория знаний, Интернет-Университет информационных технологий ИНТУИТ, 2009. – 357 с.

17. Открытое акционерное общество «Туполев» [Электронный ресурс] – URL: <http://www.tupolev.ru/Russian/Show.asp?SectionID=66/>. Дата обращения: 20.02.2011.

18. Патент РФ № 2215384. Переходная колодка и способ ее изготовления А.С. Сыров, Н.В. Волович, В.М. Глебов и др. Опубл. 27.10.2003. Бюл. № 30.

19. Патент РФ № 2216886. Радиозлектронный блок А.С. Сыров, В.М. Глебов, Н.В. Волович и др. Опубл. 20.12.2003. Бюл. № 35.

20. Патент РФ № 2327236. Оперативное запоминающее устройство с высокой степенью отказоустойчивости А.С. Сыров, В.В. Смирнов, В.В. Синельников и др. Опубл. 20.06.2008. Бюл. № 17.

21. *Перельройзен Е.З.* Проектируем на VHDL. – М.: Солон-Пресс, 2004. – 448 с.

22. Продукция Intel [Электронный ресурс] – URL: http://www.intel.com/p/ru_RU/products/. Дата обращения: 20.02.2011.

23. РД 134-139-2005. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы оценки стойкости к воздействию заряженных частиц космического пространства по одиночным сбоям и отказам.

24. РД В 319.03.38-2000. Методы взаимного пересчета параметров моделей одиночных сбоев больших и сверхбольших интегральных схем при воздействии отдельных высокоэнергетичных тяжелых заряженных частиц галактических и солнечных космических лучей и протонов космического пространства.

25. РМГ 78-2005. Излучения ионизирующие и их измерения. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2006.

26. *Сабунин А.Е.* Altium Designer. Новые решения в проектировании электронных устройств. / А.Е. Сабунин. – М.: Солон-Пресс, 2009. – 432 с.

27. Система управления разгонным блоком: Учеб. пособие / Андреев В.П., Бонк Р.И., Бровкин А.Г. и др.; под ред. д.т.н., проф. А.С. Сырова. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. – 272 с.

28. *Суходольский В.Ю.* Сквозное проектирование функциональных узлов РЭС на печатных платах в САПР Altium Designer 6. Ч. 1. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. – 153 с.

29. ФГУП «Московское опытно-конструкторское бюро «Марс» [Электронный ресурс] – URL: <http://mars-mokb.ru/>. Дата обращения: 20.02.2011.

30. Фирма «Альтера» [Электронный ресурс] – URL: <http://altera.ru/>. Дата обращения: 20.02.2011.

31. Фирма AMD [Электронный ресурс] – URL: http://www.cqham.ru/super/mem/am_flash.htm Flash/. Дата обращения: 20.02.2011.

32. *Фудзисав Юкихо*. 32-битные микропроцессоры и микроконтроллеры SuperH. / Серия: Мировая электроника. – М.: Изд-во Додека XXI век, 2009. – 360 с.

33. Экспериментальная отработка систем управления объектов ракетно-космической техники: Учеб. пособие / А.И. Батырев, Б.И. Батырев, Г.К. Бондарец и др.; под общ. ред. Ю.М. Златкина, В.С. Кривцова, А.С. Кулика, В.И. Чумаченко. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», НПП «Хар-трон-Аркос», 2008. – 501 с.

34. Altium Designer. Руководство пользователя (авторизированный перевод), 2007.

35. Macro Assembler User's Guide. Development Solutions MCS-96. – Intel Books, 1990.

36. U.S. Standard MIL-STD-461F «Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment», U.S. Department Of Defence, Washington D.C., 2007. – 255 p.

Тем. план 2011

Авторы: Андреев Виктор Петрович, Волович Наталья Владимировна, Глебов Валерий Митрофанович, Дорский Ростислав Юрьевич, Дубинкин Игорь Михайлович, Каравай Михаил Федорович, Кособоков Виктор Николаевич, Кравчук Сергей Валентинович, Малистин Александр Иванович, Петров Андрей Борисович, Попов Борис Николаевич, Сацко Александр Викторович, Синельников Владимир Васильевич, Смирнов Виктор Владимирович, Сыров Анатолий Сергеевич, Чашин Владислав Алексеевич.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИСПЫТАНИЕ
БОРТОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

Редакторы: *Л.В. Кутукова, Т.В. Кособокова*
Компьютерная верстка *Е.Э. Качаловой*

Подписано в печать 29.06.2011 г.
Бум. офсетная. Формат 60х90 1/16. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 21,5. Уч.-изд. л. 22. Тираж 1000 экз.
Изд. № 741. Заказ 1876.

Издательство МАИ-ПРИНТ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993

Отпечатано в ООО «Софтмейстер»
г. Москва, Верхняя Красносельская ул., д. 34