



СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY

ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ



**ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

УДК 621.38(07)
ББК 32.973.21-108.2я73
О-753

К о л л е к т и в а в т о р о в :
Г. М. Алдонин, А. К. Дашкова, Ф. В. Зандер,
О. А. Тронин, Е. А. Шангина

Р е ц е н з е н т ы :

А. А. Хвалько, кандидат физико-математических наук, начальник группы разработки перспективных конструкций, моделирования и испытаний бортовой РЭА АО «Информационные спутниковые системы» им. М. Ф. Решетнева;

О. В. Арипова, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий и программной инженерии Балтийского государственного технического университета «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

**О-753 Основы конструирования и технологии производства радио-
электронных средств : учеб. пособие / Г. М. Алдонин, А. К. Дашкова,
Ф. В. Зандер [и др.]. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2019. – 372 с.
ISBN 978-5-7638-4106-0**

Изложены общие принципы организации проектирования электронной аппаратуры различного назначения, а также основы конструкторского и технологического проектирования: обеспечение надежной работы радиоэлектронных средств, правила конструирования, технологические процессы формообразования, изготовление коммутационных плат, сборка и монтаж, наладка и испытания. Освещены вопросы проектирования эргономического и эстетического качества радиоэлектронных средств.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальностям 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» и 25.05.03 «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования», а также бакалавров направлений подготовки 11.03.01 «Радиотехника» и 12.03.01 «Приборостроение».

Электронный вариант издания см.:
<http://catalog.sfu-kras.ru>

**УДК 621.38(07)
ББК 32.973.21-108.2я73**

ISBN 978-5-7638-4106-0

© Сибирский федеральный
университет, 2019

|| ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	8
1. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ. ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ.....	9
1.1. Конструирование как область науки и техники	9
1.2. Ограничения при проектировании.....	23
1.3. Стандартизация в проектировании РЭС.....	36
2. НЕСУЩИЕ КОНСТРУКЦИИ РЭС.....	46
2.1. Компоновка РЭС.....	46
2.2. Базовые несущие конструкции и конструкционные системы РЭС	64
2.3. Эргономика конструкций РЭС.....	69
2.4. Композиционные построения и гармонизация частей и целого в конструкции.....	74
3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛИНИЙ СВЯЗИ.....	86
3.1. Проектирование объемного монтажа	86
3.2. Проектирование печатного монтажа.....	99
3.3. Волоконно-оптические линии передачи информации.....	124
4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОЙ РАБОТЫ РЭС.....	129
4.1. Основные понятия надежности РЭС	129
4.3. Методы повышения надежности	145
4.3. Математическое представление показателей надежности.....	147
5. ОСНОВЫ ЗАЩИТЫ РЭС ОТ ВОЗДЕЙСТВИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.....	152
5.1. Защита от климатических воздействий среды	152
5.2. Защита РЭС от тепловых воздействий.....	163
5.3. Термостатирование	170
5.4. Теплоотвод теплопроводностью (кондукцией).....	175
5.5. Теплоотвод конвекцией.....	179
5.6. Теплоотвод тепловыми трубами.....	191
5.7. Теплоотвод излучением.....	194
5.8. Теплоотвод с использованием термоэлектрического эффекта	195
5.9. Способы поглощения теплоты.....	199
6. ЗАЩИТА РЭС ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ.....	203
6.1. Виды и источники механических воздействий.....	203
6.2. Конструкция как колебательная система	206
6.3. Виброизоляция в конструкциях РЭС.....	218

6.4. Обеспечение прочности и жесткости элементов конструкций РЭС	230
6.5. Прочностные параметры элементов конструкций РЭС	236
7. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И ЗАЩИТА РЭС ОТ ПОМЕХ	242
7.1. Электромагнитная совместимость цифровых узлов	242
7.2. Электромагнитная совместимость усилительных схем	250
7.3. Экранирование проводов линий связи	258
7.4. Экранирование РЭУ	262
7.5. Конструкторский анализ электрической схемы РЭС	266
8. РАДИАЦИОННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ	268
8.1. Общая характеристика различных видов радиации	268
8.2. Воздействие проникающей радиации на электрофизические параметры исходных материалов	271
8.3. Воздействие излучения на параметры полупроводниковых приборов и интегральных микросхем	278
9. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА РЭС	287
9.1. Виды технологических процессов	287
9.2. Этапы разработки технологических процессов	288
9.3. Особенности технологии изготовления БНК из листовых материалов	292
9.4. Разработка схемы сборки	295
10. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИИ РЭС	298
10.1. Точность параметров РЭА	298
10.2. Управление качеством	299
10.3. Методы оценки точности	301
11. АНАЛИЗ И СИНТЕЗ РОБАСТНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ	313
11.1. Энтропия и информация в анализе структурной устойчивости систем	313
11.2. Информационная мера организации системы	319
11.3. Статистическая термодинамика агрегатных состояний	321
11.4. Энтропийные модели в интегральных технологиях	324
11.5. Синтез оптимальной микроэлектронной структуры	340
12. ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЭС С УЧЕТОМ МЕСТА РАЗМЕЩЕНИЯ И УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ	349
12.1. Классы и группы РЭС	349
12.2. Примеры конструкций РЭС различных классов и назначений	355
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	365
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ (ИТОГОВЫЕ)	367
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	368

1 | ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ. ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

1.1. Конструирование как область науки и техники

Понятие конструкции РЭС. Конструкция (лат. *constructio* – устройство, построение, план, взаимное расположение частей), англ. – *construction*, нем. – *die Konstruktion*, фр. – *construction*.

Технология (греч. *techne* – искусство, мастерство, *logos* – понятие, учение), нем. – *die Technologie*, фр. – *technologie*, англ. – *technology*.

Под *конструкцией* понимается совокупность деталей и материалов с разными физическими свойствами, находящихся в определенной физической связи (электромагнитной, тепловой, механической), которая обеспечивает выполнение заданных функций с необходимой точностью и надежностью под влиянием внешних и внутренних воздействий и воспроизводится в условиях производства. Конструкция определяет взаимное расположение частей в пространстве, способы их соединения, характер взаимодействия, а также материал, из которого они изготовлены. Конструкция РЭС отличается рядом особенностей, которые выделяют ее в отдельный класс среди других конструкций:

- иерархической структурой (последовательное объединение более простых электронных узлов в более сложные);
- доминирующей ролью электрических и электромагнитных связей;
- наличием неоднородностей в электрических соединениях, приводящих к искажению и затуханию сигналов, а также паразитных связей, порождающих помехи (наводки);
- наличием тепловых связей, что требует принятия мер защиты термочувствительных элементов;
- слабой связью внутренней структуры конструкции с ее внешним оформлением.

Жизненный цикл изделия. В последние годы применительно к продукции технического назначения используется термин *жизненный цикл*, под которым понимают все этапы создания изделия, начиная с разработки ТЗ и кончая эксплуатацией готовых изделий с последующей утилизацией. Жизненный цикл электронного изделия, разделенный на этапы, представлен на рис. 1.1. На рис. 1.2 приведены этапы разработки РЭС; здесь к эскизному проектированию можно отнести этапы 1–6, к техническому проекту – 7–19. В двойную рамку заключены те этапы, полное или

частичное выполнение которых зависит от участия в их выполнении специалистов-конструкторов и специалистов-технологов.

Система электронной поддержки жизненного цикла изделий позволяет обеспечить высокое качество выпускаемой продукции, сократить производственный цикл изготовления и существенно снизить себестоимость изготовления продукции.

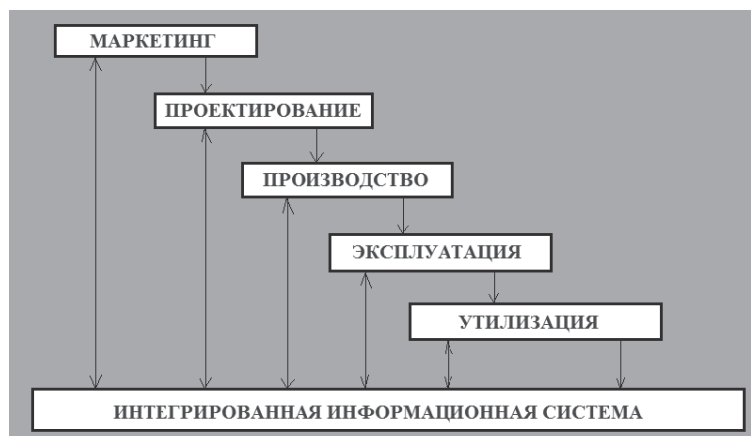


Рис. 1.1. Жизненный цикл электронного изделия

Представление конструкции РЭС как системы. Структура и связи. Условно изделия можно разбить на подсистемы в соответствии с принятой конструктивной иерархией. Исходные данные на конструирование для каждого рассматриваемого уровня конструктивной иерархии РЭС определяются в соответствии с результатами разработки более высокого уровня. Причем назначение, конструктивно-технологические ограничения и условия эксплуатации отдельных подсистем должны соответствовать требованиям ТЗ на конструкцию изделия в целом.

Под системой понимается совокупность элементов, объединенных некоторой формой взаимодействия. В виде системы может быть представлено проектируемое средство (ПС) в целом или его узел, отдельно его схема, конструкция, электрический, тепловой, механический или другой физический процесс. В свою очередь, системный подход – это представление проектируемого объекта в виде замкнутой системы и комплексное, с учетом всех взаимосвязей, изучение рассматриваемого объекта как единого целого с позиций системного анализа.

Конструкторская иерархия. Конструкторская иерархия реализуется с помощью уровней разукрупнения РЭС, габаритные размеры которых стандартизованы. Конструкции нижестоящего уровня совместимы с конструкциями вышестоящих уровней. По конструктивной сложности различают следующие уровни разукрупнения РЭС: шкаф, блок, ячейка. Если устройства являются не только конструктивно, но и функционально законченными, то они называются *модулями* (от лат. *modulus* – составная часть, кратная целому).

Различают (ГОСТ 26632–85) следующие уровни разукрупнения РЭС в модульном исполнении по конструктивной сложности: радиоэлектронный модуль третьего уровня (РЭМ 3) – функционально законченный радиоэлектронный шкаф, пульт, стойка, выполненные на основе базовой несущей конструкции третьего уровня и обладающие свойствами конструктивной и функциональной взаимозаменяемости; модуль второго уровня (РЭМ 2) – блок или рама; модуль первого уровня (РЭМ 1) – ячейка, плата. Модуль нулевого уровня (РЭМ 0) конструктивно совместим с модулем первого уровня и реализует преобразование информации или преобразование сигналов. Обычно это элементы (ЭРЭ, ИС, элементы функциональной микроэлектроники), не имеющие самостоятельного эксплуатационного применения.

Составные части процесса конструирования. Конструкция создается в процессе конструирования, под которым понимают мыслительную, оформительскую и организаторскую деятельность. Основным содержанием конструирования является прогнозирование некоторой будущей структуры на основании современных данных, нахождение и отражение найденных связей между частями конструкции в конструкторской документации и внедрение ее в производство и эксплуатацию. Один из наиболее важных результатов конструирования – получение новой информации, которую можно использовать в последующих разработках. Эта информация может иметь позитивный (новое решение) или негативный характер. Отрицательный результат тоже полезен, так как позволяет избежать повторения ошибок.

Конструирование есть часть общего процесса проектирования (или разработки) изделия, содержащего такие взаимосвязанные этапы, как разработка структурной и принципиальной электрических схем, собственно конструирование, разработка технологии изготовления, внедрение изделия в производство и эксплуатацию.

Взаимосвязь системных, схемных, конструктивных и технологических решений. При проектировании конструкции РЭС в той или иной степени принимают участие различные подразделения предприятия: системотехнические (определение структуры РЭС, разбивка на наземную и бортовую части); схемотехнические (разработка схемы, разбивка ее на узлы); конструкторские (общая компоновка, выпуск конструкторской документации, сопровождение производства); технологические (установление последовательности изготовления, отработка режимов, подготовка производства); производственные. Кроме того, в разработке принимают участие вспомогательные службы предприятия: надежности (рекомендации по структурной и информационной избыточности, проведение испытаний); снабженческие (поставка материалов, покупных изделий); патентные; автоматизированного конструкторского проектирования и т. д. В этих подразделениях работают специалисты различных направлений. Координация работы предприятий, подразделений и специалистов осуществляется с помощью согласованных календарных планов или сетевых графиков.

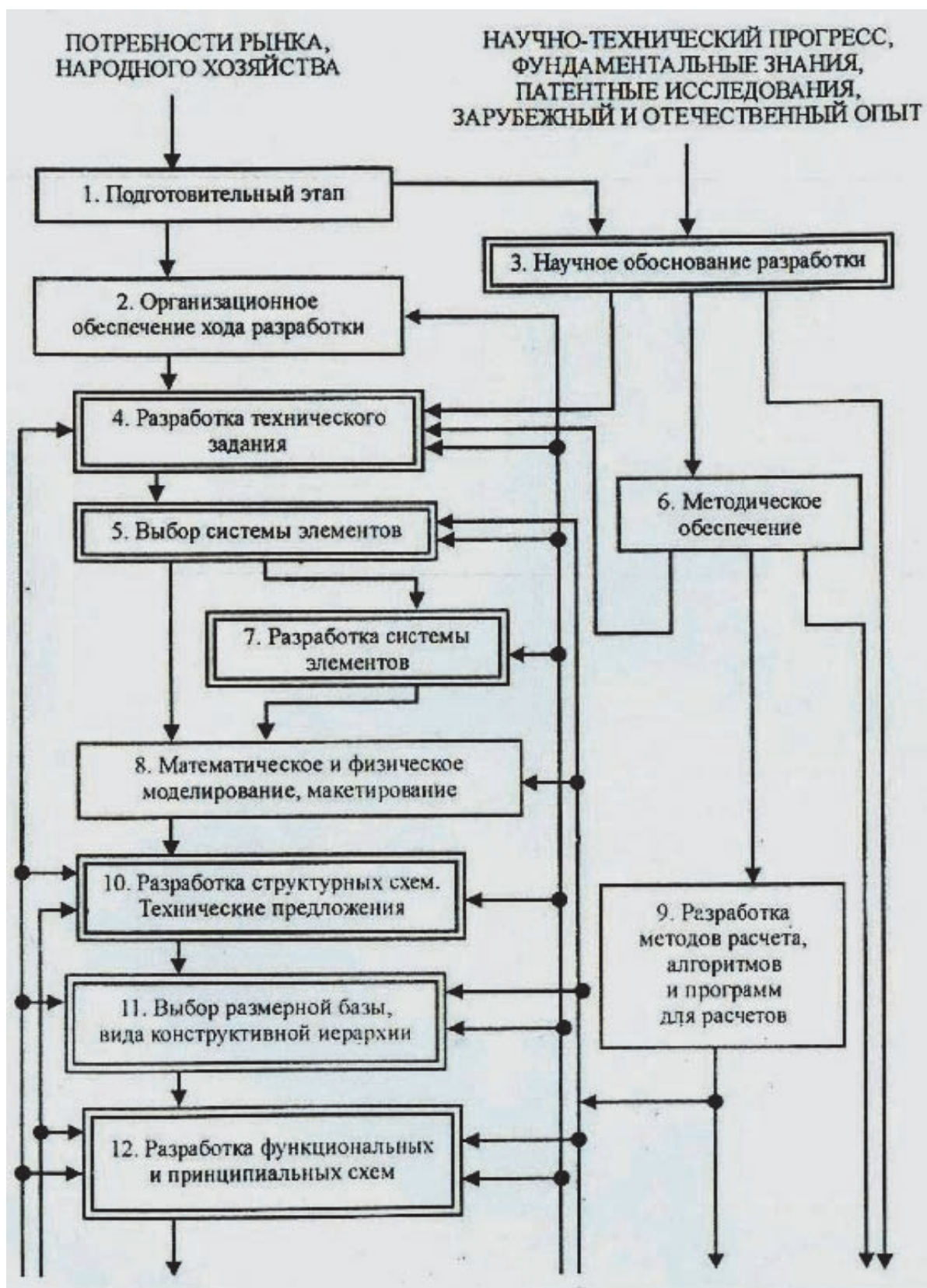
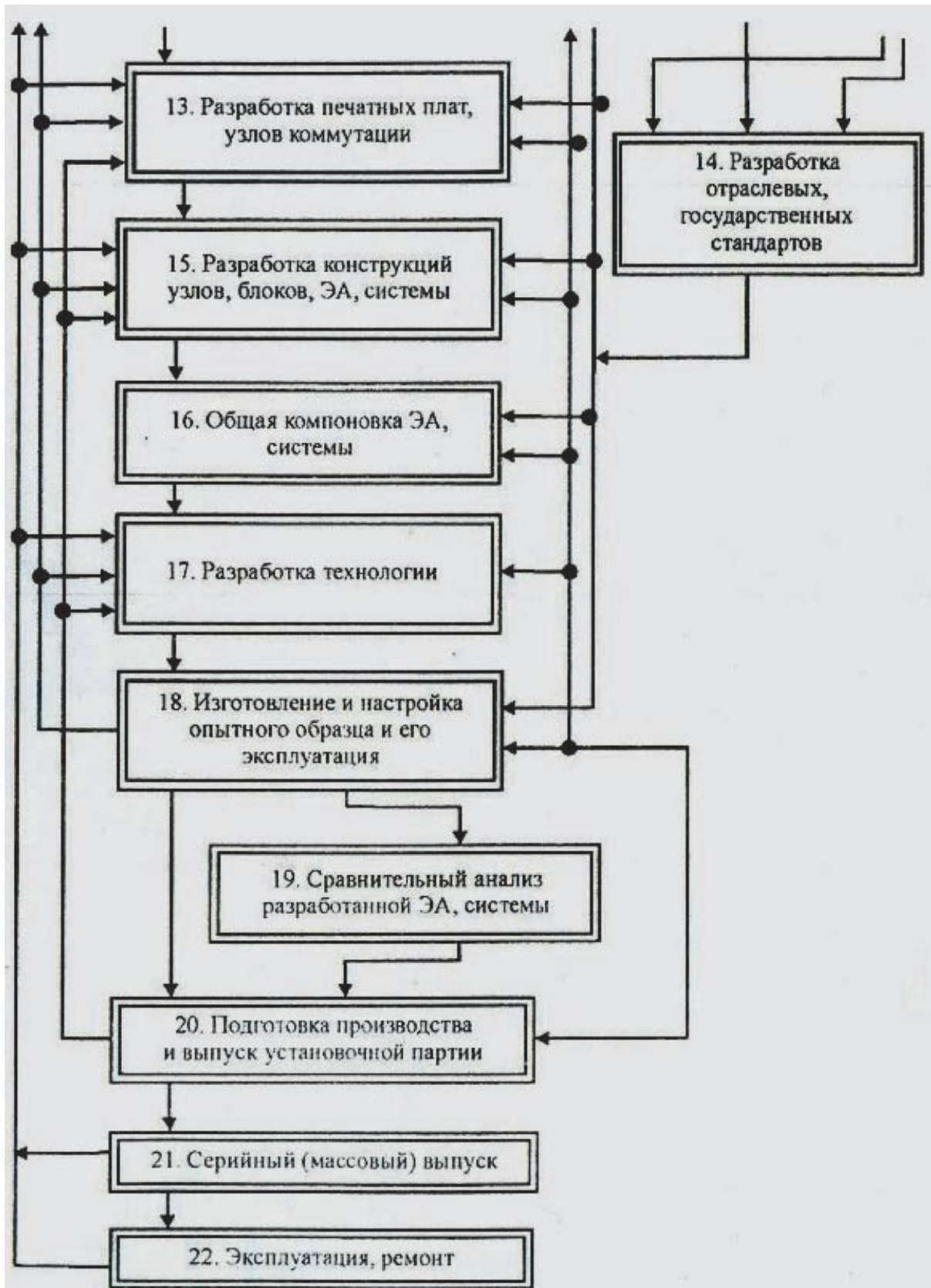


Рис. 1.2. Этапы разработки



Роль конструкторов в создании РЭС. Конструкторы и технологи взаимодействуют с самых ранних этапов до внедрения изделия в производство и эксплуатацию. На первых этапах решаются вопросы конструктивной и технологической преемственности изделий, выявляются оригинальные детали и узлы, необходимость в разработке новых техпроцессов. На более поздних этапах решаются вопросы компоновки с учетом требований удобства сборки, ремонта, контроля. Одновременно согласовывают параметры, подлежащие контролю, и допустимые отклонения от этих параметров. В ряде случаев в соответствии с технологическими требованиями конструкция может корректироваться: компоновка, значения параметров, допуски, материалы. Иногда требуется доработка технологических процессов – повышение их стабильности или разрешающей способности; в ряде случаев требуется разработка или освоение новых для данного предприятия технологических процессов (например при замене монтажного основания источника питания в виде двусторонней печатной платы на основание с металлической основой, полиамидной пленкой или керамикой, что резко улучшает теплоотвод и позволяет сократить габариты изделия). Взаимодействие конструкторов и технологов особенно тесно при согласовании конструкторской документации с технологами и при оценке технологичности конструкции на всех этапах конструкторского проектирования.

Результат конструирования – создание комплекта конструкторской документации, предназначенной для производства РЭС. Государственные стандарты, входящие в ЕСКД, устанавливают взаимосвязанные единые правила и положения по порядку создания, оформления и обращения конструкторской документации на изделия, разрабатываемые и выпускаемые предприятиями всех отраслей промышленности.

Конструкторские документы (КД) – графические и текстовые документы, в отдельности или в совокупности определяющие состав и устройство изделия и содержащие необходимые данные для его разработки и изготовления, контроля, приемки, эксплуатации, ремонта, утилизации.

Стандартам ЕСКД присваивают обозначения по классификационному принципу. Номер стандарта составляется из цифры, присвоенной классу стандартов ЕСКД, одной цифры после точки, обозначающей классификационную группу стандартов в соответствии с табл. 1.1, числа, определяющего порядковый номер стандарта в данной группе, и двузначной цифры (после тире), указывающей год регистрации стандарта. Например, обозначение стандарта ЕСКД «ЕСКД. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению» имеет вид ГОСТ 2.701–84, где ГОСТ – категория нормативно-технического документа (государственный стандарт), 2 – класс (стандарты ЕСКД), 7 – классификационная группа стандартов, 01 – порядковый номер стандарта в группе, 84 – год регистрации стандарта.

Таблица 1.1

Классификационные группы стандартов в ЕСКД

Шифр группы	Содержание стандартов в группе
0	Общие положения
1	Основные положения
2	Классификация и обозначение изделий в КД
3	Общие правила выполнения чертежей
4	Правила выполнения чертежей изделий машиностроения и приборостроения
5	Правила обращения КД (учет, хранение, дублирование, внесение изменений)
6	Правила выполнения эксплуатационной и ремонтной документации
7	Правила выполнения схем
8	Правила выполнения документов строительных, судостроительных и горных дел
9	Прочие стандарты

Организация опытно-конструкторских работ (ОКР) и научно-исследовательских работ (НИР). Ввиду того, что требования к параметрам разрабатываемых РЭС часто противоречивы (например малая стоимость и высокая надежность), исходная информация для вновь создаваемых изделий не является достаточно полной, а исполнители при работе допускают ошибки. Разработку РЭС и их конструкции проводят в несколько стадий (не менее двух): научно-исследовательская работа (НИР) и опытно-конструкторская (ОКР). Каждая стадия включает несколько этапов. В ходе выполнения работ на стадиях и этапах происходит постепенное уточнение принимаемых решений и нахождение оптимального. При этом устраняются ошибки, которые могут быть допущены как руководителями (ошибки планирования и др.), так и исполнителями (неправильный выбор технических решений, ошибки при выполнении конструкторской документации и т. д.). Причиной ошибок выступают, как правило, недостаточная квалификация, неполная информация, а также повышенная утомляемость работников при сжатых сроках разработки. Специфика разработки РЭС заключается в том, что на всех стадиях и этапах различные специалисты взаимодействуют друг с другом с самого начала.

Основные этапы проведения НИР:

- 1) предплановый патентный поиск;
- 2) разработка и согласование с заказчиком технического задания, государственная регистрация НИР;
- 3) подготовительный этап – выбор направлений исследования, разработка, согласование и утверждение частных технических заданий на основные части НИР;
- 4) основной этап – теоретические и экспериментальные исследования (выполнение теоретических изысканий, расчетов, математического моде-

лирования), обработка результатов исследований, составление и оформление технической документации;

5) заключительный этап – обобщение результатов и оценка выполненной НИР (составление карты технического уровня, оценка полноты и качества проведенной НИР, подготовка к предъявлению работы к приемке);

6) приемка НИР, обсуждение и согласование задания на проведение ОКР, государственный учет НИР.

Этапы ОКР: техническое задание, техническое предложение, эскизный проект, технический проект, разработка рабочей документации.

Отработка документации для производства. Рабочая документация – это совокупность конструкторской документации, предназначенной для изготовления и испытания опытного образца, установочной серии, серийного образца. После заводских испытаний опытного образца конструкторской документации присваивается литера «О»; после государственных, межведомственных, приемочных и других видов испытаний – литера «О₁»; на последующих стадиях (после повторных испытаний изготовленных изделий) – литеры «О₂», «О₃» и т. д. Конструкторская документация на изделие для установочной серии имеет литеру «У»; после испытаний установочной серии – литеру «А». После корректировки документации испытательной (головной) серии конструкторской документации присваивается литера «Б», что дает право наладить серийное или массовое производство изделия. Документации на изделие для разового изготовления или нескольких изделий присваивают литеру «И».

Поколения РЭС. РЭС первого поколения (1920–1950-е годы) были построены с использованием электровакуумных ламп, дискретных ЭРЭ, проводных электрических связей; ко второму поколению РЭС (1950–1960-е годы) относят конструкции РЭС на печатных платах и дискретных полупроводниковых приборах; к третьему – конструкции на печатных платах и ИС малой степени интеграции (1960–1970-е годы). В конструкциях РЭС четвертого поколения применены БИС, многослойные печатные платы, гибкие печатные шлейфы, микрополосковые линии. В настоящее время развиваются РЭС пятого поколения, в которых находят применение приборы функциональной микроэлектроники. Широкое распространение эти РЭС получили к концу XX века.

Рассмотрим специфику конструкций аппаратуры первых четырех поколений. Аппаратура первого поколения имела блочную конструкцию. Каждый блок – осциллограф, вольтметр, радиоприемник, блок автоматики (рис. 1.3), блок аналоговой РЭС (рис. 1.4) и т. д. – имел определенное функциональное назначение. К недостаткам этой аппаратуры, в состав которой входили электровакуумные приборы и дискретные ЭРЭ, относятся малые плотности компоновки, степень унификации несущих конструкций,

неприспособленность конструкции к механизации и автоматизации сборочно-монтажных работ.

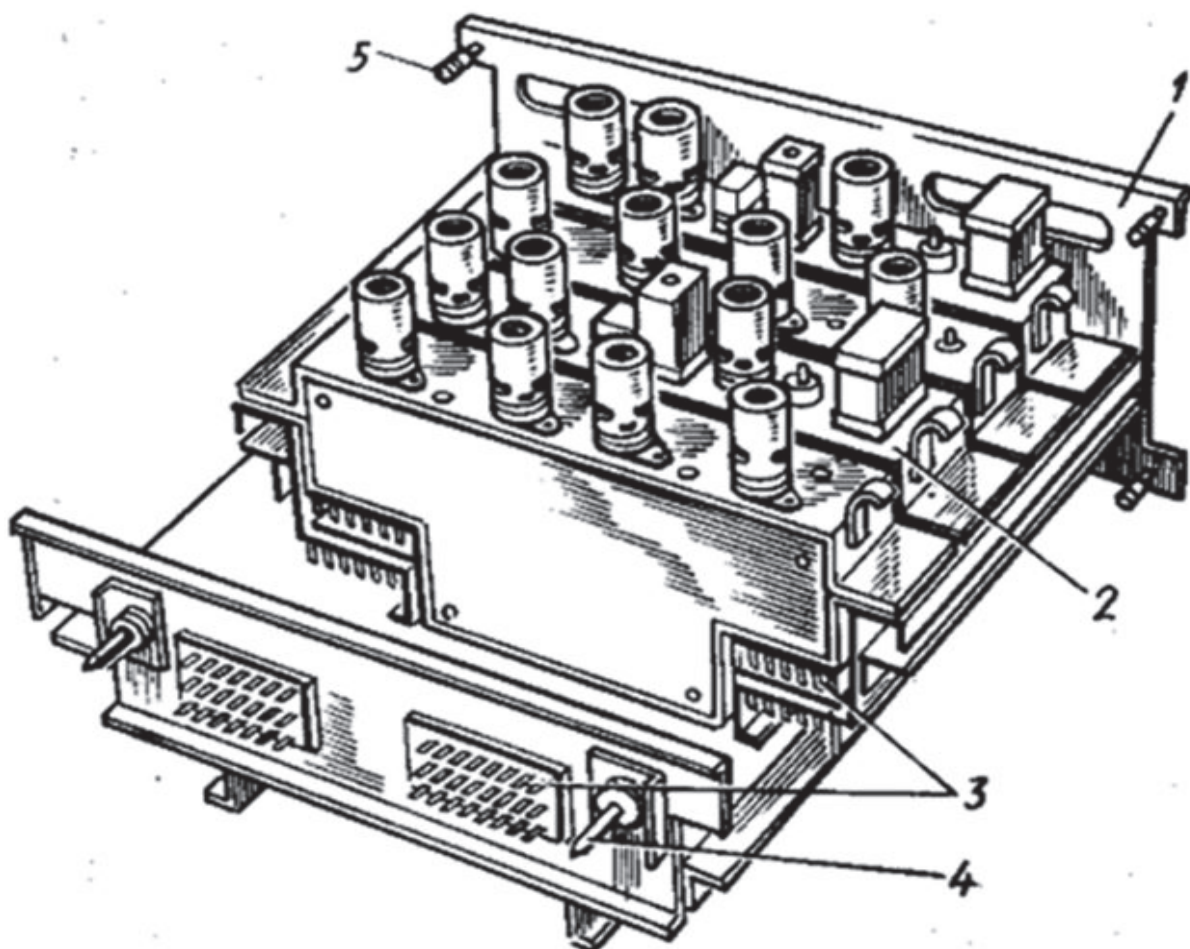


Рис. 1.3. Конструкция РЭС первого поколения: 1 – основание с передней и задней панелью; 2 – функциональные модули с электровакуумными лампами; 3 – разъемные соединители для подключения модулей и внешних связей; 4 – направляющие штыри; 5 – винты крепления блока в стойке

Характерной особенностью аппаратуры второго поколения является применение модулей на печатных платах (рис. 1.5), микромодулей этажерочной конструкции на керамических платах (рис. 1.6). Из таких модулей компоновались более сложные узлы (рис. 1.7). В модульных конструкциях удалось увеличить плотность компоновки благодаря как замене электровакуумных приборов полупроводниковыми, так и более плотной компоновке дискретных электрорадиоэлементов (ЭРЭ). Ремонтпригодность аппаратуры на модулях ниже по сравнению с блочной аппаратурой, поскольку при выходе из строя какого-либо элемента приходится заменять целый модуль.

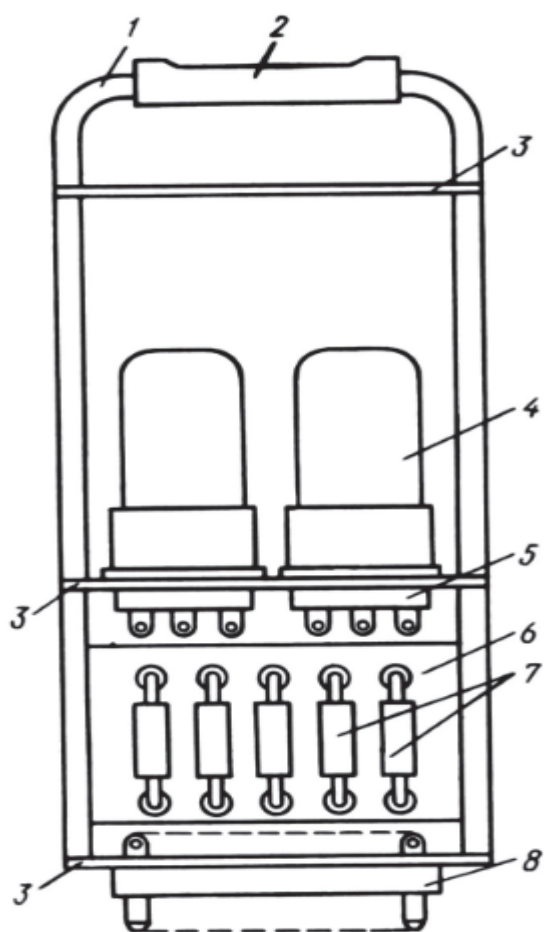


Рис. 1.4. Компоновка ячейки аналоговой ЭВМ первого поколения: 1 – рамка; 2 – ручка; 3 – поперечины; 4 – электровакуумные лампы; 5 – ламповая панелька; 6 – печатная плата; 7 – ЭРЭ; 8 – соединитель с плоскими контактами

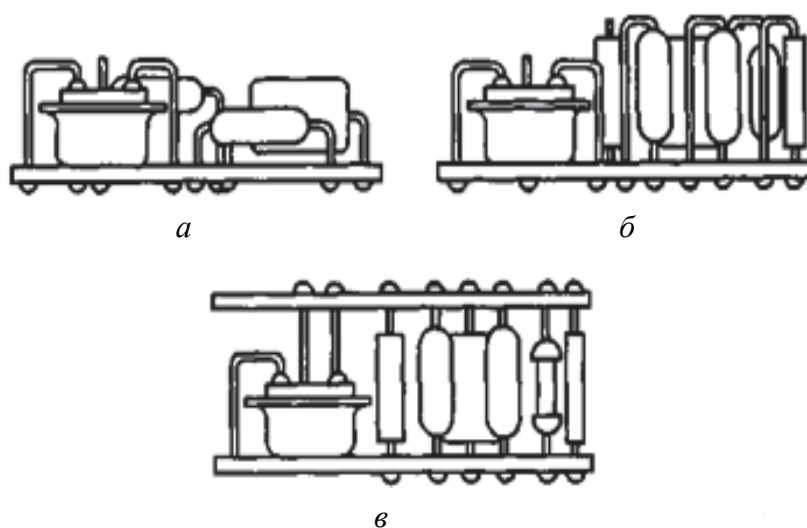


Рис. 1.5. Компоновочные схемы модулей на печатных платах:
а – горизонтальное; б – вертикальное;
в – этажерочное расположение деталей между платами

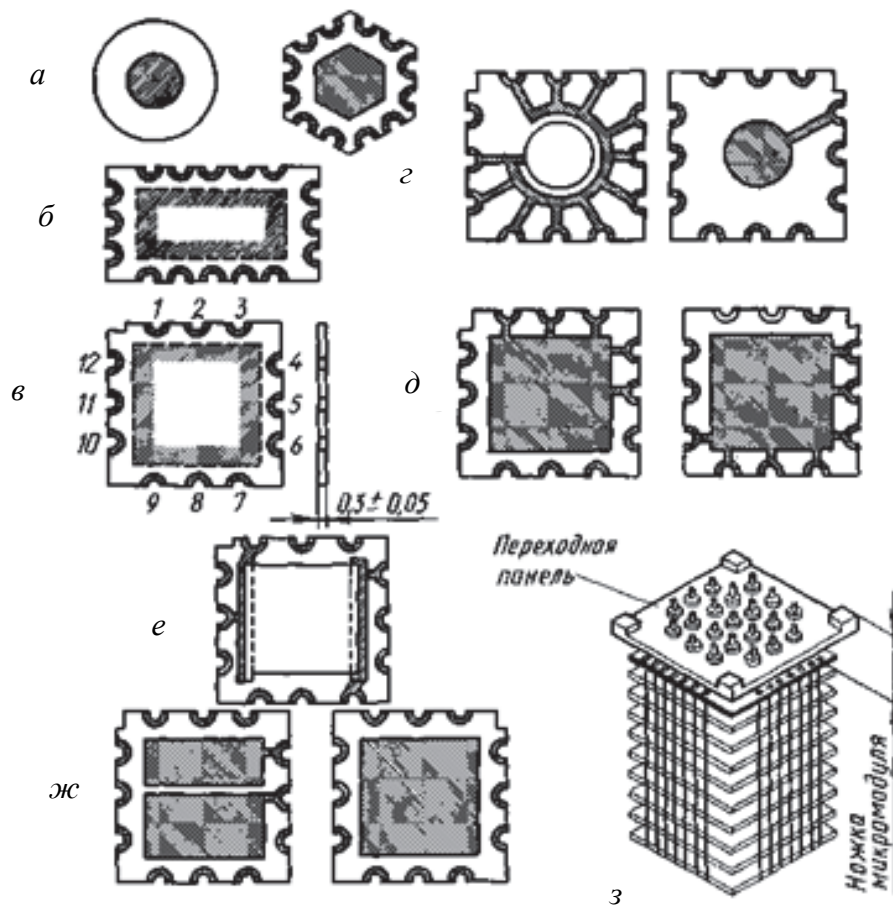


Рис. 1.6. Характерная форма микроплат (*а–в*), примеры плат-полуфабрикатов (*г–ж*), этажерочный микромодуль с 28 ленточными соединениями (*з*)

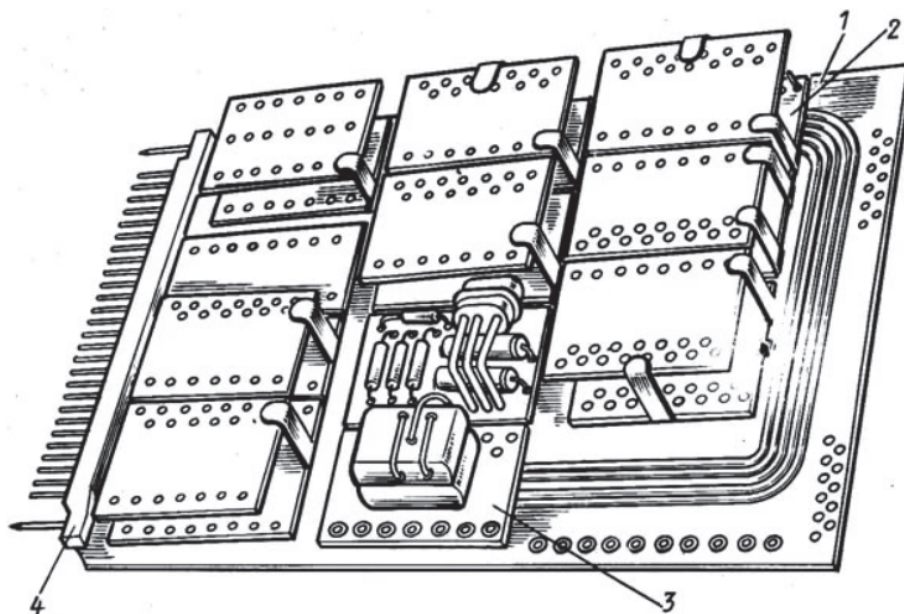


Рис. 1.7. Компоновка ячейки ЭВМ второго поколения с использованием модулей на печатных платах: *1* – двусторонняя печатная плата; *2* – двухплатный модуль; *3* – одноплатный модуль; *4* – соединитель

Аппаратура третьего поколения выполняется на ИС первой и второй степени интеграции, являющихся функциональными модулями, из которых можно скомпоновать более сложные узлы. Конструктивно такие узлы представляют собой двустороннюю или многослойную печатную плату с установленными на ней ИС (рис. 1.8). Подобные конструкции имеют высокую плотность компоновки, их функциональная сложность соответствует сложности блока первых поколений. Применение корпусных ИС позволило повысить надежность, степень унификации, взаимозаменяемость, уменьшить габариты, массу, иногда стоимость устройства по сравнению с РЭС второго поколения. Однако использование корпусных ИС приводит к значительной потере объема РЭС.

Аппаратура четвертого поколения используется в бортовых и СВЧ РЭС (рис. 1.9), её выполняют с использованием бескорпусных элементов, герметизируемых в составе блока. Плотность компоновки при этом увеличивается, но ремонтпригодность уменьшается, так как при выходе из строя одного элемента приходится либо разгерметизировать блок, либо заменять его.

Эволюция конструкций аппаратуры шла неразрывно с успехами в области технологии производства. Освоение электровакуумных приборов потребовало создания металлостеклянных спаев, разработки методов контроля герметичности приборов. Особенно большое влияние на конструкцию РЭС оказало освоение технологии печатных плат, интегральной полупроводниковой и гибридной технологии производства ИС и приборов функциональной микроэлектроники.

Дальнейшего совершенствования конструкций и методов конструирования РЭС следует ожидать в результате внедрения ЭВМ в конструирование и производство, дальнейшего расширения частотного диапазона электромагнитных сигналов, использования уже изученных и малоизученных физических явлений, новых материалов, расширения областей применения РЭС. Все более активное использование ЭВМ для проектных конструкторских работ связывают с развитием и внедрением САПР.

Появления новых конструкций можно ожидать в связи с использованием частотного диапазона сигналов в оптической области спектра. Одной из таких новых конструкций, вероятно, будет конструкция памяти сверхбольшой емкости, построенной с применением голографии и лазерной техники. Подобная память позволит создавать банки и базы данных с широкими возможностями и приблизит создание искусственного интеллекта.

Новые конструкции должны появиться и в связи с широким внедрением приборов функциональной микроэлектроники, основанных на хорошо изученных эффектах, а также за счет использования малоизученных в настоящее время эффектов (например эффекта сверхпроводимости при нормальных или повышенных температурах).

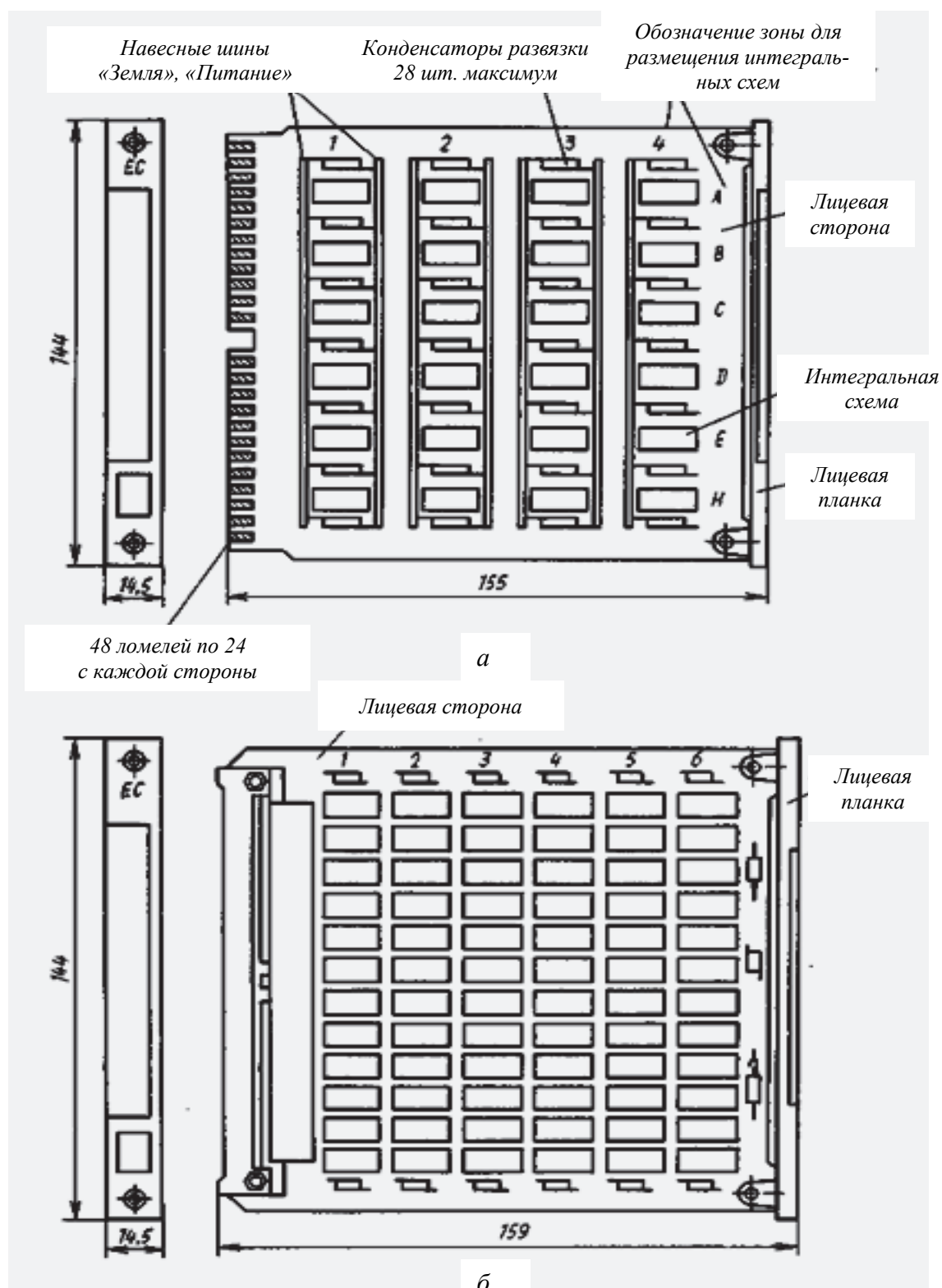


Рис. 1.8. Логические типовые элементы замены ЕС ЭВМ на основе двусторонней (а) и многослойной (б) печатной платы

Создание новых конструкций возможно и в результате появления новых материалов, например сплавов, полученных в условиях невесомости, и сплавов с более совершенной кристаллической решеткой.

Большого количества новых конструкций можно ожидать от расширения областей применения РЭС, особенно в бытовой сфере: в измерительной, медицинской, радио- и телевизионной технике. Новизна конструкций может быть обусловлена и использованием перспективных решений.

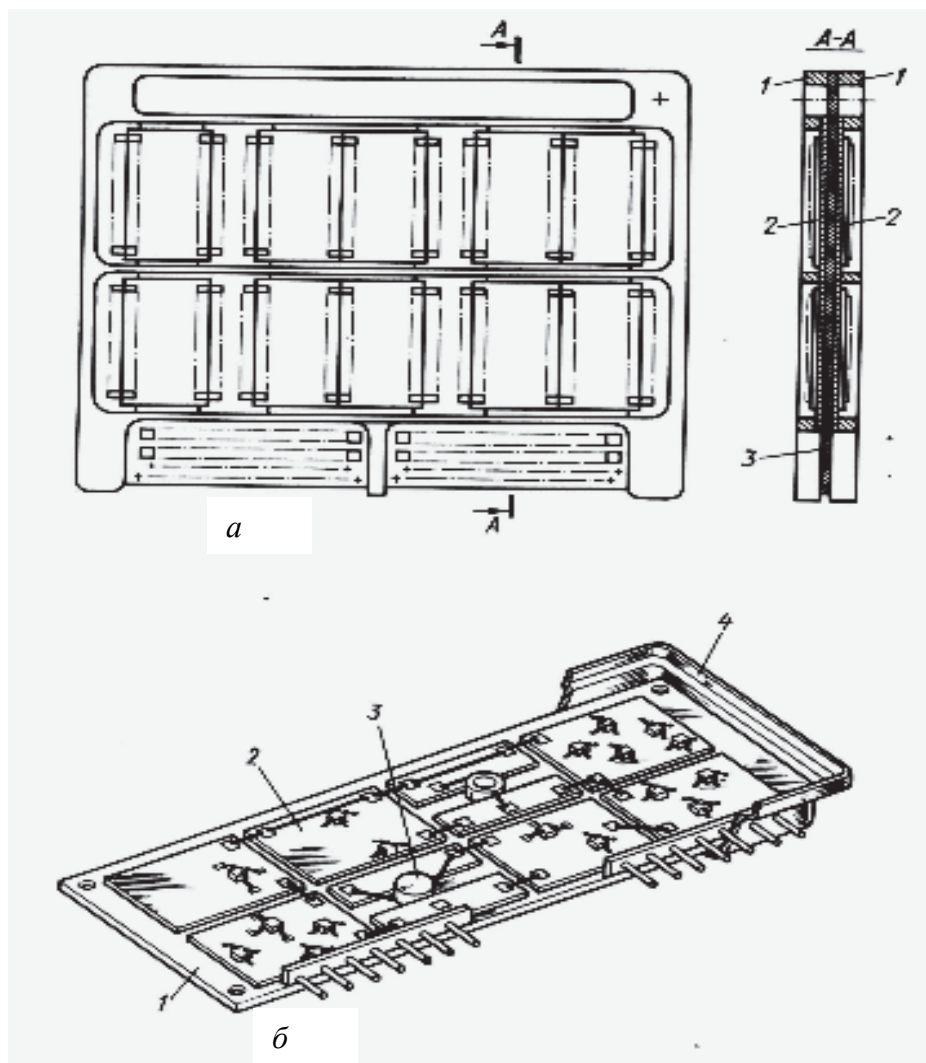


Рис. 1.9. Конструкция узлов РЭС четвертого поколения: *а* – ячейка бортовой ЭВМ на бескорпусных компонентах: 1 – рамка, 2 – микросборки, 3 – печатная плата; *б* – приемник: 1 – плата, 2 – микросборка, 3 – дискретный ЭРЭ, 4 – корпус со снятой герметизирующей крышкой

Несмотря на увеличение доли вычислительной техники и САПР при конструкторском проектировании, роль человека-конструктора не уменьшится, а возрастет, так как только человек может решать новые неформальные задачи.

1.2. Ограничения при проектировании

Структура и взаимосвязь ограничений. Ограничения – это факторы, не изменяемые конструктором: ресурсные, системотехнические, схемотехнические, конструкторские, технологические, эксплуатационные.

К *ресурсным* относятся материальные, временные, кадровые и энергетические ограничения.

Системотехнические ограничения (например тип РЭС): аналоговые или цифровые, наземные или бортовые, с информационным или структурным резервированием или без него, работающие в режиме разового, многократного, непрерывного, периодического использования и т. д.

Схемотехническими ограничениями, задаваемыми электрической схемой, являются элементная база (быстродействие, токи, помехоустойчивость, термочувствительность, стабильность параметров и т. д.), число и типы функциональных узлов, требования к их взаимному расположению и т. д.

Конструкторские ограничения: масса и габариты; рекомендуемые типы базовых несущих конструкций, методы реализации электрических связей; ограничительные перечни на материалы, полуфабрикаты, комплектующие изделия; требования к внешнему виду; патентоспособность и т. д.

Технологические ограничения: требование преемственности конструкций, тип производства, вид технологических процессов, время запуска в производство, повторяемость выпуска, номенклатура освоенных технологических процессов и их стабильность, требования по автоматизации и т. д.

Эксплуатационные ограничения: объект установки, уровень дестабилизирующих факторов – механических, климатических, тепловых, радиационных, электромагнитных воздействий; технологический уровень ремонтной базы, квалификация обслуживающего персонала, требования по ремонтпригодности конструкции, время хранения, время эксплуатации (ресурс) и т. д.

Система показателей качества Z определяет пригодность конструкции для использования ее по тому или иному назначению, что регламентируется техническим заданием на разработку конструкции. Каждый показатель зависит от характера конструкции и ограничений.

Виды технологичности: производственная и эксплуатационная. Для оценки мер по повышению технологичности вновь разрабатываемой конструкции РЭС проводится технико-экономический анализ, в результате которого устанавливается технико-экономический эффект, обусловленный внедрением новой техники и технологии с учетом дополнительных затрат на проектирование и подготовку производства. Технико-экономический эффект проявляется в виде экономии затрат и удовлетворения каких-либо потребностей людей (видеозапись, получение прогноза погоды с помощью

спутников, улучшение качества продукции, повышение безопасности, решение научных задач и т. д.). Основной предпосылкой повышения экономического эффекта как при изготовлении, так и при эксплуатации является повышение технологичности конструкции.

Различают производственную, эксплуатационную и ремонтную технологичность конструкции. Производственная технологичность определяет объем работ по технологической подготовке производства, сложность изготовления, удобство монтажа вне предприятия-изготовителя; эксплуатационная технологичность определяет объем работ при подготовке изделия к использованию по назначению, техническом ремонте и утилизации (возвращение в производство отходов); ремонтная технологичность характеризует свойства изделия при всех видах ремонта, кроме текущего.

Требования микроминиатюризации. Микроминиатюризация – постоянно действующая тенденция в развитии РЭС.

Расширение областей использования и усложнение РЭС ведут к увеличению числа входящих в них элементов и компонентов, что повышает стоимость, габариты, массу, энергопотребление и снижает надежность РЭС. Вначале для улучшения этих параметров осуществляли миниатюризацию элементов (например применяли электровакуумные лампы типов «дробь», «желудь», «пальчиковой» серии). Развитие интегральной гибридной и полупроводниковой технологии позволило резко уменьшить размеры элементов и перейти к микроминиатюризации.

Для дальнейшего улучшения параметров РЭС используют различные системотехнические, схемотехнические, конструкторские и технологические решения, в совокупности называемые *комплексной микроминиатюризацией*. Это увеличение степени интеграции ИС и модулей, разработка методов структурного резервирования, сложение мощностей маломощных источников излучения СВЧ, отвод тепла с помощью «тепловых труб», защита от механических воздействий с помощью вязкоупругих компаундов, защита от влаги бескорпусных элементов в составе блока общей оболочкой, использование микромощных элементов на основе КМДП-структур и транзисторных пар, изготовленных в едином технологическом цикле, замена электромеханических узлов электронными и т. д. Актуальность комплексной микроминиатюризации не снижается, так как отношение объема, занимаемого элементами в интегральном исполнении, к объему РЭС составляет 1:10 и менее.

Техническое задание как форма постановки задачи оптимизации конструкции РЭС. Техническое задание (ТЗ) составляет исполнитель на основании технических требований заказчика. На основе общего ТЗ могут быть составлены частные ТЗ для субподрядчиков. Объем экономических и производственных требований в этих ТЗ меньше, а технические требования более подробные, чем в основном ТЗ.

Требования, которым должна отвечать конструкция РЭС, определяются в ТЗ ее назначением, областью применения, условиями эксплуатации, типом производства, которое является основным исходным документом для разработки изделия в соответствии с ГОСТ 15.001 и ГОСТ 15.005. Объем исходных данных зависит от назначения и сложности проектируемого изделия.

Если проектировщику предлагается задание, проработанное до мелочей, то им пользоваться легко – как неким «сводом предписаний». Однако в ряде случаев задания выдают краткие и общие. В частности, для проведения разработки конструкции РЭС в рамках курсового и дипломного проектирования студент получает типовой бланк ТЗ, который заполняется в соответствии с конкретным заданием. Однако информации, приведенной в типовом бланке, недостаточно для анализа либо она записана в сокращенном виде. Поэтому первый этап работы над проектом – это формирование уточненного и расширенного технического задания.

Структура и состав ТЗ. Согласно ГОСТ 2.103 составление технического задания является первой стадией разработки РЭС, а само ТЗ – основным документом для принятия решения на последующих этапах проектирования.

Техническое задание может быть составлено как на все изделие, так и на его составные части. Оно содержит необходимые ограничения, связанные с условиями эксплуатации (климатические, механические, биологические воздействия), объектом установки (стационарная, возимая, носимая и т. д.), обслуживания (эргономические и другие факторы), производства РЭС (серийность выпуска, показатели технологичности), принципами функционирования (требования безопасности), а также сроками проектирования.

ТЗ оформляется в соответствии с ГОСТ 15.001 и ГОСТ 2.105 на листах формата А4, и его разделы нумеруются арабскими цифрами.

Рекомендуемый порядок построения и изложения технического задания в соответствии с ГОСТ 15.005 следующий:

- общие сведения о разработке;
- сведения о мировом уровне данного вида продукции;
- технические требования;
- экономические требования;
- требования к разработке;
- требования к изготовлению;
- требования к монтажу;
- требования к техническому обслуживанию и ремонту.

В экономических требованиях указывают контингент потребителей разрабатываемого изделия, его новизну и конкурентоспособность. В разделе «Требования к разработке» – график выполнения работ и перечень конструкторской документации, подлежащей разработке, а также соответствие

КД требованиям, изложенным в ЕСКД и других стандартах. Раздел ТЗ «Требования к изготовлению» заполняют тогда, когда известно конкретное предприятие-изготовитель, технологическое оборудование которого может наложить ограничения на выбор конструктивно-технологических решений при проектировании изделия и его составных частей. В разделе «Требования к монтажу» указывают ограничения к монтажу изделия, обусловленные объектом установки и квалификацией персонала, выполняющего монтаж изделия. В требованиях к техническому обслуживанию и ремонту должна содержаться информация о субъективных условиях эксплуатации: квалификация обслуживающего персонала, вид ремонтных мастерских и т. п.

Классификация РЭС по климату и категориям исполнения приведены в табл. 1.2 и 1.3 (ГОСТ15150).

Таблица 1.2

Обозначения климатических исполнений изделий РЭС

Климатические исполнения изделий	Обозначения		
	буквенные		цифровые
	русские	латинские	
Изделия, предназначенные для эксплуатации на суше, реках, озерах			
Для макроклиматического района с умеренным климатом	У	(<i>U</i>)	0
Для макроклиматического района с умеренным и холодным климатом	УХЛ	(<i>UF</i>)	1
Для макроклиматического района с влажным тропическим климатом	ТВ	(<i>TH</i>)	2
Для макроклиматического района с сухим тропическим климатом	ТС	(<i>TA</i>)	3
Для макроклиматического района как с сухим, так и с влажным тропическим климатом	Т	(<i>T</i>)	4
Для всех макроклиматических районов, кроме макроклиматического района с очень холодным климатом	О	(<i>U</i>)	5
Изделия, предназначенные для эксплуатации в макроклиматических районах с морским климатом			
Для макроклиматического района с умеренно-холодным морским климатом	М	(<i>M</i>)	6
Для макроклиматического района с тропическим морским климатом, в том числе для судов каботажного плавания или иных, предназначенных для плавания только в этом районе	ТМ	(<i>TM</i>)	7
Для макроклиматических районов как с умеренно-холодным, так и с тропическим морским климатом, в том числе для судов неограниченного плавания	ОМ	(<i>MU</i>)	8
Изделия, предназначенные для эксплуатации во всех микроклиматических районах на суше и на море, кроме макроклиматического района с очень холодным климатом	В	(<i>W</i>)	9

Таблица 1.3

Характеристика категорий исполнения РЭС

Укрупненная категория	Обозначение	Дополнительная категория	Обозначение
Для эксплуатации на открытом воздухе (воздействие совокупности климатических факторов, характерных для данного климатического района)	1	Для работы и эксплуатационного хранения в помещениях категории 4 и для кратковременной работы в других условиях	1.1
Для эксплуатации под навесом или в помещениях, где колебания температуры и влажности воздуха несущественно отличаются от колебаний на открытом воздухе и имеется доступ наружного доступа, а также изделия категории 1	2	Для эксплуатации в качестве встроенных элементов внутри комплектных изделий категорий 1; 1,1; 2, конструкция которых исключает возможность конденсации влаги на встроенных элементах	2.1
Для эксплуатации в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий	3	Для эксплуатации в нерегулярно отапливаемых помещениях	3.1
Для эксплуатации в закрытых помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями	4	Для эксплуатации в помещениях с кондиционированным или частично кондиционированным воздухом. Для эксплуатации в лабораторных, капитальных жилых и других подобного типа помещениях	4.1
Для эксплуатации в помещениях с повышенной влажностью	5	Для эксплуатации в качестве встроенных элементов внутри комплектных изделий категории 5 при условии отсутствия на них конденсации влаги	5.1

Климатические факторы. Нормальными климатическими условиями являются такие: температура $+25\pm 10$ °С, относительная влажность 45–80 %, атмосферное давление $(8,3–10,6)10^4$ Па (630–800 мм рт. ст.), отсутствие активных веществ в окружающей атмосфере.

Совокупность воздействующих на конструкцию ЭА отдельных климатических факторов и их характеристики определяются той климатической зоной, в которой она эксплуатируется. Весь земной шар разделен на семь климатических зон, климат которых определяется как очень хо-

лодный, холодный, умеренный, тропически влажный, тропически сухой, умеренно холодный морской и тропический морской.

Очень холодный регион располагается в Антарктиде. Средняя минимальная температура в нем ниже минус 60 °С. Рекордной является зафиксированная в центральных районах Антарктиды на станции «Восток» температура минус 88,3 °С. Характерная особенность этого региона – сочетание низких температур с сильным ветром.

В холодную зону включены большая часть России и Канады, Аляска, Гренландия. Средняя минимальная температура здесь достигает минус 50 °С, годовой перепад температур для некоторых районов составляет 80 °С, среднесуточный – до 40 °С. Особенностью для этой климатической зоны является наличие высокой прозрачности атмосферы, что благоприятно для ионизации воздуха и, как следствие, накоплению на поверхности аппаратуры статического электричества. Характерны обледенение, иней, ветер с мелкой снежной пылью.

В умеренный климатический регион включены часть территории России, большая часть Европы, США, прибрежные территории Австралии, Южной Африки и Южной Америки, где годовое изменение температур от минус 35 до плюс 35 °С, образование инея, выпадение росы, наличие тумана, изменение давления воздуха от 86 до 106 кПа.

Влажная тропическая зона располагается вблизи экватора и включает большую часть Центральной и Южной Америки, среднюю часть Африки, Юг Индии, Индонезию, часть Юго-Восточной Азии. Для этой зоны характерны среднегодовые температуры плюс 20...25 °С с перепадом температуры за сутки не более 10 °С. Высокая влажность и повышенная концентрация солей (особенно вблизи побережья морей и океанов) делает атмосферу этой зоны коррозионно-агрессивной. В промышленных районах в атмосфере содержатся сернистый газ и хлориды. Благоприятное сочетание температуры и влажности способствует существованию более 10 000 видов плесневых грибов.

К зоне с сухим тропическим климатом относят северную часть Африки, Центральную Австралию, засушливые районы Средней Азии, Аравийский полуостров, часть Северной Америки. Этот регион характеризуется высокими температурами (до плюс 55 °С), низкой влажностью, интенсивным солнечным излучением (до 1500 Вт/м²), высоким содержанием пыли и песка в атмосфере. Последнее способствует отрицательному абразивному и химическому воздействию на аппаратуру.

Умеренно холодная морская зона включает моря, океаны и прибрежные территории, расположенные севернее 30° северной широты и южнее 30° южной широты. Остальная часть морей, океанов и прибрежных территорий относится к тропически морской зоне. Климат морских зон отличается

сравнительно небольшими суточными перепадами температур, наличием высокой влажности и значительной концентрацией хлоридов в атмосфере.

Учитывая специфику каждой из климатических зон, ЭА наземного базирования, предназначенная для работы в тропических зонах, должна быть изготовлена в соответствующем исполнении, что отмечается в документации индексом Т; ЭА, устанавливаемая на судах с неограниченным районом плавания, имеет обозначение ОМ; ЭА, пригодная для эксплуатации на суше и на море, имеет индекс В.

Повышенные и пониженные температуры влияют на место установки ЭА, расположение источников внешнего нагрева, выделение тепла активными элементами внутри ЭА и суточным изменением температуры окружающей среды. Так как электрические параметры МС и ЭРЭ температурозависимы, необходимо, чтобы температура нагрева наиболее чувствительных к окружающей температуре элементов находилась в допустимых для этих элементов пределах. Кроме того, многие конструктивные материалы при высоких температурах претерпевают структурные изменения (тепловое старение материалов).

Работоспособность ЭА определяется допустимым температурным диапазоном работы, в котором она должна выполнять заданные функции в рабочем, т. е. во включенном, состоянии. Для исключения выхода из строя ЭА в процессе хранения и транспортирования в нерабочем (невключенном) состоянии необходимо, чтобы она выдерживала температуры, несколько бóльшие допустимого диапазона. Эти температуры, называемые *предельными*, характеризуют тепло- и холодопрочность конструкции ЭА.

Тепловой удар характеризуется резким изменением температуры окружающей среды. При этом время изменения температуры исчисляется минутами, а ее перепад – десятками градусов. Наиболее сильно тепловой удар проявляется в элементах конструкции, где имеются локальные механические напряжения, способствуя образованию микротрещин, их росту и объединению.

Влажность – один из наиболее агрессивных воздействующих факторов, проявляющий себя при погружении аппаратуры в воду, воздействии капель дождя и брызг, водяных паров, образовании росы и инея, который затем тает. Адсорбция на поверхности элементов ЭА конденсирующейся из окружающей атмосферы воды способствует коррозии металлических деталей, старению неметаллов, изменению электроизоляционных характеристик изоляторов. Кроме того, влага может выделяться из лакокрасочных и пропиточных материалов.

Вода, содержащаяся в атмосфере, всегда загрязнена активными веществами – углекислыми и сернистыми солями кальция, магния, железа, хлористым кальцием, газами, – что еще больше способствует появлению коррозии.