



МИР

ЭЛЕКТРОНИКИ

А.И. Белоус, В.А. Солодуха,
С.В. Шведов

Космическая электроника

В 2-х книгах
Книга I

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2015

УДК 621.38

ББК 32.85

Б43

Б43 Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В.

Космическая электроника

В 2-х книгах

Книга 1

Москва: Техносфера, 2015. – 696 с. ISBN 978-5-94836-398-1

Книга посвящена анализу современного состояния, проблем и перспектив развития микроэлектронной элементной базы радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической техники (РКТ), космических аппаратов и систем двойного и военного применения. Впервые в отечественной научно-технической литературе сделана попытка рассмотреть в рамках одной книги всю сложную цепь взаимосвязанных этапов создания электронных блоков РКТ – от разработки требований к этим блокам и их элементно-компонентной базе (ЭКБ), до выбора технологического базиса ее реализации, методов проектирования микросхем и на их основе бортовых систем управления аппаратурой космического и специального назначения.

Издание адресовано инженерам-разработчикам радиоэлектронной аппаратуры, а также преподавателям, студентам, аспирантам, специализирующимся в области микроэлектроники и ее приложений.

УДК 621.38

ББК 32.85

© 2015, Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В.

© 2015, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

ISBN 978-5-94836-398-1

Содержание

Предисловие	10
Введение	13
Перечень условных обозначений	30
Глава 1. Современные космические аппараты	32
1.1. Основные направления развития космической промышленности	32
1.2. Классификация современных космических аппаратов	39
1.3. Конструкции и устройство космических аппаратов	42
1.4. Бортовые системы космических аппаратов	50
1.4.1. Классификация бортовых систем космических аппаратов	50
1.4.2. Особенности проектирования бортовых информационно-управляющих систем с использованием микросхем программируемой логики	57
1.5. Космические аппараты дистанционного зондирования Земли	61
1.5.1. Космические аппараты ДЗЗ Российской Федерации и Республики Беларусь	62
1.5.2. Космические аппараты ДЗЗ Украины	77
1.5.3. Космические аппараты ДЗЗ США	77
1.5.4. Космические аппараты ДЗЗ Франции	79
1.5.5. Космические аппараты ДЗЗ Японии	80
1.5.6. Космические аппараты ДЗЗ Индии	81
1.5.7. Космические аппараты ДЗЗ Китая	82
1.5.8. Космические аппараты ДЗЗ европейского космического агентства	83
1.5.9. Космические аппараты ДЗЗ других стран	86
1.6. Радиолокационные станции дистанционного зондирования Земли	88
1.7. Воздействие космической радиации на КА	100
1.8. Микрометеоритное воздействие на КА	102
1.9. Проблема космического мусора на орбите Земли	104
1.10. Применение микроэлектронных технологий для создания миниатюрных реактивных двигателей космического назначения	107
1.10.1. Проблемы микроминиатюризации космических аппаратов	107
1.10.2. Миниатюрные реактивные двигатели горизонтальной конструкции	111
1.10.3. Миниатюрные реактивные двигатели вертикальной конструкции	116
1.11. Космические аппараты военного и специального назначения	120
1.11.1. Система предупреждения о ракетном нападении	120
1.11.2. Наземный эшелон СПРН	123
1.11.3. Фазированные антенные решетки	126
1.11.4. Космический эшелон СПРН	130
1.11.5. Военно-разведывательные спутники	136
Литература к главе 1	147

Глава 2. Отказы и аварии ракетносителей и космических аппаратов	150
2.1. Проблемы безопасности ракетно-космической техники	150
2.2. Анализ причин отказов ракет-носителей	156
2.3. Анализ отказов космических аппаратов	159
2.4. Анализ причин отказов изделий ракетно-космической техники	163
2.5. Анализ тенденций изменения рисков аварий ракет-носителей за период с 2000 по 2009 г.	166
2.6. Анализ тенденций изменения рисков отказов КА за период с 2000 по 2009 г.	172
2.7. Анализ причин аварий РН и КА за период с 2000 по 2009 г.	175
2.8. Анализ отказов компьютерных систем и программных средств	177
2.9. Анализ отказов бортовых систем на международной космической станции в 2000-е гг.	179
2.10. Методы обеспечения надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов длительного функционирования	180
Литература к главе 2	188
Глава 3. Микроэлектронная элементная база ракетно-космической техники	191
3.1. Классификация современных микропроцессоров	191
3.2. Процессоры для электронных систем управления иностранными космическими аппаратами	195
3.2.1. Бортовые процессоры иностранных космических аппаратов	195
3.2.2. Фирма Aitech Defense Systems	200
3.2.3. BAE Systems	202
3.2.4. Honeywell	203
3.2.5. Микропроцессоры с архитектурой SPARC	203
3.2.6. Микропроцессоры компании Atmel	204
3.2.7. Aeroflex	205
3.3. Отечественные микропроцессоры и микроконтроллеры	206
3.3.1. ОАО «Ангстрем» (г. Зеленоград)	207
3.3.2. ОАО «НИИМЭ и Микрон» (г. Зеленоград)	208
3.3.3. НИИСИ РАН (г. Москва)	212
3.3.4. ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова» (г. Нижний Новгород)	213
3.3.5. ЗАО «Светлана-Полупроводники» (г. Санкт-Петербург)	214
3.3.6. ОАО «НИИЭТ» (г. Воронеж)	215
3.3.7. ЗАО «ПКК Миландр» (г. Зеленоград)	218
3.3.8. ОАО НПЦ «ЭЛВИС» (г. Зеленоград)	220
3.3.9. ЗАО НТЦ «Модуль» (г. Москва)	223
3.3.10. ЗАО «МЦСТ» (г. Москва)	225
3.3.11. ОАО «НИИМА «Прогресс» (г. Москва)	228
3.3.12. ООО «Дизайн-центр КМ211» (г. Зеленоград)	229
3.3.13. ООО «НПП «Цифровые решения» (г. Москва)	231
3.3.14. ОАО «Мультиклет» (г. Екатеринбург)	232
3.3.15. НИИ МВС ЮФУ (г. Таганрог)	233
3.3.16. НПК «Технологический центр» и ОАО «Завод-ПРОТОН- МИЭТ» (г. Зеленоград)	234

3.3.17. ЧП «НТЛаб-системы» (г. Минск)	234
3.3.18. Научно-технический центр «ДЭЛС» (г. Минск)	235
3.4. Инструментальные средства разработки и отладки для МП и МК	235
3.5. Тенденции развития современных микроконтроллеров	239
3.5.1. Переход потребителей на 32-битные микроконтроллеры	239
3.5.2. Лицензионные архитектуры MIPS32 и Cortex-M	241
3.5.3. Особенности проектирования и организации производства микросхем для космического применения	242
3.6. Особенности использования фаблесс-модели при проектировании микроэлектронных изделий для космических применений	244
3.6.1. Предпосылки возникновения и развития фаблесс-модели бизнеса	244
3.6.2. Структура и особенности фаблесс-бизнеса	245
3.6.3. Особенности выбора заказчика по фаблесс-проекту	247
3.6.4. Технические предпосылки и условия реализации типового фаблесс-проекта. Программное обеспечение и библиотеки проектирования	248
3.6.5. Выбор технологического процесса изготовления изделия	249
3.6.6. Необходимость наличия собственной аналитической базы	249
3.6.7. Изготовление опытных образцов	250
3.6.8. Финансовая парадигма фаблесс-проекта	251
3.6.9. Общие рекомендации по организации работы в режиме фаблесс	252
3.7. Особенности выбора иностранной ЭКБ для проектирования отечественных КА	253
3.7.1. Основные предпосылки необходимости использования иностранной ЭКБ	253
3.7.2. Особенности этапа выбора номенклатуры ЭКБ иностранного производства	255
3.7.3. Особенности проведения сертификационных испытаний ЭКБ ИП	258
3.7.4. Особенности реализации этапа анализа отдельных перечней ЭКБ ИП	262
3.8. Особенности отечественной элементной базы для систем электроэнергетического обеспечения космических летательных аппаратов	266
3.9. Стойкость бортовой РЭА к воздействию ионизирующих излучений	270
3.10. Силовые полупроводниковые приборы для электронных систем КА	279
3.10.1. Основные принципы использования силовых приборов	279
3.10.2. Базовые технологии силовых приборов	281
3.10.3. Силовые MOSFET	283
3.10.4. Интеллектуальные МОП-транзисторы (SmartFET)	284
3.10.5. Интеллектуальные силовые ИС	289
3.10.6. Интеллектуальные ИС систем питания	292
Литература к главе 3	296

Глава 4. Особенности выбора и применения иностранной ЭКБ для проектирования отечественных космических аппаратов	298
4.1. Общие проблемы выбора ЭКБ для РЭА космического назначения	298
4.2. Ограничение экспорта в Россию электронных компонентов иностранного производства	300
4.2.1. Ограничение экспорта ЭКБ из США	301
4.2.2. Ограничение экспорта электронных компонентов из Европы и других стран	306
4.2.3. Международные организации контроля экспорта	307
4.3. Особенности применения индустриальных ЭКБ иностранного производства в ракетно-космической технике	308
4.4. Контрафактные микроэлектронные изделия и методы их выявления	318
4.4.1. Типы контрафактных компонентов	318
4.4.2. Эффективные методы выявления контрафактных изделий	320
4.4.3. Электрические испытания микроэлектронных изделий космического назначения	323
4.5. Особенности выбора и применения в отечественных космических аппаратах иностранных процессоров	330
4.5.1. Проблемы применения иностранных процессоров в отечественных КА	330
4.5.2. Варианты исполнения и квалификационные характеристики микропроцессоров UT 699 и GR 712	331
4.5.3. Архитектурные и аппаратные особенности микропроцессоров UT 699 и GR 712 семейства Leon 3FT	332
4.5.4. Особенности программирования микропроцессора Leon 3	334
4.6. Радиационно-стойкие преобразователи постоянного тока для космических и военных применений	337
4.7. Мировой опыт организации работ по созданию электронных компонентов для бортовой аппаратуры космических систем	344
4.8. Ускоренные испытания ЭКБ КН на надежность	352
4.9. Анализ результатов испытаний микросхем, закупленных в РФ в период с 2009 по 2011 г.	356
Литература к главе 4	366
Глава 5. Методы минимизации энергопотребления микроэлектронных устройств	369
5.1. Основные тенденции изменения параметров энергопотребления микроэлектронных устройств	369
5.2. Пути уменьшения величины рассеиваемой мощности в КМОП БИС	373
5.3. Основные источники рассеиваемой мощности в КМОП БИС	384
5.4. Логическое проектирование КМОП БИС с пониженным энергопотреблением	389
5.4.1. Основы логического синтеза КМОП микросхем с пониженным энергопотреблением	389
5.4.2. Определение источников рассеиваемой мощности в КМОП микросхемах	391

5.4.3. Вероятностная оценка вариантов оптимизации по прогнозируемой переключательной активности узлов микросхемы	393
5.4.4. Выбор элементного базиса при проектировании КМОП СБИС с пониженным энергопотреблением	396
5.4.5. Логический синтез КМОП БИС в базисе библиотечных элементов	398
5.4.6. Оптимизация двухуровневых логических схем с учетом рассеивания мощности	399
5.4.7. Выбор базовых вентилей технологически независимой функциональной схемы	401
5.4.8. Оптимизация многоуровневых логических схем из многовходовых вентилей	402
5.4.9. Оптимизация многоуровневых логических схем из двухвходовых вентилей	404
5.4.10. Технологическое отображение	407
5.4.11. Оценка энергопотребления спроектированных КМОП БИС на логическом и схемотехническом уровнях	408
5.4.12. Технология проектирования КМОП БИС с пониженным энергопотреблением с использованием комплекса ЭЛС	410
5.4.13. Архитектура программного комплекса ЭЛС	412
5.4.14. Функциональные возможности программного комплекса ЭЛС	413
5.5. Особенности организации режима пониженного энергопотребления в современных интерфейсных БИС	417
5.5.1. Микросхемы приемопередатчиков интерфейса RS-485	417
5.5.2. Микросхемы приемопередатчиков интерфейса RS-232	423
5.5.3. Конструктивно-схемотехнические особенности проектирования интерфейсных ИМС КН с пониженным напряжением питания	440
5.5.4. Особенности проектирования электрических схем блоков передатчика интерфейсных БИС с пониженным напряжением питания	447
5.5.5. Термнезависимый источник опорного напряжения, равного ширине запрещенной зоны полупроводника	452
5.5.6. Варианты построения термнезависимых источников опорного напряжения	453
5.5.7. Анализ схемотехнических особенностей организации и применения триггеров Д-типа	456
5.5.8. Схемотехнические методы повышения помехоустойчивости цифровых КМОП БИС	462
5.5.9. Схемотехнические методы повышения устойчивости микросхем к эффекту горячих электронов	475
Литература к главе 5	480
Глава 6. Особенности технологического процесса изготовления и базовых конструкций субмикронных транзисторов и диодов Шоттки	485
6.1. О терминологии субмикронной микроэлектроники	485
6.2. Тенденции и перспективы развития современной технологии в микроэлектронике	487

6.2.1. Проблема масштабирования	492
6.2.2. Современная субмикронная технология – пример ее реализации при изготовлении микропроцессоров	493
6.3. Особенности субмикронных МОП-транзисторов	500
6.3.1. Конструкции МОП-транзисторов в СБИС	501
6.3.2. Методы улучшения характеристик МОП-транзисторов	504
6.3.3. МОП-транзисторы со структурой «кремний на изоляторе»	507
6.3.4. Транзисторы с двойным, тройным и цилиндрическим затвором	513
6.3.5. Другие типы транзисторных структур	518
6.3.6. Особенности транзисторов для аналоговых применений	520
6.4. Конструктивно-технологические особенности высокотемпературных диодов Шоттки	522
6.4.1. Физические основы функционирования диодов Шоттки	522
6.4.2. Конструктивно-технологические особенности формирования высокотемпературных диодов Шоттки	525
6.4.3. Методы обеспечения минимального обратного тока и минимального прямого напряжения	529
6.4.4. Методы обеспечения минимального прямого напряжения и максимального обратного напряжения	532
6.5. Конструктивно-технологические особенности формирования структур диодов Шоттки с повышенной устойчивостью к разрядам статического электричества	537
Литература к главе 6	541

Глава 7. Особенности воздействия радиации на субмикронные интегральные микросхемы	549
7.1. Физические механизмы воздействия радиации на субмикронные КМОП интегральные микросхемы	550
7.2. Воздействие радиации на аналоговые биполярные интегральные микросхемы	563
7.3. Основные методы обеспечения радиационной стойкости интегральных микросхем	567
7.4. Радиационная стойкость современных и перспективных ИМС	568
7.5. Рекомендуемый набор тестовых элементов для экспериментальных исследований влияния радиационных воздействий на характеристики кремниевых микросхем	572
7.6. Оборудование и методики облучения тестовых структур и исследуемых образцов микросхем	575
7.7. Методика измерения электрических параметров тестовых структур после радиационной обработки	578
7.8. Экспериментальные результаты воздействия электронного облучения на параметры эпитаксиальных кремниевых р-п-структур	581
7.9. Экспериментальные результаты исследования воздействия проникающей радиации на параметры биполярных транзисторных структур	588

7.10. Экспериментальные исследования влияния ионизирующих излучений на параметры биполярных аналоговых интегральных микросхем	593
7.11. Экспериментальные результаты исследований воздействия ионизирующих излучений на параметры транзисторных МОП-структур и интегральных микросхем на их основе	601
7.11.1. Исследование влияния гамма-излучения на параметры транзисторных МОП-структур	601
7.11.2. Экспериментальные исследования воздействия гамма-излучения на параметры МОП-конденсаторов и транзисторных МОП-структур – элементов субмикронных КМОП ИМС	609
7.11.3. Особенности воздействия гамма-излучения на параметры МОП-ячеек памяти ЭСППЗУ	612
7.11.4. Экспериментальные исследования воздействия проникающего излучения на параметры логических КМОП ИМС	615
7.11.5. Влияние ионизирующего излучения на параметры КМОП БИС памяти	620
7.11.6. Экспериментальные исследования влияния радиационного воздействия на параметры транзисторных МОП/КНИ-структур и КМОП БИС ОЗУ на их основе	627
7.11.7. Экспериментальное исследование воздействия проникающего излучения на параметры БиКМОП БИС	635
7.12. Особенности применения имитационных методов исследования радиационных эффектов в БиКМОП микросхемах	642
Литература к главе 7	653
Глава 8. Методы прогнозирования и повышения радиационной стойкости биполярных и КМОП интегральных микросхем	665
8.1. Методы прогнозирования радиационной стойкости КМОП ИМС	665
8.1.1. Расчетно-экспериментальные методы прогнозирования радиационной стойкости МОП-приборов	665
8.1.2. Метод прогнозирования (отбора) КМОП ИМС по радиационной стойкости	671
8.2. Расчетно-экспериментальные методы прогнозирования радиационной стойкости биполярных и БиКМОП приборов	674
8.3. Расчетно-экспериментальный метод прогнозирования радиационной стойкости МОП запоминающих элементов ЭСППЗУ	676
8.4. Методы повышения устойчивости ИМС к воздействию проникающей радиации	677
8.4.1. Конструктивно-технологические методы повышения радиационной стойкости КМОП и БиКМОП микросхем	677
8.4.2. Стандартные конструктивно-схемотехнические методы повышения радиационной стойкости ИМС	680
8.4.3. Новые конструктивно-схемотехнические методы повышения радиационной стойкости КМОП БИС	688
Литература к главе 8	693

Предисловие

Первоначальное по замыслу авторов назначение этой книги — ознакомить разработчиков бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов (КА) и систем двойного и специального назначения с современными подходами к проектированию и применению микроэлектронной элементной базы этой аппаратуры. Однако в процессе написания книги, сбора и обработки имеющейся обширной информации, бесед с чиновниками и специалистами отечественной и зарубежной космической и микроэлектронной отраслей промышленности первоначальный замысел авторов был существенно изменен. Полученные в результате анализа обширные дополнительные материалы заставили отказаться от исходного формата книги, и кроме изложения собственно особенностей и проблем проектирования современных микроэлектронных устройств для приборов космического и специального назначения здесь представлен значительно более расширенный материал.

Весь этот материал автором пришлось оформить в виде «двухтомника», где кроме глав, посвященных непосредственно проблемам проектирования современных микроэлектронных устройств космического и специального (военного) назначения, появились главы, посвященные другим «космическим» проблемам — как устроены современные космические аппараты (КА), какова роль радиоэлектронного бортового оборудования в достижении цели проекта, для которого разрабатывался этот КА, какова статистика аварий и отказов этих аппаратов, почему эти аварии и отказы в значительной степени связаны с качеством и функциональными возможностями используемых в их бортовых РЭА микросхем, почему в РФ активно применяются контрафактные микросхемы и как с ними бороться, каковы физические механизмы воздействия на РЭА КН ионизирующих излучений космического пространства и потоков сверхскоростных высокоэнергетических микрочастиц (космическая пыль) и какими методами и технологическими решениями можно если не исключить, то хотя бы уменьшить их влияние на надежность функционирования РЭА космического и специального назначения — и многое другое.

Необходимость такого существенного увеличения объема книги было во многом обусловлена информацией, почерпнутой авторами из фундаментального труда Железнякова А.Б. «Тайны ракетных катастроф. Плата за прорыв в космос» / М.: Эксмо: Яуза, 2011. — 544 с., где фактически в сжатом виде детально изложена вся история как отечественной, так и мировой космонавтики.

Изложенные в этой работе факты, описания всех основных этапов грандиозной эпопеи выхода человечества за пределы нашей Земли, показали всю сложность этой чрезвычайно важной для человечества задачи, а также «высветили» роль так называемой ЭКБ — элементно-компонентной базы в процессе покорения космоса.

Конечно, автор этой работы (Железняков А.Б.) не предполагал, что всю массу достоверно изложенных им триумфальных и трагических событий процесса освоения космического пространства будут читать специалисты по электронике и рассматривать события под своим углом зрения, с учетом своего опыта и знаний в сфере микроэлектроники.

К сожалению, и в этом читатели сами могут легко убедиться, обратившись к первоисточнику, более чем в трети случаев аварий и отказов КА одной из наиболее вероятных причин этих событий является отказ этой самой ЭКБ.

Забегая вперед, одной из многих задач этой книги авторы считают и такую — проектируя конкретную бортовую радиоэлектронную аппаратуру для КА и выбирая для этого уже имеющуюся на рынке (или разрабатывая новую ЭКБ) разработчики должны представлять себя на месте тех людей (космонавтов, сотрудников наземных служб обеспечения КА, военных), жизни которых самым непосредственным способом будут зависеть от надежности этой самой РЭА. Так в оглавлении книги появились непредусмотренные ранее главы о структуре и составе бортовой аппаратуры КА, о детальном сравнительном анализе статистики и причинах аварий и отказов ракетносителей и КА, о контрафактной ЭКБ и способах борьбы с ней.

В ходе изучения этого дополнительного и непосредственно никак не связанного с профессиональной деятельностью авторов (микроэлектроника и ее приложения) материала возникла объективная необходимость сравнить подходы разработчиков КА разных стран (США, СССР/РФ, Китая, стран Евросоюза и др.) к развитию соответствующей инфраструктуры и принципов использования ЭКБ в КА и военной технике.

К удивлению авторов — дилетантов оказалось (и это отражено в материалах книги), что, например, в Китае, намного позже включившемся в «космическую гонку», в последние годы соотношение числа удачных к неудачным пускам КА значительно лучше, чем в США и РФ, что у них на момент написания этой книги в КА используется не менее 98% собственной ЭКБ (для РФ этот показатель — в зависимости от источника информации — лежит в диапазоне только от 20 до 30% — все остальное — это иностранная ЭКБ), а их КА уже далеко не повторяют американские и российские технические решения, а во многом их опережают, а, например, в области разработки «противоспутникового» оружия они продвинулись весьма существенно вперед, продемонстрировав наблюдающим за ними конкурентам (США и РФ) активно маневрирующие на орбите и выполняющие различные манипуляции роботы-спутники («убийцы» спутников), а их «нефритовый заяц» достаточно комфортно чувствует себя на Луне.

В итоге вместо задуманного авторами скромного однотомного руководства по проектированию современных высоконадежных ИМС и ПП для космической и военной техники, читателю предлагается своего рода энциклопедия космической электроники, обобщающая в объеме двухтомника основную имеющуюся в открытой печати информацию как о причинах основных аварий и отказов космической техники за весь период ее развития, так и практические рекомендации по проектированию надежной элементной базы для бортовой РЭА.

Авторы выражают благодарность коллегам, активно участвовавшим в подготовке и обсуждении материалов книги, критические замечания и дополнения которых способствовали улучшению как структуры книги, так и излагаемого в ней материала — Бибило П.Н., Богатырев Ю.В., Борисенко В.Е., Бондаренко В.П., Долгий Л.Н., Овчинников В.И., Стемпицкий В.Р., Ушеренко С.М., Коршунов В.П., Критенко М.И., Стешенко В.Б., Турцевич А.С., Телец В.А., Мерданов М.К., Макаров Ю.Н., Никифоров А.Ю., Черемисинова Л.Д., Шиллер В.А. и др.

Следует отметить, что многие из этих коллег предоставили авторам оригинальные материалы собственных исследований по тематике этой книги – их включение в состав книги в значительной степени усилило практическую направленность работы.

Авторы также выражают благодарность рецензентам – академику Витязю П.А. и академику Лабунову В.А., конкретные замечания и предложения которых в значительной степени способствовали формированию окончательного варианта предлагаемой читателю книги.

Огромный объем работ по техническому оформлению рукописи был выполнен Гордиенко С.В. и Горовой Е.В.

При написании книги авторы использовали многочисленные открытые зарубежные и отечественные источники, результаты собственных научных исследований и практические результаты, полученные ими в области проектирования современных микроэлектронных изделий, учитывая специфику исследуемых проблем – достоверная информация о результатах анализа причин катастроф и аварий как в СССР/РФ, США, так и в Китае редко появляется в открытой печати. Поэтому здесь авторы использовали также информацию, полученную во время личных встреч и переговоров с сотрудниками китайской и индийской космической промышленности, в том числе – неоднократных встреч и дискуссий с Абдул Каламом (его называют «индийский Король») – до того периода времени, когда он был избран Президентом Индии – и другими авторитетными специалистами.

Введение

Уникальность предмета исследований книги — космическая и специальная (экстремальная) микроэлектроника — элементная база современной ракетно-космической техники (РКТ), а также систем вооружений и военной техники.

Впервые в отечественной научно-технической литературе сделана попытка рассмотреть в рамках одной книги всю сложную цепь взаимосвязанных этапов создания электронных блоков РКТ — от разработки требований к этим блокам и их элементно-компонентной базе (ЭКБ) до выбора технологического базиса ее реализации, методов проектирования микросхем и на их основе бортовых систем управления аппаратурой космического и специального назначения.

Структура и последовательность изложения материала здесь направлена на изложение достаточно сложного материала в максимально упрощенном (но не в ущерб качеству) виде. Читателю последовательно излагается достаточный для понимания проблемы, но минимальный объем информации — от устройства и классификации космических аппаратов и их бортовых систем, результатов статистического анализа причин их аварий и отказов до особенностей выбора и применения ЭКБ иностранного производства. Основной объем представленного материала касается проблем проектирования микросхем космического назначения — от выбора технологии изготовления до методов их проектирования с учетом особенностей глубокого субмикрона.

Для достижения этой цели материал книги представлен в виде 20-ти глав.

В первой главе в сжатом виде представлены основные направления и тенденции развития космической техники и технологии, приводится классификация космических аппаратов, дается краткое описание их устройства, принципов организации и функционирования основных электронных бортовых систем управления, ибо именно исходя из требований к функциональным возможностям и техническим характеристикам этих систем формулируются требования к их ЭКБ. Более подробно рассмотрены космические аппараты дистанционного зондирования Земли, поскольку в одной из последующих глав рассмотрены практические примеры проектирования для них специализированных ПЗС — микросборок.

Здесь же кратко рассмотрены основные механизмы воздействия на КА факторов космического пространства (радиации, микрометеоритов и др.).

В последнем параграфе главы рассмотрены основные направления развития новых направлений в космическом приборостроении — применение МЭМС-технологий для создания миниатюрных (размерами со спичечный коробок) реактивных двигателей космического назначения.

Вторая глава посвящена общим проблемам обеспечения безопасности ракетно-космической техники, систематизации и анализу основных причин катастроф, аварий, отказов ракетносителей и КЛА. Приводятся обобщенные по открытым источникам информации статистические данные по изменению характера и причин отказов на основных этапах развития космической техники, показана роль надежности используемой ЭКБ в решении задачи снижения рисков отказов, формулируются основные требования к количественным показателям надежности и долговечности ЭКБ КН.

Отдельно здесь рассмотрены специальные методы обеспечения надежности бортовой аппаратуры КА длительного функционирования.

Третья глава посвящена общим вопросам выбора микроэлектронной ЭКБ для устройств ракетно-космической техники. Рассмотрена типовая структура контроллера бортовой электронной системы управления КА, даны конкретные примеры использования процессоров и микроконтроллеров в электронных системах управления иностранными КА,

Детально рассмотрены основные технические характеристики и функциональные особенности почти всех известных отечественных микроконтроллеров двойного и специального назначения, а также важные для практического применения особенности проектирования и организации производства микросхем для космических применений.

При рассмотрении последнего вопроса большое внимание уделено особенностям использования фэблес – модели, когда оригинальная микросхема проектируется отечественным дизайн-центром под требования конкретного заказчика – разработчика РЭА космического или специального применения, а затем изготавливается на одной из зарубежных микроэлектронных фабрик, отдельный параграф главы посвящен важным для инженера-дизайнера особенностям выбора конкретного конструктивно-технологического базиса (типа технологии, минимальных проектных норм уровня глубокого субмикрона) для проектирования микросхем космического назначения.

Система электроэнергообеспечения современных космических аппаратов во многом определяет их конечные тактико-технические характеристики, поэтому здесь детально рассмотрены состав и технические характеристики соответствующей отечественной ЭКБ для систем электрообеспечения.

Для стремительно развивающегося в РФ космического направления – спутников и специальной аппаратуры дистанционного зондирования Земли – представлено описание соответствующей ЭКБ, рассмотрены функциональные возможности, технические характеристики и особенности применения.

Поскольку воздействие ионизирующих излучений космического пространства является одним из главных факторов, ограничивающих сроки активного существования КА и приводящих к отказам и сбоям в работе бортовой РЭА (примерно в 30% случаев отказов функционирования их причиной является воздействие радиации), отдельный параграф целиком посвящен общим вопросам обеспечения стойкости бортовой РЭА к ионизирующим излучениям.

В частности, рассмотрены вопросы формирования соответствующих требований и определения локальных радиационных условий на борту КА, особенности методик оценки радиационной стойкости бортовой РЭА, а также рекомендации по повышению эффективности использования элементов радиационной защиты от воздействия тяжелых заряженных частиц, основные нормативные методики оценки радиационной стойкости бортовой РЭА.

Поскольку, кроме микросхем, при построении РЭА КН широко используются и дискретные полупроводниковые приборы, в конце главы рассмотрена номенклатура силовых полупроводниковых приборов КН (мощные полевые транзисторы, диоды, IGBT-модули и др.).

Четвертая глава посвящена особенностям выбора и применения в составе отечественных космических аппаратов ЭКБ иностранных производителей. Рассмотрены общие проблемы и подходы к выбору такой ЭКБ. Отдельно анализируются нормативные документы США и Евросоюза, ограничивающие экспорт в Россию этих компонентов, рассмотрены пути и механизмы решения сопутствующих проблем.

Поскольку приобретение иностранной ЭКБ категории Space обычно представляет собой достаточно сложную задачу, на практике для проектирования РЭА КН широко используют иностранную ЭКБ категории Industry (промышленного назначения). Детально рассмотрены особенности применения этих изделий в ракетно-космической технике, приводится перечень обязательных мероприятий, которые должен выполнить разработчик РЭА перед тем, как поставить эти образцы в электронные блоки проектируемой РЭА КН. Отдельный параграф посвящен проблемным особенностям выбора иностранной ЭКБ для РЭА стратегически значимых отечественных объектов.

Одной из важнейших проблем комплектации РЭА КН импортными микроэлектронными изделиями является проблема так называемого «контрафакта». Причем эта проблема не только для российских разработчиков, она носит глобальный характер — известно много случаев, когда даже в электронные системы подводных лодок, боевых самолетов США и стран НАТО, космической аппаратуры НАСА и Европейского космического агентства попадали контрафактные (поддельные, клонированные) микросхемы низкого качества китайского производства (в Китае налажено массовое производство таких изделий).

В последние годы все больше контрафактных изделий выявляется и российскими специалистами, а в ряде случаев однозначно установлена их ответственность за отказы РКТ.

Дана следующая классификация контрафактных изделий: пиратская версия (клон), компонент не соответствует стандартам изготовления оригинального изделия; компонент не изготовлен сертифицированным на то производителем; компонент является дефектным или ранее бывшим в употреблении, но поставленным под видом новых компонентов; компонент имеет некорректную (или поддельную) маркировку и сопроводительную документацию. В итоге контрафактную продукцию можно отнести к следующим более частным категориям: повторно используемые, перемаркированные, дефектные (бракованные), незаконно (например, сверх договорного объема) произведенные, клонированные, незаконно измененные (восстановленные) изделия, а также компоненты с поддельной документацией.

Для каждой из этих категорий рассмотрены эффективные методы их выявления. Подробно описан один из таких эффективных методов — специальный комплекс электрических и температурных испытаний с конкретными примерами из практики анализа. Рассмотрены особенности выбора и применения в отечественных космических аппаратах иностранных процессоров и микроконтроллеров, необходимых для построения высокопроизводительных и надежных бортовых цифровых вычислительных комплексов (БЦВК) — как для систем полезной нагрузки, так и для платформы космических аппаратов. Детально проанализирован

наиболее широко используемый с 2009 г. в космической отрасли США и стран ЕС разработанный компанией Aeroflex процессорный комплект Leon 3FT (микропроцессоры UT699 и GR712): варианты использования, квалификационные характеристики, архитектурные и аппаратные особенности, особенности программирования и пр.

Отдельный параграф посвящен иностранным радиационно-стойким преобразователям постоянного тока для космических и военных применений, объем импорта которых в Россию за последние 5 лет увеличился на порядок. Как известно, система электропитания любого спутникового оборудования должна быть адаптирована к высокой тактовой частоте работы и быстрому изменению нагрузки на шине питания. Показано, что для этого требуется, чтобы эти DC/DC преобразователи и стабилизаторы обладали переходными характеристиками на уровне не ниже десяти ампер на микросекунду при изменении нагрузки в полном диапазоне, при этом максимальное отклонение величины выходного напряжения не должно превышать $\pm 5\%$, ибо любое превышение предельно допустимого напряжения питания процессора или ПЛИС при таком изменении нагрузки может привести к мгновенному (или скрытому) отказу микросхемы бортовой РЭА.

Здесь же представлены основные результаты обобщения мирового опыта организации работ по созданию электронных компонентов для бортовой аппаратуры космических аппаратов, поскольку специфика ЭКБ КН заключается в том, что ее развитие идет своим путем, отличным от развития электроники общепромышленной, ориентированной на выпуск массовой продукции с коротким жизненным циклом и быстрой сменяемостью типов изделий.

Представлены особенности организации работ по развитию ЭКБ КН в США, где этим занимаются параллельно три ведомства — министерства обороны и энергетики, НАСА, а также в Европе, Японии и Китае.

В пятой главе рассмотрены основные направления решения одной из наиболее актуальных проблем космической микроэлектроники — снижение энергопотребления микроэлектронных устройств космического назначения. Актуальность проблемы обусловлена тем очевидным фактом, что функциональные возможности и производительность бортовой РЭА неуклонно увеличиваются, а закон сохранения энергии никто еще не отменил. Если за каждый килограмм (тонну) полезной нагрузки конструкторам ракетно-космической техники приходится платить сокращением «избыточных» функций, то для обеспечения минимизации энергопотребления электронных блоков приходится использовать самые различные методы и способы, основанные на использовании как особенностей собственно микроэлектронных технологий изготовления ЭКБ, так и целого спектра оригинальных конструктивно-схемотехнических методов. Пятая глава как раз и посвящена описанию основных из этих методов.

В начале главы рассмотрены основные механизмы рассеивания мощности в наиболее широко используемых в КА КМОП-микросхемах, физические, схемотехнические, технологические и системотехнические (архитектурные) ограничения, которые надо знать и учитывать разработчиками и потребителям микросхем космического применения. Особое внимание в этой главе уделено интерфейсным микросхемам, которые позволяют обеспечивать совместное функционирование в со-



ставе бортовой системы самых различных функциональных блоков, узлов и элементов систем как единичного целого, организовать взаимодействие различных электронных бортовых систем КА между собой, обеспечить быстрый и надежный информационный обмен как между этими «внутренними» системами, так и с «внешними» устройствами. Без так называемого «развитого интерфейса» невозможна эффективная эксплуатация самых современных вычислительных и управляющих бортовых систем КА. Важнейшими элементами интерфейса являются специальные микросхемы, используемые для построения интерфейсных каналов, которые имеют множество разновидностей, отличающихся функциональными возможностями, схемотехническими и конструктивно-технологическими решениями, системой электрических параметров и особенностями применения. Единственное, что их объединяет, – проблема минимизации их энергопотребления при работе в составе бортовых систем РЭА КН, а также условия работы (высокий уровень внешних помех, высокие значения переключаемых (коммутируемых) и нагрузочных токов, экстремальные электрические нагрузки, работа в условиях радиационных и механических воздействий). Особенности проектирования и применения интерфейсных микросхем предыдущего поколения достаточно подробно были изложены в работе А.И. Белоуса, О.Е. Блинкова «Биполярные микросхемы для интерфейсов систем автоматического управления (Ленинград, «Машиностроение», 1990 г., 272 с.), на которую в главе даются соответствующие ссылки.

Однако новому поколению интерфейсных микросхем присущи и новые проблемы, и новые методы их разрешения, поэтому здесь основное внимание читателей сконцентрировано на особенностях организации режимов понижения энергопотребления в современных интерфейсных микросхемах преимущественно с последовательной (а не параллельной) передачей данных. Рассмотрены наиболее часто используемые разработчиками бортовой РЭА микросхемы приемо-передатчиков пониженного энергопотребления типа RS-232 и RS-485, приведены конструктивно-схемотехнические особенности их проектирования, дан развернутый пример проектирования конкретной схемы электрического блока передатчика, источника температурнезависимого опорного напряжения и др.

Основные конструктивно-схемотехнические особенности проектирования ИМС КН с пониженным напряжением питания детально рассмотрены в рамках отдельного параграфа.

Учитывая широкое использование в интерфейсных (и не только) микросхемах элементов памяти (Embedded memory – встроенная память), последний параграф этой главы посвящен детальному анализу схемотехнических особенностей организации и применения наиболее часто используемых типов базовых элементов (ячеек) памяти – различного вида триггеров D-типа.

Учитывая повышенный уровень различного рода помех, генерируемых на борту эксплуатируемого космического аппарата (орбитальной станции, навигационного спутника, межпланетного космического аппарата), в эту главу включен специальный параграф, посвященный детальному анализу как самих источников возникающих помех, так и конструктивно-схемотехническим методам их подавления на ранних этапах – проектирования как собственных заказных микросхем, так и на этапах их последующего применения в составе бортовой РЭА КН.

Шестая глава посвящена особенностям технологического процесса изготовления и базовым конструкциям современных транзисторов и диодов Шоттки, предназначенных для использования при проектировании и изготовлении микросхем и полупроводниковых приборов космической микроэлектроники.

Эта глава необходима для понимания современных тенденций и перспектив развития современной микроэлектроники, которая развивается в направлении так называемого «глубокого субмикрона». На первый план здесь выходит проблема масштабирования геометрических размеров интегральных микросхем — уменьшение линейных (горизонтальных) и вертикальных (параметров активной структуры базового транзистора) размеров вызвала к жизни совершенно новые, ранее неизвестные физические механизмы отказов этого нового поколения микроэлектронных изделий.

Поэтому здесь детально рассмотрены особенности технологий изготовления и формируемые этими технологиями конструкции субмикронных МОП-транзисторов. Представлен общий анализ этих конструкций, дано описание наиболее часто используемых в практической деятельности инженеров-разработчиков БИС методов улучшения рабочих характеристик МОП-транзисторов для проектных норм 90, 65, 45 нм и менее, отдельно рассмотрены особенности, достоинства и основные недостатки МОП-транзисторов со структурой «кремний на изоляторе» (КНИ), особенности транзисторов с двойным, тройным, и так называемым «цилиндрическим затвором», а также другие используемые в БИС КН типы транзисторных структур. В рамках отдельного параграфа рассмотрены особенности использования в составе БИС КН специальных конструкций транзисторов для аналоговых применений.

Также отдельный параграф главы посвящен конструктивно-технологическим особенностям изготовления и использования в составе микроэлектронных устройств высокотемпературных диодов Шоттки — представлены более пятидесяти вариантов их конструкций с соответствующими комментариями в зависимости от решаемых ими задач в составе конкретных микросхем и дискретных полупроводниковых приборов космического назначения.

Седьмая глава посвящена теоретическому и экспериментальному анализу особенностей воздействия ионизирующих излучений космического пространства на субмикронные интегральные микросхемы и дискретные полупроводниковые приборы. Если физические механизмы воздействия радиации на «досубмикронные» микросхемы были достаточно хорошо изучены и представлены в многочисленных открытых отечественных и зарубежных изданиях, то при использовании субмикронных проектных норм образовался определенный «информационный вакуум» — в различных литературных источниках часто публиковалась прямо противоположная информация, вплоть до того что субмикронные микросхемы вообще нельзя использовать в космической аппаратуре из-за якобы их низкой стойкости к ионизирующим излучениям открытого космического пространства.

Во многом это объясняется жесткой конкурентной борьбой на рынке изготовителей БИС КН, а также чисто экономическими факторами — разработка субмикронной технологии требует вложения уже не сотен тысяч долларов, а сотен миллионов для уровня 90 нм и достигает нескольких миллиардов долларов для уровня 45 нм и менее.

К сожалению, на основании подобной дезинформации были приняты и определенные решения лидерами отечественной ракетно-технической отрасли, ответственными за принятие решений в области использования ЭКБ для космического аппаратостроения.

Поэтому в данной главе детально рассмотрены конкретные особенности и физические механизмы воздействия радиации на субмикронные БИС (КМОП, биполярные, цифровые, аналоговые, схемы памяти), а также представлены основные методы обеспечения их радиационной стойкости, включая рекомендации по составу тестовых приборов, элементов для экспериментальных исследований влияния радиационных воздействий на характеристики кремниевых микросхем, рекомендации по используемому оборудованию и методикам облучения образцов, методикам их измерений после радиационной обработки.

Достоинством материалов этой главы является то, что в отличие от различного рода утверждений о «стойкости» или «нестойкости» базовых конструкций субмикронной БИС в десяти параграфах главы представлены конкретные результаты экспериментальных исследований (преимущественно отечественных, в том числе авторских, а также авторитетных зарубежных исследователей) о воздействии разного рода излучений на характеристики различных микроэлектронных приборов.

Так, представлены обобщенные результаты экспериментальных исследований воздействия гамма-излучения на параметры субмикронных МОП-транзисторов, МОП-конденсаторов, ячеек памяти на МОП-транзисторах, логических МОП ИМС, КМОП ОЗУ, ПЗУ, БиКМОП БИС, МОП/КНИ структур и БИС ОЗУ на их основе.

Принимая во внимание объективные технические и финансовые проблемы разработчиков РЭА КН в отношении возможности проведения натурных испытаний (полигон в Семипалатинске во времена СССР эти проблемы закрывал), в последнем параграфе этой главы приводятся описания особенностей применения и физические обоснования целесообразности применения адекватных имитационных методов исследований радиационных эффектов и методов прогнозирования на их основе радиационной стойкости КМОП и БиКМОП-микросхем.

Здесь же представлены конкретные и только апробированные в отечественной и зарубежной практике методы повышения устойчивости различных классов БИС к воздействию факторов проникающей радиации (гамма, альфа, бета излучениям, тяжелым заряженным частицам, протонам, нейтронам и другим видам ионизирующих излучений). Детально описаны методики облучения, методики измерений электрических параметров тестовых структур и образцов типовых представителей основных классов ИМС, состав и особенности используемого при этом оборудования, технической оснастки и специальных программных обеспечений.

Следующая, *восьмая глава* целиком посвящена описанию апробированных расчетно-экспериментальных методов прогнозирования и расчета уровней радиационной стойкости как биполярных (цифровых, логических и аналоговых), так и стандартных КМОП интегральных микросхем.

Здесь же рассмотрены основные конструктивно-технологические и схемотехнические методы повышения радиационной стойкости КМОП и БиКМОП-микросхем.

Девятая глава целиком посвящена конкретным аспектам проектирования микросхем космического применения на основе наиболее быстро развивающегося направления радиационно-стойких ИМС – КНС и КНИ – структур.

Данная глава претендует на фундаментальный характер анализа уровня развития этого направления развития микроэлектронных технологий, поскольку содержит достаточно объемную теоретическую часть (анализ особенностей дефектообразования в кремнии (и поликремнии) вследствие облучения импульсами гамма-квантов, описание самих радиационных дефектов, их комплексов и кластеров, описание физических механизмов влияния радиации на проводимость диэлектрических слоев, свойства границы Si/SiO₂ и др.

Приводится сравнение радиационных свойств КНИ ИМС изготовленных различными технологическими способами, анализируются пути повышения стабильности и надежности структур с различными диэлектрическими слоями.

Несомненным достоинством главы, с точки зрения авторов, является детальное описание физических явлений и процессов, происходящих в КНИ БИС в условиях воздействия на них различных ионизирующих излучений (единичные сбои, единичная «зашелка», единичное «выгорание», единичный пробой затвора, единичное восстановление эффекта так называемой «однотранзисторной» зашелки), а также эффектов воздействия импульсного излучения и эффектов «полной дозы».

Все вышеизложенные выводы и рекомендации подтверждаются изложением результатов конкретных экспериментальных исследований образцов, приведен состав соответствующих тестовых элементов и получены экспериментальные результаты для всех базовых элементов БИС (транзисторы различных конфигураций, резисторы, диоды, конденсаторы).

В заключение приведены наиболее широко используемые конструктивно-технологические и конструктивно-схемотехнические методы повышения стойкости КНИ ИМС, в том числе путем стабилизации заряда в «скрытом» диэлектрике КНИ-структур (путем дополнительной имплантации ионов водорода, путем имплантации фтора), а также особенности формирования в КНИ-структурах МОП-транзисторов с «кольцевыми» затворами, коротко-канальных КНИ МОП-транзисторов и самосовмещенных КНИ МОП-транзисторов с «кольцевым» затвором.

Отдельный параграф главы посвящен сводному анализу конструктивно-технологических методов повышения устойчивости КНИ-структур к воздействию факторов открытого космического пространства, предложенных в открытых патентах США.

Также в отдельный параграф выделены вопросы повышения стойкости КНС и КНИ БИС ОЗУ к воздействию наиболее «опасного» – импульсного ионизирующего излучения (анализ основных радиационных дефектов, приводящих к сбоям в работе базовых элементов и микросхем, описание методик и аппаратных реализаций радиационного эксперимента, ионизационные эффекты в полупроводниковых слоях КНС и КНИ-структур, анализ процесса ионизационной реакции КНС МОП-транзисторов и импульсное ионизирующее излучение, локальные ионизационные эффекты в диэлектрических областях КМОП КНС БИС ЗУ и др.)

Не менее фундаментальной с точки зрения содержания материала является *десятая глава*, посвященная анализу общих проблем проектирования субмикрон-



ных БИС КН и электронных блоков ИС на их основе. Структура главы состоит из шести разделов, содержащих в свою очередь 33 подраздела, каждый из которых независимо от представленного объема материала одинаково важен для использования в процессе проектирования субмикронных БИС КН.

Использование субмикронной технологии (с технологическими нормами 90 нм и менее) ставит новые проблемы при проектировании как цифровых, так и аналоговых КМОП БИС. Некоторые из этих проблем ранее вообще не встречались, тогда как другие существовали и ранее, но сегодня приобрели более существенное значение.

При приближении от 90 нм к 65 нм и тем более к 45 нм перед проектировщиками встают новые проблемы, обусловленные возрастающим влиянием электрических и физических эффектов, связанных с высокой плотностью межсоединений и высокой плотностью компоновки транзисторов (динамическое падение напряжения на переходных сопротивлениях, «антенные» эффекты и эффекты перекрестного взаимодействия, возрастание роли токов утечки, электромиграция и многие другие).

Рассмотрены современные тенденции масштабирования, возникающие при этом проблемы и пути их решения.

Одной из основных проблем является рост величины потребляемой кристаллом как статической, так и динамической мощности, обусловленной токами утечки. Даны рекомендации, как возможно на этапе проектирования управлять оптимальным распределением рассеиваемой мощности по площади кристалла.

Детально проанализированы все основные виды токов, протекающих в активной и пассивной структурах транзистора (подпороговые токи утечки, туннельные токи затвора, ток выключения, токи переходов и др.), причины их возникновения, выражения для расчета их численных значений.

Особое внимание уделено проблеме расчета и управления величиной динамической мощности в структуре типового субмикронного кремниевого МОП-транзистора (использование схмотехники блоков с заданной величиной задержки переключения, корректный учет задержек распространения сигналов на межсоединениях и переходных сопротивлениях межуровневых контактов, способы снижения уровня потребляемой в процессе переключения мощности, методы библиотечной оптимизации и др.).

В заключительных параграфах главы рассмотрены еще две актуальные для инженеров-разработчиков проблемы – влияние температуры на характеристики МОП-транзисторов, изготовленных по технологии глубокого субмикрона (температурные зависимости подпороговых токов утечки, туннельного тока затвора, входного и выходного токов, токов переходов), а также влияние разбросов (флуктуаций) технологических параметров на основные электрические параметры субмикронных МОП-транзисторов. Связанное с технологией изготовления отклонение электрических параметров базовых транзисторов всегда было серьезной проблемой для разработчиков – схмотехников и инженеров-технологов. На техническом сленге это явление известно как Yield Killer (убийца выхода годных).

Неожиданно для самих исследователей этой проблемы выяснилось, что для субмикронной технологии эффект Yield Killer оказывает действительно «убий-

ственное» влияние на основные рабочие характеристики МОП-транзисторов, и чем меньше проектная норма, тем сложнее с ним бороться.

Здесь показано, что флуктуации (случайный разброс) технологических параметров в зависимости от их природы можно разделить на «глобальные» и «локальные». Если «глобальные» флуктуации оказывают влияние на все идентичные компоненты (пластины в реакторе подвергаются неравномерному нагреву в зависимости от места их расположения), то «локальные» влияют не только на конкретную пластину, но даже на единичный кристалл (неравномерный нагрев пластины в центре и на периферии в процессе высокотемпературного окисления и др.).

Поэтому особое внимание уделено влиянию этих технологических флуктуаций на величину токов утечки. В частности, показано, что подпороговый ток I_{sub} (разброс значений которого дополнительно обусловлен флуктуацией дозы легирования, толщины подзатворного окисла, длин каналов) экспоненциально зависит от важнейших параметров транзистора – пороговых напряжений и туннельного тока затвора, причем эта зависимость носит ярко выраженный нелинейный характер даже в случае незначительного увеличения разброса технологических параметров.

В завершении главы сформулированы конкретные рекомендации по снижению токов утечки в МОП-транзисторах, изготовленных по субмикронным технологиям, перечислены основные ограничения, связанные с уменьшением их линейных размеров, даны конкретные рекомендации по методам минимизации токов утечки при проектировании микросхем как на системном (архитектурном), так и на логическом и схемотехническом уровнях реализации проекта.

Глава 11 посвящена особенностям проектирования систем на кристалле (СНК) и систем в корпусе (СВК), предназначенных для использования в бортовой РЭА КН, а также в системах вооружения и военной техники.

По определению СВК представляет собой объединение нескольких различных кристаллов цифровой логики, памяти, интерфейсных компонентов, пассивных компонентов, фильтров, антенн в одном стандартном (или специально разработанном) металлокерамическом или другом специальном корпусе.

Рассмотрены конкретные особенности проектирования СВК и СНК, приведено сравнение их основных параметров и соответственно процессов их разработки. Так, например, показано, что стоимость реализации типового СНК проекта в 7–10 раз больше, чем СВК, если время реализации СВК занимает от 6 до 9 месяцев, то процесс создания СНК – от 18 до 36 месяцев, причем если для создания СВК требуется практически стандартный коллектив разработчиков, то для СНК нужен уже численно больший специально подготовленный коллектив высококвалифицированных инженеров, при этом отладка прототипа СВК занимает всего 1–2 месяца против 12–20 месяцев для СНК.

Отдельно рассмотрены особенности проектирования высокочастотных (RF) модулей в составе СВК. Так, параметризованные ячейки (p-cells) для пассивных устройств RF являются уже стандартным библиотечным компонентом в поставленных на рынок средств САПР, но они не предусматривают обычно учет влияния характеристик выбранного проектировщиком конкретного типа корпуса. Опять же, на эскизном этапе проекта разработчик самостоятельно должен принимать ряд нестандартных решений (например, стоит ли помещать требуемую

индуктивность на кристалл, где она занимает много полезной площади, или целесообразно разместить ее на подложке, плате, элементе корпуса).

В рамках отдельного параграфа рассмотрены некоторые дополнительные особенности технологий глубокого субмикрона, которые также необходимо учитывать в процессе проектирования специализированных микросхем для СНК и СВК. В частности, это касается учета влияния дестабилизирующих факторов на быстроедействие цифровых микросхем с помощью средств САПР. Так, для проектов с использованием технологических норм больше 0,25 мкм, включающих до миллиона вентиляей, можно не учитывать влияние технологических флуктуаций и импульсных помех на выходные параметры цифровых микросхем. Однако уже для 0,18 мкм отклонения реальных значений динамических параметров от расчетных весьма существенны. Максимальные значения импульсных помех в цепях питания могут достигать десятков процентов, причем наибольшую амплитуду имеют составляющие с частотами от 30 до 300 МГц (а именно это частоты обычно используются для внутренней синхронизации кристаллов).

Показано, что если для 0,25 мкм проектных норм при расчете динамических параметров обычно достаточно учитывать только емкости проводников межсоединений, то при 0,18 мкм необходимо учитывать уже и омические сопротивления линий связи, а при нормах 90 нм — еще и индуктивности, паразитные резисторы, что в итоге многократно увеличивает время расчетов.

Детально проанализированы особенности проектирования топологии кристаллов, предназначенных для использования в СНК и СВК, приведены конкретные рекомендации по минимизации последствий работы различных паразитных эффектов. Например, для исключения «антенного» эффекта (в процессе плазменного травления и полировок на проводниках накапливается статический заряд, который может вызвать пробой МОП-транзистора) рекомендуется вводить специальные ограничения на величину максимальной площади внутренней металлизации соединительных шин. Для выравнивания плотности токов в проводниках и уменьшения возникающих после химико-механической полировки термомеханических повреждений рекомендовано использовать «фиктивные» элементы — фиктивные проводники в широких диэлектрических зазорах, фиктивные диэлектрические зазоры рядом с «широкими» проводниками.

Последующие пять глав посвящены обобщению и анализу результатов исследований преимущественно отечественных ученых и специалистов в области защиты бортовой аппаратуры космических летательных аппаратов и используемой ЭКБ КН от различного рода деструктивных факторов открытого космического пространства. Если проблемы воздействия радиации и методы повышения радиационной стойкости ЭКБ достаточно подробно рассматривались в ряде предшествующих глав, то нижеследующие главы посвящены в основном конкретным проблемам защиты бортовой аппаратуры и ЭКБ от влияния электромагнитного излучения и высокоскоростных потоков микрочастиц, или в более общем виде — защиты от воздействия импульсных высокоэнергетических потоков вещества и излучений.

Известно, что в космическом пространстве находится большое количество космического мусора, микрометеоритов, «сгустков» микрочастиц так называемой «космической пыли» и других объектов микро- и макроуровня. Например, плотность

этой космической пыли в околоземном пространстве составляет $3 \cdot 10^{-29}$ кг/м³ (на Землю оседает примерно 400 тонн пыли в сутки).

Космическая пыль образуется частицами диаметром от нескольких микрон до одного миллиметра (основная масса имеет размеры от 1 до 100 мкм), отдельные из которых движутся со скоростями от 1 до 10 тыс. км/с.

Долгое время соударения таких сгустков микрочастиц с металлическими конструкциями космических аппаратов рассматривались лишь с классической позиции эрозии внешней поверхности. Однако по мере накопления информации о причинах отказа бортовых систем и КА стало очевидно, что такой подход не соответствует реально протекающим в космосе процессам. В основе сложных процессов, происходящих при ударе частиц о корпус КА и отдельные элементы его конструкции, лежит механизм образования плазмы, которая может индуцировать в электронных устройствах значительные «наведенные» импульсные токи, нарушающие нормальную работу бортовых систем вплоть до их выхода из строя.

Поэтому задача защиты конструкций и отдельных элементов КА с длительным сроком существования, космических орбитальных и особенно межпланетных станций от воздействия потоков микрочастиц является весьма актуальной.

Глава 12 посвящена проблемам получения соответствующих специальных материалов для защиты микросхем и блоков бортовой аппаратуры от воздействия этих высокоскоростных потоков микрочастиц и несанкционированных электромагнитных излучений.

Детально рассмотрены физические механизмы и особенности взаимодействия этих потоков микрочастиц с физической преградой (корпус КА, корпус микросхемы), их влияние на изменение структуры и свойств материалов, подвергшихся такому воздействию. В частности, исследованы механизмы влияния границ раздела в многослойных материалах на проникающую способность микрочастиц, рассмотрены особенности получения специальных многослойных материалов, корпусов, предназначенных для защиты кристаллов микросхем от проникающего воздействия этих микрочастиц и электромагнитного излучения.

Остальные параграфы этой главы посвящены анализу известных радиопоглощающих материалов, в том числе и многослойных, применяемых для защиты от электромагнитного излучения, а также анализу физических механизмов процессов поглощения и отражения электромагнитного излучения многослойными материалами.

Глава 13 посвящена описанию конкретных методик и типов оборудования, используемого для проведения экспериментальных исследований процессов взаимодействия высокоскоростных потоков микрочастиц с различными материалами.

В первом параграфе обоснован выбор в качестве основных материалов для исследований порошков SiC и Al₂O₃ с размером 50–100 мкм, а в качестве объектов исследований, применяемых в бортовой аппаратуре и требующих защиты, использовались микросхемы в металлокерамическом и пластмассовом корпусах (они же выполняли роль тестовых объектов и детекторов). Представлено описание методик выбора матричных материалов и наполнителей, которые воспринимали основную долю нагрузки в композиционных материалах.

Подробно рассмотрены комплексная методика и оборудование для испытаний. В частности, для разгона частиц до скоростей 1–3 км/с применялись специ-

альные взрывные ускорители, основанные на кумуляции энергии взрывчатых веществ (насыпной аммоний марки 6ЖВ).

При разработке методик измерений электромагнитного излучения, возникающего при взаимодействии микрочастиц с преградой, для количественной оценки магнитодинамических процессов использовался эффект Холла.

В основе методик измерения и регистрации ионизирующих излучений, возникающих при высокоскоростном соударении частиц космической пыли с защитными элементами КА, использовалась в качестве основного материала рентгеновская пленка с чувствительностью 850 P^{-1} по критерию 0,85 под вуалью.

Представленная в главе методика исследования структуры и свойств материалов после воздействия на них высокоскоростного потока микрочастиц базируются на использовании стандартного комплекта оборудования для проведения металлографического анализа, сканирующей электронной микроскопии, рентгеноспектрального микроанализа, а также оборудования просвечивающей электронной микроскопии.

Детально рассмотрены результаты рентгеноструктурного анализа происходящих деформационных процессов, описана детализированная методика и особенности измерения основных электрофизических параметров как самих испытываемых микросхем, так и вышеперечисленных композиционных материалов.

В главе 14 представлены экспериментальные результаты исследования влияния воздействия высокоскоростных потоков микрочастиц на механические и электрофизические свойства защитных материалов, детализированные методики проведения которых были рассмотрены в предыдущей главе. Результаты экспериментальных исследований представлены в виде таблиц, графиков, фотографий, сопровождаемых соответствующими описаниям, комментариями.

Необходимость такого представления материала обусловлена тем фактом, что, к сожалению, до сих пор наличие вышеописанного механизма влияния воздействия микроразмерных частиц «космической пыли» на материалы и приборы вызывает неординарную реакцию экспертов и иногда подвергается сомнению. Используя методики, перечень оборудования, указанный в предыдущей главе, любой исследователь может повторить эксперименты и убедиться в существовании эффекта, чтобы в последующем направить свои изыскания на поиск путей и способов защиты от его последствий.

Например, при исследовании электромагнитных излучений были зарегистрированы спектры излучения амплитудой от 100 мВ до 1,5 В при длительности импульса $(5-12) \cdot 10^{-6}$ с на расстоянии всего 15 см от эпицентра взрыва. В момент взрывов продукты сдетонировавших взрывчатых веществ представляли собой смесь газообразных и конденсированных веществ при давлении 20–40 ГПа и температуре 3000–5000 К, а ведь подобные состояния, как известно, типичны для низкотемпературной неидеальной многокомпонентной и многообразной плазмы с низкой концентрацией заряженных частиц, которые также участвуют в формировании деструктивного для физической преграды потока.

Представлены фотографии видов отдельных дефектов и треков, наблюдаемые также на поверхностях исследуемых кремниевых пластин и кристаллов при скоростях потока частиц в диапазоне 1,2–1,5 км/с.

Отдельный параграф посвящен теоретическим и практическим особенностям проведения моделирования процессов создания потоков таких микрочастиц и их взаимодействию с корпусами КА и отдельных микросхем.

Показано, что основные повреждения в микросхемах — «механические» повреждения в виде разрывов и сколов (в местах проволочных соединений, металлизированных шин питания, контактных площадок), а также впервые зафиксированные оригинальные дефекты — в местах повреждения наблюдаются зоны локально разогрева высокой интенсивности, которые в ряде случаев приводят возникновению и росту в этих местах новых кристаллических образований из полупроводникового материала поврежденного кристалла (представлен ряд фотографий).

Длительное время исследователям не удавалось определить численные характеристики энергии генерации электромагнитного поля и потоков высокоэнергетических ионов, необходимой для выброса струй плотной плазмы из объема преграды, поскольку длительность процесса не превышает 10^{-3} с, а в рамках теории обычного «классического» механического удара, как известно, не возникает источник дополнительной энергии. Поэтому в последнем параграфе главы детально рассмотрены особенности процесса генерации такого электромагнитного поля, суть которого можно кратко описать следующим образом — на первой стадии развития процесса электромагнитное поле формируется при движении частиц внутри твердого тела, при котором имеет место «классический» механизм трения — с потерей массы и возникновением в материале электрически заряженных частиц. Движение миллионов этих частиц инициирует возникновение соответствующих электромагнитных полей. Пульсация внутри таких «солитонов» высокого давления приводит к эквивалентному физическому эффекту пульсаций плотной плазмы внутри преграды, а уже сопутствующие ударно-волновые процессы перемещают в металлах обобществленные электроны.

Глава 15 посвящена анализу качественных и количественных изменений структуры и свойств одно- и многослойных защитных материалов при воздействии на них высокоскоростных потоков микрочастиц. Представлены результаты анализа таких изменений в структурах однослойных материалов (металлов, полимерных материалов). Вначале рассмотрены изменения вольт-амперных характеристик стандартных («незащищенных») микросхем серийного производства, а затем представлены и проанализированы соответствующие изменения вольт-амперных характеристик микросхем, конструктивно оформленных в корпусах из «защитного» многослойного материала.

Поскольку в конструкциях КА широко применяются такие материалы, как алюминий, титан и их сплавы, приведены результаты исследований воздействия частиц SiC на микроструктуру образцов из алюминия.

В главе 16 более детально рассмотрены конкретные особенности и последовательность операций технологического процесса изготовления многослойных защитных материалов для корпусов микросхем КН, устойчивых к эффекту сверхглубокого проникновения высокоскоростных микрочастиц.

Сформированы основные требования к таким материалам, описаны основные этапы технологического процесса получения многослойных материалов для

корпусов ИМС. Описаны особенности влияния размера частиц наполнителя на свойства материалов, особенности формирования макро- и микроструктуры этих многослойных материалов, представлены конкретные данные о механических и электрофизических свойствах материалов и экранирующих свойствах многослойных корпусов.

В главе 17 рассмотрены основные методы отбраковки в серийном производстве микросхем со скрытыми дефектами. Представленные методы позволяют разработчикам электронных устройств повышать надежность, в случае невозможности получения требуемых типономиналов иностранной ЭКБ категории Space или Industry использовать для комплектации прототипа устройства отечественные микросхемы двойного или специального назначения, но прошедших комплекс дополнительных испытаний в соответствии с рассмотренными методами. Это относится к использованию специальных статистических подходов (коэффициенты чувствительности выходных параметров, границы области работоспособности), моделей математической обработки результатов форсированных испытаний, определению потенциально ненадежных микросхем с использованием принудительного электростатического разряда, специальных режимов процедуры термотренировки, специальных критериев отбраковки по величине динамического напряжения и др.

В главе 18 рассмотрен типовой состав библиотек дизайн-китов (Process Design Kits (PDK) и особенности их применения при проектировании микросхем с субмикронными проектными нормами. Рассмотрены структура стандартного PDK и процесс разработки нового (в случае такой необходимости). При проектировании субмикронных ИМС важной особенностью является необходимость учета и глубокого анализа особенностей используемого технологического процесса при проведении компьютерного моделирования проектируемой ИМС.

Описаны необходимые правила стандартизации PDK, порядок и особенности проектирования смешанных аналогово-цифровых микросхем, приведены описание информационной модели их проектирования, а также способы определения состава библиотек проектирования и перечня элементов, требующие стандартизация.

Основной раздел главы посвящен детальному описанию важных для практического применения особенностей цифровых библиотек проектирования заказных ИМС с субмикронными и «глубокосубмикронными» технологическими номами.

Изложение материала сопровождается анализом конкретных демонстрационных примеров (модели источников тока, схемы сдвига уровня, управления питанием, библиотеки схем ввода-вывода и т.п.).

В конце главы приводится описание открытого учебного (Educational Design Kit) PDK компании SYNOPSYS, а также состав учебных PDK, представляемых известным международным центром микроэлектроники IMEC.

Глава 19 посвящена «некремниевой» микроэлектронике — арсениду галлия, нитриду галлия. В силу ограниченного объема книги здесь в рамках одной главы приведена основная информация о свойствах этих полупроводниковых материалов, приведены основные особенности технологии и конструкции современных

высокочастотных транзисторов и микросхем на их основе. Рассмотрены основные сферы применения СВЧ ИМС, в том числе для построения фазированных антенных решеток. Дан краткий обзор отечественных предприятий и их достижений в области СВЧ-техники.

Последняя глава – *глава 20* носит в определенной степени полемический характер. Она в основном предназначена не техническим специалистам (хотя будет, безусловно, интересна и им), а менеджерам, руководителям предприятий космической и оборонной промышленности, руководителям федеральных и государственных органов, имеющих отношение к разработке и реализации государственной и ведомственной политики в отношении вышеуказанных отраслей.

В этой главе изложены результаты исследований авторами возможных путей решения острой проблемы обеспечения этих приоритетных для государства отраслей ЭКБ с гарантированной надежностью и в требуемых для поступательного развития объемах.

В начале главы авторы на конкретном примере из собственного опыта попытались развеять активно обсуждаемый современными средствами массовой информации миф о недееспособности отечественных разработчиков РЭА КН.

В качестве этого примера изложена история создания РЛС ФАР «Волга», где секретным решением ЦК КПСС и Правительства СССР предписывалось создать станцию на основе собственных оригинальных алгоритмов обработки информации и только с использованием отечественной ЭКБ. Тогда специалисты НИИ ДАР совместно с НИИ ЦЭВТ (г. Москва) разработали алгоритмы и технические задания на ЭКБ, для реализации которых в этот момент в СССР не было даже соответствующей интегральной технологии. Но поскольку было принято политическое решение, их новые технологии и новые, не имеющие зарубежных аналогов, микросхемы были разработаны и освоены в серийном производстве НПО «Интеграл» (параллельно решена задача унификации – вместо 200 ИМС все функции были реализованы на 7-ми ИМС).

Проведен анализ возможных источников стабильного получения современной ЭКБ для космических и военных применений – отечественные, США, Европа и Китай. В результате простого статистического анализа показано, что в настоящее время и в ближайшем будущем отечественная полупроводниковая промышленность не в состоянии удовлетворить в требуемом объеме как текущие, так и возрастающие перспективные потребности РКП и СВ и ВТ в ЭКБ, а поставка иностранной ЭКБ из США и Европы будет проблематичной как по ряду чисто технических вопросов, так и по соображениям геополитического характера. В этой связи в рамках отдельного параграфа представлены в сжатом виде результаты анализа состояния и динамики государственных инвестиций, производственных возможностей и ресурсов разрабатывающих дизайн-центров Китая, который, по мнению авторов, должен стать в ближайшей и среднесрочной перспективе стратегическим партнером России в области совместного производства и поставок ЭКБ для приоритетных отраслей отечественной промышленности – по объемам ежегодных финансовых инвестиций и по их нарастающей динамике, по количеству крупных серийных производственных линий полупроводниковых фабрик (в Китае – больше 170, в СНГ только три – «Микрон» и «Ангстрем» в Зеленограде и «ИНТЕГРАЛ» в Минске), по

количеству разрабатывающих дизайн-центров (в РФ — больше 30-ти, в КНР — более 370-ти). Сравнение не в пользу отечественной полупроводниковой отрасли. В области освоения космоса Китай проходил в анализируемый период времени все этапы быстрее РФ — то, на что в СССР (РФ) уходило 4-5 лет, Китай преодолевал за год-полтора, а его последние разработки КА уже далеко не копии советских (российских) КА.

Частота отказов и аварий китайских КА почти в два раза меньше отечественных и имеет стойкую тенденцию к снижению, чего нельзя сказать в отношении российских запусков.

20 лет назад США полностью запретили поставки ЭКБ КН в Китай (в отличие от РФ), что послужило стимулом развития оригинальной китайской ЭКБ КН, у которой пока еще много проблемных вопросов, о которых говорится в одном из параграфов этой главы.

В качестве альтернативы закупкам ЭКБ с Запада в этой главе читателю предлагается обсудить два варианта (кроме стратегического альянса с китайской полупроводниковой промышленностью).

Первый вариант — «лобовое решение» — создание в России специализированного (только под задачи РКП и ОПК) научно-производственного полупроводникового кластера в составе крупного интегрирующего центра системного проектирования и двух полупроводниковых фабрик — кремниевой и арсенид-галлиевой (включая опции «нитрид-галлия»).

Второй вариант — создание целой сети небольших мелкосерийных кластеров на основе методов бесшаблонной литографии, которые будут располагаться непосредственно на предприятиях-разработчиках РЭА стратегического назначения, обеспечивая независимость отрасли от поставок иностранной (в перспективе — и китайской) ЭКБ. Включая материалы главы в эту книгу, авторы преследовали только одну цель — активизировать полемику в среде технических специалистов, экспертов, руководителей профильных предприятий РКП и ОПК, чиновников соответствующих министерств, ведомств по поиску путей обеспечения приоритетных отраслей промышленности и оборонного комплекса качественной, надежной и сложнофункциональной ЭКБ.

Перечень условных обозначений

АЛУ –	арифметико-логическое устройство
АФТ –	алгоритмические функциональные тесты
БАКА –	бортовая аппаратура космических аппаратов
БиКМОП БИС –	большая интегральная схема на основе биполярных транзисторов и комплементарных МОП-транзисторов
БИС –	большая интегральная схема
БЛЭ –	базовый логический элемент
БПС –	быстрые поверхностные состояния
БПФ –	быстрое преобразование Фурье
БЦВМ –	бортовая цифровая вычислительная машина
БЭ –	базовые элементы
ВАХ –	вольт-амперная характеристика
ВПР –	время потери работоспособности
ВФХ –	вольт-фарадная характеристика
ДЗЗ –	дистанционное зондирование Земли
ДМ –	диэлектрик-металл
ДП –	диэлектрик-полупроводник
ДЦ –	дизайн-центр
ЗУ –	запоминающее устройство
ИИ –	ионизирующее излучение
ИИИ –	импульсное ионизирующее излучение
И2Л –	интегральная инжекционная логика
ИКН –	интегральные компараторы напряжений
ИМС –	интегральная микросхема
ИОУ –	интегральные операционные усилители
ИСЗ –	искусственный спутник Земли
КА –	космический аппарат
КЛА –	космический летательный аппарат
КМОП ИМС –	интегральная микросхема на комплементарных МОП-транзисторах
КН –	компараторы напряжений
КНИ –	«кремний-на-изоляторе»
КНС –	«кремний-на-сапфире»
КО –	катастрофические отказы
ЛЭ –	логический элемент
МДП –	металл-диэлектрик-полупроводник
МКС –	межпланетная космическая станция
МНОП –	металл-нитрид-окисел-полупроводник
МОП –	металл-окисел-полупроводник
МОПТ –	МОП-транзистор
ННЗ –	неосновные носители заряда
НПО –	научно-производственное объединение
НТЦ –	научно-технический центр

ОЗУ –	оперативное запоминающее устройство
ОУ –	операционные усилители
ПЗС –	микросхема на основе использования поверхностных зарядовых состояний
ПЗУ –	постоянное запоминающее устройство
ППЗУ –	постоянное программируемое ЗУ
ПС –	поверхностные состояния
РД –	радиационные дефекты
РН –	ракета-носитель
РПЗУ –	репрограммируемое ПЗУ
РС –	радиационная стойкость
РЭА –	радиоэлектронная аппаратура
СА –	спускаемый аппарат
СБИС –	сверхбольшая интегральная схема
СВВФ –	специальные внешние воздействующие факторы
СЖР –	сверхжесткое рентгеновское (излучение)
СИИ –	стационарное ионизирующее излучение
СН –	стабилизаторы напряжения
СОЗУ –	статическое оперативное запоминающее устройство
ТКН –	температурный коэффициент напряжения
ТНЧ –	тяжелые незаряженные частицы
ТТЛ –	транзисторно-транзисторная логика
ТТЛШ –	транзисторно-транзисторная логика с диодами Шоттки
ТУ –	технические условия
ТЭ –	тиристорный эффект
УБР –	уровень бессбойной работы
УСИ –	уровень сохранности информации
УФО –	уровень функционального отказа
ФК –	функциональный контроль
ЭЗ –	элементы защиты
ЭКБ –	элементно-компонентная база
ЭМИ –	электромагнитное излучение
ЭНПО –	экспериментальное научно-производственное объединение
ЭП –	элементы памяти
ЭС –	элементы согласования
ЭСЗ –	электростатический заряд
ЭСЛ –	эмиттерно-связанная логика
ЭСП –	эффект сверхглубокого проникновения
ЭСППЗУ –	электрически стираемое программируемое постоянное запоминающее устройство (EEPROM – Electrically Erasable Programmable Read Only Memory)
ЭСР –	электростатический заряд
ЭТТ –	электротермотренировка
ЯП –	ячейка памяти

ГЛАВА I

СОВРЕМЕННЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

1.1. Основные направления развития космической промышленности

В настоящее время космические технологии так широко вошли в современную жизнь человечества, что отказ от них отбросил бы развитие цивилизации далеко назад, поскольку только с использованием возможностей космической отрасли возможно решение задач развития как современного индустриального общества в целом, так и отдельного суверенного и индустриально развитого государства.

Главной целью государственной политики в области развития космической промышленности любой современной страны в конечном счете является выход этой страны на качественно новый уровень науки, технологий и промышленных возможностей. Прежде всего – это защита государственных, научных и экономических интересов страны в области космической деятельности; укрепление обороны и безопасности государства; укрепление кадрового потенциала промышленности; разработка современных и перспективных отечественных космических средств, приборов, стратегических материалов, средств связи и управления; накопление и совершенствование научных знаний о Земле, Вселенной и космическом пространстве, расширение международной космической кооперации в деле совместных научных исследований и освоения космоса и многое другое.

Говоря прагматичным языком, приобретение страной статуса космической державы должно принести конкретную пользу и материальную выгоду социально-экономическому развитию страны.

Кроме очевидных задач обеспечения обороны, национальной безопасности (космическая разведка, космическая связь и управление, системы раннего обнаружения пусков баллистических ракет) и технологической независимости только использование космических технологий может обеспечить государству решение многообразных народнохозяйственных и технических задач в следующих сферах:

- глобальная многоканальная связь;
- многопрограммные радио- и телевидение;
- высокоточная оперативная навигация всех транспортных и других объектов;
- достоверное метеорологическое обеспечение;
- оповещение о чрезвычайных ситуациях;
- экологический мониторинг;
- глобальное оперативное спасение;
- изучение природных ресурсов – дистанционный поиск полезных ископаемых;
- новейшие высокие технологии и материалы;
- расширение знаний о Вселенной;
- медико-биологические исследования.

Реализация наиболее насущных потребностей каждого государства в этих сферах в настоящее время осуществляется в рамках национальных космических программ, направленных на создание перспективной космической техники и технологий.

В то же время в мире наблюдается тенденция интеграции космических средств и технологий различных стран с целью обеспечения более эффективного использования выделяемых национальными бюджетами весьма значительных бюджетных финансовых средств, необходимых для развития КП, что позволяет ускорить развитие и совместное использование их космического потенциала в интересах решения социально-экономических, оборонных и научных задач, стоящих перед этими странами. Необходимость и актуальность такой интеграции средств и технологий подтверждается общими потребностями стран в:

- обеспечении потребителей недорогой качественной космической информацией дистанционного зондирования Земли, в том числе с использованием центров предоставления космических услуг;
- развитию международного сотрудничества в области создания и совместного использования космического потенциала;
- создании устойчивой кооперации предприятий и организаций по разработке перспективных космических средств и технологий, включая микро- и нанотехнологии.

В качестве примера практической реализации таких интеграционных процессов в научно-технологической и производственной сферах на постсоветском пространстве следует отметить успешную реализацию по космической тематике ряда совместных программ Союзного государства Российской Федерации и Республики Беларусь [1–3].

Первой стала запущенная в 1998 году программа «Разработка и использование космических средств и технологий получения, обработки и отображения космической информации» («Космос-БР»), одной из задач которой, помимо собственно реализации заданий программы, было восстановление разорванных с распадом СССР научно-производственных связей между предприятиями и организациями космической отрасли двух государств.

Продолжением «Космос-БР» стала вторая совместная программа «Разработка и исследование перспективных космических средств и технологий в интересах социально-экономического развития Союзного государства» на 2004–2007 годы («Космос-СГ»), в результате реализации которой белорусские и российские партнеры создали современный технический комплекс приемной космической информации системы дистанционного зондирования Земли, целый ряд современных технических и программных средств и технологии обработки и дешифровки космических снимков, мобильный образец контрольно-корректирующей станции для высокоточного определения координат и многое другое.

В 2011 году завершилась реализация третьей российско-белорусской программы «Разработка базовых элементов, технологий создания и применения орбитальных и наземных средств многофункциональной космической системы» на 2008–2011 годы («Космос-НТ»). В ее рамках были созданы более чем 25 экспериментальных образцов космических средств и 18 экспериментальных наукоемких технологий в интересах космической отрасли Беларуси и России.

Завершена также совместная программа «Разработка нанотехнологий создания материалов, устройств и систем космической техники и их адаптация к другим отраслям техники и массовому производству» на 2009–2012 годы («Нанотехнология-СТ»).

Актуальность полученных результатов обусловлена необходимостью повышения устойчивости космических средств к факторам космического пространства, потребностью в снижении их массогабаритных характеристик и удешевлении производства элементной базы для применения в космической, а также в других отраслях техники.

Необходимо в этой связи отметить только два важнейших направления дальнейшего российско-белорусского сотрудничества в сфере космических технологий и их применений.

Прежде всего, это разработка космических и наземных средств обеспечения потребителей России и Беларуси информацией дистанционного зондирования Земли, а также создание соответствующих центров предоставления космических услуг. Эта задача занимает наиболее важную роль в интеграции космических средств и технологий России и Беларуси. В ходе ее реализации будут обеспечены возможности получения доступной и качественной космической информации широким кругом потребителей, создание средств, технологий и программных комплексов в интересах повышения надежности, работоспособности и живучести космических средств дистанционного зондирования Земли.

Второе направление относится к совместной разработке комплексных технологий создания материалов, устройств и ключевых элементов космических средств, целью которого является достижение существенного снижения массы и габаритов КА, а также повышение надежности и сроков функционирования элементов, устройств и систем ракетно-космической техники, сокращение затрат на их разработку и эксплуатацию.

В частности, это позволит создать и освоить в космической промышленности комплексные технологии создания широкой номенклатуры элементов ракетно-космической техники с повышенными эксплуатационными характеристиками, в том числе:

- системы терморегулирования и электропитания;
- бортовые комплексы управления;
- широкую номенклатуру унифицированной ЭКБ КН;
- специальные узлы и элементы малогабаритных космических аппаратов;
- высоконадежные теплонапряженные узлы двигательных установок;
- наноэлектронные устройства сверхнизкого энергопотребления;
- функциональные наноструктурные сенсоры различного назначения и многое другое, что позволит повысить функциональные характеристики космических средств и их надежность в период ввода в строй и эксплуатации.

За последнее десятилетие в производстве российской ракетно-космической техники произошли существенные изменения. Резко сократился объем производства, ряд серийных изделий сняты с производства, одновременно идет процесс освоения новых высокотехнологичных изделий. При этом РКП в основном сохранила существовавшие ранее организационно-технологическую структуру пред-

приятый, парк технологического оборудования и оснащения, принципы технологической подготовки производства.

Государственная политика по развитию и технологической модернизации ракетно-космической промышленности России реализуется в соответствии со «Стратегией развития ракетно-космической промышленности на период до 2015 года» по следующим целевым программам [4, 5, 6]:

- Федеральная космическая программа России на 2006–2015 годы (ФКПР-2015);
- ФЦП «Глобальная навигационная система» на 2002–2011 годы (ФЦП «ГЛОНАСС»);
- ФЦП «Развитие оборонно-промышленного комплекса РФ на 2007–2010 годы и на период до 2015 года» (ФЦП «Развитие ОПК-2015»);
- ФЦП «Национальная технологическая база» на 2007–2011 годы, а также в проектах:
- ФЦП «Развитие инфраструктуры nanoиндустрии РФ» на 2007–2010 годы;
- ФЦП «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008–2015 годы.

Следует отметить, что успех любых космических, в том числе и военных программ напрямую зависит от номенклатуры, функциональных возможностей и качества элементной базы, составляющей основу любой современной аппаратуры как общего, так и специального назначения.

Космическая микроэлектроника как самостоятельное направление научно-технического процесса включает в себя целый комплекс взаимосвязанных направлений – от исследований свойств новых материалов и физических механизмов применения параметров микросхем в условиях их работы в космосе, до разработки новых технологий и методов проектирования микросхем, специальных методов повышения их помехоустойчивости, надежности, устойчивости к ионизирующим воздействиям, снижения статического и динамического энергопотребления при существенном возрастании как плотности упаковки кристаллов, так и их рабочих (тактовых) частот.

Приоритетными направлениями государственной политики РФ в этой области являются следующие.

1. **Создание космических комплексов и систем** нового поколения с техническими характеристиками, обеспечивающими их высокую конкурентоспособность на мировом рынке, в том числе:

- развитие современных средств выведения, модернизация действующих ракет-носителей и разработка новых ракет-носителей и разгонных блоков;
- создание ракеты-носителя среднего класса для выведения пилотируемого космического корабля нового поколения, космических спутников с увеличенным сроком активного существования;
- подготовка к реализации прорывных проектов в области космических технологий и исследований космического пространства.

2. **Завершение создания и развитие системы ГЛОНАСС**, в частности:

- развертывание спутниковой группировки на базе аппаратов нового поколения с длительным сроком активного существования (не менее 12 лет) и повышенными техническими характеристиками;

- создание наземного комплекса управления и создание оборудования для конечных пользователей, его продвижение на мировой рынок, обеспечение сопряженности аппаратуры ГЛОНАСС и GPS.

3. **Развитие спутниковой группировки**, в том числе создание группировки спутников связи, обеспечивающих рост использования всех видов связи – фиксированной, подвижной, персональной (на всей территории Российской Федерации); создание группировки метеорологических спутников, способных передавать информацию в реальном масштабе времени.

В долгосрочной перспективе интересы поддержания высокой конкурентоспособности на рынке передачи информации потребуют качественного скачка в повышении интервала «конкурентного существования» спутников связи. Это может быть достигнуто только путем создания технологий производства «много-разовых» спутников связи, т.е. таких, которые будут изначально проектироваться и создаваться с возможностью их обслуживания, заправки ракетным топливом, ремонта и модернизации непосредственно на орбите. В итоге такого технологического развития планируется появление к 2025 году массивных орбитальных платформ, на которых будет размещаться различная целевая аппаратура и другое оборудование, в том числе энергетическое, допускающее обслуживание или замену.

4. **Расширение присутствия России на мировом космическом рынке**, в том числе:

- удержание лидирующих позиций на традиционных рынках космических услуг (коммерческие пуски – до 30%);
- расширение присутствия на рынке производства коммерческих космических аппаратов;
- расширение продвижения на внешние рынки отдельных компонент ракетно-космической техники и соответствующих технологий;
- выход на высокотехнологические сектора мирового рынка (производство наземной аппаратуры спутниковой связи и навигации, дистанционное зондирование земли);
- создание и модернизация системы российского сегмента международной космической станции (МКС).

5. **Модернизация наземной космической инфраструктуры и технологического уровня ракетно-космической промышленности**, в частности:

- техническое и технологическое перевооружение предприятий отрасли, внедрение новых технологий, оптимизация технологической структуры отрасли;
- развитие системы космодромов, оснащение новым оборудованием наземных средств управления, систем связи, экспериментальной и производственной базы ракетно-космической промышленности.

Государственной программой развития ракетно-космического комплекса РФ на период до 2025 г. предусмотрено первоочередное развитие следующих технологических направлений:

- космические системы навигации;
- космические системы ретрансляции информации;
- гидрометеорологические космические средства;
- космические средства дистанционного зондирования Земли;

- спутниковые системы связи и вещания;
- космические средства геодезического и картографического обеспечения;
- космические средства связи и боевого управления;
- космические средства предупреждения о ракетном нападении;
- космические средства радиоэлектронной разведки;
- космические комплексы оптикоэлектронного наблюдения;
- космические средства многоцелевого радиолокационного наблюдения;
- космические средства наблюдения за морскими акваториями.

Решение одной из основных проблем, оказывающих негативное влияние на реализацию программ развития отечественной ракетно-космической техники, ее обеспечение современной радиационно-стойкой электронной компонентной базой предусматривается за счет реализации (при координирующей роли Минпромторга России) мероприятий в рамках федеральной целевой программы по развитию радиоэлектронной промышленности.

Независимый доступ в космическое пространство предусматривается обеспечить за счет развития и использования космодрома «Плесецк», аренды космодрома «Байконур» и строительства нового отечественного космодрома «Восточный», создаваемого во исполнение Указа Президента Российской Федерации от 6 ноября 2007 г. «О космодроме «Восточный».

В результате реализации государственной программы должны быть:

- создан и принят в эксплуатацию космический ракетный комплекс «Ангара-А5», модернизированы объекты и обеспечена эффективная эксплуатация космодромов «Плесецк» и «Байконур»;
- созданы первая (2015 год) и вторая (2018 год) очереди объектов нового российского космодрома «Восточный»;
- развернута орбитальная группировка космических аппаратов в интересах удовлетворения государственных нужд в количестве: 95 космических аппаратов в 2015 году, 113 космических аппаратов в 2020 году, в том числе развернутый российский сегмент Международной космической станции в составе 6 модулей – в 2015 году, 7 модулей в 2018 году;
- обеспечен необходимый состав орбитальной группировки системы ГЛО-НАСС, обновленный космическими аппаратами «Глонасс-К» с расширенными функциональными возможностями. К 2015 году система будет обеспечивать точность определения местоположения потребителями порядка 1,4 м, а к 2020 году – около 0,6 м;
- создан научно-технический задел по перспективным образцам ракетно-космической техники, в том числе обеспечена в 2018 году готовность транспортно-энергетического модуля с перспективной двигательной установкой к летно-конструкторским испытаниям;
- разработаны новые конкурентоспособные производственные технологии, технологии спутниковой связи, дистанционного зондирования Земли, навигационного обеспечения, поиска и спасения терпящих бедствие, мониторинга чрезвычайных ситуаций, слежения и мониторинга подвижных объектов с использованием космической автоматической идентификационной системы и персональных радиобуев.

В области фундаментальных космических исследований будут реализованы проекты, которые позволят преодолеть сложившееся отставание от ведущих космических держав в этой области и обеспечить выход российской науки на ведущие позиции в основных направлениях наук о космосе, а в долгосрочной перспективе — стать одним из мировых лидеров в исследованиях Вселенной. В частности, планируется:

- создание трех космических обсерваторий — «Спектр-УФ», «Спектр-М» («Миллиметрон») и «Гамма-400» для проведения исследований астрофизических объектов в различных диапазонах электромагнитного спектра и гамма-излучения в диапазоне высоких энергий;
- развертывание программы по углубленному изучению Луны — осуществление миссий орбитального аппарата «Луна-Глоб», посадочных аппаратов «Луна-Ресурс» (этапы 1 и 2), а также миссии по доставке на Землю образцов лунного грунта для детального изучения;
- развитие целого класса новых технологий — технологий межпланетных полетов и напланетной деятельности человека;
- создание перспективной пилотируемой транспортной системы, способной обеспечить полеты человека к Луне.

К результатам государственной программы, способствующим расширению спектра предоставляемых услуг к 2020 году, относятся:

в части космических средств связи, вещания и ретрансляции —

- создание полномасштабной многофункциональной космической системы ретрансляции, что позволит повысить эффективность использования отечественных низкоорбитальных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, средств выведения и российского сегмента Международной космической станции;
- наращивание орбитальной группировки систем фиксированной связи, подвижной президентской связи и телерадиовещания космическими аппаратами нового поколения до 39 аппаратов, что позволит осуществлять предоставление указанных услуг связи практически на всей территории Российской Федерации, включая Арктический регион;

в части средств дистанционного зондирования Земли и гидрометеорологического наблюдения —

- увеличение до 24 космических аппаратов орбитальной группировки за счет развертывания принципиально новых космических систем, предназначенных для решения задач картографии, контроля состояния природной среды, оперативного мониторинга чрезвычайных ситуаций, инвентаризации природных ресурсов, обеспечения рационального ведения сельскохозяйственной, водной и других видов деятельности, мониторинга Арктического региона.

Успешное выполнение мероприятий государственной программы будет способствовать развитию и использованию отечественной космической техники в интересах социально-экономической сферы, расширению присутствия России на мировом космическом рынке, решению амбициозных задач исследования и освоения космического пространства, обеспечению гарантированного доступа Рос-

сии в космическое пространство со своей территории, сохранению ведущих позиций в пилотируемых полетах [7].

1.2. Классификация современных космических аппаратов

Космический аппарат (КА) — общее название технических устройств, используемых для выполнения разнообразных задач в космическом пространстве, а также проведения исследовательских и иного рода работ вблизи или на поверхности различных небесных тел. Средствами доставки космических аппаратов на орбиту служат ракеты-носители или ракетоносители (РН).

Космический аппарат, одной из основных задач которого является транспортировка людей или оборудования в верхней части земной атмосферы — так называемом ближнем космосе, называют космическим кораблем (КК) или космическим летательным аппаратом (КЛА).

В зависимости от областей использования КА подразделяются на:

- суборбитальные;
- околоземные орбитальные, движущиеся по геоцентрическим орбитам искусственных спутников Земли;
- межпланетные (экспедиционные);
- напланетные (луноходы, марсоходы и пр.).

Принято различать автоматические спутники (ИСЗ) Земли и пилотируемые космические аппараты. К пилотируемым космическим аппаратам, в частности, относят все виды пилотируемых космических кораблей (КК) и орбитальных космических станций (ОС). Несмотря на то, что современные орбитальные станции совершают свой полет в области ближнего космоса и формально могут называться космическими летательными аппаратами, в сложившейся традиции их называют космическими аппаратами.

Название «космический летательный аппарат» иногда также используется для обозначения активных (то есть маневрирующих) ИСЗ с целью подчеркивания их отличий от пассивных спутников. В большинстве же случаев значения терминов «Космический летательный аппарат» и «космический аппарат» синонимичны и взаимозаменяемы.

В активно исследуемых в последнее время проектах создания орбитально-гиперзвуковых летательных аппаратов как частей авиационно-космических систем (АКС) часто используют еще названия «воздушно-космический аппарат» (ВКА), обозначая *космоланы* и *космолеты* АКС, предназначенные для выполнения управляемого полета как в безвоздушном космическом пространстве, так и в плотной атмосфере Земли.

В то время как стран, имеющих ИСЗ, несколько десятков, наиболее сложные технологии автоматических возвращаемых и межпланетных КА освоили всего несколько стран — СССР/Россия, США, Китай, Япония, Индия, Европа/ESA. Пилотируемые КК имеют только первые три из них (кроме того, Япония и Европа имеют КА, посещаемые людьми на орбите, в виде модулей и грузовиков МКС).

Также только первые три из них имеют технологии перехвата ИСЗ на орбите (хотя Япония и Европа близки к ней ввиду проведения стыковок).

Еще типы КА различают в зависимости от их режимов работы, выполняемых функций, по наличию функции возвращения на Землю, в зависимости от их массы, по типу управления, по типу двигательной установки, для ближнего или дальнего космоса.

По *режиму работы* различают следующие типы космических аппаратов:

- искусственные спутники Земли – общее название всех аппаратов, находящихся на геоцентрической орбите (вращающихся вокруг Земли);
- автоматические межпланетные станции (или космические зонды) – аппараты, осуществляющие перелет между Землей и другими космическими телами Солнечной системы; при этом они могут как выходить на орбиту вокруг изучаемого тела, так и исследовать их с пролетных траекторий, некоторые аппараты после этого направляются за пределы Солнечной системы;
- космические корабли, автоматические или пилотируемые, используются для доставки грузов и человека на орбиту Земли; существуют планы полетов на орбиты других планет;
- орбитальные станции – аппараты, предназначенные для длительного пребывания и работы людей на орбите Земли;
- спускаемые аппараты – используются для доставки людей и материалов с орбиты вокруг планеты или межпланетной траектории на поверхность планеты;
- планетоходы – автоматические лабораторные комплексы или транспортные средства, для перемещения по поверхности планеты и другого небесного тела.

По наличию *функции возвращения* КА подразделяются на две группы:

- возвращаемые – предусматривают возвращения людей и материалов на Землю, осуществляя мягкую либо жесткую посадку;
- невозвращаемые – при выработке ресурса обычно сходят с орбиты и сгорают в атмосфере.

По *выполняемым функциям* выделяют следующие классы КА:

- метеорологические;
- навигационные;
- спутники связи, телевидения, телекоммуникационные спутники;
- научно-исследовательские;
- геофизические;
- геодезические;
- астрономические;
- дистанционного зондирования Земли;
- разведывательные и военные спутники;
- другие.

Следует отметить, что многие современные космические аппараты выполняют сразу несколько функций.

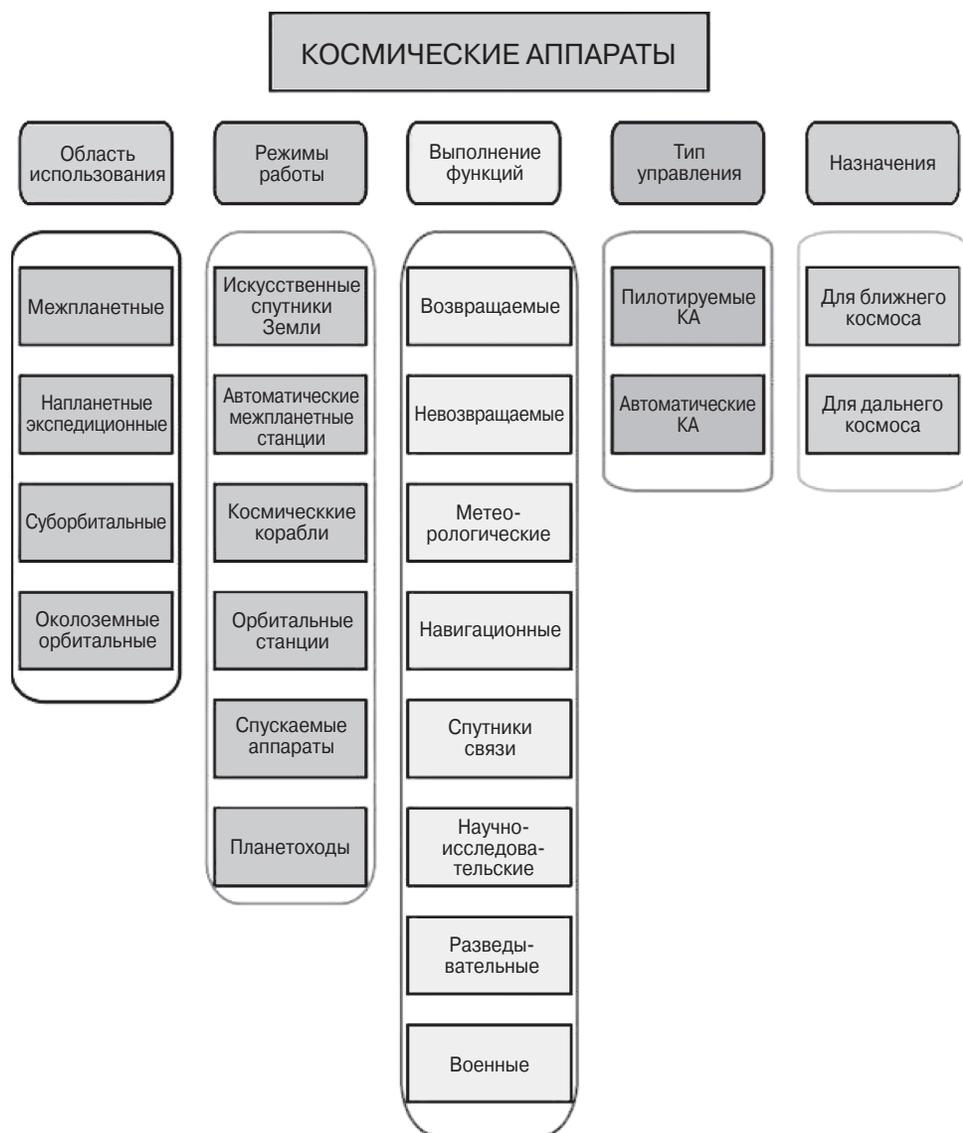


Рис 1.1. Классификация космических аппаратов

По *массовым характеристикам* КА принято классифицировать следующим образом:

- фемто- — до 100 г;
- пико- — до 1 кг;
- нано- — 1–10 кг;
- микро- — 10–100 кг;
- мини- — 100–500 кг;
- малые — 500–1000 кг;
- большие — более 1000 кг.

Следовательно, любой КА с весом больше 10 кг, но меньше 100 кг должен называться микроспутником, а КА с весом от 500 кг до одной тонны будет называться малым космическим аппаратом.

По типу управления КА разделяют на автоматические и пилотируемые. По типу используемых двигательных установок КА различают следующим образом:

КА с двигательными установками большой тяги, КУ с двигательными установками на ядерном топливе, КУ на двигательных установках на химическом (жидком или твердом) топливе.

Различают КА по областям использования – ближнего и дальнего космоса.

КА для ближнего космоса: околоземные КА (ИСЗ, обсерватории, обитаемые орбитальные станции). КА для дальнего космоса: межпланетные КА (спутники планет, десантные, пролетные).

1.3. Конструкции и устройство космических аппаратов

Первый в мире космический аппарат был запущен в СССР 4 октября 1957 г., первый пилотируемый космический аппарат-корабль «Восток-1» под управлением гражданина СССР Ю.А. Гагарина – 12 апреля 1961 г. За прошедшие почти семь десятилетий с момента первого космического старта (не считая двадцати предыдущих лет исследований и экспериментов) конструкции космических аппаратов (КА) непрерывно совершенствовались. Значительный вклад в эволюцию конструкций КА внесли так называемые «испытательные» космические аппараты, которые проектировались специально для проверки и отработки в реальных условиях космического полета элементов конструкции, систем, узлов, агрегатов и блоков, способов их оптимального применения, возможных путей их унификации.

Если в СССР в качестве автоматических испытательных КА широко использовались различные модификации КА практически только одной серии «Космос», то в США – целый ряд КА: «ATS», «GGTS», «0V», «Додж», «TTS», «SERT», «RW» и др.

Несмотря на большое многообразие конструкций КА, общим для всех устройств является наличие корпуса с набором различных конструктивных элементов (так называемое «обеспечивающее» оборудование) и специальная (целевая) радиоэлектронная аппаратура [7].

Корпус КА является конструктивно-компоновочной основой для установки и размещения всех его элементов и соответствующей аппаратуры. Например, для автоматического КА обеспечивающее оборудование предусматривает наличие как минимум следующих бортовых систем: ориентации и стабилизации, терморегулирования, энергопитания, телеметрии, траекторных измерений, управления и навигации, командно-программной, различных исполнительных органов и т.п.

На пилотируемых КА и космических станциях, кроме того, имеются системы жизнеобеспечения, аварийного спасения и т.п.

В свою очередь, целевая аппаратура КА может быть оптической (оптико-электронной), фотографической, телевизионной, инфракрасной, радиолокационной, радиотехнической, спектрометрической, рентгеновской, радиосвязи и ретранс-

ляции, радиотехнической, радиометрической, калориметрической и т.п. Более детально описание этих систем приведено в следующем параграфе, но отметим, что все эти системы (их структура, функции, конфигурация и т.п.), используют самую современную ЭКБ.

Естественно, конфигурации КА зависят от их назначения и уже поэтому значительно различаются – это ракеты-носители (РН), осуществляющие выведение КА на требуемые орбиты и траектории, разгонно-тормозные блоки КА, включающие маршевые и корректирующие двигатели, топливные отсеки, агрегаты и системы обслуживания (обеспечивают переход КА с низкой орбиты на более высокую или межпланетную, осуществляют обратные переходы – с высокой орбиты на низкую, коррекцию траекторных параметров и т.д.).

С конструкцией КА неразрывно связано понятие «компоновка» КА – наиболее рациональное и максимально плотное пространственное размещение составляющих элементов. При этом различают внутреннюю и внешнюю (аэродинамическую) компоновку КА [7].

Задача разработки конструкции конкретного КА является достаточно сложной, поскольку необходимо учитывать очень много факторов, зачастую противоречащих друг другу. Например, необходимо обеспечивать минимальное количество связей КА с наземным комплексом (особенно это касается РН), безопасность и комфортность экипажа (для пилотируемых КА), безопасную эксплуатацию и обслуживание на стартовой позиции и в полете, обеспечение заданных параметров устойчивости, управляемости, тепловых режимов и аэродинамических характеристик работы КА и многое другое [8, 9].

Задача конструкторов КА усложняется тем, что критерием оптимальности их решения является не только минимизация массы КА, но и его стоимости и сроков создания при гарантированном обеспечении параметров надежности, многофункциональности и др.

На нижеследующих рисунках представлена эволюция типовых конструкций различных КА.

Так, на рис. 1.2 представлен внешний вид первого космического аппарата Земли «Восток-1», поднявшего первого человека на околоземную орбиту.

Как известно, стартовавший с Байконура корабль выполнил всего лишь один (на зато первый в истории человечества) оборот вокруг планеты Земля, причем полет проходил полностью в автоматическом режиме, при котором первый космонавт Земли был как бы «пассажиром», готовым в любой момент переключить управление на себя. Хотя реально по нашей классификации это был не «пилотируемый» полет, а полет полностью в автоматическом режиме, но это как раз тот случай, когда классификация не всегда правильно отражает суть происходящего процесса (явления, события).

На рис. 1.3 представлен общий вид конструкции одного из первых (1977 г.) КА дальнего проникновения (так называемый «космический зонд») серии Voyager (наиболее известные КА – Voyager-1 и Voyager-2). По некоторым литературным источникам, этот 723-килограммовый автоматический зонд, запущенный 5 сентября 1977 г. и предназначенный для исследований Солнечной системы и ее ближайших окрестностей, к удивлению его создателей до сих пор находится в нор-

мальном рабочем состоянии и в связи с этим обстоятельством выполняет даже новую (дополнительную) миссию – по определению местонахождения границ Солнечной системы, включая «пояс Койпера» (Пояс астероидов), хотя по замыслу разработчиков его первоначальная основная миссия заключалась лишь в исследовании двух планет – Юпитера и Сатурна (он был первым зондом, сделавшим детальные снимки всех спутников этих планет).

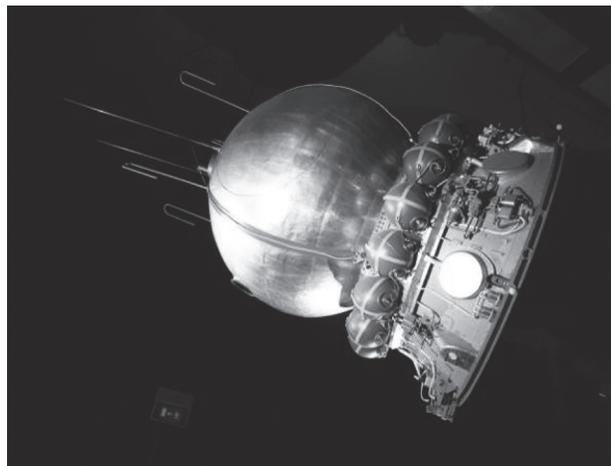


Рис. 1.2. Пилотируемый корабль «Восток-1»

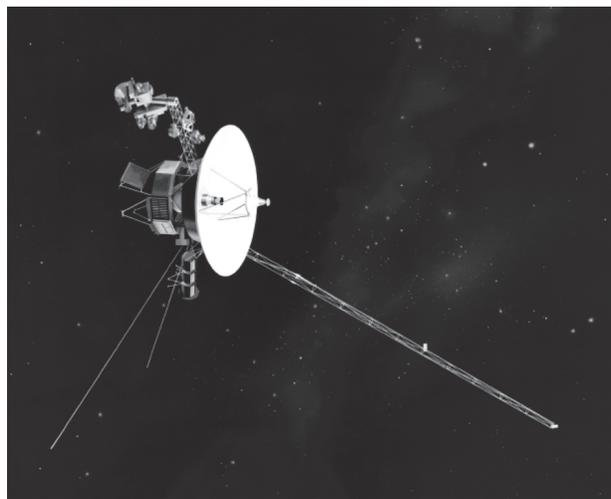


Рис. 1.3. Космический аппарат дальнего проникновения серии Voyager

Такое длительное активное существование КА обусловлено прежде всего оптимальными принятыми инженерными решениями при создании электронной бортовой аппаратуры, грамотным выбором соответствующей ЭКБ для комплектации его бортовых систем.

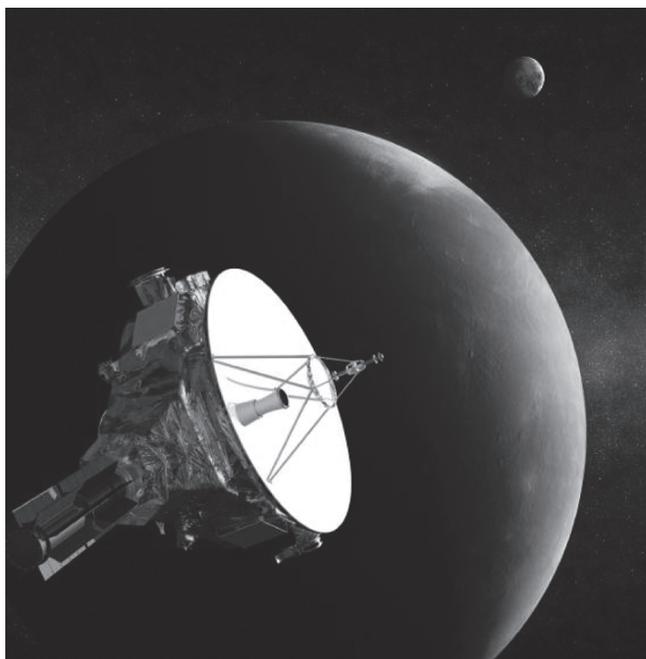


Рис. 1.4. Общий вид конструкции автоматической межпланетной станции НАСА, разработанной в рамках программы «Новые рубежи»

На рис. 1.4 представлен общий вид конструкции автоматической межпланетной станции НАСА (США), предназначенной для изучения Плутона и его естественного спутника Харона. Миссия предусматривает, кроме изучения Плутона и его спутника, достижение к 2015 году орбиты Плутона и изучение Пояса астероидов («пояса Койпера»).

Как видно из сравнения рис. 1.3 и 1.4, общий вид конструкций различных КА внешне примерно одинаков, но при рассмотрении деталей и конструктивных элементов становится очевидным их различие, связанное с различным функциональным назначением. Причем если унификация конструктивных решений КА имеет свои ограничения, то унификация технических решений электронных бортовых систем является жизненно важной задачей, одним из условий успешного решения которой является унификация номенклатуры и технических характеристик используемой ЭКБ. К сожалению, отечественным разработчикам РКТ эту задачу до сих пор решить не удалось.

На рис. 1.5 на фоне «колец Сатурна» представлен общий вид конструкции другого межпланетного зонда Cassini-Huygens, предназначенного для исследования сразу двух планет Солнечной системы – Сатурна (его «колец» и спутников) и Титана.

В отличие от предыдущих КА, разработанных Россией и США, этот КА является первым плодом глобализации в космической отрасли – объединения усилий сразу нескольких космических держав и организаций – США (НАСА), Европейского космического агентства и Итальянского космического агентства.

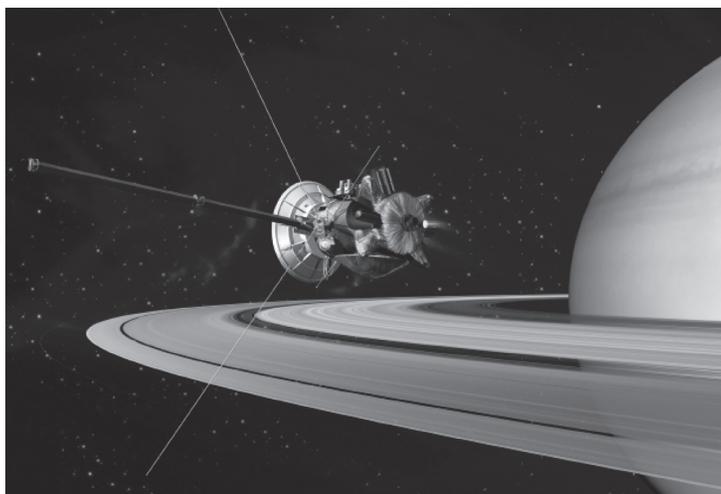


Рис. 1.5. Межпланетный зонд Cassini-Huygens

Конструкция аппарата состоит из двух самостоятельных элементов — станции Cassini и «спускаемого» аппарата (зонда) Huygens, предназначенного для автоматической посадки и автономной работы на Титане.

Этот пример демонстрирует высокую эффективность объединения усилий конструкторов разных стран и школ на решение амбициозных программ научных исследований. Как известно, этот комбинированный межпланетный КА был запущен в 1997 г. и в 2004 г. успешно достиг системы Сатурн, выполнил весь цикл необходимых исследований и продолжил миссию — 25 декабря 2004 г. зонд Huygens штатно отделился от головного КА и через год достиг окрестностей Титана, выполнив все запланированные маневры, и совершил успешный спуск в непростых условиях атмосферы этого спутника.

Станция Cassini в результате этой эксплуатации стала первым искусственным спутником Сатурна.

На рис. 1.6 представлен общий вид конструкции стартующего широко известного многоразового транспортного КА «Шаттл».

Как видим, его конструкция является гибридной — «ракетоноситель + собственно КА» и принципиально отличается от вышерассмотренных конструкций КА, представленных на рис. 1.2–1.5. Основное назначение этих космических «челноков» — доставлять полезные грузы на орбитальные космические станции и обратно. Всего было построено пять таких космических систем (причем два из них погибли в катастрофах), и один прототип (по принятой в этой книге классификации — испытательный КА). Программа просуществовала двадцать лет (с 1981 по 2011 г.) и в итоге была признана неэффективной.

Действительно, планировалось что каждый из этих КА будет стартовать два раза в месяц (24 старта в год) и каждый из них совершит не менее ста полетов в космос. На практике в силу ряда объективных причин они использовались значительно меньше (выполнено 135 пусков). Причем больше всего полетов (39) совершил наиболее отработанный вариант «Дискавери».



Рис. 1.6. Американский многоцелевой транспортный космический корабль

И, наконец, следует сказать несколько слов о наиболее сложных межпланетных КА – пилотируемых межпланетных кораблях с посадочными возвращающимися модулями, при проектировании которых в максимальной степени анализировались и использовались все полученные ранее знания, опыт, последние достижения микроэлектроники, космического аппаратостроения, материаловедения, космической психологии и др.

На рис. 1.6 представлена сделанная непосредственно после посадки на Луну в далеком 1969 году фотография одного из целой серии межпланетных КА США «Аполлон» («Аполлон-11»). Опять же, его конструкция и внутренне устройство отличаются от всех вышеописанных КА в силу конкретного целевого назначения и выполняемых функций.

Вот вошедшие уже в историю факты – командир экипажа легендарный Нил Армстронг и пилот Эдвин Ондрич оставались на поверхности Луны в специальном КА «Лунном модуле» в течение 21 часа 36 минут и 21 секунды. Все это время пилот второго КА «командного модуля» Майкл Коллинз ожидал их на так называемой окололунной орбите, поддерживая постоянную радио-видеосвязь как с ними, так и наземным центром управления полетом. Астронавты (к нашему сожалению, не космонавты) совершили один первый выход на поверхность Луны, который продлился долгих 2 часа 31 минуту, 40 секунд, после чего они успешно (почти успешно) вернулись в лунный модуль и успешно стартовали с поверхности Луны, а затем не менее успешно (по плану) стыковались с командным модулем и успешно вернулись на родную землю.

Безусловно, успех этой исторической миссии был обусловлен как использованием новейших достижений в области промышленных технологий, материаловедения, конструкторских решений, информационно-коммуникационных техно-

логий, так и правильным выбором состава ЭКБ КН категории «Спейс» при создании различной бортовой аппаратуры командного и лунного модулей.

Хотя данная книга носит сугубо технический характер, для понимания роли и места микроэлектронных технологий в космическом приборостроении необходимо провести известный только узкому кругу специалистов один из многих неприятных эпизодов, которые могли фактический грандиозный триумф превратить в катастрофу миссии.

Как известно, габариты помещений на обитаемых КА данного типа жестко ограничены, это касается и командных, и лунных модулей данной экспедиции. Возвратившись с поверхности Луны после исторической миссии в лунный модуль в громоздких космических скафандрах, последний входивший член лунной экспедиции при закрытии входного люка случайно повредил (отломал) небольшой пластиковый рычажок, расположенный рядом с этим люком. Рычажок имел всего два положения – «вверх» и «вниз». Его одна, но жизненно важная функция – управление запуском стартового двигателя лунного модуля: положение «вниз» означало «спящий режим», положение «вверх» – означало «старт» (включение автоматической системы управления процессом старта с поверхности Луны).

Поскольку рычажок сломался в положении «вниз», чтобы перевести механические металлизированные контакты в положение, эквивалентное «вверх», астронавтам, а также всем обеспечивающим полет службам пришлось пережить более тридцати крайне неприятных минут.

Кажущуюся анекдотичность ситуации характеризует следующий факт – после доклада ситуации командиром экипажа астронавту, находящемуся в командном модуле и его передачи описания ситуации в наземный центр управления НАСА, после пятиминутного всеобщего замешательства оттуда последовала первая «ценная» рекомендация одной из многочисленных групп экспертов, всегда присутствующих в ЦУПах: «Возьмите стержень от шариковой ручки и его острой (пишущей) частью механически переместите «ползунок» контакта «вверх». Действительно здравая практическая рекомендация, но для земных условий, а где взять шариковую ручку на Луне? Но одной из отличительных психологических особенностей как наших космонавтов, так и американских астронавтов, является неординарность мышления (есть даже специальные тесты, по которым бракуются от 10 до 15 процентов кандидатов в космонавты (астронавты), у которых все другие параметры полностью соответствуют требованиям).

«Замурованные» в лунном модуле астронавты нашли и использовали острый и тонкий эквивалент стержня шариковой ручки, после чего стартовый двигатель сработал штатно, и вся цепь мероприятий по стыковке с командным модулем и последующим триумфальным возвращением астронавтов на Землю прошла штатно.

В итоге принципиальному инженеру, настойчиво предлагавшему заменить этот механический переключатель на микроэлектронный сенсорный MEMS-ключ, руководство НАСА в суточный срок в порядке компенсации выделило премию в размере оклада и месячную оплаченную путевку для отдыха на Канарских островах (подалеже от журналистов), а в конструкцию аналогичных переключателей были введены соответствующие изменения, базирующиеся опять же на достижениях микроэлектронных технологий.

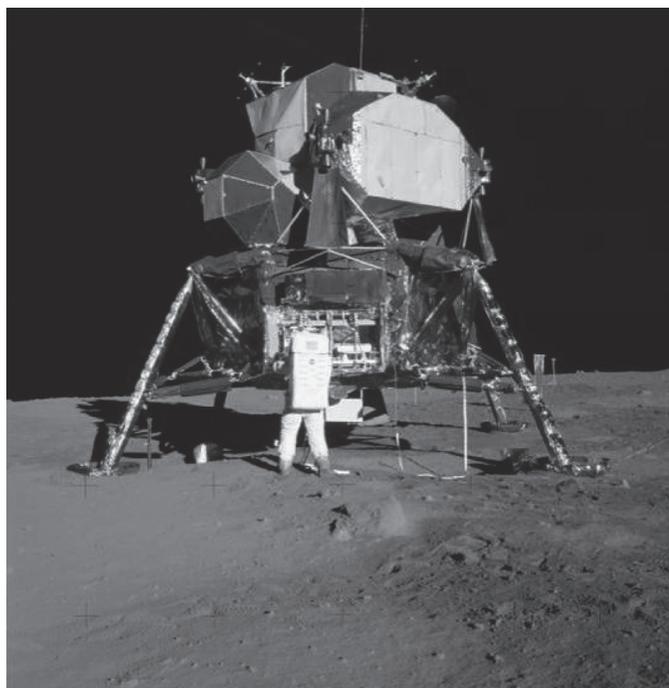


Рис. 1.7. Межпланетный КА «Аполлон-11» на Луне

По результатам последующего детального разбора полета непосредственного руководителя этого инженера по-тихому уволили из НАСА с «белым билетом».

Таким образом, можно сделать следующие общие выводы – устройство конкретного КА определяется прежде всего его целевым назначением, но основой организации всех бортовых электронных систем является современная микроэлектронная элементная база, которая должна полностью удовлетворять целому ряду специфических требований, которые будут изложены в последующих главах этой книги.

На рис. 1.8 представлены в общем виде основные области применения микроэлектронной ЭКР в КА. Здесь в правой части рисунка перечислены основные функции, которые должны выполнять бортовые системы КА – накопление и хранение данных, обработка информации и генерация соответствующих команд, интерфейс с экипажем наземных служб, управление различными исполнительными механизмами, организация электропитания, операции преобразования измеряемых величин в аналоговые электрические сигналы и, наоборот, первичная обработка сигналов и др.

В левой части рисунка представлены конкретные направления (классы) ЭКБ, предназначенной для обеспечения реализации этих функций – датчики, операционные усилители, интерфейсные микросхемы, драйверы, схемы силовой электроники, стандартные логические микросхемы, цифровые и аналоговые микросхемы, стабилизаторы напряжений, солнечные элементы (батареи) и пр.



Рис. 1.8. Основные области применения микроселектронной элементной базы в КА

1.4. Бортовые системы космических аппаратов

1.4.1. Классификация бортовых систем космических аппаратов

Для обеспечения жизнеспособности разнообразных уже эксплуатируемых и только еще проектируемых космических аппаратов (КА) и выполнения ими целевых программ необходимо решить достаточно широкий круг общих задач, присущих всем типам КА. В числе этих задач следующие [13]:

- обеспечение обмена информацией с наземным комплексом управления (НКУ);
- обеспечение снабжения аппарата электроэнергией;
- распределение электропитания на КА между потребителями;
- сбор, хранение, обработка и передача телеметрической информации;
- управление работой систем и оборудования КА в соответствии с программой полета КА и с учетом его реального состояния;
- поддержание требуемого теплового режима на КА;
- определение и поддержание ориентации КА в пространстве;
- обеспечение движения КА в пространстве (перемещение его центра масс);
- обеспечение углового движения КА в пространстве (перемещения вокруг центра масс);
- определение и прогнозирование местоположения КА на орбите;
- управление вращающимися солнечными батареями (при их наличии).

При проектировании первых КА каждая задача решалась автономно — использовалась отдельная специализированная система, содержащая свою сенсорную ап-

паратуру, свои исполнительные органы и соответствующим образом запрограммированную автоматику управления. С усложнением внутреннего устройства КА и увеличением числа решаемых ими задач появилась необходимость в централизации устройств управления и контроля за работой бортовых систем КА, прежде всего, в части рационального расходования и пополнения энергоресурсов, приоритетности и времени выполнения полетных и регламентных операций, автономного реагирования на нештатные ситуации на основе результатов оперативной диагностики и тестирования бортовой аппаратуры и др. Разработка и внедрение на КА вычислительных средств с развитым программным обеспечением (ПО) позволили, в принципе, решить эту проблему. По аналогии с наземным комплексом управления (НКУ) появилось понятие *бортового* комплекса управления (БКУ), объединяющего в себе все основные бортовые системы КА и включающего в себя также бортовую вычислительную систему, систему управления движением и навигацией, систему управления бортовой аппаратурой, бортовую аппаратуру служебного канала управления, систему бортовых измерений, а также соответствующее программное обеспечение БКУ, главного интеграционного звена БКУ.

Для более детального рассмотрения принципов построения БКУ автоматических КА с целевой направленностью (связные спутники, КА наблюдения участков звездного пространства, космические аппараты зондирования Земли) перечислим эти основные бортовые системы (рис. 1.9) [13]:

- бортовая вычислительная система в виде совокупности вычислительных средств и устройств сопряжения (интерфейсов и адаптеров связи), обеспечивающая информационное взаимодействие с бортовыми абонентами и предоставляющая свои вычислительные ресурсы для решения задач управления системами КА и задач контроля их работы;
- система управления движением и навигации (иначе – система ориентации и управления движением), предназначенная для управления движением КА как материальной точки (перемещением центра масс), так и для управления угловым движением КА (движением вокруг центра масс);
- система управления бортовой аппаратурой, выполняющая функции коммутации электропитания, усиления и преобразования электрических сигналов, а также выдачи команд управления в системы и приборы КА в соответствии с временными или логическими условиями;
- система бортовых измерений, предназначенная для сбора, обработки и передачи в НКУ телеметрической информации о результатах измерений, характеризующих состояние систем КА и протекающие на КА процессы;
- бортовая аппаратура служебного канала управления или командной радиолинии, представляющая собой радиотехнический комплекс для обеспечения своевременного обмена служебной информацией между НКУ и БКУ;
- объединенная двигательная установка, состоящая из комплекта двигателей для обеспечения перемещения КА относительно орбиты и углового движения КА;
- система обеспечения определенного теплового режима внутри КА;
- система энергоснабжения (СЭС) для преобразования первичной (солнечной) энергии в электрическую.

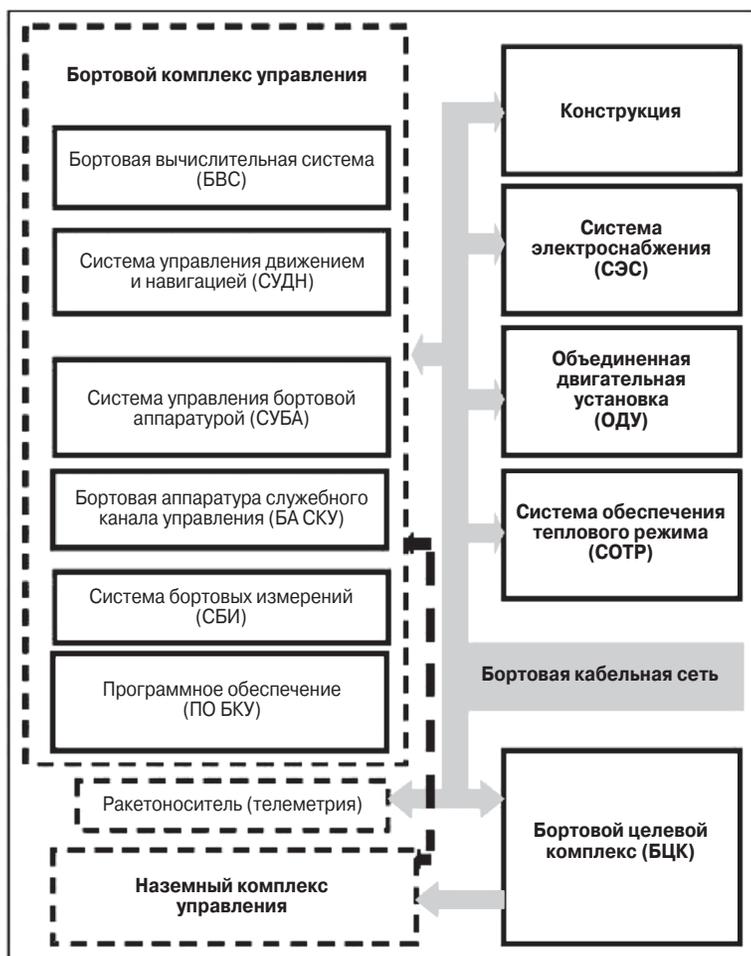


Рис. 1.9. Бортовые системы космического аппарата

В некоторых классах КА в качестве отдельной структурной единицы рассматривается бортовая кабельная сеть.

Внедрение на КА вычислительных средств и новых конструктивно-технологических решений, применение современной элементной базы и средств комплексирования ПО позволили создать основу для построения интегрированных БКУ. Возможность оперативного контроля состояния систем КА и «умного» выполнения программы полета КА с учетом внешней обстановки, текущего статуса бортовых систем и имеющихся на текущий момент времени ресурсов позволила перенести многообразные функции контроля и управления КА в БВС, точнее – в ее ПО. Тенденция концентрации этих функций в бортовой вычислительной системе (ПО БКУ) продолжает усиливаться по мере развития программных и аппаратных средств. Программное обеспечение сформировалось как отдельный (и один из самых главных) компонент БКУ (рис. 1.10). Программное обеспечение БКУ построено по иерархическому принципу [13]:

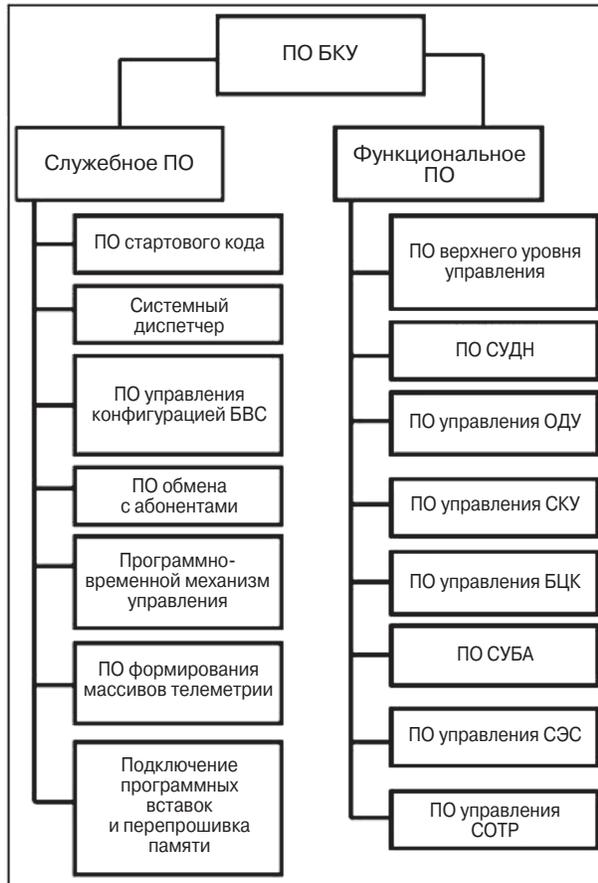


Рис. 1.10. Структура программного обеспечения [13]

- первый, или нижний уровень составляют драйверы обмена с аппаратурой и программы организации вычислительного процесса;
- второй уровень составляют программы обеспечения управления и контроля работы бортовых приборов и оборудования;
- программы третьего уровня включают в себя программы обеспечения полетных режимов бортовых систем и расчетные программы;
- четвертый, или верхний уровень составляют программы планирования и организации режимов работы всего БКУ и контроль состояния систем КА.

Архитектура ПО БКУ подразделяет все программы на служебные (диспетчер, обмен, управление конфигурацией БВС, таймирование и др.) и функциональные (программы включения/выключения конкретных приборов, программы расчета различной подготовительной и сопроводительной информации, программы формирования управляющих воздействий на отдельные приборы и т. п.). Каждая программа (программный модуль) имеет свои настроечные параметры и логико-информационные связи с другими программами. Построение ПО БКУ предполагает детерминированное циркулирование обменной информации между програм-

мами всех уровней, причем управляющая информация поступает сверху вниз (от программ верхних уровней до программ нижних уровней), а контрольно-диагностическая информация — снизу вверх. Для обеспечения функционирования ПО БКУ в реальном масштабе времени каждой программе определяются последовательность и конкретное время подключения на вычислительном такте бортового компьютера, а также ее вычислительные ресурсы.

Интеграционный характер ПО БКУ позволяет выполнять, кроме функций контроля и управления, и другие важные функции и задачи, как, например:

- задачи повиткового планирования полета КА;
- задачи оптимизации расхода бортовых ресурсов;
- функции обеспечения автономности существования КА;
- функции оперативного реагирования на многие нештатные ситуации.

Получение цифровой информации от бортовых систем (напрямую или через СБИ), обмен информацией с НКУ (через БА СКУ), обработка и использование полученной информации в вычислительных задачах, реализованных в ПО, — все это выдвинуло БВС и ПО БКУ на главенствующее место в бортовом комплексе управления. Системы БА СКУ и СБИ в такой конфигурации являются неотъемлемой частью БКУ как источники циркулирующей на КА информации и необходимые звенья, поддерживающие информационно-логические интерфейсы. Следует отметить, что здесь имеются связи между БВС, БА СКУ и СБИ как физические (проводные, через бортовую кабельную сеть и интерфейсные устройства сопряжения), так и «виртуальные» (информационные, через каналы информационного обмена).

Неотъемлемой и основной частью БКУ следует считать и систему управления бортовой аппаратурой. Две важные функции СУБА носят интеграционный характер и являются прерогативой БКУ [13]:

- обеспечение физического (проводного) интерфейса с системами и оборудованием КА и управление ими путем формирования соответствующих команд и сигналов.
- обеспечение всех бортовых потребителей электропитанием.

Все остальные из вышеперечисленных систем решают свои конкретные задачи, жизненно важные для КА, но не являющиеся интеграционными с точки зрения структурного построения БКУ. Из этих систем особо выделим СУДН, часто включаемую разработчиками КА в состав БКУ благодаря следующим аспектам:

- задачи СУДН (ориентация, стабилизация, наведение КА для решения целевых задач и т.д.) — важнейшие и первоочередные;
- данная система (как и СУБА) — одна из первых бортовых систем, она проектировалась и разрабатывалась уже для первых КА;
- программы управления СУДН тесно привязаны к программам управления других систем и программам верхнего уровня ПО БКУ и др.

В состав СУДН включены чувствительные элементы в виде оптико-спектральных датчиков и датчиков угловых скоростей, преобразующие устройства и блоки формирования управляющих сигналов, а также исполнительные органы в виде силовых гиросприборов (например, маховиков или гиросилов). Исполнительными органами СУДН служат также двигатели двигательной установки. Состав ап-

паратуры СУДН может дополняться различными навигационными приборами и аппаратурой спутниковой навигации.

Например, основой построения СУДН разработки РКК «Энергия» является корректируемая бесплатформенная инерциальная навигационная система, позволяющая в реальном масштабе времени определять текущее положение связанных осей КА относительно инерциальной системы координат путем интегрирования составляющих абсолютной угловой скорости (рис. 1.11) [13].

Функционирование СУДН обеспечивается работой трех контуров управления:

- навигационный контур позволяет определять (прогнозировать) в реальном масштабе времени с заданной точностью местоположение КА на орбите по начальным условиям, определяемым в НКУ или в бортовой навигационной аппаратуре с использованием расчетных гравитационных и магнитных моделей Земли и информации от бортовых навигационных датчиков КА;
- кинематический контур управления ориентацией позволяет определять угловое рассогласование приборного базиса СУДН с неким опорным базисом, задаваемым режимом ориентации; кроме того, кинематический контур уточняет (корректирует) данный опорный базис;
- динамический контур управления ориентацией позволяет совмещать с заданной точностью связанный базис КА с опорным базисом; кроме того динамический контур обеспечивает стабилизацию КА в процессе коррекции орбиты и других динамических операций.

К служебным системам автоматических КА рассматриваемого класса предъявляются сходные по своему составу требования, обусловленные полезной нагрузкой (или БЦК) к служебным системам этих аппаратов. В головных предприятиях космической отрасли наметилась положительная тенденция разработки универсальных космических платформ (УКП), единых для различных типов автоматических КА. Интеграция готовой УКП с новым БЦК путем преемственности систем и приборов УКП и минимизации этапов проектирования и наземной обработки позволяет существенно сократить сроки создания новых КА и финансовые затраты при сохранении показателей качества и надежности.

Степень преемственности существующей космической платформы к применению на КА с новой целевой аппаратурой определяется исходя из характеристик этой аппаратуры и состава требований к УКП, ее обусловленных. Основные характеристики БЦК: энергопотребление, масса, количество фидеров питания, тип интерфейсов и др. В число задач, определяемых условиями работы БЦК, включаются:

- обеспечение точности ориентации и стабилизации КА при работе БЦК;
- обеспечение точности наведения и ее оценка;
- обеспечение заданных параметров рабочей орбиты и длительности эксплуатации КА;
- выполнение заданных режимов работы БЦК и др.

В такой схеме БКУ рассматривается как ядро УКП [13]. Другими словами, БКУ является совокупностью основных служебных систем и бортового ПО, обеспечивающей интеграцию систем УКП при реализации функциональных задач КА на программно-логическом и физическом уровнях через соответствующие интерфейсы.

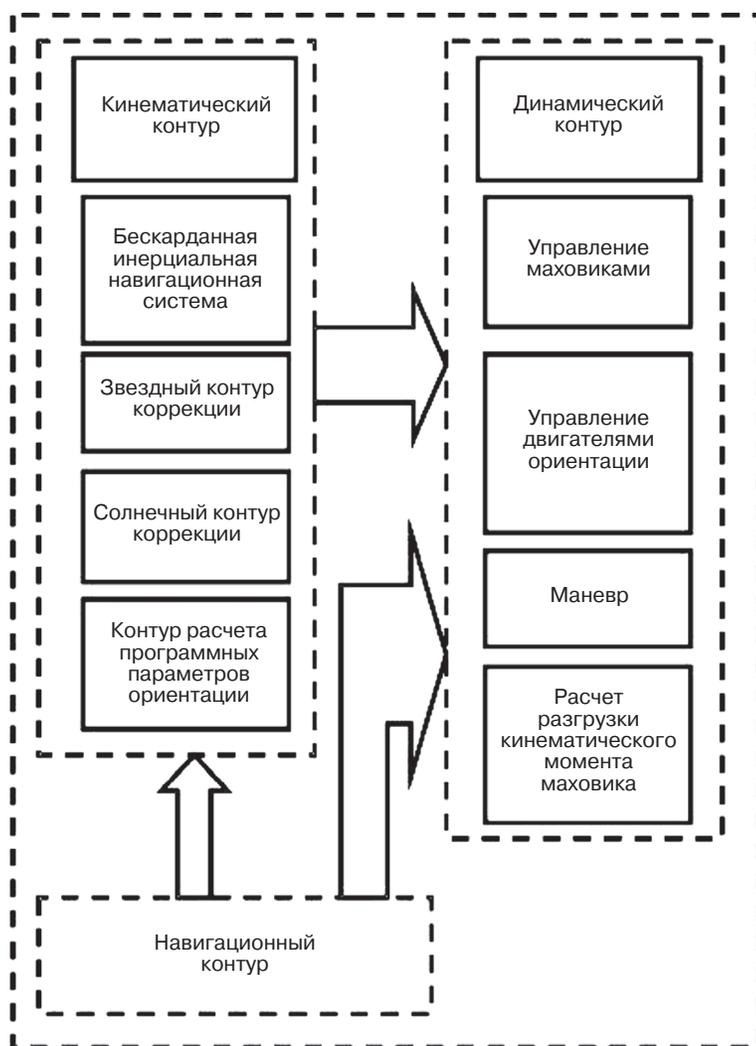


Рис. 1.11. Структура СУДН на базе двухконтурной бесплатформной инерциальной системы [13]

Основные задачи БКУ:

- сбор, первичная обработка, хранение и телеметрирование информации оперативного контроля, а также ее использование в задачах управления УКП;
- организация информационно-командного взаимодействия с БЦК;
- координированное управление функционированием УКП и КА в целом при наземной отработке КА и штатном выполнении программы полета в автоматическом режиме и по информации от НКУ;
- диагностика состояния УКП и ее систем, обнаружение, локализация и парирование расчетных нештатных ситуаций в автоматическом режиме.

Решение бортовым комплексом управления перечисленных задач сопровождается подтверждением таких качественных характеристик, как:

- высокий уровень комплексирования, т.е. организация комбинированной работы систем У КП и поддержка интерфейсов при реализации всех полетных режимов и операций в реальном масштабе времени;
- строгая иерархичность многоуровневой структуры построения БКУ и детерминированность движения потоков информации (командно-управляющей информации сверху вниз от «ядра» БКУ к каждому элементу и контрольно-диагностической информации снизу вверх от периферийных элементов до «ядра»);
- развитая гибкость управления, реализованная в алгоритмах управления ПО БКУ и обеспечивающая на базе целеуказаний от НК У и обработанной диагностической информации от датчиковой аппаратуры эффективный расход ресурсов и задействование резервов, а также адаптивность к отказам и парирование нештатных ситуаций.

Отработанная и готовая к применению в составе целого класса космических аппаратов платформа создает особенную привлекательность для заказчиков перспективных космических изделий. Развитие и совершенствование БКУ предполагается в следующих направлениях:

- повышение надежности и увеличение гарантированного срока функционирования отдельных приборов и БКУ в целом путем применения современных типономиналов ЭКБ, а также благодаря внедрению функционального резервирования на аппаратном и программном уровнях;
- при сохранении целевых функций и показателей БКУ снижение его общей массы и экономия интерфейсных ресурсов в интересах полезной нагрузки благодаря унификации разнотипных интерфейсов, оптимизации размещения бортовой кабельной сети, переходу в отдельных позициях структуры БКУ на дублирование вместо троирования аппаратных средств.

1.4.2. Особенности проектирования бортовых информационно-управляющих систем с использованием микросхем программируемой логики

Структура современной бортовой аппаратуры космических аппаратов подразумевает высокую степень конструктивной интеграции ее элементов. Как показано выше, основным элементом, обеспечивающим управление этой сложной аппаратурой, является бортовой информационно-управляющий комплекс (БИУК). Решение этих задач является достаточно ресурсоемким и осуществляется с использованием бортовых вычислительных комплексов. При этом для эффективного решения в зависимости от целевых назначений и характеристик космического аппарата могут потребоваться как минимальные, так и предельные максимальные вычислительные ресурсы. Например, большинство современных высокоорбитальных спутниковых систем связи предусматривает работу аппаратуры спутников-ретрансляторов в режиме непосредственной ретрансляции или ретрансляции с переносом частоты, что обеспечивается лишь переключением различных полуккомплектов приемо-передающей аппаратуры и не требует решения сложных вычислительных задач в рамках реализации целевой программы космического ап-

парата. Другим примером являются низкоорбитальные оптико-электронные спутники наблюдения и дистанционного зондирования Земли, более подробно рассматриваемые в следующем разделе, функционирование которых подразумевает постоянное получение и сложную вычислительную обработку изображений подстилающей поверхности в совокупности с постоянным слежением за местоположением и ориентацией космического аппарата, обеспечивающим точность получаемых данных. Построение бортовой аппаратуры на вновь разрабатываемых каждый раз и под задачу микросхемах является достаточно дорогостоящей и длительной стадией разработки. Кроме того, при сохранении высокой динамики развития микроэлектронной технологии такие разработки быстро устаревают. Как уже отмечалось, одной из основных тенденций развития современной бортовой аппаратуры является унификация ее элементов. Поэтому для ее построения часто используются прошедшие апробацию стандартизованные технологии проектирования, реализованные по следующим принципам [11]:

- 1) многомодульное построение элементов БИУК на базе стандартных микроконтроллеров и микропроцессоров;
- 2) иерархическое построение БИУК с реализацией основных требуемых вычислительных ресурсов центральным элементом (бортовой микроЭВМ) и использованием дополнительных элементов для решения вспомогательных задач;
- 3) построение по принципу «система на кристалле» (system on chip) – реализация всех функций БИУК в одной микросхеме сверхбольшой степени интеграции.

Первый вариант построения основан на использовании стандартизованных модулей и микросхем. Примером может служить стандарт РС 104, предусматривающий «этажерочную» конструкцию бортовой аппаратуры, в которой каждый модуль имеет стандартизованные размеры (форм-фактор) и элементы коммутации для взаимодействия. Центральным модулем, обеспечивающим в том числе управление, является модуль центрального процессора. Другой вариант такого построения БИУК базируется на модульном принципе реализации на нескольких микроконтроллерах, имеющих упрощенную внутреннюю структуру, например, на PIC-контроллерах.

Иерархическая реализация БИУК подразумевает использование бортовой ЭВМ с достаточно высокой производительностью. Однако, как правило, такие ЭВМ обладают большими с точки зрения бортовой аппаратуры массогабаритными и энергетическими потребностями. Поэтому использование данного варианта возможно лишь в средних и больших космических аппаратах.

Концепция «система на кристалле», более подробно рассматриваемая в гл. 11, является наиболее приемлемой для использования в бортовой аппаратуре перспективных космических аппаратов, так как обеспечивает максимальную степень интеграции элементов аппаратуры в совокупности с малыми размерами и энергопотреблением. Для ее реализации могут быть разработаны специализированные интегральные схемы, изготовленные специально для данного конкретного космического аппарата. Однако разработка и штучное изготовление таких элементов требуют больших экономических и временных затрат и оправдано лишь при серийном производстве космических аппаратов и платформ. Кроме того, усложняются процессы модернизации и реконструкции таких элементов.

В общем случае «система на кристалле» может включать в себя различные типы блоков: программируемые процессорные ядра, блоки специализированных интегральных схем, блоки программируемой логики, памяти, периферийных устройств, аналоговые компоненты и различные интерфейсные схемы. Не обязательно все такие блоки должны быть физически реализованы на одном кристалле: процессоры, блоки памяти могут использоваться как отдельные компоненты.

Значительное повышение эффективности разработки высокоинтегрированных БИУК по технологии «система на кристалле» достигается при использовании интегральных микросхем с программируемой логикой (ПЛИС). Эта технология известна и распространена достаточно широко, однако в последнее время благодаря повышению степени интеграции и быстродействия элементной базы появились возможности для ее активного внедрения в бортовую аппаратуру космического аппарата. ПЛИС представляют собой относительно новое, быстроразвивающееся направление микроэлектроники, и в условиях жесткой конкуренции их популярность настолько выросла, что, по некоторым прогнозам [11], более 60% приборов с применением специализированных интегральных микросхем будут использовать ПЛИС и только 21% – специализированные вентильные матрицы.

Использование ПЛИС значительно повышает технологичность процесса проектирования цифровых устройств и переводит практически весь этот процесс на ПЭВМ. Образно говоря, любое цифровое устройство реализуется на базе ПЛИС прямо на столе разработчика при помощи только персональной ЭВМ и соответствующего программатора.

К классу программируемых логических интегральных схем относятся интегральные схемы, построенные по следующим технологиям:

- FPGA (Field Programmable Gate Array);
- EPLD ((E)EPROM technology based complex Programmable Logic Devices);
- CPLD (CMOS FastFlash complex Programmable Logic Devices);
- MPLD (Mask Programmable Logic Devices).

Технологии EPLD, CPLD, MPLD предполагают использование комбинации полностью программируемых матриц вентиляей и/или банков макроячеек. Макроячейки образуют функциональные блоки, выполняющие различные комбинаторные или последовательные логические функции. Технология программируемых пользователем базовых матричных кристаллов (FPGA) является более совершенной, так как позволяет реализовать внутреннюю структуру интегральной схемы путем программирования внутренней матрицы.

Основными разработчиками и производителями элементной базы с программируемой логикой являются компании QuickLogic, Actel, Xilinx, Altera. В области использования ПЛИС в космических системах отдельное место занимает продукция компании Actel. Особенностью ПЛИС компании Actel является применение так называемой Antifuse-технологии, представляющей собой создание металлизированной перемычки при программировании. Данная технология обеспечивает высокую надежность и гибкие ресурсы трассировки, при этом не требуется конфигурационное ПЗУ. Продукция, производимая компанией, предусматривает варианты коммерческого, промышленного и радиационностойкого исполнения, соответствующие требованиям стандартов надежности и устойчивости функцио-

нирования в сложных условиях. Проектирование схем на базе ПЛИС предусматривает выполнение следующих операций [11]:

- ввод описания разрабатываемой логической схемы на нескольких языках высокого уровня (описание функционального поведения элемента, графический ввод его схемы в базисе стандартизованных микросхем средней степени интеграции или с использованием библиотек типовых компонентов);
- экспертный выбор модели ПЛИС для реализации описанной схемы, осуществляемый с учетом требуемого количества программируемых ячеек и условий функционирования компонента;
- перевод логического описания схемы элемента в модель ПЛИС и ее оптимизация (трансляция, оптимизация, размещение);
- функциональное и временное моделирование разработанного компонента с целью проверки соответствия требований к компоненту;
- верификацию разработанного компонента и редактирование его модели;
- загрузку отлаженной модели в ПЛИС с помощью ПЭВМ через соответствующий порт или программирование внутреннего постоянного запоминающего устройства в случае технологии FPGA, которая при включении питания сама в себя загружает конфигурационные данные.

Чипы CPLD с памятью FAST FLASH после загрузки в них конфигурационных данных при выключении питания их сохраняет. Чаще всего для описания компонентов ПЛИС используют язык VHDL – язык описания логической структуры цифровых компонентов. Кроме того, для большинства применений разработаны библиотеки компонентов, распространяемые бесплатно фирмами-производителями ПЛИС.

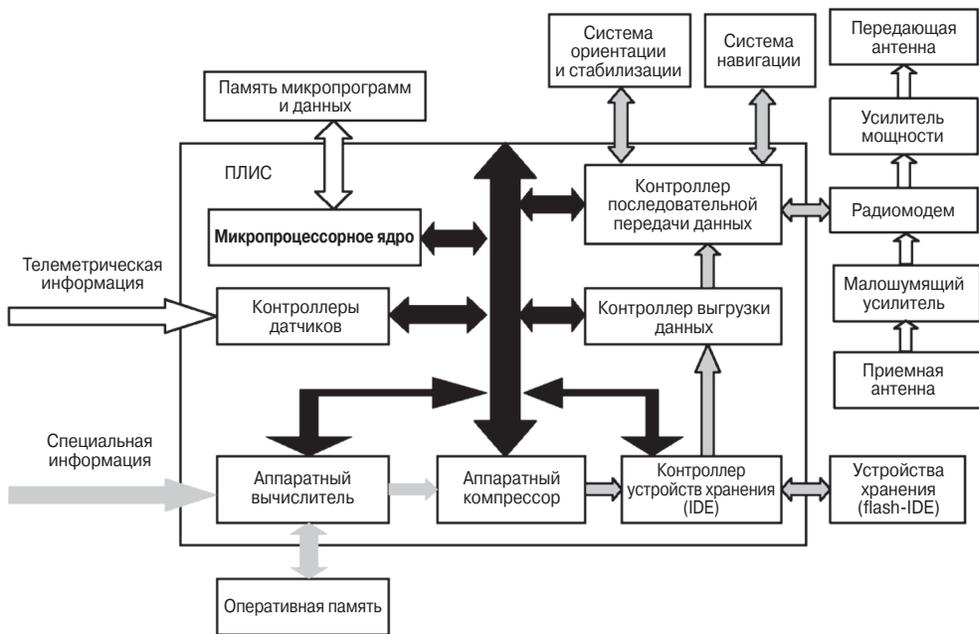


Рис. 1.12. Пример реализации БИУК космического аппарата на базе микросхемы ПЛИС [11]

Вариант реализации БИУК перспективного космического аппарата связи представлен на рис. 1.12 [11]. ПЛИС в этом случае является центральным элементом, осуществляющим сбор и обработку специальной информации, а также управление и контроль состояния всех элементов бортовой аппаратуры. Структура БИУК на ПЛИС предусматривает использование внутренних шин обмена данными между различными компонентами. Ориентировочное число используемых при этом вентиляей составляет порядка одного-полутора миллионов, что реализуемо в рамках одной микросхемы ПЛИС серии ProASIC. На рис. 1.13 [11] показан внешний вид платы разработчика компонентов ПЛИС с интегрированной микросхемой серии ProASIC Plus, а также элементами, обеспечивающими отработку операций взаимодействия с внешними устройствами.

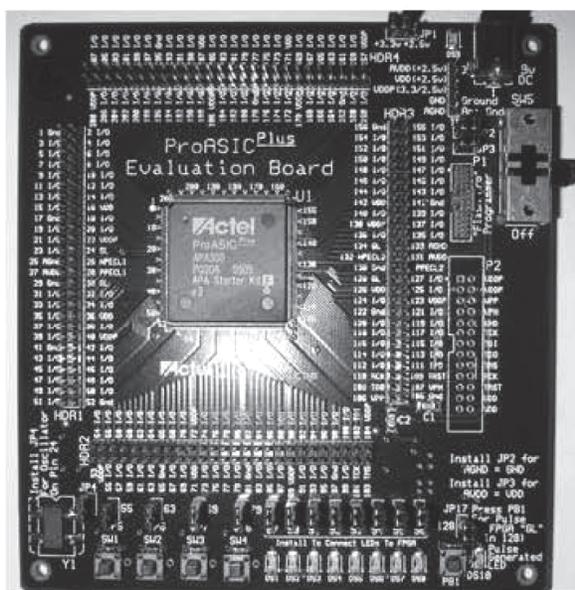


Рис. 1.13. Отладочная плата микросхем с программируемой логикой [11]

Дальнейшая модернизация бортовой аппаратуры благодаря наличию программных моделей и наработанных библиотек стандартных компонентов фактически не будет требовать дополнительных затрат, что в случае массового использования данной технологии позволит обеспечить серийное производство перспективных космических аппаратов.

1.5. Космические аппараты дистанционного зондирования Земли

Развитие информационных технологий в начале XXI в. привело к качественным изменениям в отрасли дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [14–20]: появились космические аппараты со съемочными системами нового поколения,

позволяющие получать снимки со сверхвысоким пространственным разрешением (до 41 см у спутника GeoEye-1). Съемки ведутся в гиперспектральном и многоканальном мультиспектральном (в настоящее время до 8 каналов у спутника WorldView-2) режимах. Основными тенденциями последних лет является появление новых спутников сверхвысокого разрешения с улучшенными характеристиками (французская система Pleiades), разработка концепции оперативной и глобальной съемки земной поверхности с высоким разрешением с помощью группировок малых спутников (группировка немецких спутников RapidEye, пополнение группировки DMC спутником высокого разрешения, перспективные спутники SkySat, NovaSAR и т.д.). В технологиях ДЗЗ, помимо традиционных направлений (улучшение пространственного разрешения, добавление новых спектральных каналов, автоматизация процессов обработки и оперативного предоставления данных), появляются разработки, связанные с оперативной видеосъемкой объектов из космоса (например, разработки компании SkyBox Imaging, США).

В данном параграфе приведены сравнительные характеристики некоторых наиболее интересных космических аппаратов ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения, как уже запущенных на орбиту, так и планируемых к запуску в ближайшие три-четыре года [21].

1.5.1. Космические аппараты ДЗЗ Российской Федерации и Республики Беларусь

В соответствии с Федеральной космической программой в 2012 г. был осуществлен запуск малого космического аппарата (КА) «Канопус-В». Он предназначен для обеспечения подразделений Роскосмоса, МЧС России, Минприроды России, Росгидромета, РАН и других заинтересованных ведомств оперативной информацией. Среди задач, стоящих перед спутником, можно выделить:

- обнаружение очагов лесных пожаров, крупных выбросов загрязняющих веществ в природную среду;
- мониторинг техногенных и природных чрезвычайных ситуаций, в том числе стихийных гидрометеорологических явлений;
- мониторинг сельскохозяйственной деятельности, природных (в том числе водных и прибрежных) ресурсов;
- землепользование;
- оперативное наблюдение заданных районов земной поверхности.

Кроме спутника «Канопус-В», в настоящее время в составе российской орбитальной группировки ДЗЗ завершают работу спутники «Ресурс-ДК1» (запущен в 2006 г.) и «Монитор-Э» (запущен в 2005 г.). Особенности КА «Ресурс-ДК1» являются повышенные оперативные и точностные характеристики получаемых изображений (разрешение 1 м в панхроматическом режиме, 2-3 м – в мультиспектральном). Данные со спутника активно используются для создания и обновления топографических и специальных карт, информационного обеспечения рационального природопользования и хозяйственной деятельности, инвентаризации лесов и сельскохозяйственных земель, других задач.

Продолжением миссии отечественных спутников природно-ресурсного назначения высокого разрешения является оптико-электронный КА «Ресурс-П», запущенный 25 июня 2013 г. При создании спутника применялись технические решения, наработанные при создании КА «Ресурс-ДК1». Использование круговой солнечно-синхронной орбиты высотой 475 км позволило существенно улучшить условия наблюдения. С шести до трех суток улучшилась периодичность наблюдения.

Съемка будет проводиться в панхроматическом и 5-канальном мультиспектральном режимах. Дополнительно к оптико-электронной аппаратуре высокого разрешения на спутнике установлены гиперспектральный спектрометр (ГСА) и широкозахватный мультиспектральный съемочный комплекс высокого (ШМСА-ВР) и среднего (ШМСА-СР) разрешения.

Таблица 1.1. Основные технические характеристики съемочной аппаратуры КА «КАНОПУС-В»

Режим съемки	Панхроматический	Мультиспектральный
Спектральный диапазон, мкм	0,52–0,85	0,54–0,60 (зеленый) 0,63–0,69; 0,6–0,72 (красный) 0,75–0,86 (ближний ИК)
Пространственное разрешение (в надире), м	2,1	10,5
Ширина полосы обзора, км	Более 20 (при высоте 510 км)	
Производительность съемки, млн кв. км/сут.	Более 2	
Периодичность съемки, сут.	5	
Скорость передачи данных на наземный сегмент (X-диапазон), Мбит/с	2 × 122,8	

В ближайших планах наращивания российской орбитальной группировки ДЗЗ запуск спутников серии «Обзор». Группировка из четырех оптико-электронных КА «Обзор-О» предназначена для оперативной мультиспектральной съемки России, прилегающих территорий соседних государств и отдельных районов Земли. На первом этапе (2015–2017 гг.) планируется запустить два космических аппарата, на втором (2018–2019 гг.) – еще два. Система «Обзор-О» будет служить для обеспечения данными космической съемки МЧС России, Минсельхоза России, РАН, Росреестра, других министерств и ведомств, а также регионов России. На КА «Обзор-О» № 1 и № 2 планируется установить опытные образцы гиперспектральной аппаратуры.

Согласно техническим требованиям к системе «Обзор-О» она должна состоять из четырех спутников, способных вести съемку в восьми спектральных диапазонах, в том числе в видимом и инфракрасном. Разрешение камер в видимом диапазоне будет составлять пять метров, в инфракрасном – не хуже двадцати метров. При этом на первом этапе создания системы, когда на орбите будут работать два аппарата, «Обзор-О» должен обеспечить съемку всей территории России не более чем за 30 суток; когда к работе приступят все четыре спутника – не более чем за 7 суток.