

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ДГТУ)

Факультет Энергетики и нефтегазопромышленности
Кафедра Автоматизация и математическое моделирование в нефтегазовом
комплексе

Конспект лекций

По дисциплине Проектирование автоматизированных систем
По направлению 150304 Автоматизация технологических процессов и
производств
Форма обучения заочная.

Ростов-на-Дону
2023

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Проектирование технических систем — комплекс работ по изысканиям, исследованиям, расчетам и конструированию, имеющих целью получение в принятой форме всех необходимых исходных данных для создания новых изделий или реализации новых процессов, удовлетворяющих заданным требованиям.

ЭВМ и многие другие радиоэлектронные системы — сложные системы, проектирование которых — трудоемкий процесс. Поэтому выполнение проектных работ должно быть распределено как во времени, так и между подразделениями проектного предприятия и отдельными представителями коллектива разработчиков.

Распределение работ во времени приводит к разделению процесса проектирования на этапы. Распределение работ между подразделениями производится на основе блочно-иерархического подхода к проектированию, обуславливающего выделение в процессе проектирования ряда уровней. Блочно-иерархический подход позволяет общую сложную задачу проектирования объекта свести к совокупности более простых задач, доступных для решения с помощью имеющихся средств проектирования.

В данной главе рассматриваются общие вопросы проектирования электронной и вычислительной аппаратуры с помощью систем автоматизированного проектирования (САПР): содержание процесса проектирования, характерные задачи, возникающие на каждом из этапов и уровней проектирования, особенности структуры САПР и назначите ее основных составных частей.

§ 1. УРОВНИ И ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В процессе проектирования сложной системы формируются определенные представления о системе, отражающие ее существенные свойства той или иной степенью подробности. В этих представлениях можно выделить составные части — *уровни проектирования*. В один уровень, как правило, включаются представления, имеющие общую основу и допускающие для своего описания использования одного и того же математического аппарата. Уровни проектирования можно выделять по степени подробности, с которой отражаются свойства проектируемого объекта. Тогда их называют *горизонтальными (иерархическими) уровнями проектирования*.

Выделение горизонтальных уровней лежит в основе *блочно-иерархического подхода* к проектированию. Горизонтальным уровням свойственны следующие:

при переходе с некоторого уровня $K1$, на котором рассматривается система S , на соседний, более низкий уровень $K2$ происходит разделение системы S на блоки s_j рассмотрение вместо системы S ее отдельных блоков s_j ;

рассмотрение каждого из блоков s_j на уровне $K2$ с большей степенью детализации, чем на уровне $K1$ (обычно степень детализации такова, что для системы S на уровне $K1$ и для

каждого из блоков s_j на уровне K_2 получаются задачи проектирования приблизительно одинаковой сложности с точки зрения возможностей восприятия человеком и возможностей решения с помощью имеющихся средств проектирования);

использование своих понятий системы и элемента на каждом иерархическом уровне: если на уровне K_1 элементами проектируемой системы S считались блоки s_j , то на соседнем, низшем уровне K_2 те же блоки s_j рассматриваются уже как системы.

Уровни проектирования можно выделять также по характеру учитываемых свойств объекта. Тогда и называют *вертикальными уровнями проектирования*. При проектировании изделий электронной техники основными вертикальным уровнями являются функциональное (схемное), конструкторское технологическое проектирование. При проектировании ЭВМ: уровням добавляется алгоритмическое (программное) проектирование

Функциональное проектирование связано с разработкой структурных, функциональных и принципиальных схем. В случае радиоэлектронной аппаратуры при функциональном проектировании определяются основные особенности структуры, принципы функционирования, важнейшие параметры и характеристики создаваемых объектов.

Алгоритмическое проектирование связано с разработкой алгоритмов функционирования ЭВМ в вычислительных систем (ВС), с созданием их общего математического обеспечения.

Конструкторское проектирование включает в себя вопросы конструкторской реализации результатов функционального проектирования, т. е. вопросы выбора форм и материалов оригинальных деталей, выбор типоразмеров унифицированных деталей, пространственного расположения составных частей, обеспечивающего заданные взаимодействия между ними.

Технологическое проектирование охватывает вопросы реализации результатов конструкторского проектирования, т. е. вопросы создания технологических процессов изготовления изделий.

Этапы проектирования. Процесс проектирования сложных систем разбивается на следующие этапы.

Этап научно-исследовательских работ (НИР) — этап предварительного проектирования. Как правило, новая сложная система определенного назначения либо не имеет аналогов, либо должна по тем или иным показателям превосходить их. И в том, и в другом случае достижение поставленных целей требует научных исследований, связанных с поиском принципиальных возможностей построения системы, новых структур, физических процессов, технических средств и т. п. Результаты выполнения этого этапа — техническое предложение.

Этап эскизного проектирования или опытно-конструкторских работ (ОКР) — этап выработки эскизного проекта, в котором отражаются результаты детальной проработки возможностей построения системы.

Этап технического (рабочего) проектирования — этап тщательной проработки всех схемных, конструкторских и технологических решений, фиксируемых в техническом проекте системы.

Кроме названных этапов при проектировании серийно выпускаемых изделий выделяются этапы изготовления, испытания опытного образца (часто также пробной серии) и корректировки проекта по результатам испытаний.

Основное назначение САПР — решение задач эскизного и технического проектирования.

Использование ЭВМ для решения задач этапа НИР по своему характеру ближе к решению научных задач. Здесь чаще, чем на других этапах, возникает необходимость использования нетиповых постановок задач, оригинальных математических моделей для исследуемых явлений и процессов, уделяется внимание вопросам управления научными экспериментами и обработки их результатов. Поэтому для этапа НИР целесообразно использование специальных *систем автоматизации научных исследований и экспериментов*. В этих системах используются многие элементы математического и программного обеспечения САПР, обслуживающие другие этапы проектирования. Но в целом эти системы иногда рассматриваются как самостоятельные, не входящие в состав САПР.

Этапы эскизного и технического проектирования, в свою очередь, делятся на более мелкие составные части, также называемые этапами.

Примечание. В дальнейшем, если нет специальной оговорки, под *этапом проектирования* будет подразумеваться часть процесса проектирования, заключающаяся в решении задач одного уровня.

В зависимости от порядка, в каком выполняются этапы проектирования, различают восходящее и нисходящее проектирование. *Восходящее проектирование* (проектирование снизу вверх) характеризуется решением задач более низких иерархических уровней перед решением задач более высоких уровней. Противоположная последовательность приводит к *нисходящему проектированию* (проектированию сверху вниз). При проектировании электронной и вычислительной аппаратуры находят применение как восходящее, так и нисходящее проектирование.

Уровни проектирования электронной и вычислительной аппаратуры. В настоящее время проектирование собственно ЭВМ и их элементной базы осуществляется на разных предприятиях и, следовательно, с помощью разных САПР.

Примечание. В дальнейшем будем для систем автоматизированного проектирования ЭВМ использовать обозначение САПР ЭВМ, а для систем автоматизированного проектирования изделий электронной техники — обозначение САПР ИЭТ.

Практика проектирования электронной и вычислительной аппаратуры привела к выделению горизонтальных и вертикальных уровней перечисленных в табл. 1.

Вертикальные уровни:			
функциональный		алгоритмический	конструкторский
Горизонтальные уровни: в САПР ИЭТ в САПР ЭВМ	—	Проектирование схем алгоритмов	—
	—	Программирование модулей	—
	Системный (структурный)	Архитектурный (машинный)	Стойка, панель
	Функционально-логический	Микропрограммный	ТЭЗ, модуль
	Схемотехнический	—	Кристалл интегральной схемы
	Компонентный		

Функциональное проектирование в САПР ЭВМ. Это проектирование включает в себя два больших горизонтальных уровня — системный и функционально-логический. Для выполнения задач этих уровней обычно используется нисходящее проектирование.

На системном уровне проектируются структурные схемы ЭВМ, в связи с чем данный уровень называют также структурным уровнем. На этом уровне ведется укрупненное рассмотрение всей ЭВМ или ВС в целом, а элементами проектируемых ЭВМ являются такие устройства, как процессоры, каналы, запоминающие, внешние и др. На системном уровне для раздельного исследования ЭВМ, больших: многомашинных ВС и сетей вычислительных машин можно выделить отдельные подуровни.

На функционально-логическом уровне проектируются функциональные и принципиальные схемы устройств ЭВМ. Здесь выделяют подуровни — регистровый и логический. На регистровом подуровне проектируются устройства из блоков (блоки типа регистров, счетчиков, дешифраторов и логических преобразователей, составляющих цепи межрегистровых пересылок). На логическом подуровне проектируются устройства или составляющие их блоки из отдельных логических вентилях и триггеров. На обоих подуровнях используются близкие по своему характеру математические модели и методы исследования, что и обуславливает удобство объединения этих подуровней в один уровень.

Функциональное проектирование в САПР ИЭТ. В случае схем малой и средней степени интеграции это проектирование занимает уровни схемотехнический и компонентный. Появление в САПР ИЭТ средств для решения задач функционально-логического уровня вызвано потребностью проектирования больших интегральных схем (БИС). Задачи

функционально-логического уровня в САПР ИЭТ аналогичны задачам такого же уровня в САПР ЭВМ (здесь проектируются функциональные схемы БИС).

На схемотехническом уровне проектируются принципиальные электрические схемы ИС или фрагментов БИС. Элементами здесь являются компоненты электронных схем (резисторы, конденсаторы, транзисторы, диоды).

На компонентном уровне разрабатываются отдельные компоненты ИС, рассматриваемые как системы, состоящие из элементов — участков полупроводникового кристалла, или дискретные компоненты.

Функциональное проектирование в САПР ИЭТ может быть как восходящим, так и нисходящим. Восходящее проектирование характеризуется использованием типовых конфигураций компонентов, типовых логических ячеек (фрагментов) при проектировании БИС.

Нисходящее проектирование характеризуется стремлением использовать схемотехнические решения, являющиеся наилучшими для конкретной БИС или сверх-БИС, и связано с разработкой оригинальных принципиальных схем и структур компонентов.

Высшие иерархические уровни алгоритмического проектирования служат для создания программного обеспечения ЭВМ. Для сложных программных систем обычно выделяют два иерархических уровня. На высшем из них производится планирование программной системы и разрабатываются схемы алгоритмов; элементами схем являются программные модули. На следующем уровне эти модули программируются на каком-либо алгоритмическом языке. Здесь используется нисходящее проектирование.

Низшие иерархические уровни алгоритмического проектирования тесно взаимосвязанных с уровнями функционального проектирования.

Основная задача *архитектурного уровня* проектирования—*выбор архитектуры* ВС, т. е. определение таких структурно-алгоритмических особенностей, как форматы данных и команд, система команд, принципы выполнения операций, условия возникновения и дисциплина обслуживания прерываний и т. п. (см. [1]). Часто выбор архитектуры рассматривают как одну из задач системного уровня, т.е. объединяют архитектурный и системный уровни в один иерархический уровень функционального проектирования.

Микропрограммный уровень предназначен для проектирования операций и процедур, выполняемых в ЭВМ аппаратным способом. Этот уровень тесно связан с функционально-логическим уровнем проектирования.

Конструкторское проектирование включает в себя иерархические уровни проектирования стоек, панелей, типовых элементов замены (ТЭЗов), модулей и кристаллов (чипов) интегральных схем. Для решения конструкторских задач характерно восходящее проектирование.

Примечание: Процесс выполнения операции и процедур иерархических уровней проектирования системного, функционально-логического, схемотехнического и т. д.

называют соответственно проектированием системным, функционально-логическим, схемотехническим и т. д.

§ 2. ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Задачи функционального проектирования ЭВМ и их элементной базы. Рассмотрим основные задачи, решаемые на различных иерархических уровнях функционального проектирования, а также на связанных с ними уровнях алгоритмического проектирования (см. [1—8]). При этом будем предполагать, что используется нисходящее проектирование.

Основные задачи системного и архитектурного уровней проектирования следующие:

определение принципов организации ВС;

выбор архитектуры, уточнение функций ВС и их разделение на функции, реализуемые аппаратным и программным путем;

разработка структурной схемы, т. е. определение состава устройств и способов их взаимодействия;

определение требований к выходным параметрам устройств и формирование технических заданий (ТЗ) на разработку отдельных устройств ЭВМ.

В ТЗ на разработку отдельных устройств ЭВМ входят: перечисление функций, выполняемых устройством, условия работоспособности устройства, требования к его выходным параметрам, данные о содержании и форме информации, которой данное устройство обменивается с другими устройствами системы. Кроме того, на этапе функционального проектирования устройств уже известно принятое на этапе предварительного проектирования решение относительно характера элементной базы (оригинальные или типовые БИС или серии стандартных микросхем средней и малой степени интеграции).

Поэтому в задачи *микропрограммного уровня алгоритмического проектирования и регистрового подуровня функционально-логического уровня проектирования* входят:

детализация выполняемых устройством функций, их алгоритмическая реализация и представление алгоритмов в одной из принятых форм;

выбор принципов организации устройства, включающий, например, выбор типа оперативного запоминающего устройства или де-композицию устройства на ряд блоков с выбором их структуры и т. п.;

разработка микропрограмм, т. е. определение для каждой команды совокупности микрокоманд и последовательности их выполнения;

синтез конечных автоматов (блоков), реализующих заданные функции, с определением типа и емкости памяти автоматов, функций выхода и возбуждения элементов памяти.

На *логическом подуровне функционально-логического уровня проектирования* решаются следующие задачи:

синтез функциональных и принципиальных схем выделенных блоков;

проверка работоспособности синтезируемых блоков с учетом задержек сигналов и ограничений выбранной элементной базы или выработка требований к задержкам элементов в составе БИС;

синтез контролирующих и диагностических тестов;

формулировка ТЗ для схемотехнического уровня проектирования.

Основную часть ТЗ на схемотехническом уровне проектирования составляют требования к следующим выходным параметрам электронных схем: задержкам распространения сигналов, мощностям рассеяния, уровням выходного напряжения, запасам помехоустойчивости и т. п. Кроме того, в ТЗ оговариваются условия функционирования в виде указания допустимых диапазонов изменения внешних параметров (температуры, напряжений питания, коэффициентов нагружения и др.).

На *схемотехническом уровне* основные задачи проектирования следующие:

синтез структуры принципиальной схемы;

расчет параметров пассивных компонентов и определение требований к параметрам активных компонентов;

расчет вероятности выполнения требований ТЗ к выходным параметрам;

формулировка ТЗ на проектирование компонентов.

На *компонентном уровне* задачи функционального, конструкторского и технологического проектирования тесно связаны друг с другом:

выбор физической структуры и расчет параметров диффузионного профиля полупроводниковых компонентов;

выбор топологии компонентов и расчет геометрических размеров в плане;

расчет электрических параметров и характеристик компонентов;

расчет параметров технологических процессов эпитаксии, диффузии окисления, обеспечивающих получение желаемого диффузионного профиля;

расчет вероятности выполнения требований к выходным параметрам компонентов.

При нисходящем проектировании связь иерархических уровней проявляется через формирование ТЗ на разработку элементов исходя из требований, предъявляемых к системе. Формирование ТЗ на некоторый объект производится на более высоком уровне по отношению к уровню данного объекта.

При нисходящем проектировании разработка элементов предшествует разработке системы, поэтому обычно ТЗ на элементы формируются на основе мнений экспертов на том же уровне, на каком эти элементы проектируются. Связь между уровнями проявляется прежде всего в том, что при проектировании системы учитываются свойства уже спроектированных элементов через использование макромоделей элементов. Поэтому в перечень задач различных уровней, решаемых при восходящем проектировании, добавляется задача получения макромоделей и определения значений их параметров.

Задачи конструкторского проектирования. Конструкторское проектирование включает в себя решение задач следующих групп: коммутационно-монтажного проектирования; обеспечения допустимых тепловых режимов; конструирования электромеханических узлов внешних устройств; изготовления конструкторской документации (см. [8—11]).

Основные задачи коммутационно-монтажного проектирования в САПР ИЭТ — задачи размещения компонентов на подложке и трассировки электрических соединений между компонентами. При проектировании интегральных схем эти задачи конкретизируются в следующем перечне (см. [8]):

конструкторский расчет геометрических размеров компонентов в плане (эта задача иногда считается задачей функционального проектирования);

определение взаимного расположения компонентов на полупроводниковой пластине;

размещение компонентов на пластине с учетом геометрии компонентов, схемотехнических и технологических ограничений;

трассировка соединений;

вычерчивание послойных чертежей с общего вида топологии и составление таблиц координат угловых точек для последующего изготовления фотошаблонов.

Задачи размещения элементов и трассировки электрических соединений решаются и в САПР ЭВМ. Так, на уровне типовых элементов замены (ТЭЗов) необходимо разместить корпуса микросхем и выполнить трассировку печатных проводников в одном или нескольких слоях печатной платы. На других уровнях (панели, стойки) также решаются задачи размещения элементов и проведения проводных соединений. Кроме того, к задачам коммутационно-монтажного проектирования относится задача компоновки элементов блока, решение которой требуется в САПР ЭВМ и при проектировании БИС в САПР ИЭТ.

При конструировании электромеханических устройств возникает большое количество разнообразных задач, связанных с разработкой кинематических схем, расчетами динамики и прочности конструкции и их элементов, определением допусков и т. п.

Изготовление конструкторской документации включает в себе автоматическое оформление результатов проектирования, получаемых в ходе решения охарактеризованных выше задач, в требуемой виде (например, в виде чертежей, диаграмм, таблиц и т. п.). Развитие технологического оборудования с программным управлением все чаще приводит к необходимости получения результатов проектирования в виде перфолент

или других машинных носителей управляющей информации. Так, для получения фотооригиналов печатных плат и фотошаблонов интегральных схем (ИС) в настоящее время используется программно-управляемое оборудование — координатографы и фотонаборные установки.

Схема процесса проектирования (см. [12]). Задачи, решаемые на каждом этапе блочно-иерархического проектирования, делятся на задачи синтеза и анализа. Задачи синтеза связаны с получением проектных вариантов, а задачи анализа — с их оценкой.

Различают синтез параметрический и структурный. Цель структурного синтеза — получение структуры объекта, т. е. состава его элементов и способа их связи между собой.

Цель параметрического синтеза — определение числовых значений параметров элементов. Если ставится задача определения наилучших в некотором смысле структуры и (или) значений параметров, то такая задача синтеза называется оптимизацией. Часто оптимизация связана только с параметрическим синтезом, т. е. с расчетом оптимальных значений параметров при заданной структуре объекта. Тогда, чтобы подчеркнуть такой характер оптимизации, ее называют параметрической оптимизацией. Задачу выбора оптимальной структуры называют *структурной оптимизацией*.

Задачи анализа при проектировании являются задачами исследования модели проектируемого объекта. Модели могут быть физическими (различного рода макеты, стенды) и математическими. Математическая модель — совокупность математических объектов (чисел, переменных, векторов, множеств и т. п.) и отношений между ними, которая адекватно отображает свойства проектируемого объекта, интересующие инженера-проектировщика.

Математические модели объекта могут быть *функциональными*, если они отображают физические или информационные процессы, протекающие в моделируемом объекте, и структурными, если они отображают только структурные (в частном случае геометрические) свойства объектов. Функциональные модели объекта чаще всего представляют собой системы уравнений, а структурные модели объекта — это графы, матрицы и т. п. Обычно при проектировании одного и того же объекта используется несколько моделей, различающихся сложностью и точностью.

Математическую модель объекта, полученную непосредственным и объединением математических моделей элементов в общую систему, полной математической моделью. Упрощение полной математической модели объекта дает его *макромодель*. В САПР применение приводит к сокращению затрат машинного времени и памяти, но за счет уменьшения точности и универсальности модели.

Фигурирующие в математических моделях объектов величины называют параметрами. Важное значение при описании объектов имеют параметры, характеризующие свойства элементов, — *параметры элементов (внутренние параметры)*, параметры, характеризующие свойства систем, — *выходные параметры* и параметры, характеризующие свойства внешней по отношению к рассматриваемому объекту среды, — *внешние параметры*.

Обозначим через X , Q и Y векторы соответственно внутренних и внешних и выходных параметров. Очевидно, что Y есть функция X и Q . Если эта функция известна и может быть представлена в явной форме

$$Y = F(X, Q), \quad (1)$$

то (1.1) называют *аналитической моделью*.

В задачах проектирования аналитические модели удастся получать лишь в редких случаях. Поэтому обычно используются алгоритмические модели, в которых отображение (1.1) задается в виде алгоритма.

Задачи анализа довольно разнообразны. При одновариантном анализе исследуются свойства объекта в заданной точке пространства параметров, т. е. при заданных значениях внутренних и внешних параметров. К задачам одновариантного анализа относится анализ статических состояний, переходных процессов, стационарных режимов колебаний, устойчивости. При многовариантном анализе исследуются свойства объекта в окрестностях заданной точки пространства параметров. Типовыми задачами многовариантного анализа являются статистический анализ и анализ чувствительности.

Примечание. Названия «одно- и многовариантный анализ» подчеркивают то обстоятельство, что для их выполнения обычно требуется соответственно один или много вариантов решения уравнений математической модели (или вариантов измерений на макете).

Исходные данные для проектирования на очередном уровне зафиксированы в ТЗ, включающем перечисление функций объекта, технические требования (ограничения) $тт_j$ на выходные параметры y_j допустимые диапазоны изменений внешних параметров. Требуемые соотношения между y_j и $тт_j$ называют условиями работоспособности. Эти условия могут иметь вид равенств

$$y_j = тт_j \pm \Delta y_j \quad (2)$$

и неравенств

$$y_j < тт_j \quad (3)$$

$$y_j > тт_j \quad (4)$$

Где Δy_j — допустимое отклонение реально достигнутого значения y_j от указанного в ТЗ значения y_j ; $j = 1, 2, \dots, m$ (m — количество выходных параметров).

На рис. 1 представлена типичная для одного уровня схема процесса нисходящего проектирования. Синтезируется исходный вариант структуры, для него составляется модель и рассчитываются исходные значения параметров элементов. Анализ модели позволяет принять то или иное решение о дальнейших действиях. Если получена прилемая степень выполнения условий работоспособности, то синтезируемый вариант считается на данном этапе проектирования окончательным; следовательно, можно приступить к оформлению технической документации, записи ТЗ на разработку

элементов и перейти к следующему уровню проектирования. Если удовлетворительный результат еще не достигнут, то принимается решение о путях дальнейшего улучшения объекта.

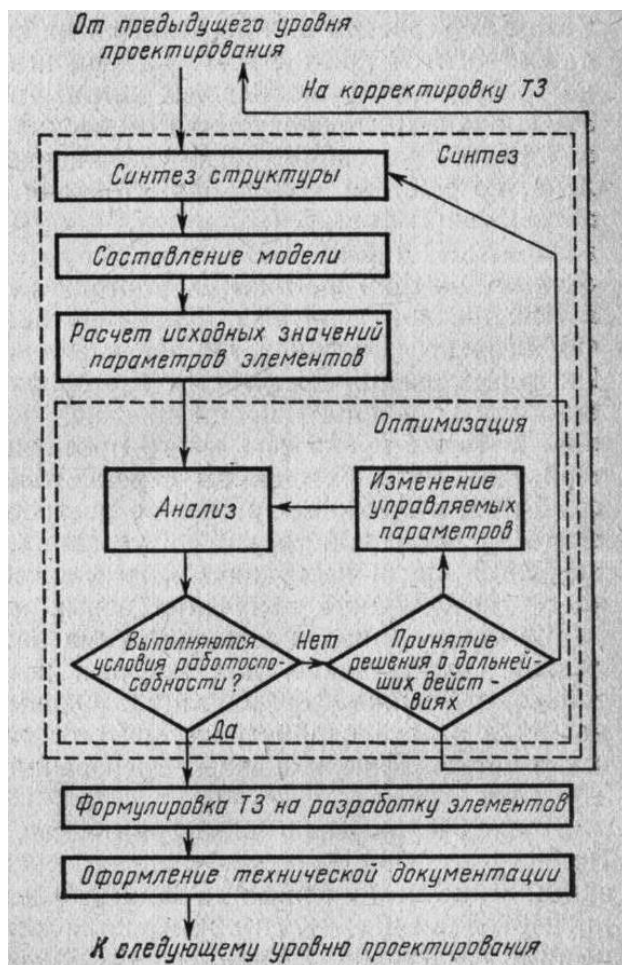


Рис.1. Схема процесса нисходящего проектирования

Первый путь — изменение значений параметров элементов. Если это изменение осуществляется с целью получить наибольшую степень выполнения условий работоспособности при заданной структуре объекта, то совокупность процедур анализа и изменения параметров есть процедура оптимизации. Второй путь — изменение структуры объекта. Для каждого нового варианта структуры должна корректироваться или заново составляться модель и выполняться оптимизация параметров. Совокупность процедур синтеза структуры, составлении модели и оптимизации параметров есть процедура синтеза объекта. Третий путь связан с корректировкой ТЗ на проектируемый объект. Он используется, если достичь выполнения требований ТЗ с помощью других путей не удается.

Процесс проектирования носит *итерационный характер*. Последовательные приближения к окончательному результату имеют место в рамках всех рассматриваемых путей. Итерации могут включать в себя и более чем один уровень проектирования, необходимость возврата к предыдущему уровню может обнаружиться на любом последующем этапе. Таким образом, в процессе проектирования приходится многократно выполнять процедуру анализа объекта.

Поэтому очевидно стремление уменьшить трудоемкость каждого варианта анализа без ущерба для качества окончательного проекта. В этих условиях целесообразно на начальных итерациях процесса проектирования, когда высокой точности результатов не требуется, использовать наиболее простые и экономичные модели. На последних итерациях применяют наиболее точные модели, проводят многовариантный анализ и тем самым получают достоверные оценки работоспособности объекта.

Формализация проектных задач и возможности применения ЭВМ для их решения. Формализация проектной задачи является необходимым условием для ее решения на ЭВМ. К формализуемым задачам относятся прежде всего задачи, всегда считавшиеся рутинными, не требующими существенных затрат творческих усилий инженеров. Это, например, процедуры изготовления конструкторской документации (КД) в условиях, когда содержание КД уже полностью определено, но еще не имеет принятой для хранения и дальнейшего использования формы (например, формы чертежей, графиков, схем алгоритмов, таблиц соединений); процедуры проведения электрических соединений в печатных платах или выполнения межпанельного и межстоечного монтажа. Кроме рутинных к формализуемым задачам относится большинство задач анализа проектируемых объектов. Их формализация достигается благодаря развитию теории и методов автоматизированного проектирования и прежде всего моделирования. В то же время есть много проектных задач творческого характера, для которых способы формализации неизвестны. Это задачи, связанные с выбором принципов построения и организации объекта, синтеза схем и конструкций в условиях, когда выбор варианта производится среди неограниченного множества вариантов и не исключается возможность получения новых, ранее неизвестных решений.

Между рутинными и творческими задачами находится многочисленная группа задач, для которых возможна (или целесообразна) только частичная формализация. Одним из примеров таких задач является задача параметрической оптимизации объектов при отсутствии четко зафиксированных требований к выходным параметрам в ТЗ.

Подход к решению задач указанных групп в САПР неодинаков. Полностью формализуемые задачи, составляющие первую группу задач, чаще всего решаются на ЭВМ без вмешательства человека в процесс решения, т. е. применяется решение на ЭВМ в пакетном режиме. Частично формализуемые задачи, составляющие вторую группу задач, решаются на ЭВМ при активном участии человека, т. е. имеет место применение ЭВМ в интерактивном режиме. Наконец, неформализуемые задачи, составляющие третью группу задач, решаются инженером без помощи ЭВМ.

Примечание: Использование интерактивного режима может быть предпочтительным и при решении некоторых рутинных задач, если затраты машинного времени оказываются существенными и вмешательство человека в ход вычислений на некоторых этапах решения может заметно ускорить получение результата (например, за счет пропуска ряда бесперспективных вариантов расчета).

В настоящее время одним из направлений развития математического обеспечения автоматизированного проектирования является разработка методов и алгоритмов синтеза на различных уровнях иерархического проектирования радиоэлектронной

аппаратуры(РЭА). Успехи этого направления приводят к расширению второй группы задач за счет отдельных задач третьей группы. В то же время общий научно-технический прогресс электроники и вычислительной техники порождает новые задачи, которые, как правило, первоначально относятся к третьей группе задач. Последнее обстоятельство служит причиной того, что проектирование изделий электронной техники и ЭВМ останется автоматизированным, в нем активную роль будет играть человек. Автоматическое (без участия человека) проектирование может появиться только в рамках каких-либо отдельных подсистем в общей системе автоматизированного проектирования.

Математический аппарат, используемый в САПР для разных уровней проектирования. Представления о проектируемых объектах, составляющие уровни проектирования, естественным образом включают в себя и математическое описание структур и процессов, т. е. включают математические модели объектов. При этом для каждого уровня характерно использование своего математического аппарата получения и анализа моделей.

На компонентном уровне исследуются процессы, протекающие в трехмерной среде и в непрерывном времени. Для описания этих процессов используются дифференциальные уравнения в частных производных, в которых в качестве независимых переменных фигурируют время и пространственные координаты. Для описания электрических процессов в полупроводниковых компонентах электронных схем такими уравнениями являются уравнения непрерывности, переноса и Пуассона, а для описания тепловых процессов — уравнение теплопроводности.

На схмотехническом уровне рассматриваются более сложные системы — совокупности компонентов, функционирующих в составе электронной схемы. Для сохранения сложности моделей на приемлемом уровне здесь осуществляется переход от непрерывного к дискретному пространству при сохранении непрерывного представления времени. Поэтому математическим аппаратом моделирования и анализа «электрических процессов в электронных схемах является аппарат численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений в статических, случаях вырождающихся в алгебраические и трансцендентные уравнения. На конструкторском этапе проектирования электронных схем используются уравнения такого же типа, с их помощью анализируются тепловые процессы в изделиях ранга ТЭЗов, проверяются условия электромагнитной совместимости при коммутационно-монтажном проектировании.

На более высоких уровнях функционального проектирования в моделях отражаются процессы преобразования информации. Вместо фазовых переменных, описывающих электрические, магнитные или тепловые процессы, используются переменные, отражающие информационное состояние объектов. На функционально-логическом уровне проектирования цифровой аппаратуры этими объектами являются логические вентили и блоки, их состояние характеризуется дискретными, чаще всего булевыми, величинами. Поэтому используемый здесь математический аппарат — математическая логика (в том числе булева алгебра и теория конечных автоматов). На этом уровне в модели отображаются переменные и действия, которые выполняются моделируемым объектом в соответствии с алгоритмом функционирования. Здесь можно отождествлять информационные переменные с сигналами и поставить в соответствие каждому сигналу

некоторую физическую величину — напряжение или ток на выходе конкретного элемента.

На системном уровне происходит дальнейшее абстрагирование от физической сущности информационных процессов. Состояние некоторого устройства системы характеризуется только тем, занято устройство обработкой информации на данном отрезке времени или нет. Обрабатываемая информация делится на составные части — заявки (задачи). Заявки в отличие от сигналов предыдущего уровня не привязаны жестко к какому-либо одному устройству, а обслуживаются в системе, перемещаясь от устройства к устройству в соответствии с алгоритмом функционирования системы и своими параметрами. Таким образом, на системном уровне фигурируют объекты двух типов — устройства и заявки. И те, и другие имеют свои параметры, в том числе параметры, характеризующие их состояние. Для заявок возможны состояния ожидания и обслуживания. При проектировании системы необходимо обеспечить обслуживание заданного потока заявок при рациональном использовании оборудования. Математическим аппаратом анализа на системном уровне является теория массового обслуживания.

Большинство задач конструкторского проектирования относится к задачам синтеза (например, задачи коммутационно-монтажного проектирования). Для их решения широко используются теория графов, дискретное математическое программирование, комбинаторные методы.

Параметрическая оптимизация на различных уровнях проектирования основана на применении методов математического программирования (главным образом нелинейного программирования). Кроме того, для решения задач статистического анализа на различных уровнях используется ряд положений теории вероятностей и математической статистики.

§ 3. СТРУКТУРА И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ

Составные части САПР. Система автоматизированного проектирования (САПР) — это совокупность средств и методов для осуществления автоматизированного проектирования. Она состоит из нескольких составных частей, называемых техническим, математическим, программным, лингвистическим, информационным, методическим и организационным обеспечениями (см. [13]).

Техническое обеспечение включает в себя технические средства (ЭВМ, периферийное оборудование), с помощью которых решаются задачи проектирования.

Математическое обеспечение представляется математическими моделями, методами и алгоритмами для решения проектных задач.

Программное обеспечение — это совокупность программ для реализации автоматизированного проектирования. Программное обеспечение может быть специальным и общим. *Специальное программное обеспечение* включает в себя пакеты прикладных программ (ППП), предназначенных для решения конкретных проектных задач. Общее программное обеспечение предназначено для управления вычислительным

процессом в САПР и подготовки программ из ППП к исполнению на ЭВМ. В общее программное обеспечение входят операционные системы ЭВМ, функционирующие в САПР, а также программы, не входящие в состав операционных систем, но выполняющие сходные функции (управление заданиями, данными, редактирование, трансляции и т. п.) в конкретной САПР.

Лингвистическое обеспечение выражается совокупностью языковых средств, используемых в САПР. В лингвистическое обеспечение входят общеизвестные алгоритмические языки, используемые для записи программ САПР, и входные языки, служащие для описания объектов проектирования и заданий на выполнение проектных процедур. Входные языки представляют для пользователя САПР наибольший интерес, определяя удобство общения инженера с ЭВМ в процессе проектирования.

Информационное обеспечение — совокупность сведений, необходимых для выполнения проектирования. Основную часть информационного обеспечения составляет база данных — информационные массивы, используемые в более чем одной программе проектирования. Иногда к базе данных относят массивы только данных справочного характера, а также массивы результатов выполнения этапов проектирования, используемых на других этапах в качестве исходных данных. Такие базы данных в некоторых системах называют *архивами*. Базы данных в процессе проектирования должны пополняться, в ней возможны корректировка содержимого, стирание устаревших и ненужных сведений и т. п. Должна быть обеспечена также защита данных от неправильных изменений. Доступ к содержимому базы данных нужно обеспечить только определенному кругу лиц. Все перечисленные функции по работе с базой данных обеспечиваются *системой управления базой данных* (СУБД). База данных вместе с СУБД называются *банком данных*.

Методическое и организационное обеспечения представляют собой совокупность документов, устанавливающих состав и правила функционирования средств САПР и подразделений проектного предприятия.

Подсистемы САПР. Специализация некоторой части САПР на обслуживание проектных задач одного этапа проектирования приводит к выделению этой части как *подсистемы* САПР. Такая специализация затрагивает программное, математическое и лингвистическое обеспечение и иногда касается технического обеспечения.

Как правило, в САПР ЭВМ имеются подсистемы функционально-логического проектирования и конструкторского проектирования (см. [14]). В некоторых САПР ЭВМ есть также подсистема структурного (системного) проектирования и отдельная подсистема изготовления конструкторской документации.

В САПР ИЭТ различают подсистемы схмотехнического проектирования; проектирования компонентов; конструкторского (топологического) проектирования. Развитие БИС привело к появлению в САПР ИЭТ подсистемы функционально-логического проектирования (см. [15, 16]).

Для каждой подсистемы обычно разрабатывается свой входной язык и пакет прикладных программ; часто в подсистемах имеются автономные базы данных. Отличия технических

средств в подсистемах связаны с составом устройств автоматизированных рабочих мест проектировщика.

Принципы построения САПР. Современные САПР создаются соответствии со следующими принципами:

САПР — человеко-машинная система. Коллектив разработчиков является составной частью системы проектирования, выполняя проектные работы во взаимодействии с ЭВМ. Выше говорилось о том, что при проектировании РЭА наряду с процедурами, выполняемыми в автоматическом режиме работы ЭВМ, имеются процедуры, частично или полностью не формализуемые и потому выполняемые при определяющем участии человека. Об автоматическом проектировании можно говорить лишь в отношении отдельных несложных изделий.

Комплексная автоматизация всех уровней проектирования. Введение автоматизированного проектирования на нескольких уровнях при сохранении старых ручных форм проектирования на других уровнях менее эффективно, чем комплексная (сквозная) автоматизация на всех уровнях. Комплексная автоматизация позволяет внести такие изменения в структуру проектных предприятий, формы документов, которые соответствуют целям автоматизации — сокращению материальных и временных затрат, повышению качества проектирования, сохранению численности инженерно-технических работников на прежнем уровне, несмотря на усложнение проектируемых объектов.

Информационная согласованность подсистем и программ проектирования. Программы, входящие в пакет прикладных программ некоторой подсистемы САПР, должны быть информационно согласованными, т. е. допускающими возможность совместного исполнения при реализации заданной проектной процедуры без вмешательства человека в процесс сопряжения программ. Информационная согласованность программ имеет место при следующих условиях: программы созданы для работы, с одной и той же базой данных и не требуют ручной перекомпоновки числовых массивов, являющихся входными для одной и выходными для другой из сопрягаемых программ; задание исходной информации об объекте или о требуемых проектных операциях производится единым входным языком.

Обычно в составе одного пакета объединяются только информационно согласованные программы. Конечно, при этом обеспечивается сопряжение не любых двух произвольных программ пакета, а только тех, которые образуют последовательности, полезные для проектирования. Для комплексной автоматизации всех уровней требуется информационная согласованность как программ внутри подсистем, так и самих подсистем между собой. Эта согласованность также обеспечивается единством элементов информационного и лингвистического обеспечений, имеющих отношение к обеим сопрягаемым подсистемам.

Открытость САПР. Свойство открытости системы означает возможность внесения изменений в систему во время ее эксплуатации. Изменения могут заключаться в добавлении новых или замене старых элементов в программном, информационном, а возможно, также в техническом и лингвистическом обеспечениях. Внесение изменений должно быть максимально упрощено и доступно пользователям САПР.

Открытая САПР является развивающейся системой, так как более совершенные методы, программы, технические средства по мере их появления могут быть реализованы в ней; она также легко адаптируется к изменяющимся условиям проектирования. Следовательно, свойство открытости приводит к увеличению срока службы Системы, повышает ее универсальность.

Совместимость традиционного и автоматизированного проектирования. Этот принцип имеет значение в случаях, когда автоматизированное проектирование внедряется на уже действующем предприятии со сложившейся структурой, взаимоотношениями подразделений, формами и способами использования проектной документации. Именно в этих условиях целесообразен эволюционный путь внедрения САПР, при котором изменения, диктуемые особенностями автоматизированного проектирования, не будут нарушать на длительный срок нормального функционирования предприятия.

Техническое обеспечение САПР

К техническому обеспечению САПР предъявляются следующие требования:

удобство использования инженерами-проектировщиками, возможность оперативного взаимодействия инженеров с ЭВМ;

достаточная производительность и объем оперативной памяти ЭВМ для решения задач всех этапов проектирования за приемлемое время;

возможность одновременной работы с техническими средствами необходимого числа пользователей для эффективной деятельности всего коллектива разработчиков;

открытость комплекса технических средств для расширения и модернизации системы по мере прогресса техники;

высокая надежность, приемлемая стоимость и т. п.

Удовлетворение перечисленных требований возможно только в условиях организации технического обеспечения в виде специализированной ВС, допускающей функционирование в нескольких режимах. Такое техническое обеспечение называют *комплексом технических средств САПР* (комплексом ТС). Рассмотрение структуры комплекса ТС, вариантов его состава, режимов работы и характеристик отдельных устройств составляет содержание данной главы.

§ 4. ОРГАНИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Автоматизированные рабочие места проектировщиков. Традиционная форма использования ЭВМ, сконцентрированных в вычислительном центре и работающих только в пакетном режиме, не годится для САПР. ЭВМ лишь тогда станет регулярно используемым инструментом проектирования, когда инженер сможет оперативно обращаться к машине и так же оперативно получать результаты решения. Поэтому в комплексе ТС должна быть развита группа внешних устройств ввода — вывода информации. При этом эффективное

взаимодействие инженера с ЭВМ будет обеспечено только в случае, если форма вводимой и выводимой информации удобна для человека и не приводит к необходимости вручную выполнять обременительные и чреватые ошибками операции по кодированию или расшифровке сообщений. В зависимости от характера решаемых задач удобными формами представления информации могут быть таблицы, чертежи, графики, текстовые сообщения и т. п.

Таким образом, первое из указанных в начале главы требований «к техническим средствам САПР обуславливает включение в комплекс стандартного комплекта внешних устройств ЭВМ, так и дополнительных устройств оперативного ввода—вывода информации, в том числе в графической форме. Этот комплект внешних устройств устанавливается в помещении проектного подразделения и называется *автоматизированным рабочим местом* (АРМ) проектировщика. Состав АРМ зависит от характера задач, решаемых в проектном разделе. Так, для инженеров, занятых функционально-логическим проектированием, и инженеров-конструкторов оптимальный состав внешних устройств неодинаков. Действительно, конструкторы в существенно большей мере связаны с обработкой информации в виде чертежей, для них важно наличие развитых средств машинной графики.

В настоящее время разработано несколько типов серийно выпускаемых АРМ для различных отраслей промышленности, например комплекс АРМ-М, предназначенный для использования в машиностроительных отраслях, и комплекс АРМ-Р, ориентированный для использования в системах проектирования РЭА (см. 17, 18).

В АРМ-Р входят устройства ввода и вывода информации на перфоленте; устройства ввода информации с перфокарт; пишущая машинка для обмена информацией между оператором и ЭВМ короткими сообщениями; запоминающие устройства на магнитных дисках (НМД) и магнитной ленте (НМЛ); алфавитно-цифровой дисплей; графический дисплей; графопостроитель рулонного типа; кодировщик графической информации (считыватель координат); алфавитно-цифровое питающее устройство (АЦПУ). Предусматривается несколько вариантов комплектации АРМ-Р. Как правило, во все варианты входят устройства ввода—вывода с перфолент, пишущая машинка, НМД, алфавитно-цифровой дисплей. Остальные устройства присутствуют во всех вариантах.

Наличие в одной САПР многих АРМ, возможности одновременной работы на аппаратуре АРМ нескольких пользователей и размещения АРМ на территориях проектных подразделений, достаточно удаленных от друга, диктует необходимость иерархического построения комплекса ТС с выделением в нем по крайней мере двух уровней ЭВМ. На высшем уровне находится одна или несколько ЭВМ большой производительности. Эти ЭВМ составляют *центральный вычислитель-комплекс* (ЦВК), предназначенный для решения сложных задач проектирования, требующих больших затрат машинного времени и памяти. Наличие высокопроизводительных ЭВМ в составе ЦВК обеспечивает выполнение второго из перечисленных в начале главы требований к техническим средствам САПР. На низшем уровне находятся входящие в

АРМ мини-ЭВМ (терминальные ЭВМ). Мини-ЭВМ и АРМ управляет работой комплектных внешних устройств, обменом информацией между АРМ и ЦВК; решает сравнительно не сложные по затратам машинного времени и памяти проектные задачи.

Режимы работы аппаратуры в комплексе технических средств САПР. Отдельные устройства ввода — вывода, к которым относятся дисплеи, графопостроители, кодировщики графической информации могут работать в составе АРМ в двух режимах, называемых режимами on — line (на линии) и off — line (вне линии).

В режиме on — line осуществляется непосредственная электрическая связь внешнего устройства с терминальной ЭВМ. В этом режиме информация об элементах вычерчиваемого документа поступает на графопостроитель или графический дисплей из оперативной памяти ЭВМ, а значения считываемых координат из кодировщика передаются непосредственно в оперативную память.

В режиме off — line устройство работает автономно. Так, при работе графопостроителя в режиме off — line информация поступает с промежуточного носителя — перфоленты, при работе дисплея с клавиатуры, при работе кодировщика графической информации сведения о кодируемом чертеже заносятся на перфоленту.

Комплекс АРМ также может работать в двух режимах — автономном и взаимодействия с ЦВК.

В автономном режиме АРМ функционирует как обособленный комплекс, управляющий работой внешних устройств и решающих несложные задачи.

В режиме взаимодействия с ЦВК осуществляется перераспределение вычислительной работы и обмен информацией между ЭВМ центрального вычислительного комплекса и терминальной ЭВМ.

Важно отметить, что весь комплекс технических средств (ТС) его отдельные части (АРМ) — системы коллективного пользования. На каждом АРМ одновременно могут работать несколько пользователей, например в первых вариантах АРМ-Р число таких пользователей доходит до четырех. Несколько АРМ одновременно могут работать в режиме взаимодействия с ЦВК. Следовательно, ЭВМ составе САПР и их операционные системы должны допускать одновременное решение нескольких задач, т. е. должны работать в режиме мультипрограммирования.

По характеру обмена информацией между пользователем и ЭВМ различают пакетный и диалоговый режимы работы. Оба эти режимы используются в САПР.

В пакетном режиме решаются задачи, для которых возможна целесообразна полная формализация и которые требуют больших затрат машинного времени для решения.

В диалоговом (интерактивном) режиме решаются задачи, для которых, во-первых, отсутствуют или являются неэффективными формальные правила принятия решений в точках ветвления алгоритмов, во-вторых, выполняются условия предпочтительности диалогового режима: 1) время реакции системы на запрос пользователя не превышает некоторого предела (нескольких секунд для частых запросов и нескольких минут для

редко встречающихся команд); 2) объем и формации, вводимой пользователем в ЭВМ в диалоговом режиме относительно мал, и поэтому процедура обращения человека к ЭВМ непродолжительна. Наличие диалогового режима — характерная черта комплекса ТС в САПР, обуславливаемая большим количеством проектных процедур, относящихся к охарактеризованным в гл. 1 задачам второй группы.

Мультипрограммный диалоговый режим работы вычислительной системы называется режимом разделения времени (PPV). Этот режим необходим в САПР для организации одновременной работы нескольких АРМ во взаимодействии с ЦВК. Наличие PPV реализует третье из названных выше требований.

§ 5. Требования и факторы, влияющие на конструкцию

Любые проектные решения, в том числе на этапе разработки конструкции ЭА, принимаются с учетом большого количества факторов: требований технического задания, стандартов, инструкций и других нормативных документов, требований безопасности, эргономики, технической эстетики, технологичности, экономических и эксплуатационных требований и т. д. Эти требования находятся в взаимосвязи, причудливо переплетаясь и противореча друг другу. Поэтому при анализе возможных вариантов технической реализации ЭА, как правило, приходится искать компромисс, при котором улучшение одних характеристик не приводит к существенному ухудшению других. Не все требования равнозначны, поэтому всегда нужно ясно представлять, какие свойства являются приоритетными, а какими можно пожертвовать для достижения главной цели проектирования. Эти требования условно можно объединить в следующие группы: специальные, эксплуатационные, конструктивно-технологические, экономические. При выборе принципа действия и элементной базы новой техники обязательно ориентируются на наиболее перспективные идеи и технические решения, наработанные в данной области. В противном случае, еще в ходе проектирования устройство или система может морально устареть. Успешное решение возникающих в процессе работы творческих задач невозможно без выявления основных технических противоречий, препятствующих улучшению качества ЭА, а также отыскания приемов их преодоления. На принимаемые конструктивные решения оказывают влияние ряд других факторов, в том числе субъективных: квалификация инженерных кадров, сроки выполнения работ, технологические возможности предприятия, где будет изготавливаться изделие, возможность приобретения необходимых комплектующих изделий.

Специальные требования. Данные требования описывают область применения, функциональное назначение, технические и иные специфические характеристики ЭА и в основном удовлетворяются на более ранних этапах системного и схематического проектирования. Однако ряд требований, связанных с условиями эксплуатации ЭА, приходится обеспечивать и на этапе разработки ее конструкции. Особенностью специальных требований является то, что они содержат набор характеристик, используемых только для узкого класса технических средств: для источников питания — это выходное напряжение, мощность нагрузки, коэффициент стабилизации, коэффициент пульсаций; для усилителей — коэффициент усиления, полоса пропускания, коэффициент искажений, уровень шумов и т. д. Перечень и значения таких

характеристик, а также методы их проверки приводятся в стандартах на аппаратуру данного класса.

Эксплуатационные требования. Эти требования относятся к удобству использования ЭА по назначению, ее надежности, безопасности и экономичности и могут быть сформулированы следующим образом.

1. Техническое изделие должно быть простым и удобным (эргономичным) в использовании. *Эргономика* — это научная дисциплина, изучающая трудовые процессы с целью создания оптимальных условий труда, что способствует увеличению его производительности, а также обеспечивает необходимые удобства и сохраняет силы, здоровье и работоспособность человека. Предметом изучения эргономики является система «человек — машина». Эргономические требования к техническим средствам делятся на группы: антропометрические (соответствие форме, размерам и распределению массы тела человека и отдельных его частей); физиологические (соответствие силовым, скоростным и энергетическим возможностям человека и его органам чувств); психологические (соответствие возможностям человека воспринимать и перерабатывать информацию и формировать сигналы управления); гигиенические (освещенность, температура, влажность и другие факторы, характеризующие комфортность условий работы оператора). Существуют конкретные эргономические рекомендации по выбору размеров и некоторых других параметров технических средств. При разработке ЭА хорошие результаты могут быть получены, если конструктор поставит себя на место оператора и оценит, насколько удобно ему в процессе эксплуатации будет осуществлять монтаж аппаратуры, выполнять манипуляции с органами управления, считывать показания индикаторных устройств и т. д. Большую роль играет также внешний вид изделия. Красивое изделие в процессе его применения вызывает у оператора положительные эмоции, что благоприятно сказывается на производительности труда.

2. Изделие должно иметь заданный уровень надежности в реальных условиях эксплуатации с учетом комплексного влияния внешних воздействующих факторов. —

3. Случайное неправильное обращение с изделием не должно выводить его из строя. Если какое-либо неправильное действие в отношении изделия возможно, то рано или поздно такая ошибка обслуживающего персонала может быть совершена. Примеры защитных мер от ошибок персонала:

- защита источника питания или усилителя от коротких замыканий выхода;
- исключение неправильного подключения кабелей путем применения для различных цепей, не стыкующийся друг с другом, типов электрических соединителей;
- поясняющие надписи и иная маркировка на корпусе ЭА, способствующая правильному выполнению соединений;
- защита от неправильной полярности питающего напряжения и т. п.

4. Для ремонтпригодной ЭА должны быть обеспечены удобная сборка и разборка, легкий доступ к узлам, требующим периодического технического обслуживания (осмотра, чистки, регулировки или смазки).

5. Изделие должно быть безопасным в обращении. Должны быть предусмотрены меры, исключающие либо сводящие к минимуму возможность несчастных случаев, например:

— исключение возможности прикосновения к токоведущим частям, находящимся под опасным напряжением. Использование в разъёмных электрических соединениях со стороны подвода напряжения контактов типа «гнездо» (вспомним сетевую электрическую розетку);

— защитное заземление корпуса устройства;

— автоматическое отключение питания при открывании крышки устройства;

— использование предупредительных надписей типа «Осторожно! Высокое напряжение!»;

— исключение возгорания или взрыва устройства при возникновении отказа, например путем

применения плавких предохранителей;

— исключение воздействия на персонал опасных электромагнитных полей и иных неблагоприятных факторов.

6. Изделие должно быть экологически безопасным.

7. Изделие должно иметь минимальные эксплуатационные расходы, связанные с энергопотреблением, охлаждением, заменой быстроизнашивающихся частей, пополнением расходных материалов. Конструктивно-технологические требования. Данные требования относятся к ускорению процесса проектирования и повышению технологичности конструкции ЭА. Технологичность конструкции представляет собой приспособленность изделия к достижению минимальных затрат ресурсов при производстве и эксплуатации для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ.

Конструктивно-технологические требования состоят в следующем.

1. Изделие должно иметь максимально простую конструкцию, при которой обеспечиваются заданные технические характеристики. Простую конструкцию легче изготовлять, в ней меньше потенциальных источников отказов.

2. Масса и габаритные размеры изделия должны быть минимальны, что обеспечивает снижение расходов на материалы, изготовление, упаковку, транспортирование, хранение. В погоне за миниатюризацией нельзя забывать о требованиях эргономики. Например, размеры кнопок управления, дисплея и некоторых других элементов ограничиваются антропометрическими и иными возможностями человеческого организма.

3. Следует выбирать материалы, обладающие оптимальным сочетанием физических и механических свойств, коррозионной стойкости, технологичности при обработке.
4. Целесообразно использовать модульный принцип построения ЭА, обеспечивающий параллельное выполнение технологических операций сборки и наладки.
5. Необходимо обеспечить взаимозаменяемость однотипных деталей и узлов ЭА. Способ обеспечения (вид) взаимозаменяемости в процессе серийного производства выбирается исходя из требований технологичности. Далее этот вопрос будет рассмотрен более подробно.
6. Следует сокращать номенклатуру применяемых материалов и деталей (видов листового проката, типов комплектующих изделий и т. п.).
7. Целесообразно по возможности использовать в новых разработках детали и узлы от ранее выпускавшихся изделий (конструктивная преемственность).
8. В конструкции необходимо максимально использовать готовые стандартизированные и нормализованные изделия. Это дает большой экономический эффект, так как позволяет ликвидировать затраты на разработку самих изделий и технологических процессов их производства, а также приобретение дополнительного инструмента и оборудования. Стандартизированные и нормализованные изделия имеют высокое качество и низкую стоимость, поскольку выпускаются на предприятиях, оснащенных высокопроизводительным специальным оборудованием. Наконец, стандартизированные и нормализованные изделия проверены практикой и более надежны. При конструировании электронной аппаратуры хороший эффект дает применение готовых корпусов и несущих конструкций.
9. Обеспечение максимальной технологичности сборочных и электромонтажных работ, минимальное число подгоночных и регулировочных операций.
10. При разработке обязательно учитывается имеющееся в распоряжении технологическое оборудование и объем выпуска изделий. Технология изготовления изделий, предназначенных для единичного производства, должна базироваться на применении универсального оборудования без использования дорогостоящего инструмента и оснастки — токарных, фрезерных, шлифовальных и других станков для обработки материалов резанием. Для массового и крупносерийного производства используются высокопроизводительное специальное оборудование и оснастка, а основными технологическими процессами являются штамповка, гибка, точное литье, опрессовка и др. Экономические требования. В большинстве случаев одним из важнейших критериев эффективности того или иного технического решения являются затраты на его реализацию, под которыми понимаются не только финансовые расходы, но и время, количество привлекаемых исполнителей и другие ограниченные ресурсы. Не будет преувеличением сказать, что практически любое проектное решение принимается с учетом перечисленных факторов. Следует стремиться к минимизации затрат на разработку изделия, на материалы и комплектующие изделия, производственных затрат и др. В организационном плане для сокращения сроков работ проектирование отдельных частей сложного оборудования обычно целесообразнее поручить сторонним

организациям-исполнителям, имеющим соответствующий опыт. Не следует выбирать электронные компоненты со значительно более высокими, чем это необходимо, характеристиками и необоснованно применять дорогостоящие конструкционные материалы. Необходимо помнить, что в стоимость изделия входят затраты на подготовку производства: разработку техпроцессов, конструирование и изготовление технологической оснастки, приобретение недостающего оборудования, обучение персонала. Поэтому подготовка производства изделий с высокой конструктивной приемственностью будет дешевле и потребует меньших сроков.

В каждом конкретном случае экономическая оптимальность того или иного решения зависит от многих факторов, одним из важнейших среди которых, подчеркнем еще раз, является объем выпуска изделия. При значительных объемах производства аппаратуры становятся экономически обоснованными разовые инвестиции в разработку заказных микросхем, оригинальных литых корпусов, новых технологических процессов. В условиях массового производства даже небольшое снижение затрат может принести ощутимую экономическую выгоду и конкурентные преимущества изделия по сравнению с аналогами. Экономическая сторона не всегда играет главную роль. Например, в военной технике, системах жизнеобеспечения и многих других видах специальной аппаратуры при разрешении противоречия цена—качество приоритет отдается достижению максимальной надежности и эксплуатационной эффективности изделия.

§ 5.1. Стандартизация в конструировании

В проектной, и в частности конструкторской деятельности очень велика роль разнообразных нормативных документов, которыми разработчик обязан руководствоваться. Особая роль отведена стандартам. Стандарты устанавливают нормы, правила, требования, термины, качественные и количественные показатели, перечень и форму документов, методы испытаний и т. п. Стандарты могут быть международными, межгосударственными, государственными, отраслевыми, а также действующими в пределах предприятия. Наиболее известны три организации по международной стандартизации: Международная организация по стандартизации — ИСО (ISO), Международная электротехническая комиссия — МЭК (IEC), Международный союз электросвязи — МСЭ (ITU). Их объединяет не только общая область деятельности, но и практически общее место расположения в Женеве. В самих названиях организаций заложено разграничение сфер их влияния. ИСО разрабатывает стандарты для всех секторов экономики и сфер деятельности, МЭК специализируется в электротехнике и электронике, МСЭ курирует электросвязь и телекоммуникации. Сферы интересов этих организаций часто пересекаются. В таких случаях образуются совместные органы по координации работы и созданию общих документов. Самой крупной и авторитетной из этих организаций является ИСО. Официальные языки ИСО — английский, французский и русский.

В России принят следующий порядок внедрения международных стандартов:

— прямое применение международного стандарта без включения дополнительных требований (применение аутентичного текста или так называемый метод обложки);

— использование аутентичного текста международного стандарта с дополнительными требованиями, отражающими потребности народного хозяйства. Аутентичный текст — это текст, составленный на двух и более языках, рассматриваемый как одинаково подлинный и имеющий равную силу. К примеру, обозначение ГОСТ Р ИСО 10543—99 означает, что данный государственный стандарт Российской Федерации утвержден в 1999 г. И представляет собой аутентичный текст международного стандарта ИСО 10543:1994. Обозначение ГОСТ Р 50488-93 (ИСО 344-81) следует понимать как российский государственный стандарт, разработанный на основе аутентичного текста международного стандарта ИСО 344—81, содержащий дополнительные требования и утвержденный в 1993 г. Аналогично обозначаются государственные стандарты, принятые на основе аутентичных текстов международных стандартов МЭК, например: ГОСТ Р МЭК 1007-96 или ГОСТ Р 50377-92 (МЭК 950-86). К числу влиятельных международных организаций относятся также Европейский комитет по стандартизации (СЕН), Европейский комитет по стандартизации в электротехнике (СЕНЭЛЕК), Европейский институт по стандартизации в области телекоммуникаций (ETSI), Консультативный комитет по стандартизации и качеству стран-членов АСЕАН, Конгресс по стандартизации стран Тихоокеанского бассейна (PASC), Панамериканская комиссия по стандартам (COPANT), Евразийский международный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (EASC), Институт инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) и др. Межгосударственными (ГОСТ) являются стандарты Содружества независимых государств, изданные после распада СССР. Обозначение ГОСТ имеют также действующие стандарты бывшего СССР. Государственные стандарты Российской Федерации имеют обозначение ГОСТ Р. Стандарты, действующие в пределах отрасли, обозначаются ОСТ. Самый низкий статус у стандартов предприятия (СТП). Существуют системы взаимосвязанных стандартов, относящихся к той или иной области человеческой деятельности. Для разработчика электронной аппаратуры наиболее важны следующие комплексы государственных стандартов:

- единая система конструкторской документации (ЕСКД);
- единая система программной документации (ЕСПД);
- государственная система приборов и средств автоматизации (ГСП);
- единая система допусков и посадок (ЕСДП);
- основные нормы взаимозаменяемости (ОНВ).

§ 5.2. Виды, обозначения и комплектность конструкторских документов

Конструкторские документы — это графические и текстовые документы, определяющие состав и устройство изделия и содержащие необходимые данные для его разработки или изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонта. Виды и комплектность конструкторских документов в зависимости от стадии их разработки устанавливает ГОСТ 2.102-68. Каждый конструкторский документ имеет обозначение, которое строится по следующей схеме: АБВВ.ХХХХХХ.ХХХ ХХ, где первые четыре буквы — код организации-разработчика; последующие шесть цифр — код классификационной характеристики изделия по классификатору ЕСКД; далее три цифры — регистрационный

номер изделия от 001 до 999; далее после пробела код документа. Двух и более документов с одинаковыми обозначениями быть не может. Обозначения разных документов должны отличаться, как минимум, кодом.

Документы подразделяют на виды, указанные в табл. 2.

Код документа	Наименование документа	Определение
-	Чертеж детали	Документ, содержащий изображение детали и другие данные, необходимые для ее изготовления и контроля
СБ	Сборочный чертеж	Документ, содержащий изображение сборочной единицы и другие данные, необходимые для ее сборки (изготовления) и контроля. К сборочным чертежам также относят чертежи, по которым выполняют гидромонтаж и пневмомонтаж
ВО	Чертеж общего вида	Документ, определяющий конструкцию изделия, взаимодействие его составных частей и поясняющий принцип работы изделия
ТЧ	Теоретический чертеж	Документ, определяющий геометрическую форму (обводы) изделия и координаты расположения составных частей
ГЧ	Габаритный чертеж	Документ, содержащий контурное (упрощенное) изображение изделия с габаритными, установочными и присоединительными размерами
МЭ	Электромонтажный чертеж	Документ, содержащий данные, необходимые для выполнения электрического монтажа изделия
МЧ	Монтажный чертеж	Документ, содержащий контурное (упрощенное) изображение изделия, а также данные, необходимые для его установки (монтажа) на месте применения. К монтажным чертежам также относят чертежи фундаментов, специально разрабатываемых для установки изделия
УЧ	Упаковочный чертеж	Документ, содержащий данные, необходимые для выполнения упаковывания изделия
По ГОСТ 2.701	Схемы	Документ, на котором показаны в виде условных изображений или обозначений составные части изделия и связи между ними
	Спецификация	Документ, определяющий состав сборочной единицы, комплекса или комплекта
ВС	Ведомость спецификаций	Документ, содержащий перечень всех спецификаций составных частей изделия с указанием их количества и входимости
ВД	Ведомость ссылок документов	Документ, содержащий перечень документов, на которые имеются ссылки в конструкторских документах изделия
ВП	Ведомость покупных изделий	Документ, содержащий перечень покупных изделий, примененных в разрабатываемом изделии
ВИ	Ведомость разрешения применения покупных изделий	Документ, содержащий перечень покупных изделий, разрешенных к применению в соответствии с ГОСТ 2.124
ДП	Ведомость держателей подлинников	Документ, содержащий перечень предприятий (организаций), на которых хранят подлинники документов, разработанных и (или) примененных для данного изделия
Пт	Ведомость технического предложения	Документ, содержащий перечень документов, вошедших в техническое предложение
ЭП	Ведомость эскизного проекта	Документ, содержащий перечень документов, вошедших в эскизный проект
ТП	Ведомость технического проекта	Документ, содержащий перечень документов, вошедших в технический проект
ПЗ	Пояснительная записка	Документ, содержащий описание устройства и принципа действия разрабатываемого изделия, а также

		обоснование принятых при его разработке технических и технико-экономических решений
ТУ	Технические условия	Документ, содержащий требования (совокупность всех показателей, норм, правил и положений) к изделию, его изготовлению, контролю, приемке и поставке, которые нецелесообразно указывать в других конструкторских документах
пм	Программа и методика испытаний	Документ, содержащий технические данные, подлежащие проверке при испытаниях изделия, а также порядок и методы их контроля
ТБ	Таблица-	Документ, содержащий в зависимости от его назначения соответствующие данные, сведенные в таблицу
РР	Расчет	Документ, содержащий расчеты параметров и величин, например, расчет размерных цепей, расчет на прочность и др.
И...	Инструкция	Документ, содержащий указания и правила, используемые при изготовлении изделия (сборке, регулировке, контроле, приемке ИТ. п.)
д...	Документы прочие	Конструкторские документы, не вошедшие в настоящий список
По гост 2.601	Документы эксплуатационные	Документы, предназначенные для использования при эксплуатации, обслуживании и ремонте изделия в процессе эксплуатации
По ГОСТ 2.602	Документы ремонтные	Документы, содержащие данные для проведения ремонтных работ на специализированных предприятиях

Схемы в зависимости от видов элементов и связей, входящих в состав изделия, подразделяют на виды, обозначаемые буквами (ГОСТ 2.701):

- электрические — Э;
- гидравлические — Г;
- пневматические — П;
- газовые (кроме пневматических) — Х;
- кинематические — К;
- вакуумные — В;
- оптические — Л;
- энергетические — Р;
- деления — Е;
- комбинированные — С.

В зависимости от основного назначения схемы подразделяют на типы, приведенные в табл. 3.

Код схемы	Тип схемы	Определение
1	Структурная	Схема, определяющая основные функциональные части изделия, их назначение и взаимосвязи. Схемы структурные разрабатывают при проектировании изделий на стадиях,

		предшествующих разработке схем других типов, и пользуются ими для общего ознакомления с изделием
2	Функциональная	Схема, разъясняющая определенные процессы, протекающие в отдельных функциональных цепях изделия или в изделии в целом. Схемами функциональными пользуются для изучения принципов работы изделий, а также при их наладке, контроле и ремонте
3	Принципиальная	Схема, определяющая полный состав элементов и связей между ними и, как правило, дающая детальное представление о принципах работы изделия. Схемами принципиальными пользуются для изучения принципов работы изделий, а также при их наладке, контроле и ремонте. Они служат основанием для разработки других конструкторских документов, например, схем соединений и чертежей
4	Соединений	Схема, показывающая соединения составных частей изделия и определяющая провода, жгуты, кабели или трубопроводы, которыми осуществляются эти соединения, а также места их присоединений и ввода (разъемы, платы, зажимы и т.п.). Схемами соединений пользуются при разработке других конструкторских документов, в первую очередь, чертежей, определяющих прокладку и способы крепления проводов, жгутов, кабелей или трубопроводов в изделии, а также для осуществления присоединений и при контроле, эксплуатации и ремонте изделий
5	Подключения	Схема, показывающая внешние подключения изделия. Схемами подключения пользуются при разработке других конструкторских документов, а также для осуществления подключений изделий и при их эксплуатации
6	Общая	Схема, определяющая составные части комплекса и соединения их между собой на месте эксплуатации. Схемами общими пользуются при ознакомлении с комплексами, а также при их контроле и эксплуатации. Схему общую на сборочную единицу допускается разрабатывать при необходимости
7	Расположения	Схема, определяющая относительное расположение составных частей изделия, а при необходимости, также жгутов, проводов, кабелей, трубопроводов и т. п. Схемами расположения пользуются при разработке других конструкторских документов, а также при эксплуатации и ремонте изделий
0	Объединенная	Схема, когда на одном конструкторском документе выполняют схемы двух или нескольких типов, выпущенных на одно изделие

Наименование и код схем определяют их видом и типом. Код схемы должен состоять из буквенной части, определяющей вид схемы, и цифровой части, определяющей тип схемы. Например, схема электрическая структурная — Э1; схема электрическая принципиальная — ЭЗ; схема электрогидропневмокинематическая принципиальная — СЗ; схема электрическая соединений и подключения — ЭО.

Виды эксплуатационных документов по ГОСТ 2.601 (с сокращениями) указаны в таблице 4.

Код документа	Вид документа	Определение
РЭ	Руководство по эксплуатации	Документ, содержащий сведения о конструкции, принципе действия, характеристиках изделия и его составных частей, указания, необходимые для правильной и безопасной эксплуатации изделия и оценок его технического состояния при определении необходимости отправки его в ремонт, а также сведения по утилизации изделия и его составных частей
Код документа	Вид документа	Определение

ФО	Формуляр	Документ, содержащий сведения, удостоверяющие гарантии изготовителя, значения основных параметров и характеристик изделия, сведения, отражающие техническое состояние данного изделия, сведения о сертификации и утилизации изделия, а также сведения, которые вносят в период его эксплуатации (длительность и условия работы, техническое обслуживание, ремонт и другие данные)
ПС	Паспорт	Документ, содержащий сведения, удостоверяющие гарантии изготовителя, значения основных параметров и характеристик изделия, а также сведения о сертификации и утилизации изделия
ЗИ	Ведомость комплекта запасных частей, инструмента и принадлежностей (ЗИП)	Документ, содержащий номенклатуру, назначение, количество и места укладки запасных частей, инструментов, принадлежностей и материалов, расходуемых за срок службы изделия
ВЭ	Ведомость эксплуатационных документов	Документ, устанавливающий комплект эксплуатационных документов и места укладки документов, поставляемых с изделием или отдельно от него

Документы в зависимости от стадии разработки подразделяются на проектные (техническое предложение, эскизный проект и технический проект) и рабочие (рабочая документация).

Наименования конструкторских документов в зависимости от способа их выполнения и характера использования приведены в табл. 5.

Наименование документа	Определение
Оригиналы	Документы, выполненные на любом материале и предназначенные для изготовления по ним подлинников
Подлинники	Документы, оформленные подлинными установленными подписями и выполненные на любом материале, позволяющем многократное воспроизведение с них копий. Допускается в качестве подлинника использовать оригинал, репродуцированную копию или экземпляр документа, изданного типографским способом, заверенные подлинными подписями лиц, разработавших данный документ и ответственных за нормоконтроль
Дубликаты	Копии подлинников, обеспечивающие идентичность воспроизведения подлинника, выполненные на любом материале, позволяющем снятие с них копий
Копии	Документы, выполненные способом, обеспечивающим их идентичность с подлинником (дубликатом) и предназначенные для непосредственного использования при разработке, в производстве, эксплуатации и ремонте изделий

Состав (комплектность) конструкторских документов, выпускаемых на техническое средство или его часть, определяется видом данного изделия. В соответствии с ГОСТ 2.101—68 изделием называют любой предмет или набор предметов, подлежащих изготовлению на предприятии. Установлены четыре вида изделий: а) деталь — изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала без применения сборочных операций. Например: валик из одного куска металла, отрезок кабеля, печатная плата, контакт разъема, ферритовый сердечник; б) сборочная единица — изделие, составные части которого подлежат соединению на предприятии-изготовителе сборочными операциями. В состав сборочной единицы могут входить детали, другие

сборочные единицы и комплексы. Например: корпус, сваренный из нескольких кусков металла; два куска кабеля, спаянных между собой; электронный блок; в) комплекс — несколько изделий, не соединенных сборочными операциями, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций. Например: измерительный прибор, состоящий из выносного датчика и электронного преобразователя; персональный компьютер, в состав которого входят системный блок, монитор, клавиатура, мышь. Данные составные части могут располагаться на расстоянии друг от друга и не иметь проводных связей между собой (например, телевизор и пульт дистанционного управления); г) комплект — набор деталей или сборочных единиц, имеющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера. Например: комплект запасных частей и принадлежностей (ЗИП).

При определении комплектности конструкторских документов на изделия следует различать:

- основной конструкторский документ;
- основной комплект конструкторских документов;
- полный комплект конструкторских документов.

Основной конструкторский документ изделия в отдельности или в совокупности с другими записанными в нем конструкторскими документами полностью и однозначно определяют данное изделие и его состав. За основные конструкторские документы принимают: для деталей — чертеж детали; для сборочных единиц, комплексов и комплектов — спецификацию. Изделие, примененное по конструкторским документам, выполненным в соответствии со стандартом ЕСКД, записывают в документы других изделий, в которых оно применено, за обозначением своего основного конструкторского документа. Считается, что такое изделие применено по своему основному конструкторскому документу. Основной комплект конструкторских документов изделия объединяет конструкторские документы, относящиеся ко всему изделию (составленные на все данное изделие в целом), например, сборочный чертеж, принципиальная электрическая схема, технические условия, эксплуатационные документы. Конструкторские документы составных частей в основной комплект документов изделия не входят. Полный комплект конструкторских документов изделия составляют (в общем случае) из следующих документов:

- основного комплекта конструкторских документов на данное изделие;
- основных комплектов конструкторских документов на все составные части данного изделия, примененные по своим основным конструкторским документам.

Пример построения полного комплекта конструкторских документов комплекса приведен на рис.2. Здесь основные конструкторские документы показаны в скругленных рамках, документы основного комплекта — в прямоугольных рамках. Документы, обведенные двойной рамкой, предусматриваются только для изделий, предназначенных для самостоятельной поставки. Число ступеней в ходимости для комплексов, сборочных

единиц и комплектов, а также число входящих комплектов сборочных единиц, комплектов и деталей не ограничиваются.

В соответствии с ЕСКД процесс разработки изделий новой техники в общем случае включает этапы *научно-исследовательских работ* (НИР) и *опытно-конструкторских работ* (ОКР). Часто НИР и ОКР условно объединяют в один этап, называемый НИОКР.

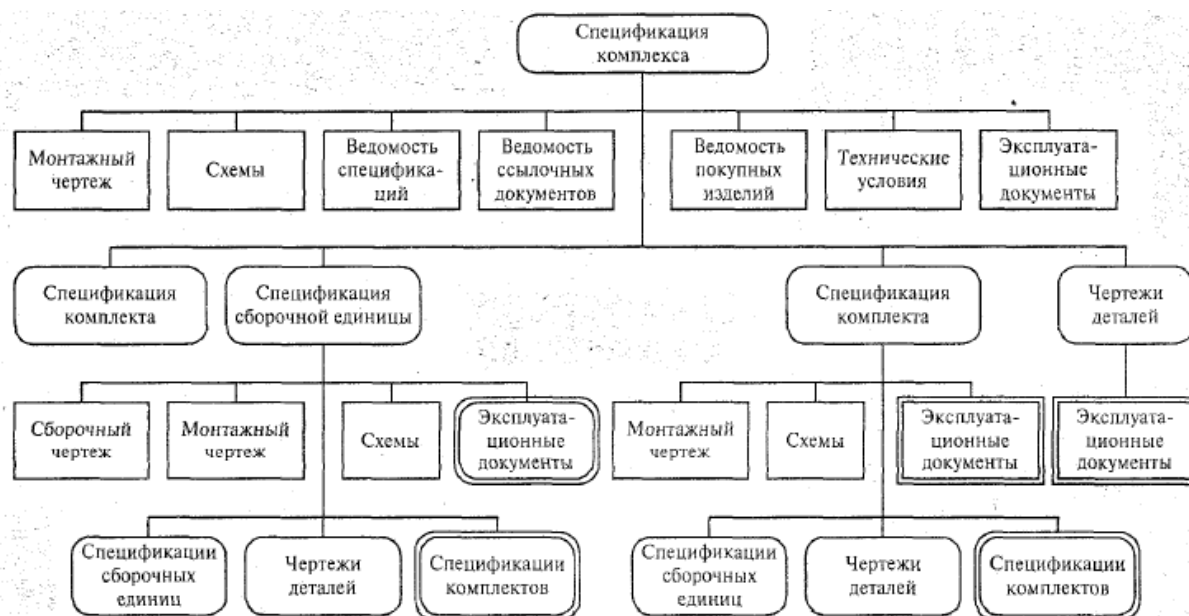


Рис.2. Пример построения полного комплекта конструкторских документов комплекса

НИР являются начальным этапом комплекса работ по созданию новой техники. Они проводятся с целью получения научно обоснованных исходных данных для разработки технического задания на ОКР, показания принципиальной возможности и путей создания устройства с заданными параметрами. НИР включают следующие подэтапы: разработка ТЗ на НИР, выбор направления работ, теоретические и экспериментальные исследования, обобщение и оценка полученных результатов. Результаты НИР представляют в виде отчета по НИР, который оформляется по ГОСТ 7.32-2001 и должен содержать рекомендации по разработке новой техники. Техническое задание является основным исходным документом для разработки изделия. Оно должно содержать технико-экономические требования к изделию, определяющие его потребительские свойства и эффективность применения, перечень документов, требующих совместного рассмотрения, порядок сдачи и приемки результатов разработки. При необходимости техническое задание может содержать также требования к подготовке и освоению производства. Конкретное содержание технического задания определяют заказчик и разработчик, а при инициативной разработке — разработчик. После согласования и утверждения ТЗ заказчиком и разработчиком оно становится документом, на основании которого выполняются все остальные этапы работ. Для разработки конструкторской документации новой техники проводятся опытно-конструкторские работы. Для всех отраслей промышленности ГОСТ 2.103—68 устанавливает следующие стадии разработки конструкторской документации.

1. Техническое предложение — совокупность конструкторских документов, которые должны содержать технические и технико-экономические обоснования целесообразности разработки документации изделия на основании анализа ТЗ и сравнительной оценки вариантов возможных решений, а также патентные исследования.

2. Эскизный проект — совокупность конструкторских документов, которые должны содержать принципиальные конструктивные решения, дающие общее представление об устройстве и принципе работы изделия, а также данные, определяющие назначение, основные параметры и габаритные размеры разрабатываемого изделия. При необходимости производится изготовление и испытание макетов изделия.

3. Технический проект — совокупность конструкторских документов, которые должны содержать окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве разрабатываемого изделия, и исходные данные для разработки рабочей документации. При необходимости производится изготовление и испытание макетов изделия.

4. Рабочая конструкторская документация — совокупность конструкторских документов, необходимых для изготовления и испытаний опытного образца (опытной партии) изделия. До проведения государственных или ведомственных испытаний РКД имеет литер О. После изготовления и заводских испытаний опытного образца он предъявляется на государственные или ведомственные испытания. После корректировки РКД по результатам этих испытаний документации присваивают литер О1. Далее РКД передается для подготовки серийного производства изделий. При необходимости, изготавливают и испытывают установочную серию изделий с присвоением РКД литер А и далее головную серию с присвоением РКД литер Б. По мере надобности производятся корректировки РКД.

Стремление заказчика ускорить сроки проектных работ и уменьшить расходы на их проведение на практике приводит к тому, что предусмотренные ЕСКД этапы постановки изделий на производство редко выполняются в полном объеме. В конкретных случаях отдельные стадии разработки могут отсутствовать. Например, при наличии у разработчика достаточного опыта и научно-технического задела, после утверждения ТЗ возможна разработка сразу РКД, минуя этапы НИР, эскизного и технического проектов. Однако в любом случае процесс проектирования ЭА предусматривает решение ряда последовательных задач:

— выбор и формулировка цели проектирования, разработка технического задания;

— системотехнический этап — выбор принципов функционирования и структуры устройства или системы, вида и способов передачи и обработки сигналов;

— схемотехнический этап — разработка принципиальных схем ЭА и программного обеспечения;

— конструкторский этап — разработка чертежей, спецификаций, технических условий, руководства по эксплуатации и других документов, требуемых стандартом;

— технологический этап — разработка технологии изготовления ЭА (для единичного и мелкосерийного производства подробная технологическая проработка может не проводиться). Отметим, что работы могут выполняться только в изложенной последовательности, поскольку результаты предыдущего этапа являются исходными данными для последующего этапа.

§ 5.3. Обеспечение взаимозаменяемости частей конструкции

Взаимозаменяемость является одним из основополагающих принципов конструирования и обеспечивает возможность сборки изделия, полностью соответствующего предъявляемым к нему требованиям, из изготовленных независимо друг от друга деталей и узлов. Для реализации этого принципа параметры этих деталей и узлов должны быть выдержаны с необходимой Точностью, указываемой на чертежах в виде допусков. В зависимости от характера узла, допуски могут относиться к геометрическим, электрическим, магнитным, оптическим и другим характеристикам. Например, для механических узлов при изготовлении достаточно соблюсти допуски на геометрические параметры деталей (размеры, форму, шероховатость поверхности, твердость материала). Для резисторов помимо размеров необходимо обеспечить допуск на величину сопротивления и т. д. Взаимозаменяемость может быть полной и неполной. При полной взаимозаменяемости параметры изделия после сборки находятся в заданных пределах при использовании любых однотипных деталей и узлов без их дополнительной подгонки и подбора. Полная взаимозаменяемость реализована, например, в крепежных изделиях — любой экземпляр винта М5 можно вкрутить в любой экземпляр гайки М5. При изготовлении электронных узлов полная взаимозаменяемость элементов имеет место в том случае, если сборка производится без предварительного подбора элементов по параметрам и в последующем не производится регулировка узла (например, в цифровых устройствах). Реализация полной взаимозаменяемости может оказаться экономически нецелесообразной из-за необходимости обеспечения чрезмерно жестких и технологически трудно выполнимых допусков на параметры составных частей узла. В этом случае применяют неполную взаимозаменяемость, которая может обеспечиваться групповым подбором, регулированием и пригонкой.

1. Групповой подбор (селективная сборка) применяется преимущественно при изготовлении прецизионных механических узлов (подшипников, двигателей внутреннего сгорания и т. д.) и заключается в изготовлении деталей по технологически обоснованным допускам, их последующем 100%-ном контроле и сортировке на группы по заранее установленным градациям размеров. Например, в цилиндрическом механическом соединении с номинальным диаметром 20 мм нужно обеспечить зазор не более 0,012 мм. Точность изготовления отверстия $20+0.008$ мм, вала — $20_{-0.008}$ мм, следовательно, без предварительного подбора деталей максимальный зазор составит 0,016 мм.

Для получения требуемого зазора путем селективной сборки детали каждого вида делят на две группы:

— по диаметру отверстия — 20...20,004 мм и 20,004...20,008 мм;

— по диаметру вала — 19,992... 19,996 мм и 19,996...20 мм.

При сборке соединения используют детали из одноименных групп, т. е. для первой группы деталей с отверстием берут валы первой группы.

Групповой подбор деталей существенно увеличивает трудоемкость сборки и применяется в случаях, когда осуществить серийное изготовление деталей с нужной точностью не удастся, а возможность регулировки узла в целом исключается. При производстве электронной аппаратуры этот метод используется в виде исключения — подбор пар транзисторов с одинаковыми значениями $h_{21Э}$ и т. п.

2. Регулирование элемента с переменными параметрами для достижения требуемых характеристик собранного изделия используется очень широко и не сопровождается необратимым изменением регулировочного элемента. В электронных схемах регулирование осуществляется с помощью подстроечных резисторов, конденсаторов, индуктивностей. Иными словами, наличие операции регулировки собранного электронного узла является признаком неполной взаимозаменяемости элементов. В механических узлах требуемая величина зазоров или люфтов обеспечивается с помощью регулировочных винтов, деталей с эксцентриситетом, наборов прокладок переменной толщины.

3. Пригонка — достижение требуемой точности сборки за счет дополнительной обработки заранее намеченного элемента, путем удаления так называемого припуска. Изменение этого элемента в процессе пригонки необратимо. Например, в единичном производстве пригонка часто используется для обеспечения требуемого характера сопряжения механических деталей. При этом на чертеже для какой-либо детали указываются требования типа «обработать по месту», «обработать по сопрягаемой детали...» и т. д. В аналоговой электронике широко применяется подгонка сопротивления пленочных резисторов путем разрушения специальных перемычек или удаления части резистивного покрытия. Для этой цели может использоваться луч лазера или механическое воздействие.

Допуски и посадки

Взаимозаменяемость по геометрическим размерам необходима для любых технических изделий и обеспечивается соблюдением допусков, выбираемых в соответствии с единой системой допусков и посадок. Рассмотрим основные понятия, относящиеся к данному вопросу на примере деталей с гладкой поверхностью. Допуски и посадки конусных, резьбовых, шлицевых и других соединений здесь не рассматриваются. В соединении двух деталей различают охватывающую и охватываемую поверхности. Охватывающая поверхность называется отверстием, охватываемая — валом. Эти названия применяют не только для цилиндрических, но и для плоских поверхностей. Посадка — это характер соединения деталей, который определяется разностью между размерами отверстия и вала. Если размер отверстия больше размера вала, то разность между этими размерами называют зазором. Если до сборки деталей размер вала был больше размера отверстия, то разность этих размеров называется натягом. Ввиду неизбежных погрешностей при изготовлении, требуемый размер детали всегда задается в виде двух предельных значений, между которыми должен находиться действительный размер, т. е. размер, полученный в результате измерения с допустимой погрешностью. Эти предельные

значения называются наибольшим и наименьшим предельными размерами (ПР). Номинальный размер — это размер, определенный из функционального назначения детали и служащий началом отсчета отклонений. Верхнее предельное отклонение размера (ВПО) — это алгебраическая разность между наибольшим предельным и номинальным размерами; нижнее предельное отклонение (НПО) — алгебраическая разность между наименьшим предельным и номинальным размерами.

Допуск размера — разность между наибольшим и наименьшим предельными размерами (абсолютная величина алгебраической разности между верхним и нижним предельными отклонениями). При графическом изображении допусков и посадок предполагается, что нижние образующие соединяемых отверстия и вала совмещены (рис. 1.2). Номинальный размер изображают в виде нулевой линии, вверх от которой откладываются положительные отклонения размера, вниз — отрицательные.

Поле допуска — это поле, ограниченное линиями, изображающими наибольший и наименьший предельный размер (верхнее и нижнее предельные отклонения). Под полем допуска понимают также интервал значений размеров, который характеризуется величиной допуска и его положением относительно номинального размера. В зависимости от взаимного расположения полей допусков отверстия и вала, различают три группы посадок: — посадки с зазором — посадки с полем допуска отверстия, расположенным над полем допуска вала, в том числе скользящие посадки, в которых нижняя граница поля допуска отверстия совпадает с верхней границей поля допуска вала;

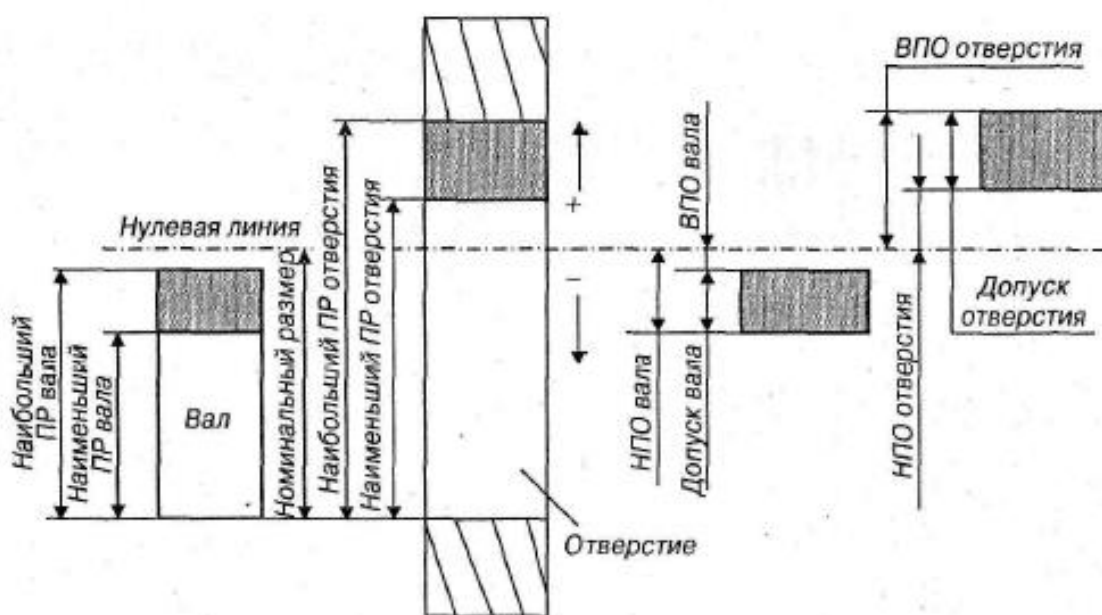


Рис.3. Схема допусков и посадок с зазорами: ПР — предельный размер, ВПО и НПО — верхнее и нижнее предельные отклонения размеров

— посадки с натягом — посадки с полем допуска вала, расположенным над полем допуска отверстия;

— переходные посадки, допускающие как натяги, так и зазоры. К ним относятся посадки с перекрывающимися полями допуска отверстия и вала. Существуют две системы задания

посадок — система отверстия и система вала. Наибольшее распространение получила система отверстия, в которой разные посадки при одном и том же классе точности и одном и том же номинальном размере образуются за счет изменения предельных отклонений вала при неизменных предельных отклонениях отверстия. Во всех посадках этой системы нижнее предельное отклонение отверстия равно нулю. Графическое изображение посадок в системе отверстия показано на рис. 1.3. В системе вала разные посадки при одном и том же классе точности и одном и том же номинальном размере образуются за счет изменения предельных отклонений отверстия при неизменных предельных отклонениях вала. Во всех посадках этой системы верхнее предельное отклонение вала равно нулю. Предельные отклонения деталей и посадки должны выбираться в соответствии с Единой системой допусков и посадок (ЕСДП) по таблицам, приводимым в справочной литературе. В указанных таблицах значения отклонений приводятся в зависимости от номинального размера детали и класса точности ее изготовления (квалитета).

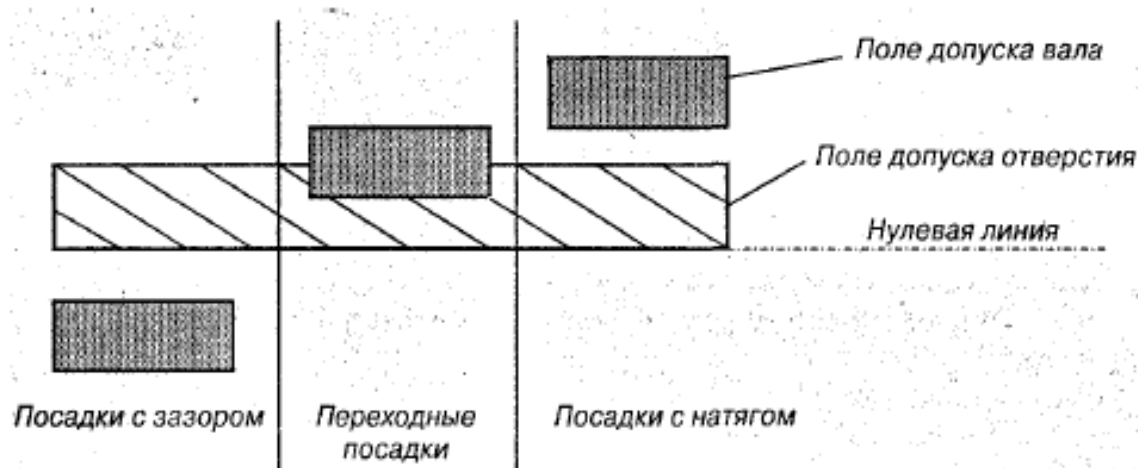


Рис.4. Поля допусков посадок в системе отверстия

Установлено двадцать квалитетов: 01, 0, 1, 2, ..., 18, причем первые пять квалитетов в основном предназначены для калибров, 7 и 8 квалитеты — для точных соединений в машиностроении и приборостроении, 9 квалитет — для соединений, не требующих высокой точности, последующие квалитеты — для несопрягаемых размеров. Поля допусков обозначаются буквой латинского алфавита и следующей за ней цифрой. Буква обозначает положение поля допуска относительно нулевой линии и качественно характеризует вид посадки (с зазором, с натягом, степень подвижности деталей и др.). Цифра обозначает номер квалитета и характеризует ширину поля допуска. Чем больше номер, тем шире поле допуска и, следовательно, ниже точность изготовления деталей (рис. 5). В системе отверстия поля допусков отверстий обозначаются буквой H, а поля допусков валов — строчными буквами латинского алфавита.



Рис.5. Поля допусков валов одностипных посадок с зазором, относящихся к квалитетам 7-9

Обозначение поля допуска ставится после обозначения номинального размера детали. Например, обозначения {diam}16H7 и {diam}16e8 расшифровываются следующим образом: {diam} — знак диаметра, ставится для круглых отверстий или валов; 16 — номинальный размер, равный 16 мм; H — обозначение поля допуска основного отверстия; e — обозначение поля допуска вала; 7 и 8 — номера квалитетов. Для указанных полей допусков по справочнику могут быть найдены числовые значения предельных отклонений размеров. Предельные отклонения на чертежах могут указываться тремя способами:

— условным обозначением поля допуска 16H7, 16e8;

— числовыми значениями {diam};16^{+0,018}{diam}16^{-0,032}_{-0,056}

— комбинированным способом {diam}16H7^(+0,018)16e8^{(-0,032}_{-0,056)}.

Здесь предельное отклонение, равное нулю, условно не указывается. Обозначение посадки ставится на сборочном чертеже и образуется сочетанием полей допусков отверстия и вала:

$$16 \frac{H7}{e8}; 16 \frac{+0,018}{-0,032} ; 16 \frac{H7(+0,018)}{e8(-0,032)}.$$

Неточности изготовления сопрягаемых деталей приводят к тому, что зазоры и натяги в посадке одного типа получаются не одинаковыми. Предельными зазорами (натягами) считают два значения, между которыми должен находиться действительный размер зазора (натяга). Больше из этих значений называют наибольшим зазором (натягом), меньшее — наименьшим зазором (натягом). Например, для посадки 16 — наибольший зазор равен $0,018 + e8 + 0,056 = 0,074$ мм; наименьший зазор составляет $0 + 0,032 = 0,032$ мм.

Поля допусков несопрягаемых размеров обычно выбирают по 10—14 квалитетам, для охватываемых поверхностей — в плюс как для отверстий, для охватываемых — в минус как для валов. Поля допусков отверстий обозначают H, валов — h с номером квалитета, например: H12, h12. Симметричные поля допусков отверстий и валов обозначаются соответственно Js и js, например: Js 14, js 14. Поля допусков прочих размеров располагают

симметрично относительно нулевой линии и обозначают $\pm \frac{IT_{12}}{2}, \pm \frac{IT_{14}}{2}$ (рис. 1.5).

.Множественно повторяющиеся предельные отклонения разрешается оговаривать записью в технических требованиях, например:



Рис.6. Несимметричные и симметричные поля допусков

«Неуказанные предельные отклонения размеров отверстий — H14, валов — h 14, прочих

$$— \pm \frac{IT14}{2} ».$$

§ 5.4. Условия эксплуатации электронной аппаратуры

Надежное функционирование ЭА в значительной мере связано с условиями ее эксплуатации, которые могут изменяться в широких пределах. Эти условия определяются сочетанием ряда внешних воздействующих факторов (ВВФ). Внешним воздействующим фактором называется явление, процесс или среда, внешние по отношению к изделию или его составным частям, которые вызывают или могут вызвать ограничение или потерю работоспособного состояния изделия в процессе эксплуатации. Электронная аппаратура должна быть стойкой, устойчивой и прочной к воздействию ВВФ в пределах заданных значений. Под стойкостью к ВВФ понимается способность изделия сохранять работоспособное состояние во время и после воздействия определенного воздействующего фактора в течение всего срока службы. Устойчивость изделия означает сохранение его работоспособного состояния во время действия ВВФ, прочность — сохранение работоспособности после воздействия ВВФ.

Внешние воздействующие факторы делятся на следующие классы:

— климатические (тепло и холод, относительная влажность воздуха, атмосферные осадки, роса и обледенение, пыль и песок, атмосферное давление, солнечная радиация, ветер, морской туман, коррозионные вещества в окружающей среде);

— механические (вибрация, механический удар, шум, механическое давление, качка, крен, дифферент, сейсмическое воздействие и другие);

- биологические (организмы и их сообщества, нарушающие функционирование аппаратуры — бактерии и плесневые грибы, термиты, организмы, вызывающие обрастание тел в воде и другие);
- термические (тепловой удар, разогрев ионизирующим излучением, электрическим полем, ультразвуком, аэродинамической струей);
- радиационные (ионизирующие излучения);
- ВВФ специальных сред (органические и неорганические соединения, масла, смазки, растворители, разные виды топлива, рабочие растворы и другие вещества);
- ВВФ электромагнитных полей.

Перечень и характеристики ВВФ, учитываемых при проектировании, устанавливаются в стандартах на конкретные виды аппаратуры в зависимости от предполагаемого региона эксплуатации и места установки изделия. Далее для примера рассмотрим нормирование устойчивости к ВВФ промышленных приборов и средств автоматизации, используемых при построении систем измерения, контроля и управления производственными процессами, технологическими линиями и агрегатами (изделий ГСП).

Нормативными документами, которыми следует руководствоваться, для изделий ГСП являются ГОСТ 12997-84, ГОСТ 15150-69, ГОСТ 14254—96 (МЭК 529) и некоторые другие. В соответствии с ГОСТ 12997—84 изделия ГСП должны быть устойчивыми и прочными к воздействию климатических и механических факторов, внешних магнитных полей, промышленных радиопомех. Регламентируется также степень защиты оболочки корпуса изделий. Проверка на устойчивость к воздействию других факторов осуществляется при необходимости, то есть в случаях, когда какой-нибудь ВВФ характерен для условий эксплуатации и проектируемое изделие ГСП может быть чувствительным к нему.

1. Исполнения изделий ГСП в отношении устойчивости и прочности к воздействию температуры и влажности окружающего воздуха приведены в табл. 6.

Для изделий группы В, эксплуатируемых в помещениях с искусственным климатом, требования в отношении стойкости к остальным климатическим ВВФ не предъявляются. Изделия групп С и Д должны быть устойчивы к воздействию других климатических факторов (нагрев солнечными лучами, ветер, дождь, снег, град, обледенение, резкие изменения температуры) в пределах согласно ГОСТ 15150—69.

Таблица 6. Исполнения изделий ГСП по устойчивости и прочности к воздействию температуры и влажности окружающего воздуха

Группа исполнения	Диапазон температуры окружающего воздуха, °С		Верхнее значение относительной влажности, %	Место размещения при эксплуатации
	Нижнее значение	Верхнее значение		
B1	+ 10	+35	75 при 30 °С и более низких температурах без конденсации влаги	Обогреваемые и (или) охлаждаемые помещения без непосредственного воздействия солнечных лучей, осадков, ветра, песка и пыли, отсутствие или незначительное воздействие конденсации
B2	+5	+40		
B3	+5	+40	95 при 30 °С и более низких температурах, без конденсации влаги	
B4	+5	+50	80 при 35 °С и более низких температурах, без конденсации влаги	
C1	-25	+55	100 при 30°С и более низких температурах, с конденсацией влаги	Помещения с нерегулируемыми климатическими условиями и (или) навесы. Изделия могут быть влажными в результате конденсации, вызванной резкими изменениями температуры или в результате воздействия заносимых ветром осадков и каплюющей воды
C2	-40	+70		
C3	-10	+50	95 при 35 °С и более низких температурах, без конденсации влаги	
C4	-30	+50		
Д1	-25	+70	100 при 40 °С и более низких температурах, с конденсацией влаги	Открытое пространство. Изделия подвергаются воздействию атмосферных факторов (непосредственный нагрев солнечными лучами, ветер, дождь, снег, град, обледенение). Могут появляться резкие изменения температуры, изделия могут быть влажными в результате конденсации, воздействия осадков, брызг, утечек
Д2	-50	+85, +100, +125, +155, +200		
Д3	-50, -60, -65	+50	95 при 35 °С и более низких температурах, без конденсации влаги	

2. ГОСТ 15150-69 устанавливает исполнения машин, приборов и других технических изделий для различных климатических районов, а также категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. В зависимости от предполагаемого района эксплуатации изделия могут иметь следующие климатические исполнения:

У, ТУ — для районов с умеренным климатом;

ХЛ — для районов с холодным климатом;

УХЛ — для районов с умеренным и холодным климатом;

ТВ — для районов с влажным тропическим климатом;

ТС — для районов с сухим тропическим климатом;

Т — для районов как с сухим, так и с влажным тропическим климатом;

О — для всех районов суши, кроме Антарктиды (общеклиматическое исполнение);

М — для районов с умеренно-холодным морским климатом;

ТМ — для районов с тропическим морским климатом;

ОМ — для районов как с умеренно-холодным, так и тропическим морским климатом, в том числе для судов с неограниченным районом плавания;

В — для всех районов суши и моря, кроме Антарктиды (все климатическое исполнение).

В стандарте приводится географическая карта, на которой обозначены упомянутые климатические районы. Для каждого климатического исполнения возможны различные категории размещения изделий (табл. 7). Например, исполнение УХЛ1 означает, что изделие предназначено для районов с умеренно холодным климатом и может эксплуатироваться на открытом воздухе. Характеристики климатических факторов выбираются по исполнению и категории размещения изделия.

Таблица 7. Категории размещения изделий на объекте эксплуатации по ГОСТ 15150-69

Укрупненные категории размещения	Дополнительные категории размещения
1. Для эксплуатации на открытом воздухе	1.1. Для работы и эксплуатационного хранения в помещениях категории 4 и для кратковременной работы в других условиях, в том числе и на открытом воздухе
2. Для эксплуатации под навесом или в помещениях, где колебания температуры и влажности воздуха несущественно отличаются от колебаний на открытом воздухе. Отсутствует прямое воздействие солнечного излучения и атмосферных осадков	2.1. Для встроенных элементов изделий категории размещения 1; 1.1; 2 при условии отсутствия на них конденсации влаги
Укрупненные категории размещения	Дополнительные категории размещения
3. Для эксплуатации в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без кондиционирования	3.1. В нерегулярно отапливаемых помещениях
4. Для эксплуатации в помещениях с искусственным климатом	4.1. В помещениях с кондиционированным или частично кондиционированным воздухом 4.2. В отапливаемых помещениях
5. Для эксплуатации в помещениях с повышенной влажностью (шахтах, подвалах, трюмах, в которых возможно длительное наличие воды)	5.1. Для встроенных элементов изделий категории размещения 5 при условии отсутствия на них конденсации влаги

3. Изделия ГСП должны быть устойчивыми и прочными к воздействию атмосферного давления в диапазонах:

— 84—106,7 кПа (высота до 1000 м над уровнем моря) — исполнение P1;

— 66—106,7 кПа (высота до 3000 м над уровнем моря) — исполнение P2.

4. Защита изделий ГСП от проникновения внутрь пыли и воды, а также твердых тел обеспечивается с помощью оболочек. Степень защиты оболочки корпуса электротехнических изделий регламентируется ГОСТ 14254-96 (МЭК 529) и обозначается буквами IP и следующими за ними двумя цифрами, например IP54. Первая цифра обозначает степень защиты персонала от прикосновения к токоведущим или движущимся частям внутри корпуса, а также степень защиты изделия от проникновения внутрь твердых тел и пыли, вторая цифра — степень защиты изделия от попадания внутрь воды (табл. 8).

5. Изделия ГСП должны быть устойчивыми и прочными к воздействию синусоидальных вибраций, а при необходимости и ударов. Параметры вибраций для наиболее распространенных групп исполнений приведены в табл. 1.8.

Таблица 8. Степени защиты корпуса по ГОСТ 14254-96 (МЭК 529)

Степень запылы	Защита от твердых тел	Защита от воды
0	Защита отсутствует	Защита отсутствует
1	Защита от проникновения внутрь оболочки большого участка поверхности человеческого тела, например рук, и от проникновения твердых тел диаметром более 50 мм	Капли воды, вертикально падающие на оболочку, не должны оказывать вредного воздействия на изделие
2	Защита от проникновения внутрь корпуса пальцев или предметов длиной более 80 мм и от проникновения твердых тел диаметром более 12 мм	Капли воды, падающие на оболочку под углом до 15° от вертикали, не должны оказывать вредного воздействия на изделие
3	Защита от проникновения внутрь оболочки инструментов, проволоки, твердых тел и т. п. диаметром или толщиной более 2,5 мм	Дождь, падающий на оболочку под углом 60° от вертикали, не должен оказывать вредного воздействия на изделие
4	Защита от проникновения внутрь оболочки проволоки и твердых тел диаметром более 1,0 мм	Вода, разбрызгиваемая на оболочку в любом направлении, не должна оказывать вредного воздействия на изделие
5	Проникновение пыли внутрь корпуса не предотвращено полностью, однако количество проникающей пыли не может нарушить работу изделия	Струя воды, выбрасываемая в любом направлении на оболочку, не должна оказывать вредного воздействия на изделие
6	Проникновение пыли предотвращено полностью	Сильная струя воды (100 л/мин при давлении 100 кПа) или волны воды не должны вызывать попадание в оболочку воды в количестве, достаточном для повреждения изделия
7	Не предусмотрено	Вода не должна проникать в оболочку, погруженную в воду на глубину примерно 15 см, при примерном равенстве температуры оболочки и воды, в количестве, достаточном для повреждения изделия
8	Не предусмотрено	Изделие пригодно для длительного погружения в воду при условиях, устанавливаемых изготовителем

Таблица 9. Исполнения изделий ГСП по устойчивости и прочности к воздействию вибраций

Группа исполнения	Частота, Гц	Амплитуда		Размещение
		смещение для частоты ниже частоты перехода, мм	ускорения для частоты выше частоты перехода, м/с ²	
L1	5-35	0,35	—	Места, защищенные от существенных вибраций. Могут появляться вибрации только низкой частоты
L7		0,75	—	
L3		(0,1)*	—	
N1	10-55	0,15	—	Места, подверженные вибрации от работающих механизмов. Типовое размещение на промышленных объектах
N2		0,35		
II	10-150	0,075	9,8	Места на промышленных объектах при условии, что существует вибрация с частотой, превышающей 55 Гц
II		0,15	19,6	
УЗ		0,35	49,0	

Примечание. *По требованию потребителя.

§ 5.5. Методы поиска конструктивных решений

В процессе проектирования инженеру постоянно приходится сталкиваться с поиском вариантов технической реализации разрабатываемого устройства или системы. Возникающие при этом задачи можно разделить на обычные и творческие. Для обычных задач существуют четкие исходные данные и постановка задачи, апробированные методики поиска решения. Заранее известен и примерный результат расчета по этим методикам. Примеры обычных задач:

- разработка схемы типового электронного узла;
- расчет параметров схемы по существующей методике;
- разработка печатной платы.

Для творческих задач, как правило, отсутствует постановка задачи, неизвестны пути решения и конечный результат. Примеры творческих задач:

- разработка необычной схемы компоновки устройства;
- создание новых схемотехнических решений электронных узлов;

— разработка новых способов измерения физических величин, обработки деталей и т. д.

Обычно творческие задачи решаются методом проб и ошибок. Это длительный и трудоемкий процесс, заключающийся в переборе и анализе большого количества вариантов. Психологическая инерция направляет процесс мышления по привычным и знакомым направлениям, редко приводящим к получению приемлемого результата. Неудивительно, что достаточно большое число исследователей предпринимало попытки обобщения и систематизации опыта удачливых изобретателей с целью нахождения методов поиска более результативных, чем метод проб и ошибок. В настоящее время существуют десятки методов, позволяющих повысить эффективность мыслительного процесса и ускорить нахождение нужного решения, среди которых наиболее известны:

- метод мозгового штурма (мозговой атаки);
- метод эвристических приемов; метод контрольных вопросов;
- метод морфологического анализа;
- метод синектики;
- метод функционально-стоимостного анализа;
- метод вещественно-полевого (вепольного) анализа;
- алгоритм решения изобретательских задач (АРИЗ);
- комплексный метод поиска решений технических проблем.

В дальнейшем рассмотрении остановимся только на наиболее простых и интуитивно понятных методах, не требующих предварительного обучения и соответствующих специфике деятельности конструктора ЭА. Для углубления знаний в данной области можно воспользоваться литературой [23, 40]. Начальным этапом поиска технического решения является постановка задачи, при которой следует четко сформулировать, что в конечном итоге желательно получить и что мешает получению желаемого. Правильно поставленная задача — наполовину решенная задача.

Метод мозговой атаки

Метод мозгового штурма или мозговой атаки (МА) основывается на многократной активизации мыслительного процесса при коллективном обсуждении проблемы. В одном из американских руководств по методу МА говорится, что «99% ваших конструктивных идей возникает подобно электрической искре при контакте с мыслями других людей». Сама жизнь подсказывает идею использования коллективного разума при решении сложных ситуаций, поэтому история возникновения данного метода уходит в глубину веков. Основоположником современного метода МА считается А. Осборн, предложивший для устранения психологических препятствий, вызываемых боязнью критики, разделить во времени процессы генерирования идей и их критической оценки. Причем последующий критический анализ идей может проводиться не участниками МА, а

другими специалистами. Метод МА не требует специальной подготовки участников и позволяет решать практически любые задачи в сфере человеческой деятельности.

В состав творческой группы помимо узких специалистов должны входить специалисты смежных областей, которые обеспечат комплексное и всестороннее рассмотрение задачи (конструкторы, технологи, экономисты, снабженцы). Полезным может быть участие посторонних людей, не имеющих образования в рассматриваемой области, которые, обладая «свежим» взглядом, способны предложить неожиданное решение. Приглашать на сеанс МА желательно за 2—3 дня с изложением сути задачи, чтобы участники могли настроиться. Иногда бывает целесообразно заранее сообщить постановку задачи. Успех и результативность МА в большой мере зависит от ведущего, в роли которого чаще всего выступает руководитель творческой группы. Если в группе есть новички, ведущий вначале представляет всех участников, излагает правила поведения. Далее ведущий излагает формулировку задачи как в специальном, так и в общедоступном изложении (для неспециалистов), отвечает на вопросы, направляет обсуждение, записывает высказываемые идеи и т. п. При проведении МА следует стремиться высказать максимальное число идей, в том числе казалось бы заведомо глупых. Плохие идеи — это катализаторы, без них не будет хороших идей, предпочтение отдается озарениям и фантазии, а не систематическому логическому мышлению. Старайтесь развивать, комбинировать и улучшать высказанные ранее идеи, получать от них новые ассоциации. Во время МА абсолютно запрещена критика идей, создается непринужденная дружеская атмосфера, способствующая продуктивному мышлению. Не рекомендуется увеличение длительности обсуждения более 30 мин. После сеанса МА проводится коллективное редактирование списка высказанных идей для детальной проработки, причем последующий критический анализ высказанных идей может проводиться и другой группой людей — «экспертов». В группу «генераторов идей» подбирают людей с бурной фантазией, склонных к абстрагированию, в качестве «экспертов» лучше работают люди с аналитическим, критическим складом ума. Чем сложнее проблема, тем длительнее творческий процесс поиска решения, и наиболее интересные идеи часто появляются уже после окончания сеанса МА. Поэтому полезно на следующий день после МА проводить дополнительный сбор предложений по решению задачи. Для сложных задач практикуется двукратное проведение МА по одному и тому же вопросу с интервалом от нескольких часов до 2—3 дней (двойная мозговая атака).

Метод эвристических приемов

В результате успешного решения творческой задачи методом «проб и ошибок» человек кроме собственно искомого ответа получает и методический результат — способ решения подобных задач. При решении новой задачи человек в первую очередь пытается использовать найденный им способ. Если это не удастся, изобретатель вновь вынужден искать решение методом «проб и ошибок». Постепенно у опытного изобретателя формируется набор способов решения различных задач. Такие способы или правила решения творческих задач называются эвристическими приемами (ЭП). Эвристический прием — это краткое указание того, какие преобразования в данной технической системе можно провести для получения нового решения, достижения поставленной цели. В результате обобщения опыта многих изобретателей составлен межотраслевой фонд эвристических приемов. Этот фонд насчитывает около 180 приемов, разделенных на 12

групп, имеющих следующие наименования: преобразование формы, преобразование структуры, преобразования во времени, преобразование материала и вещества, использование профилактических мер, использование резервов и др. Межотраслевой фонд эвристических приемов имеет универсальный характер, он ориентирован на различные области техники, поэтому ЭП имеют обобщенное описание. В конце описания многих ЭП дается указание «инверсия приема», по которому рекомендуется производить обратное преобразование. После описания ЭП даются примеры его использования для решения задач. Межотраслевой фонд ЭП обладает избыточностью, то есть многие задачи могут быть решены независимо разными ЭП. Вторая черта избыточности состоит в том, что одновременное использование двух и более ЭП приводит к их взаимному усилению при нахождении решения. Примеры формулировок эвристических приемов:

- изменить традиционную ориентацию объекта в пространстве — горизонтальное положение на вертикальное или наклонное и т. п.;
- приблизить рабочие органы объекта к месту выполнения ими своих функций без передвижения самого объекта;
- изменить физические свойства материала, например, его агрегатное состояние;
- заранее придать объекту напряжения, противоположные недопустимым или нежелательным рабочим напряжениям;
- использовать принцип агрегатирования, то есть создать базовую конструкцию (единую раму, станину), на которую можно устанавливать различные рабочие органы, агрегаты, сменные блоки и т. п.

При формулировке задачи выявляют главный недостаток или главное противоречие в развитии прототипа, которые необходимо устранить. Исходя из этой информации, просматривают список ЭП и отбирают наиболее подходящие для преобразования прототипа приемы, с помощью которых получают ряд улучшенных технических решений. Эти решения вновь могут быть приняты в качестве прототипа для дальнейшего усовершенствования этим же методом до получения приемлемого результата.

Пример. Найти улучшенное техническое решение коммутационной кнопки, монтируемой на панели блоков, пультов управления и т. д. Прототипом является широко распространенная кнопка (рис. 1.6), имеющая подвижный замыкающий электрический контакт, совершающий возвратно-поступательные перемещения, и два неподвижных контакта. Нормально разомкнутое состояние контактов обеспечивается возвратной пружиной. Недостатком прототипа является возможность проникновения пыли и влаги внутрь кнопки через кольцевой зазор вокруг ее подвижной части. В фонде ЭП, приведенном в [23], выбираем для просмотра группы «преобразование структуры» (2), «преобразование движения и силы» (5), «преобразование материала и вещества» (6). В этих группах отбираем следующие приемы:

- заменить связи (способ или средства соединения) между элементами; жесткую связь сделать гибкой и наоборот (2.5);

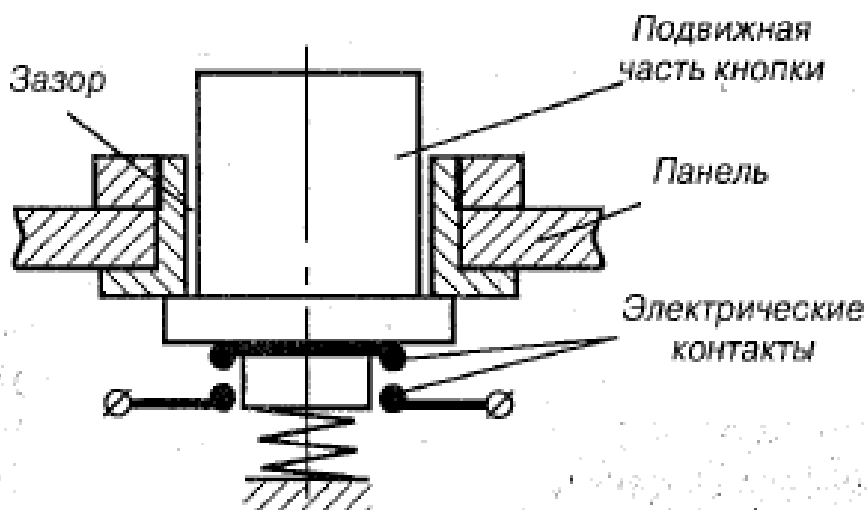


Рис.7. Схема коммутационной кнопки

— заменить механическую схему электрической, тепловой, оптической или электронной (2.7);

— использовать магнитные силы (5.13);

— заменить жесткую часть элементами из материала, допускающего изменение формы при эксплуатации, вместо жестких объемных конструкций использовать гибкие блоки и пленки; инверсия приема (6.6).

Используя приемы 2.5, 6.6, помещаем электрические контакты внутрь герметичной оболочки из упругой диэлектрической пленки, способной приобретать первоначальную форму после деформации. Данное техническое решение реализовано в гибких пленочных клавиатурах, наклеиваемых на лицевую панель (рис. 8, а). Руководствуясь приемом 5.13, получаем схему с постоянным магнитом (рис. 8, б), воздействующим через панель из немагнитного материала на установленный внутри аппаратуры герконовый контакт (геркон). Такой контакт может быть установлен и с наружной стороны панели, ближе к магниту.

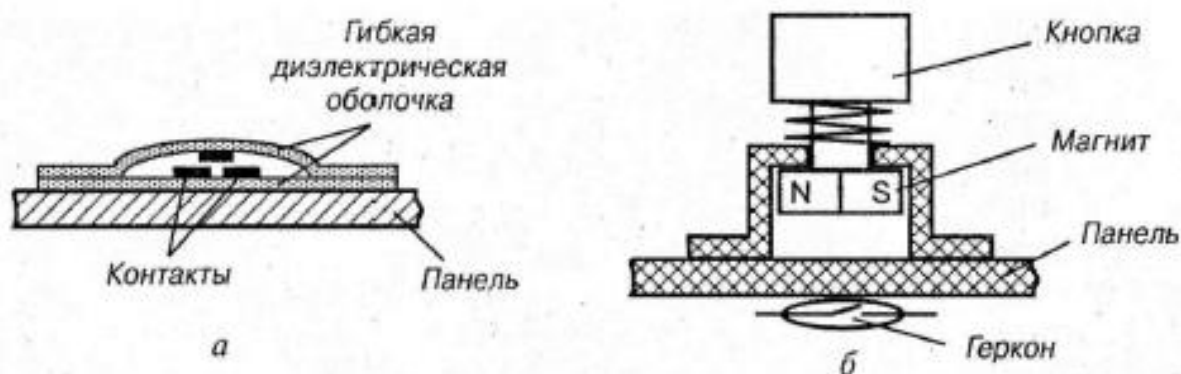


Рис.8. Схема гибкой пленочной клавиатуры (а) и кнопки с магнитоуправляемым контактом (б)

Применяя прием 2.7, приходим к получающим все более широкое распространение сенсорным экранам, работа которых основана на различных физических принципах: резистивном, емкостном, использовании инфракрасного излучения, поверхностных акустических волн и др.

Метод контрольных вопросов

Метод контрольных вопросов по своей сути близок к методу эвристических приемов и применяется для психологической активизации творческого процесса. Цель его — с помощью наводящих вопросов, списки которых предлагались различными авторами с 20-х годов XX века, подвести к решению задачи. Изобретатель отвечает на вопросы, содержащиеся в списке, и в связи с этим рассматривает свою задачу. Метод может применяться либо в форме монолога изобретателя, обращенного к самому себе, либо диалога, например, в виде вопросов, задаваемых руководителем мозгового штурма членам группы генераторов идей. Широко распространены универсальные вопросники, разработанные А. Осборном, Э. Раудзенном, Т. Эйлоартом и другими. За рубежом чаще используется вопросник, разработанный А. Осборном, который содержит 9 групп вопросов:

- какое новое применение технического объекта можно предложить?
- возможно ли решение задачи путем приспособления, упрощения, сокращения?
- какие модификации технического объекта возможны?
- что можно в техническом объекте увеличить?
- что можно в техническом объекте уменьшить?
- что можно в техническом объекте заменить?
- что можно в техническом объекте преобразовать?
- что можно в техническом объекте перевернуть наоборот?
- какие новые комбинации элементов технического объекта возможны?

В каждой из перечисленных групп приводится список дополнительных вопросов, конкретизирующих вопрос, вынесенный в название группы. Например, для второй группы дополнительные вопросы сформулированы следующим образом:

- что напоминает вам данный технический объект?
- вызывает ли аналогия новую идею?
- имеются ли в прошлом аналогичные проблемные ситуации, которые можно использовать?
- что можно скопировать?

§ 5.6. Надежность электронной аппаратуры

§ 5.6.1. Основные понятия и характеристики надежности

Надежность — это свойство ЭА сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования [8, 9, 19, 38]. Аппаратура может находиться в работоспособном или неработоспособном состоянии.

Работоспособность — это состояние ЭА, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической или конструкторской документации. Событие, заключающееся в нарушении работоспособности, называется отказом. При возникновении отказа дальнейшее использование изделия по назначению становится невозможным. Повреждения, не связанные с прекращением функционирования (например, вмятина в корпусе), отказом не считаются. Рассмотрим классификацию отказов.

По характеру возникновения отказы делят на внезапные и постепенные. Внезапные отказы проявляются в виде скачкообразного изменения параметров ЭА в результате выхода из строя элементов (пробой диода или конденсатора, разрушение механической детали и т. п.). Постепенные отказы вызываются медленным изменением свойств элементов (потеря емкости электролитических конденсаторов, высыхание смазки трущихся частей и т. п.) до тех пор, пока хотя бы один из параметров ЭА не выйдет за допустимые пределы. По характеру устранения отказы делят на устойчивые и самоустраняющиеся. Устойчивый отказ исчезает только после ремонта. Самоустраняющиеся отказы исчезают сами по себе и проявляются в виде перемежающегося отказа или сбоя. Примером перемежающегося отказа является то исчезающий, то восстанавливающийся электрический контакт. Сбой — это однократно возникающий самоустраняющийся отказ. Сбои характерны для цифровых устройств и могут быть обусловлены сетевыми помехами, несинхронной работой отдельных узлов, ошибками программного обеспечения и т. п.

По внешним проявлениям отказы делят на явные (обнаруживаются при внешнем осмотре) и неявные (обнаруживаются специальными методами контроля).

В зависимости от возможности устранения отказов, электронные устройства делят на восстанавливаемые и невосстанавливаемые. Восстанавливаемым называется устройство, для которого при возникновении отказа нормативно-технической документацией предусматривается восстановление работоспособного состояния. Устройство, для которого восстановление работоспособности не предусматривается, называется невосстанавливаемым. Надежность является комплексным понятием и включает в себя такие составляющие как безотказность, ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость.

Безотказность — свойство ЭА непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки.

Ремонтопригодность — свойство ЭА, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

Долговечность — свойство ЭА сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при условии выполнения технического обслуживания и ремонта. Предельное состояние — это состояние, при котором дальнейшее применение изделия невозможно или нецелесообразно.

Сохраняемость — свойство ЭА сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтопригодности в течение и после хранения и транспортирования.

Показатели безотказности

Возникновение отказа во времени — случайное событие, поэтому для оценки надежности используются методы теории вероятности и математической статистики. Для количественной характеристики безотказности наиболее часто используются такие параметры, как вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, средняя наработка на отказ. Вероятность безотказной работы — вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ устройства не возникнет. Этот параметр связан с функцией распределения времени безотказной работы соотношением $P(t) = 1 - Q(t)$, где $P(t)$ — вероятность безотказной работы; $Q(t)$ — функция распределения времени безотказной работы, которая представляет собой вероятность появления отказа устройства в течение времени t . Функция $P(t)$ является монотонно убывающей, а функция $Q(t)$ — монотонно возрастающей, причем

$$0 \leq P(t) \leq 1, P(0) = 1, P(\{\infty\}) = 0.$$

Для экспериментального определения показателей надежности испытаниям подвергают достаточно большую партию однотипных изделий. Для $P(t)$ используется следующая статистическая оценка: $P^*(t_x) = N_x/N_0$, где N_0 — число изделий, поставленных на испытания; N_x — число изделий, оставшихся исправными в момент времени t_x (отказавшие в процессе испытаний изделия не ремонтируются).

Достоверность полученного значения тем выше, чем больше N_0 . Точное (вероятностное) значение вероятности безотказной работы определяется по формуле:

$$P(t_x) = \lim_{N_0 \rightarrow \infty} \frac{N_x}{N_0}.$$
$$P(t) = \exp \left[- \int_0^{t_x} \lambda(t) dt \right],$$

Время между соседними отказами элементов ЭА является непрерывной случайной величиной, которая характеризуется некоторым законом распределения. При расчете безотказности ЭА обычно считают, что все отказы устройства являются внезапными и используют экспоненциальный закон: Где $\lambda(t)$ — интенсивность отказов. Указанное допущение в большинстве случаев достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Интенсивность отказов — условная плотность вероятности возникновения отказа устройства, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник. Интенсивность отказов λ показывает, какая часть изделий в среднем выходит из строя за 1 час работы. Например, если $\lambda = 10^{-5}$, значит за 1 час работы выйдет из строя 10^{-5} часть изделий, за 1000 ч — 10^{-2} часть изделий. Экспериментально установлено, что зависимость интенсивности отказов от времени имеет вид, показанный на рис. 1.8. Здесь $(0 \dots t_1)$ — период приработки, составляющий 1—1,5% от срока службы изделия. В этот период выходят из строя элементы, имеющие скрытые дефекты. Период нормальной работы изделия соответствует участку $(t_1 \dots t_2)$, на котором $\lambda = \text{const}$. В это время происходят отдельные случайные отказы элементов. При расчетах надежности используют значение λ именно для этого отрезка. После точки t_2 — период старения и

износа
элементов

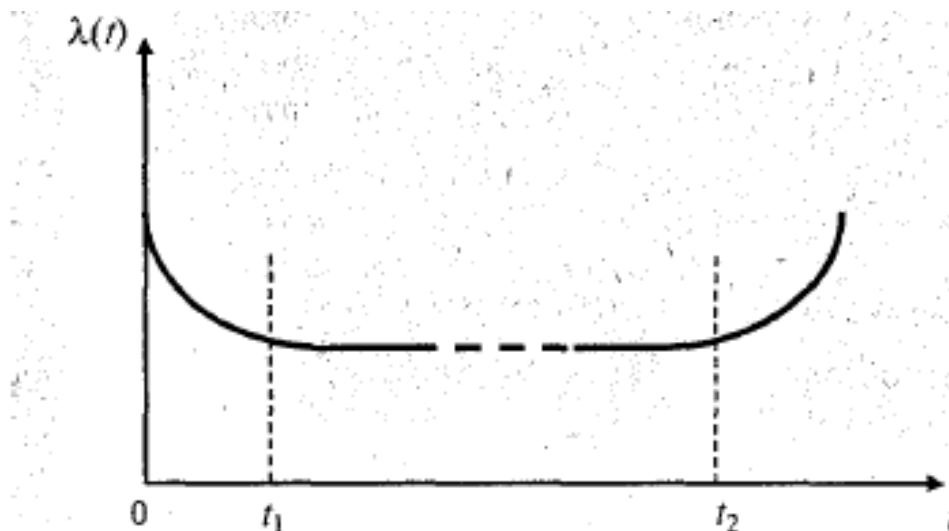


Рис.9. Зависимость интенсивности отказов от времени

Далее будет показано, что интенсивность отказов существенно зависит также от электрической нагрузки элемента, температуры его корпуса, внешних механических воздействий и других условий эксплуатации.

Полагая в выражении экспоненциального закона $X(t) = \text{const}$, приходим к выражению для практических расчетов безотказности: $P(t) = e^{-\lambda t}$

То есть при увеличении t вероятность безотказной работы снижается по экспоненте, показатель которой равен интенсивности отказов.

Средняя наработка на отказ T — математическое ожидание наработки на отказ. Для невозстанавливаемых устройств применяется показатель наработки до отказа. Статистическое определение T проводится следующим образом. На наработку в заданных условиях ставится достаточно большое число изделий. В процессе наработки возникающие отказы устраняют и вновь включают изделия в работу. При этом

$T^* = t/n$, где t — суммарное количество часов, которые изделия были в исправном состоянии; n — суммарное количество отказов.

Для невосстанавливаемых изделий в данную формулу в качестве p подставляют число изделий, так как каждое изделие работает до первого отказа. Вероятностное \

$$T = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt.$$

определение T :

Полагая $\lambda = \text{const}$, получим формулу для практических расчетов

$$T = \frac{1}{\lambda}.$$

Показатели ремонтпригодности

Большинство электронных устройств относятся к восстанавливаемым. Способность устройства выполнять свои функции в реальных условиях эксплуатации зависит как от его безотказности, так и от ремонтпригодности. Поэтому для таких устройств, в дополнение к $P(t)$, T , λ , характеризующим безотказность, используются показатели ремонтпригодности (среднее время восстановления и др.). Применяются также комплексные показатели, характеризующие одновременно и безотказность, и ремонтпригодность (коэффициент готовности и др.). Среднее время восстановления — математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния устройства после отказа. Среднее время восстановления определяется как свойствами изделия (приспособленностью к проведению ремонта), так и другими факторами (квалификацией обслуживающего персонала, его технической оснащённостью и т. д.). Среднее время восстановления T_B определяется по формуле

$$T_B^* = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \tau_i,$$

где $\{\tau_i\}$ — время, затраченное на восстановление изделия при i -м отказе; m — общее число восстановлений. Коэффициент готовности — это вероятность того, что устройство окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение устройства по назначению не планируется. Для любых распределений времени между отказами и восстановлением справедлива формула:

$$K_r^* = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\sum_{i=1}^m t_i + \sum_{i=1}^m \tau_i} = \frac{T}{T + T_B},$$

$$\sum_{i=1}^m \tau_i$$

где $\sum_{i=1}^m \tau_i$ — суммарное время исправной работы устройства;

$$\sum_{i=1}^m \tau_i$$

— суммарное время восстановления устройства при отказах; t — число отказов за период наблюдения; T и T_B — среднее время безотказной работы и среднее время восстановления.

Показатели долговечности и сохраняемости

Для характеристики долговечности и сохраняемости изделий используются такие понятия как ресурс, срок службы, срок сохраняемости.

Ресурс — наработка объекта от определенного момента времени до наступления предельного состояния.

Срок службы — календарная продолжительность эксплуатации изделия от определенного момента времени до наступления предельного состояния. Дополнительно может оговариваться, сколько часов в сутки работает изделие. «Определенный момент» — это начало эксплуатации или ее возобновление после капитального ремонта. Предельное состояние, при котором дальнейшая эксплуатация устройства невозможна или нецелесообразна, вызывается следующими факторами:

— устройство становится неработоспособным либо настолько часто отказывает, что его эксплуатация становится экономически нецелесообразной (физическое старение);

— появляется техника настолько более совершенная, что еще работоспособное устройство эксплуатировать уже нецелесообразно (моральное старение).

Срок сохраняемости — продолжительность хранения объекта, в течение которой сохраняются установленные показатели качества. Используются следующие показатели долговечности и сохраняемости.

Средний ресурс — математическое ожидание ресурса для различных экземпляров данного типа изделия.

Назначенный ресурс — суммарная наработка изделия, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от состояния.

Гамма-процентный срок службы — срок службы, в течение которого изделие не достигает предельного состояния с заданной вероятностью γ .

Средний срок службы — математическое ожидание срока службы.

Гамма-процентный срок сохраняемости — продолжительность хранения, в течение которой у изделия сохраняются установленные показатели с заданной вероятностью $\{\gamma\}$.

Средний срок сохраняемости — математическое ожидание срока сохраняемости для различных экземпляров данного типа изделий.

Расчетно-логические схемы

При расчете надежности обычно оцениваются только безотказность и ремонтпригодность устройства. При этом составляется расчетно-логическая схема, элементами которой являются части конструкции устройства, которые потенциально могут отказать в процессе работы: электронные компоненты, паяные соединения, провода, элементы крепления и др. Электрические, магнитные, оптические, механические и иные функциональные связи между частями заменяются логическими, характеризующими выполнение главной функции устройства при отказах его элементов. Различают расчетно-логические схемы с последовательным, параллельным и смешанным соединением элементов (рис. 10).

Наибольшее распространение получили электронные устройства и системы без структурного резервирования. Расчетно-логическая схема нерезервированного объекта представляет собой цепочку последовательно соединенных элементов, отказ любого из которых приводит к отказу устройства в целом (рис. 10, а). Элементы, отказ которых не приводит к нарушению функционирования, в последовательную цепочку не включаются. Чем больше элементов содержит устройство, тем ниже его надежность.

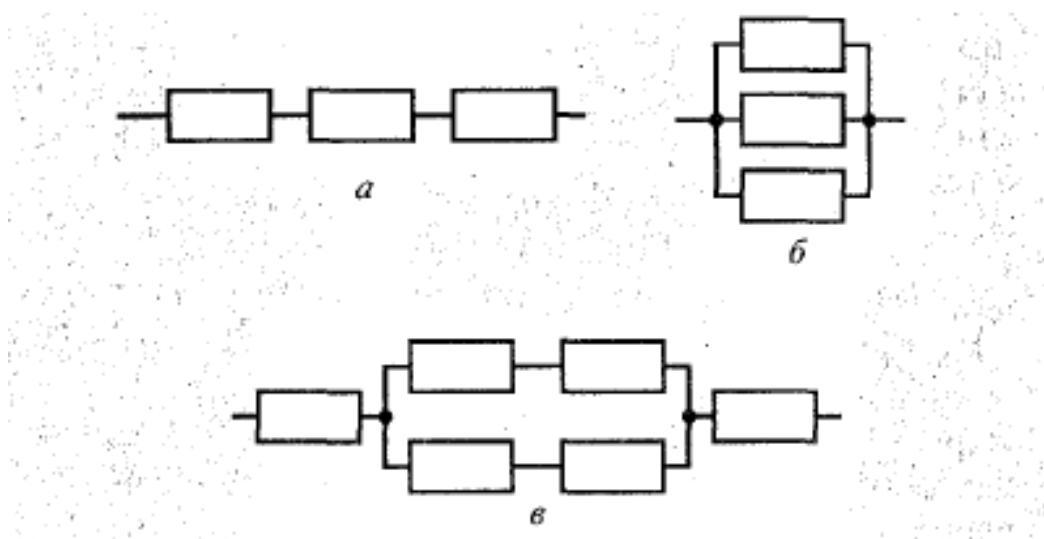


Рис.10. Расчетно-логические схемы с последовательным (а), параллельным (б) и смешанным (в) соединением элементов

В устройствах со структурным резервированием используется параллельное соединение однотипных элементов (рис. 10, б). При отказе элементов их функции начинают выполнять исправные элементы. Отказ устройства происходит после отказа всех элементов в резервированной группе. Поэтому здесь увеличение числа элементов способствует повышению надежности устройства. При параллельно-последовательном соединении (рис. 10, в) следует найти вероятность безотказной работы для каждой группы последовательно или параллельно включенных элементов, а затем для всей схемы. От адекватности принятой расчетно-логической схемы зависят полученные при расчете значения параметров надежности. Поэтому важно правильно определить элементы, от которых зависит выполнение главной функции устройства. Второстепенные элементы,

например, индикаторы режимов работы, блоки, обеспечивающие сервисные и другие вспомогательные функции, в расчетно-логическую схему иногда можно не вводить.

§5.5.2. Виды структурного резервирования

Одним из основных средств обеспечения заданного уровня надежности ЭА при недостаточно надежных элементах является резервирование. Под резервированием понимается способ обеспечения надежности изделия за счет использования дополнительных средств и возможностей, избыточных по отношению к минимально необходимым для выполнения требуемых функций. Структурное резервирование заключается в том, что в состав изделия вводят дополнительные устройства или отдельные узлы, предназначенные для быстрой замены (автоматически или вручную) аналогичных им элементов основного оборудования. Резервные элементы берут на себя выполнение рабочих функций при отказе соответствующих основных элементов. Резервирование широко используется в радио- и телевещательной аппаратуре, авиационной, военной и космической технике, системах аварийной сигнализации и жизнеобеспечения. Степень аппаратной избыточности характеризуется кратностью резерва. Кратность резерва — это отношение числа резервных элементов к числу резервируемых ими основных элементов, выраженное несокращенной дробью. Резервирование с кратностью резерва один к одному называется дублированием.

Резервирование может быть общим и отдельным. В первом случае резервируется устройство в целом, во втором — его отдельные элементы или их группы. По схеме включения элементов различают постоянное резервирование, мажоритарное резервирование, резервирование замещением с целой кратностью, скользящее резервирование (рис. 11).

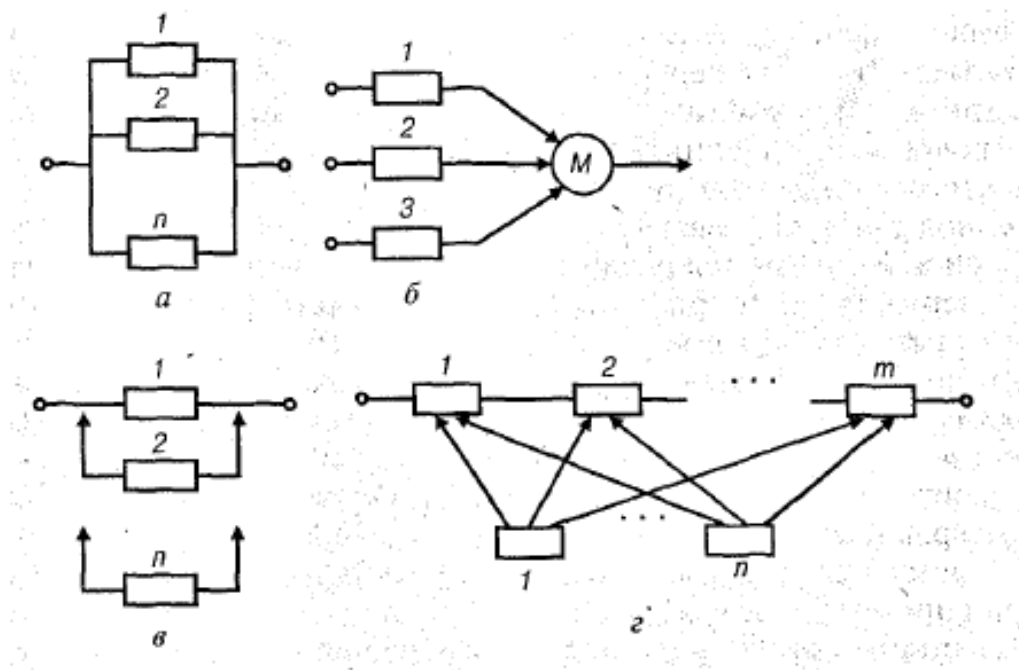


Рис.11. Расчетно-логические схемы резервированного устройства: а — постоянное резервирование; б — мажоритарное резервирование; в — резервирование замещением с целой кратностью; г — скользящее резервирование.

Постоянное резервирование — это резервирование, при котором используется нагруженный резерв, и при отказе любого элемента в резервированной группе выполнение устройством требуемых функций обеспечивается оставшимися элементами без переключений.

Постоянное резервирование — это резервирование, при котором используется нагруженный резерв, и при отказе любого элемента в резервированной группе выполнение устройством требуемых функций обеспечивается оставшимися элементами без переключений.

Резервирование замещением — это резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного элемента. Обнаружение отказа и переключение на резервный элемент может осуществляться автоматически или вручную. Разновидностью резервирования замещением является скользящее резервирование. При скользящем резервировании (резервировании с дробной кратностью) для группы одинаковых основных элементов используется один или несколько резервных элементов, каждый из которых может заменить любой из отказавших элементов данной группы. В зависимости от режима работы резервных элементов различают нагруженный, облегченный и ненагруженный резерв. В первом случае резервные элементы находятся в том же режиме, что и основной элемент и имеют такую же интенсивность отказов. При облегченном резерве резервные элементы находятся в менее нагруженном режиме, чем основной элемент. Поэтому интенсивность отказов резервных элементов в период их пребывания в качестве резервных ниже, чем в период их использования вместо основных. При ненагруженном резерве резервные элементы находятся в выключенном состоянии. При расчетах надежности принимается, что отказы элементов, находящихся в резерве, исключены ($\lambda = 0$); в период же использования этих элементов в качестве основных, их надежность становится равной надежности основных элементов. Резервирование, при котором работоспособность любого основного и резервного элементов устройства в случае возникновения отказов подлежит восстановлению в процессе эксплуатации, называется резервированием с восстановлением. В противном случае имеет место резервирование без восстановления. Выигрыш в повышении надежности увеличивается при переходе от резервирования устройства в целом к резервированию его отдельных частей, причем теоретически наиболее выгодно поэлементное резервирование. Для иллюстрации сказанного рассмотрим схемы постоянного общего и отдельного резервирования устройства, состоящего из t элементов (рис. 12). Здесь все элементы одинаковы и имеют вероятность отказа $q\{t\}$.

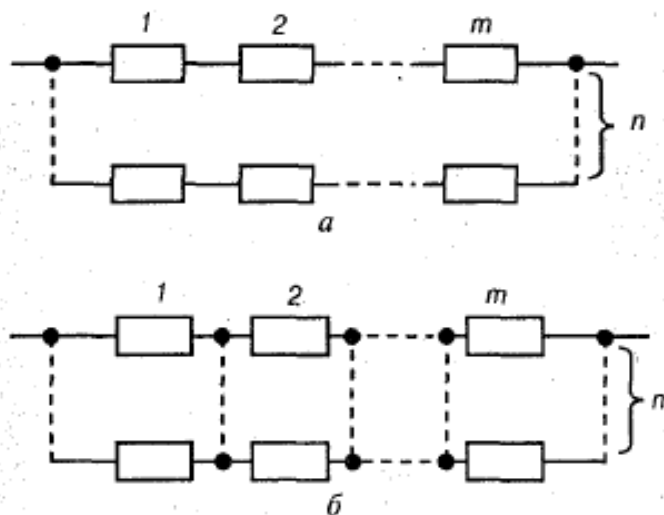


Рис.12. Схемы общего (а) и реального (б) резервирования

Если предположить, что $m q(t) \ll 1$ (обычно выполняется), то вероятность отказа устройства с отдельным резервированием будет в $t'' \sim 1$ раз ниже, чем при общем резервировании. Например, при $t = 5$, $n = 2$ получаем $m n - 1 = 5$. То есть при том же числе элементов переход от общего резервирования к отдельному дает пятикратный выигрыш в надежности. Подобный результат может быть получен и для резервирования замещением, если предположить абсолютную надежность переключателей. На практике возможности в этом отношении весьма ограничены, поскольку с повышением числа резервируемых элементов резко растет сложность как основной аппаратуры, так и схем диагностики и переключателей. Возникает потребность диагностировать сами узлы диагностики. Поэтому определение числа резервируемых узлов является задачей оптимизации. Существование оптимума обусловлено тем, что вначале с ростом числа узлов надежность растет, но в дальнейшем из-за увеличения сложности аппаратуры начинает снижаться. Кроме обеспечения заданных показателей надежности учитываются и затраты: стоимость, масса, объем, сложность аппаратуры.

§ 5.5.3. Резервирование без восстановления

Постоянное резервирование

Постоянное резервирование является единственно возможным в устройствах, где недопустим даже кратковременный перерыв в функционировании. Устройство содержит и однотипных элементов, которые включаются в работу одновременно (см. рис. 1.10, а). Деление этих элементов на основной и резервные достаточно условно, поскольку режим работы всех элементов может быть одинаков: в случае отказа основного элемента его функции без всякого перерыва начинает выполнять один из резервных, причем считается, что возможны только отказы типа «обрыв». Отказавшие элементы не восстанавливаются, поэтому устройство работоспособно до тех пор, пока исправен хотя бы один из n -элементов. Вероятность отказа $q(t)$ одного элемента $q(t) = 1 - P_0(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ где $P_0(t)$ и X — вероятность безотказной работы и интенсивность отказов одного элемента.

Отказ устройства произойдет после отказа всех элементов, вероятность этого

$Q(t) = q_1(t) \cdot q_2(t) \dots q_n(t)$. Отсюда вероятность безотказной работы резервированного устройства

$$P_p(t) = 1 - [1 - P(t)]^n.$$

Средняя наработка до отказа резервированного устройства

$$T_p = T \left[1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} \right] = \frac{1}{\lambda} \left[1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} \right]$$

где средняя наработка до отказа одного элемента $T = 1/\lambda$. Другая форма записи этой формулы имеет вид

$$T_p = T \sum_{i=1}^n \frac{1}{n-i+1}.$$

Постоянное резервирование широко используется на низком уровне конструктивной иерархии, например, включенные параллельно контакты реле и электрических соединителей и т. д. Постоянное резервирование является единственно возможным в устройствах, где недопустим даже кратковременный перерыв в функционировании. При отсутствии восстановления элементов, возможности постоянного резервирования невелики и иллюстрируются табл. 10. Легко видеть, что при $n = 2$ наработка на отказ возрастает всего в 1,5 раза; для удвоения T_p аппаратная сложность устройства должна быть увеличена в 4 раза. В данном примере интенсивность отказов одного элемента принята равной 10^{-4} .

Таблица 10. Зависимость надежности от числа параллельных элементов при постоянном резервировании без восстановления

Число элементов n	$\lambda(4000)$	
1 (без резервирования)	0,670	10^4
2	0,891	$1,5 \cdot 10^4$
3	0,964	$1,83 \cdot 10^4$
4	0,988	$2,08 \cdot 10^4$

Мажоритарное резервирование.

В ряде случаев возникает необходимость резервирования датчиков и других элементов, выдающих информацию. Для отделения истинной информации от ложной, поступающей от отказавших элементов, применяется мажоритарное резервирование (см. рис. 1.10, б), являющееся частным случаем постоянного резервирования. При мажоритарном резервировании вместо одного используются три идентичных элемента, выходы которых подключаются к мажоритарному органу M . Если все элементы исправны, то на вход M поступают три одинаковых сигнала и такой же сигнал присутствует на выходе M . Если один из трех резервированных элементов отказал, то на вход M поступают два одинаковых истинных сигнала и один ложный сигнал. Сигнал на выходе M будет того же вида, что и большинство одинаковых входных сигналов. Подобное построение схемы основывается

на том, что вероятность одновременного отказа двух элементов из трех пренебрежимо мала. Число элементов в резервированной группе может быть более трех, но оно обязательно должно быть нечетным. Условием безотказной работы устройства при мажоритарном резервировании является работоспособность любых двух элементов из трех и мажоритарного органа в течение заданного времени t . Вероятность безотказной работы устройства с мажоритарным резервированием

$$P_p(t) = P_M(t)[3P_0^2(t) - 2P_0^3(t)],$$

где $P_0(t)$ и $P_M(t)$ — соответственно вероятности безотказной работы одного элемента и мажоритарного органа в течение времени t . Относительное увеличение вероятности безотказной работы

$$\frac{P_p(t)}{P_0(t)} = P_M(t)P_0(t)[3 - 2P_0(t)].$$

График зависимости относительного увеличения вероятности безотказной работы резервированной схемы от числа элементов и их надежности приведен на рис. 1.12 [32].

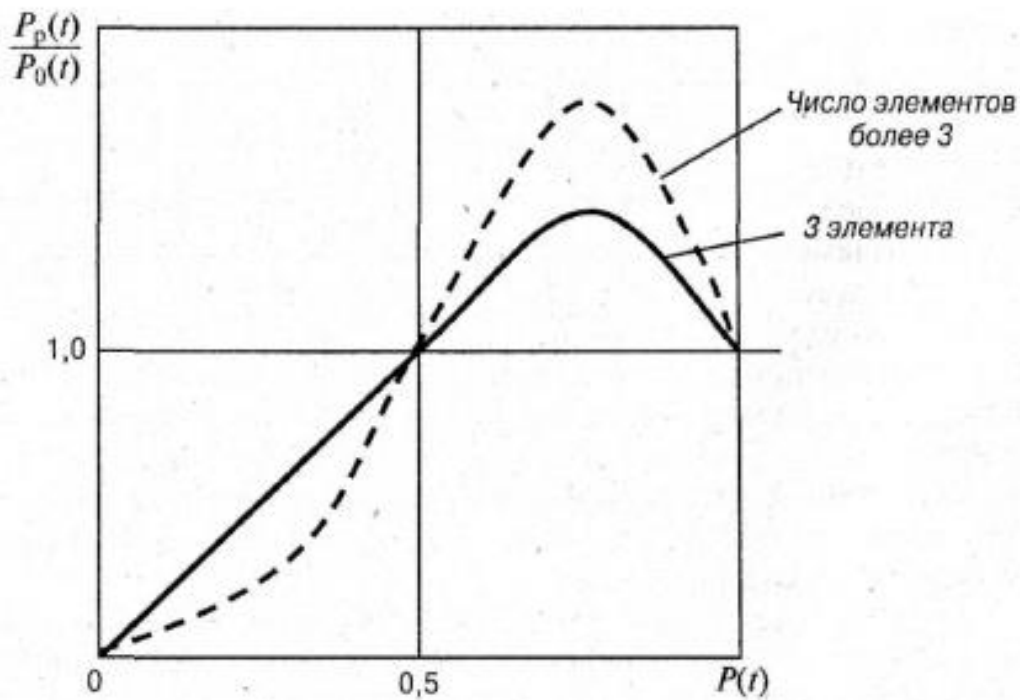


Рис.13.

Из данного графика видно, что мажоритарное резервирование дает повышение надежности при вероятности безотказной работы одного элемента $P_0(t) > 0,5$. При $P_0(t) < 0,5$, резервирование данного вида нецелесообразно при любом числе элементов в резервированной группе.

Резервирование замещением

При резервировании с целой кратностью устройство состоит из одного основного и $n - 1$ резервных элементов (см. рис. 11, в). При отказе основного элемента на его место включается один из резервных элементов. Таких замещений может быть не более $n - 1$; n -й отказ приводит к отказу устройства. Переключатели, осуществляющие замещения, считаются абсолютно надежными, что при реальных расчетах не всегда корректно и может приводить к завышению оптимистичной оценке получаемых результатов. Резервные элементы могут находиться в нагруженном или ненагруженном резерве. В первом случае резервные элементы имеют такую же, как и у основного элемента, интенсивность отказов λ . Поэтому при нагруженном резерве, включаемом замещением, вероятность безотказной работы и средняя наработка до отказа устройства определяются так же, как и при постоянном резервировании. Поскольку вышедший из строя элемент отключается от схемы, ограничение на вид отказа (только «обрыв») отсутствует. Перевод резервных элементов в облегченный режим работы позволяет снизить интенсивность их отказов, однако при этом может увеличиться время включения резерва. Расчетные соотношения для систем с облегченным резервом здесь не приводятся. Основное практическое значение имеет использование непогруженного резерва. Предполагается, что отказывать могут только основные элементы, элементы, находящиеся в ненагруженном резерве, отказывать не могут. Поэтому средняя наработка до отказа резервированного устройства пропорциональна числу элементов

$$T_p = \frac{n}{\lambda} = nT,$$
$$P_p(t) = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t}$$

Вероятность безотказной работы резервированного устройства

Для дублированного устройства

$$P_d(t) = (1 + \lambda t) e^{-\lambda t}$$

Для реальных электронных устройств интенсивность отказов элементов в режиме хранения примерно в 100 раз меньше, чем в рабочем режиме. Поэтому предположение о том, что для резервных элементов $X = 0$, в большинстве случаев является корректным. Если интенсивность отказов элементов в процессе хранения высока, такой вид резерва следует рассматривать как облегченный, при котором интенсивность отказов меньше, чем в рабочем режиме, но не равна нулю. По сравнению с постоянным резервированием, резервирование замещением способно обеспечить больший выигрыш в надежности, особенно при ненагруженном резерве. Однако оно предполагает кратковременный перерыв в работе устройства на период замены отказавшего элемента.

Скольльзящее резервирование. Разновидностью резервирования замещением является скольльзящее резервирование (резервирование с дробной кратностью), которое применяется для устройств и систем, содержащих несколько однотипных элементов. Основным преимуществом скольльзящего резервирования является сокращение числа резервных элементов вплоть до одного. Устройство состоит из t основных и p резервных

однотипных элементов, причем $t > n$ (см. рис.11, г). При отказе одного из основных элементов на его место включается любой из резервных. Таких замещений может быть не более n . Резервные элементы могут находиться в нагруженном или ненагруженном состоянии. При нагруженном резерве интенсивности отказов λ основных и резервных элементов одинаковы. Средняя наработка до отказа устройства со скользящим резервированием

$$T_p = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{m+1} + \dots + \frac{1}{m+n} \right) = T \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{m+1} + \dots + \frac{1}{m+n} \right).$$

$$P_p(t) = \sum_{i=0}^n C_{m+n}^i [1 - P(t)]^i [P(t)]^{n+m-i}, \text{ где } C_{m+n}^i = \frac{(m+n)!}{i!(m+n-i)!}.$$

Вероятность безотказной работы резервированного устройства

При ненагруженном резерве, в отличие от предыдущего случая, предполагается, что находящиеся в обесточенном состоянии резервные элементы отказать не могут. Средняя наработка до отказа устройства со скользящим резервированием

$$T_p = \frac{n+1}{m\lambda} = \frac{n+1}{m} T$$

Вероятность безотказной работы резервированного устройства

$$P_p(t) = \sum_{i=0}^n \frac{(m\lambda t)^i}{i!} \exp(-m\lambda t).$$

§ 5.5.4. Резервирование с восстановлением

При резервировании с восстановлением отказавшие элементы устройства ремонтируются, а потом вновь включаются в эксплуатацию. Благодаря тому, что отказы не накапливаются, а устраняются по мере их появления, надежность устройства при той же кратности резерва резко возрастает. Резервирование без восстановления для систем длительного пользования малоэффективно и на практике обычно не оправданно. Резервирование с восстановлением может быть тех же видов, что и без восстановления. Рассмотрим схему устройства с постоянным резервированием кратностью 1/1 (рис. 14). Предполагается, что элементы дублированной группы равнонадежны, причем возможны только отказы типа «обрыв». При возникновении отказа неисправный элемент поступает в службу ремонта и после восстановления через случайный промежуток времени, распределенный по экспоненциальному закону с параметром $\{\mu\}$, опять включается в состав устройства. Отказ устройства наступает тогда, когда во время восстановления одного из элементов откажет другой элемент.

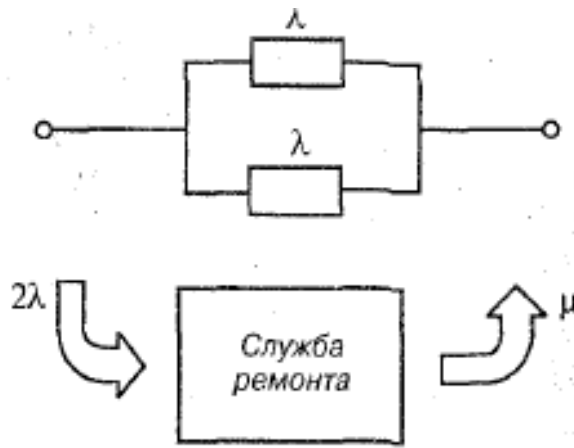


Рис.14. Дублированное восстанавливаемое устройство с нагруженным резервом

При $M > 0,01$, вероятность безотказной работы дублированного устройства определяется по формуле

$$P_d(t) = \frac{a+b}{2a} \exp\left[-\frac{1}{2}(b-a)t\right] + \frac{a-b}{2a} \exp\left[-\frac{1}{2}(a+b)t\right],$$

$$\text{где } a = \sqrt{\mu^2 + 6\lambda\mu + \lambda^2}; \quad b = \mu + 3\lambda.$$

Средняя наработка на отказ устройства

$$T_d = \frac{1+3M}{2M} T,$$

$$\text{где } M = \lambda / \mu; \quad T = 1/\lambda; \quad \mu = 1/T_v.$$

Здесь λ и μ — соответственно интенсивность отказов и интенсивность восстановления элемента; T_v — среднее время восстановления элемента.

При $M < 0,01$, вероятность безотказной работы устройства может быть рассчитана по приближенной формуле

$$P_d \approx \exp\left(-\frac{t}{T_d}\right).$$

Стационарный коэффициент готовности $K_{гд}$ дублированного устройства может быть определен для следующих двух случаев.

1. Служба ремонта предприятия немногочисленна и может восстанавливать одновременно только один из двух неисправных элементов устройства (ограниченное восстановление),

$$K_{гд} = \frac{1+2M}{1+2M+2M^2};$$

при этом

2. Служба ремонта предприятия способна восстанавливать одновременно оба неисправных элемента устройства (неограниченное восстановление), при этом

$$K_{гд} \approx \frac{1+2M}{1+2M+M^2}.$$

В реальных устройствах и системах обычно используется смешанное резервирование, представляющее собой комбинацию рассмотренных выше видов. В качестве примера на рис. 15. приведена схема устройства бесперебойного электропитания судовых электронных систем, содержащего два идентичных импульсных источника питания ИП1 и ИП2. Входы источников подключены к основной и резервной

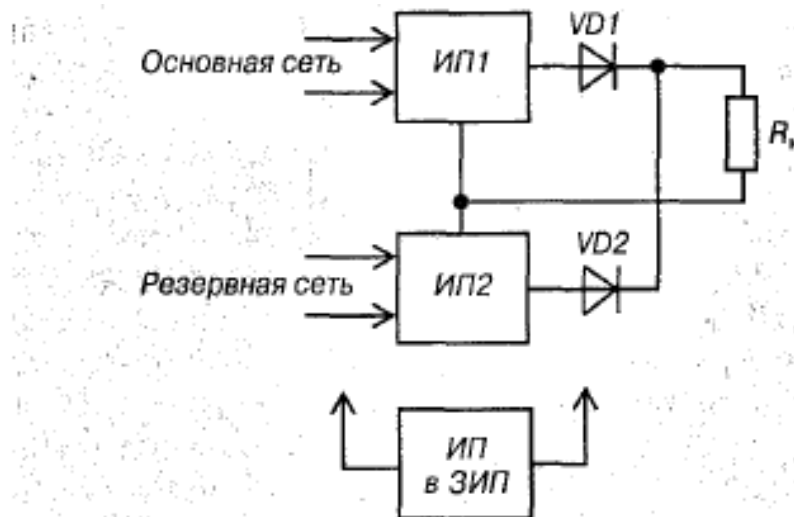


Рис.15. Схема устройства бесперебойного электропитания со смешанным резервированием

сетям электропитания. ИП1 и ИП2 включены по схеме постоянного резервирования. С точки зрения нагруженности резерва возможны следующие варианты.

1. Нагруженный резерв — в нормальном состоянии каждый источник обеспечивает половину тока нагрузки. При пропадании напряжения на выходе одного из ИП второй источник без перерыва автоматически возьмет на себя всю нагрузку.
2. Облегченный резерв — в нормальном состоянии весь ток нагрузки обеспечивает основной источник ИП1. У резервного источника ИП2 выходное напряжение сделано на 0,5 В меньше, поэтому диод VD2 будет закрыт. В этом облегченном режиме у ИП2 будет работать только схема управления, наименее надежная силовая часть будет находиться в режиме холостого хода. При пропадании напряжения на выходе ИП1 всю нагрузку без перерыва возьмет ИП2. Благодаря постоянному резервированию потребители не почувствуют пропадания напряжения на выходе одного из источников по причине отсутствия сетевого напряжения или отказа данного ИП. При отказе одного из ИП его заменяют резервным, взятым из комплекта запасных частей и принадлежностей (ЗИП). Встроенные средства автоматической диагностики и сигнализации неисправности, а также модульное построение устройства позволяют сократить время от возникновения неисправности до замены отказавшего блока (время восстановления) до нескольких минут. Для замены блока не требуется отключение устройства. Отказавший блок

подвергается ремонту и помещается в комплект ЗИП. Здесь в отношении блока, находящегося в комплекте ЗИП, используется схема резервирования замещением с ненагруженным резервом.

§ 5.5.5. Обеспечение надежности на этапе проектирования

Надежность ЭА обеспечивается на этапе проектирования, производства и эксплуатации. Этап проектирования имеет наибольшее значение, поскольку именно в этот период закладывается основа для качественного изготовления аппаратуры и минимизации влияния условий эксплуатации на ее функциональную надежность. Как правило, соответствие показателей надежности устройства требованиям технического задания подтверждается расчетным путем. Обеспечение требуемого уровня надежности может стать основополагающим при выборе структуры устройства или системы. В большинстве случаев заданные показатели надежности удастся обеспечить использованием следующих приемов.

1. При выборе элементной базы следует ориентироваться на компоненты, у которых интенсивность отказов X в заданных условиях эксплуатации минимальна. Например, интенсивность отказов интегральных микросхем в пластмассовых корпусах при прочих равных условиях в три раза выше, чем у аналогичных микросхем в корпусах из металла и керамики. Поэтому для жестких условий эксплуатации микросхемы в пластмассовых корпусах желательно не использовать.

2. Интенсивность отказов компонентов зависит от степени их сложности. Зависимость эта не слишком сильная: при увеличении числа элементов микросхемы на порядки, ее интенсивность отказов возрастает в разы. Поэтому, как правило, замена совокупности дискретных компонентов микросхемой, выполняющей те же функции, увеличивает надежность.

3. Интенсивность отказов элементов существенно зависит от режимов их электрической нагрузки. Под коэффициентом электрической нагрузки k_H понимается отношение рабочего значения электрического параметра к его предельно допустимому (номинальному) значению, установленному нормативно-технической документацией. Для каждого типа элементов при оценке интенсивности электрической нагрузки существуют свои определяющие параметры, в частности:

- для интегральных микросхем КМОП — напряжение питания;
- для диодов, стабилитронов, транзисторов, тиристоров
- рассеиваемая мощность (ток) и рабочее напряжение;
- для конденсаторов - рабочее напряжение;
- для трансформаторов — мощность;
- для дросселей — ток обмоток.

Путем снижения коэффициентов электрической нагрузки элементов удастся уменьшить интенсивность их отказов в несколько раз. Например, интенсивность отказов кремниевых

диодов при повышении k_n от 0,2 до 0,9 возрастает более чем в девять раз (при температуре 30 °С). В любом случае значения k_n по всем параметрам, характеризующим предельно допустимые режимы эксплуатации элемента, не должны превышать 0,8.

4. Необходимо учитывать зависимость надежности элементов от напряжения питания. Например, для микросхем КМОП при расчете эксплуатационной интенсивности отказов используется следующий повышающий коэффициент K_V .

Напряжение питания, K_V

В

до 10,0 1,0

10,0...12,6 3,0

12,6...15,0 10,

0.

Для микросхем, изготовленных по другим технологиям, столь явного снижения надежности при высоких напряжениях питания не отмечается:

5. Еще одним важным фактором является температура корпуса элементов. Не следует заблуждаться по поводу того, что элементы одинаково надежны во всем допускаемом диапазоне температур. Приведем всего два типичных примера. Интенсивность отказов интегральных микросхем и других полупроводниковых приборов при температуре 60 °С вдвое, а при 90 °С почти в четыре раза превышает значение при 25 °С. Для окисно-электролитических алюминиевых конденсаторов К50—68 с допускаемым диапазоном температур от —40 до +85 °С приводятся следующие данные по надежности, которые достаточно типичны:

Температура, °С Минимальная наработка, ч

-40...+55 15 000

-40...+70 10 000

-40...+85 1000.

Необходимо помнить, что нагрев корпуса элемента определяется суммарным воздействием температуры окружающей среды и тепловой мощности, выделяющейся внутри элемента. Поэтому допускаемая мощность, рассеиваемая элементом, не является постоянной и снижается пропорционально температуре окружающей среды.

Для уменьшения температуры элементов обеспечивают эффективное охлаждение устройства. Наиболее нагревающиеся элементы при необходимости устанавливают на радиатор.

6. Следует всячески снижать интенсивность внешних механических воздействий на устройство: вибраций, ударов, ускорений. Данная задача решается на этапе разработки

конструкции путем применения амортизаторов. Наряду с этим обеспечивается устойчивость устройства к механическим воздействиям путем повышения прочности и жесткости конструкции, дополнительного крепления элементов к печатным платам, заливки электронных узлов компаундами, подавлением резонансных явлений с помощью вибропоглощающих покрытий и т. д.

7. Должно быть уделено должное внимание защите аппаратуры от воды, пыли, агрессивных веществ, ионизирующих излучений и других подобных воздействий.

8. Если весь арсенал перечисленных средств уже использован, а надежность все же недостаточно высока, используют структурное резервирование.

9. В процессе разработки следует ориентироваться на прогрессивные технологии и современные предприятия для выпуска ЭА. Еще на этапе конструирования большое внимание должно быть уделено исключению потенциальных источников брака на всех этапах производства ЭА. При отлаженной технологии производства отпадает необходимость в многочисленных и дорогостоящих операциях контроля качества продукции. Качество должно обеспечиваться технологией, а не последующим тщательным контролем готовой продукции!

10. Кроме безотказности важно обеспечить быстрое восстановление работоспособности устройства при отказе. Если не уделить должного внимания ремонтпригодности, можно оказаться в ситуации, при которой устройство с высокими значениями $P(t)$ и T имеет меньший коэффициент готовности, чем ЭА с худшей безотказностью, но более высокой ремонтпригодностью. Время восстановления ЭА при ремонте определяется главным образом временем поиска неисправных элементов и временем, затраченным непосредственно на устранение неисправности. К конструктивным факторам, обеспечивающим сокращение времени восстановления, относятся:

- доступность элементов для контроля, профилактики и ремонта;
- преимущественная доступность и удобство замены наименее надежных элементов;
- модульный принцип построения ЭА, взаимозаменяемость модулей;
- защищенность от ошибок и безопасность персонала при техническом обслуживании и ремонте;
- возможность независимого выполнения регулировок;
- применение быстроразъемных соединений и креплений;
- использование встроенных средств диагностики и индикации неисправностей.

§ 5.5.6. Расчет надежности электронной аппаратуры

Большинство электронных устройств автоматики, систем управления и вычислительной техники являются нерезервированными восстанавливаемыми объектами, предназначенными для работы в закрытых помещениях. Поэтому ниже рассматривается методика оценки надежности аппаратуры только этого класса.

При выполнении расчета считается, что время работы устройства соответствует периоду нормальной эксплуатации, интенсивности отказов элементов являются постоянными, распределение времени безотказной работы подчиняется экспоненциальному закону. Предполагается также, что отказы элементов являются внезапными, полными и независимыми, причем элементы и устройство в целом могут находиться в двух состояниях: работоспособном или неработоспособном. Интенсивности отказов элементов зависят от их электрической нагрузки, температуры окружающей среды и других факторов, учитываемых с помощью поправочных коэффициентов. При расчете эксплуатационной надежности элементов электронных устройств используются математические модели следующего вида

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma} k_p \prod_{j=1}^n k_j,$$

где λ_{Σ} — эксплуатационная интенсивность отказов элемента; λ_{Σ} — исходная (базовая) интенсивность отказов элемента при номинальной электрической нагрузке ($k_n = 1$) и температуре окружающей среды 25 °С; k_p — коэффициент режима, учитывающий изменение λ_{Σ} в зависимости от электрической нагрузки и температуры окружающей среды; k_j — коэффициенты, учитывающие изменение эксплуатационной интенсивности отказов от различных факторов (степени жесткости условий эксплуатации, интенсивности ионизирующих излучений и др.); n — число учитываемых факторов. Для наземной стационарной аппаратуры в качестве исходных данных принимаются интенсивности отказов групп элементов в типовых усредненных условиях эксплуатации, указанные в табл. 1.10 [35]. Данные цифры рассчитаны по приведенной выше формуле для следующих условий: температура окружающей среды 30 °С, коэффициенты электрической нагрузки $K_n = 0,4$, механические воздействия и ионизирующие излучения практически отсутствуют.

Таблица 11. Интенсивности отказов элементов в типовых усредненных условиях эксплуатации

Вид элемента	Интенсивность отказов $X_{\Sigma} \cdot 10^{-1}/ч$
Интегральные микросхемы (ИМС): цифровые ИМС малой и средней степени интеграции микропроцессоры, микропроцессорные комплекты, программируемые логические матрицы, ИМС памяти аналоговые ИМС с числом элементов не более 100 (операционные усилители, стабилизаторы напряжения и др.) аналоговые ИМС с числом элементов 100-1000	0,19 1,40 0,40 0,80
Транзисторы биполярные и полевые	0,17
Тиристоры и симисторы	0,22
Оптотиристоры	0,80
Диоды выпрямительные	0,10
Диоды импульсные	0,04
Диодные сборки	0,016
Стабилитроны	0,0076
Оптопары (оптроны)	0,12

Светодиоды	0,08
Индикаторы вакуумные люминесцентные цифровые и буквенно-цифровые	7,00
Индикаторы жидкокристаллические	8,80
Индикаторы полупроводниковые цифровые и буквенно-цифровые	0,40
Индикаторы полупроводниковые шкальные	0,23
Фотодиоды	2,00
Фототранзисторы	1,50
Фоторезисторы	18,00
Конденсаторы: керамические	0,02
оксидно-электролитические алюминиевые	0,26
объемно-пористые танталовые оксидно- полупроводниковые полистирольные	0,19
	0,17
поликарбонатные и полипропиленовые	0,06
фторопластовые	0,014
	0,0036
полиэтилентерефталатные низковольтные	0,06
полиэтилентерефталатные высоковольтные	1,00

Продолжение табл. 11.

Вид элемента	Интенсивность отказов Цх И-М/ч
Резисторы:	
постоянные пленочные	0,19
постоянные проволочные нагрузочные	0,054
постоянные проволочные прецизионные	0,017
переменные металлоокисные и керметные	0,05
переменные композиционные пленочные	0,018
переменные проволочные	0,038
Терморезисторы	0,60
Наборы резисторов	0,044
Резонаторы кварцевые	0,20
Элементы пьезоэлектрические	0,40
Реле электромагнитные: средней мощности слаботочные низкочастотные герконовые	0,13 0,083
	0,003
Реле контроля и защиты	6,10
Контакты	0,29
Автоматы защиты и выключатели автоматические	3,00
Переключатели движковые	0,70
Микропереключатели	0,17
Тумблеры	0,30
Кнопки и кнопочные переключатели	0,50
Электрические соединители:	
низкочастотные цилиндрические для объемного монтажа	0,012
низкочастотные прямоугольные для объемного монтажа	0,024
низкочастотные прямоугольные для печатного	0,026
Монтажа радиочастотные	0,06
Трансформаторы: силовые, в том числе статических преобразователей	0,12
импульсные	0,01
согласования	0,02
Дроссели	0,01
Электродвигатели постоянного тока:	
с возбуждением от постоянных магнитов	4,00 1,10
с электромагнитным возбуждением без стабилизации частоты вращения	15,00
с электромагнитным возбуждением со стабилизацией чистоты вращения	

Окончание табл. 11.

Вид элемента	Интенсивность отказов $\lambda_{\text{эл}}$, 1/ч
Электродвигатели бесконтактные моментные	0,40
Электродвигатели переменного тока: асинхронные силовые асинхронные малоинерционные управляемые синхронные	5,00 4,20 5,60
Электродвигатели шаговые	0,70
Электроклапаны переменного тока	1,30
Тахогенераторы	1,00
Сельсины	2,00
Провода монтажные длиной до 3 м	0,06
Вставки плавкие	0,10
Держатели вставки плавкой	0,03
Соединения пайкой на односторонней печатной плате (на одно соединение)*	0,0007
Соединение пайкой при объемном монтаже (на одно соединение)	0,0014

Примечание. *Интенсивность отказов двусторонних печатных плат с металлизированными отверстиями рассчитывают по формуле

$$\lambda_{\text{эл}} = 0,0004 \cdot 10^{-7} (N_1 + 14N_2),$$

где N_1 — количество сквозных отверстий, пропаянных волной; N_2 — количество сквозных отверстий, пропаянных вручную. Интенсивность отказов устройства в целом

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_{\text{эл}i} m_i,$$

где $\lambda_{\text{эл}i}$ — интенсивность отказов элементов i -й группы в соответствии с табл. 11.; m_i — число элементов в i -й группе; n — число групп элементов. Результаты промежуточных вычислений оформляются в табличной форме (табл. 1.11).

Таблица 12.

Тип элемента	Число элементов, m	$\lambda_{\text{эл}}$, 1/ч	

Вероятность безотказной работы устройства рассчитывается по формуле

$$P(t) = e^{-\Lambda t},$$

где время t выбирается из ряда: 1000, 2000, 4000, 8000, 16 000 часов. Средняя наработка на отказ определяется из соотношения

$$T = 1/\Lambda.$$

Время восстановления устройства при отказе включает в себя время поиска неисправного элемента, время его замены или ремонта и время проверки работоспособного состояния аппаратуры. Время ожидания специалиста-ремонтника, время получения запасных частей и другие подобные факторы неучитываются. Среднее время восстановления T_v конкретного устройства зависит от степени его ремонтпригодности и выбирается из ряда 1; 2; 4; 6; 8; 10; 12; 18; 24; 36; 48 ч. Меньшие цифры соответствуют ЭА с высокой ремонтпригодностью, большие — аппаратуре с низкой ремонтпригодностью. Признаками высокой ремонтпригодности являются модульная конструкция, быстрая сборка и разборка, доступный монтаж, встроенные средства диагностики и др. Стационарное значение коэффициента готовности определяется по формуле

$$K_r = \frac{T}{T + T_v}.$$

§ 5.6. Уровни разукрупнения электронной аппаратуры

Электронные устройства и системы строятся из отдельных составных частей. Разукрупнение (т. е. деление на части) ЭА — не искусственный прием, а отражение внутренних свойств сложных изделий и обусловлено рядом факторов, в числе которых:

- требования эргономики, учитывающие психофизиологические и антропометрические возможности человека;
- требования ремонтпригодности ЭА, обеспечиваемые применением легкосъёмных взаимозаменяемых модулей;
- обеспечение параллельной разработки и изготовления отдельных частей ЭА, что необходимо для оптимальной организации данных работ;
- габаритные ограничения, обусловленные условиями эксплуатации; например технические средства, используемые на флоте, должны проходить через люк диаметром 594 мм. При разукрупнении обязательно соблюдение иерархического принципа, в соответствии с которым аппаратура делится на структурные уровни, обладающие конструктивной однородностью. К низшему структурному уровню относятся «неделимые» изделия — элементная база, в качестве старшего уровня может выступать устройство, комплекс или система. Неделимость технических средств условна. Так, для изготовителей ЭА интегральная микросхема представляет собой неделимое изделие, а для предприятий электронной промышленности — изделие высшего уровня, состоящее из большого числа деталей.

В соответствии с ГОСТ Р 52003-2003 уровни разукрупнения ЭА определяет их функциональная или конструктивная сложность. Данным стандартом установлены следующие уровни разукрупнения ЭА по функциональной сложности:

- радиоэлектронный функциональный узел — функционально и конструктивно законченная сборочная единица, выполняющая радиотехнические и/или электронные функции и не имеющая самостоятельного применения;

— радиоэлектронное устройство — совокупность функционально и конструктивно законченных сборочных единиц;

— радиоэлектронная система — функционально законченная совокупность радиоэлектронных комплексов и устройств;

— радиоэлектронный комплекс — функционально законченная совокупность радиоэлектронных устройств, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями, выполненная с использованием интерфейсов.

Уровни разукрупнения ЭА по конструктивной сложности соответствуют уровням несущих конструкций, на основе которых построена аппаратура. Для ЭА в немодульном исполнении установлены три структурных уровня:

— ячейка — радиоэлектронное устройство или радиоэлектронный функциональный узел, выполненное (выполненный) на основе несущей конструкции первого уровня;

— блок — радиоэлектронное устройство или радиоэлектронный функциональный узел, представляющее собой совокупность ячеек выполненное (выполненный) на основе несущей конструкции первого или второго уровней;

— шкаф — радиоэлектронное устройство, представляющее собой совокупность блоков и (или) ячеек, выполненное на основе несущей конструкции третьего уровня.

Сложная ЭА имеет модульное исполнение и строится на основе стандартизованных базовых несущих конструкций (БНК), имеющих уровни БНК1, БНК2 и БНК3. Под электронным модулем понимается функционально и конструктивно законченная часть ЭА, выполненная на базовой несущей конструкции и обладающая свойством взаимозаменяемости. Аппаратура в модульном исполнении по конструктивной сложности имеет четыре структурных уровня:

- электронный модуль нулевого уровня (ЭМО) — электронный модуль, выполненный на основе изделий электронной техники и электротехнических изделий, размерно координируемый с БНК1;
- электронный модуль первого уровня (ЭМ1) — электронный модуль, выполненный на основе БНК1;
- электронный модуль второго уровня (ЭМ2) — электронный модуль, выполненный на основе БНК2;
- электронный модуль третьего уровня (ЭМ3) — электронный модуль, выполненный на основе БНК3.

Сравнение уровней конструктивного разукрупнения для аппаратуры в немодульном и модульном исполнении показывает, что ячейке соответствует ЭМ1, блоку — ЭМ2, шкафу — ЭМ3. Модули ЭМО фактически представляют собой электронные узлы на основе печатных плат, входящие в составячейки. Конструктивная иерархия ЭА схематично показана на рис. 16. [12]. Микросборки, в отличие от других изделий электронной техники (электронных компонентов), нередко разрабатываются и

изготавливаются самими производителями ЭА. Однако после выпуска микросборки используются наряду с другими покупными электронными компонентами и к ЭМО не относятся.

§ 5.7. Задачи и методы компоновки электронной аппаратуры

Первым и наиболее важным этапом конструирования электронной аппаратуры является компоновка. *Компоновка* — это процесс создания из отдельных составных частей функционально законченной конструкции устройства или системы. В процессе компоновки осуществляется решение следующих взаимосвязанных вопросов:

- выбор корпуса устройства с учетом заданных условий эксплуатации;
- обеспечение устойчивости блока к дестабилизирующим воздействиям (влаге, пыли, вибрациям, ударам, электромагнитным помехам и др.);
- выбор типов и мест расположения элементов управления и индикации с учетом эксплуатационных и эргономических требований;

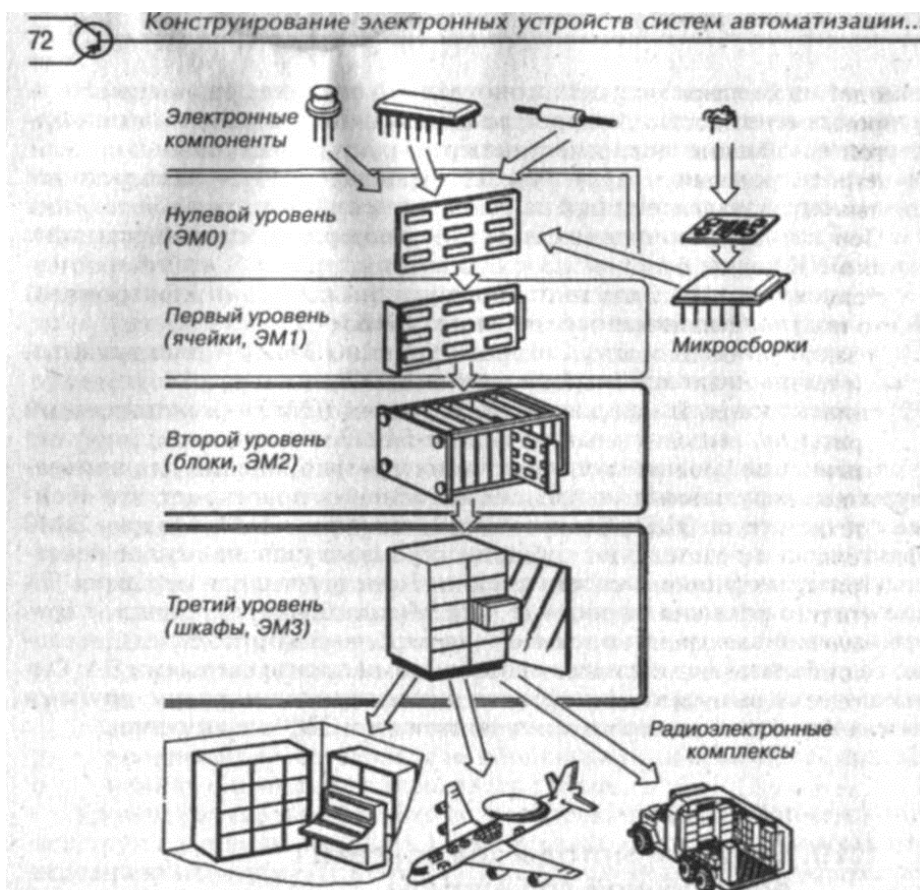


Рис. 16. Конструктивная иерархия ЭА

- распределение электронных компонентов по печатным платам, выбор размеров и числа печатных плат;

- обеспечение охлаждения блока в целом и его отдельных элементов;
- компоновка составных частей блока внутри корпуса;
- разработка печатного и объемного электрического монтажа. От того насколько удачной окажется выбранная компоновочная схема, зависят многие свойства ЭА: функциональные характеристики и надежность, масса, габаритные размеры, технологичность при производстве и эксплуатации, внешний вид и др. Более того, от компоновочного решения зависит количество и сложность разрабатываемых деталей аппаратуры, то есть трудоемкость самого процесса конструирования. Конструирование электронной аппаратуры, как и любой другой творческий процесс, является итерационным. Окончательное решение, как правило, не получается сразу и требуется проработать несколько возможных вариантов.

Перед началом компоновки должно быть принято решение о том, в каком корпусе будет выполнено устройство: унифицированном или специально разработанном. Корпус собственной конструкции часто способен наиболее полно удовлетворить требования технического задания, но для него нужно разрабатывать рабочую документацию и технологию изготовления, приобретать материалы и комплектующие изделия. В связи с этим при проектировании электронной аппаратуры широко используются базовые несущие конструкции. Важным преимуществом базовых конструкций является то, что они производятся специализированными предприятиями по отработанной технологии. Это гарантирует высокое качество и относительно невысокую стоимость этих изделий.

При конструировании электронных систем в зависимости от варианта расположения отдельных блоков возможны централизованная и децентрализованная схемы компоновки. При централизованной схеме блоки системы устанавливаются в одном месте (в шкафу, стойке, пульте, стеллаже и т. д.). Преимущества этой схемы: минимальная длина соединительных кабелей, возможность использования общего источника питания, упрощение конструкции блоков, которые могут не иметь наружного кожуха, удобство обслуживания. Недостатками являются усложнение естественного охлаждения аппаратуры и ухудшение электромагнитной совместимости блоков. В ряде случаев монтировать блоки в одном месте нецелесообразно либо просто невозможно. Например, в распределенных системах сбора и обработки информации для устранения влияния длинных линий на результаты измерения электронные преобразователи желательно устанавливать рядом с Датчиками, смонтированными на объекте контроля. В подобных ситуациях отдельные блоки размещаются в тех местах, где это необходимо по условиям функционирования системы. Другой причиной использования децентрализованной схемы является отсутствие необходимого пространства для установки всей аппаратуры в одном месте, что характерно для бортового оборудования подвижных объектов (самолетов, кораблей, автомобилей и др.). При децентрализованной схеме отдельные блоки выполняются в виде конструктивно законченных устройств, защищенных от внешних воздействий. В реальных системах часто используются принципы централизации и децентрализации одновременно. При конструировании ЭА применяются функционально-модульный, моносхемный, схемно-узловой принципы компоновки. Моносхемный принцип подразумевает размещение всех электронных компонентов на одной печатной плате. При этом упрощается сборка и снижается стоимость устройства, но могут возрасти

его габаритные размеры из-за нерационального использования объема корпуса. Моносхемный принцип широко применяется в бытовой и промышленной аппаратуре с относительно небольшим числом компонентов.

Схемно-узловой принцип используется при дроблении на части сложных функциональных узлов и предполагает расположение на отдельных печатных платах частей схемы, имеющих четко выраженные входные и выходные характеристики. Дробление функциональных узлов на части нежелательно и должно осуществляться лишь в обоснованных случаях. Наиболее часто аппаратура строится на основе функционально-модульного принципа, при котором отдельные электронные модули являются функционально и конструктивно законченными. Примером может служить построение персонального компьютера, в состав которого входят следующие модули: блок питания, процессор, материнская плата, жесткий диск, привод оптических дисков и др.

Применение функционально-модульного принципа компоновки позволяет:

- свести к минимуму число связей между модулями;
- осуществлять параллельно сборку, регулировку и проверку разных модулей, что сокращает длительность технологического цикла изготовления изделия;
- обеспечить полную взаимозаменяемость, благодаря чему неисправный модуль может быть быстро заменен запасным без подгонок и регулировок;
- производить модернизацию устройства путем усовершенствования отдельных модулей независимо от других;
- реализовывать на одном и том же базисе технических средств различную конфигурацию аппаратуры.

Как уже отмечалось, электронная аппаратура компонуется с учетом принципа иерархии, подразумевающего разделение устройств и систем на однородные структурные уровни (разукрупнение). В процессе компоновки происходит последовательное объединение более простых электронных элементов и узлов в более сложные.

Методы выполнения компоновки.

Различают три основных метода компоновки, взаимно дополняющих друг друга: аналитическая, модельная и графическая компоновка [34]. Аналитическая компоновка проводится на начальном этапе конструирования для решения следующих задач: выбор типоразмера унифицированного корпуса блока, оценка линейных размеров и объема устройства, обоснование необходимого количества и размеров печатных плат и т. п.

В процессе аналитической компоновки обобщенные параметры устройства рассчитываются путем суммирования установочных площадей или объемов его отдельных компонентов. Установочные объемы (площади) — это объемы (площади) эквивалентных фигур простой формы, описанных вокруг реальных компонентов с учетом их выступающих частей. Например, площадь печатной платы S , необходимая для размещения компонентов, рассчитывается по формуле

$$S = \frac{1}{K_S} \sum_{i=1}^n S_{уст\ i},$$

где $S_{уст\ i}$, — установочные площади компонентов; K_S — коэффициент заполнения площади платы. Аналогично может быть найден объем электронного блока V :

$$V = \frac{1}{K_V} \sum_{i=1}^n V_{уст\ i},$$

где $V_{уст\ i}$, — установочные объемы компонентов; K_V — коэффициент заполнения объема блока.

Графическая компоновка производится путем вычеркивания на бумаге или экране компьютера деталей устройства и проработки различных вариантов их расположения. Результатом графической компоновки является чертеж устройства. Графическая компоновка, выполняемая вручную, — трудоемкая операция. Вручную трудно прорисовать ряд вариантов с целью поиска лучшего решения. Поэтому к графической компоновке желательно переходить тогда, когда уже найден оптимальный вариант расположения составных частей устройства. Поиск такого варианта проводится методом модельной компоновки. При модельной компоновке используются плоские или объемные модели элементов, выполненные в одинаковом масштабе. Применение моделей позволяет наглядно представить расположение составных частей устройства, траекторию их перемещения в процессе работы и другие моменты. Плоские модели называются аппликациями. Аппликации изготавливаются из плотной бумаги или других подходящих материалов. В процессе компоновки на листе бумаги вычерчивают контур внутреннего объема ЭА. Перемещая аппликации в пределах этого контура, находят их оптимальное расположение, которое в дальнейшем берется за основу при графической компоновке. При пространственной компоновке используются трехмерные модели из картона, пенопласта, пластилина и т. д. Компоновка с использованием вместо моделей реальных элементов иногда называется натурной.

§ 5.8. Автоматизация конструирования электронной аппаратуры

Компьютеризация человеческой деятельности кардинально изменила технологию разработки ЭА благодаря широкому использованию систем автоматизированного проектирования. Особенно высокая степень автоматизации работ достигается при проектировании электронных узлов на основе печатных плат (ПП). Современные специализированные САПР содержат пакет программ, обеспечивающих сквозное проектирование таких узлов — от моделирования и оптимизации принципиальной схемы до разработки топологии многослойной печатной платы. С помощью этой же САПР обеспечивается оформление конструкторской документации на бумаге и создание электронного файла, в котором содержатся все необходимые данные для автоматизированного изготовления ПП. К числу подобных программных комплексов относятся PCAD, OrCAD, DesignLab. Технология конструирования с помощью САПР предполагает изготовление печатных плат безбумажным методом (без использования рабочих чертежей). При применении автоматизированного или автоматического сборочного оборудования чертежи могут не потребоваться и при монтаже на плату

электронных компонентов. Это конечно не означает, что конструкторская документация на печатные узлы не выпускается, поскольку она необходима при монтаже, настройке и других работах, выполняемых вручную. В соответствии с ЕСКД в комплекте рабочей конструкторской документации ЭА чертежи печатных узлов обязательно должны быть. Среди конструкторов ПП наибольшее распространение получила система PCAD [37] — одна из наиболее мощных САПР, ориентированных на разработку электронных узлов на основе печатного монтажа. Она обеспечивает моделирование электронных устройств, создание и редактирование принципиальных схем, автоматическое размещение компонентов и трассировку соединений на ПП, выдачу чертежей на принтер, плоттер, фотопостроитель, подготовку данных для сверления отверстий на станках с ЧПУ, а также вспомогательные сервисные функции. Технологическое оборудование для производства ГШ адаптировано к этой программе, в связи с чем изготовители печатных плат обычно предпочитают принимать заказы в формате последней версии PCAD. Проект ПП представляет собой так называемый pcb-файл, который на каком-либо носителе данных или по электронной почте может быть передан на производство. При компоновке электронных блоков и шкафов, конструировании корпусов аппаратуры, механических деталей и узлов, объемного монтажа САПР используется преимущественно в режиме графического редактора, снабженного библиотеками изображений типовых элементов конструкции. Очень популярным во всем мире пакетом программ для конструирования любых механических изделий и строительных сооружений является AutoCAD. Система AutoCAD кроме режима графического редактора имеет режим графического программирования, позволяющий пользователю самостоятельно создавать шаблоны чертежей типовых деталей. При использовании таких шаблонов для автоматического получения чертежа необходимо ввести только основные размеры детали. Пакет КОМПАС представляет собой программу отечественной разработки и по выполняемым функциям и интерфейсу похож на AutoCAD. В последние годы КОМПАС существенно потеснил AutoCAD в России и странах бывшего СССР, так как он полностью русифицирован, адаптирован к требованиям ЕСКД, содержит обширные библиотеки изображений типовых деталей, шаблонов документов, интегрируется с программой-классификатором ЕСКД.