

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА

*П. Е. Молотов, А. Н. Чекмарев*

КОМПОНОВКА  
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ  
АППАРАТУРЫ  
В УСЛОВИЯХ ГИБКОГО  
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
ПРОИЗВОДСТВА

Утверждено  
редакционно-издательским  
советом института  
в качестве  
учебного пособия

Молотов П. Е., Чекмарев А. Н. *Компоновка радиоэлектронной аппаратуры в условиях гибкого автоматизированного производства.* — Куйбышев: КуАИ, 1987 — 79 с.

В учебном пособии излагаются особенности и задачи, математическая модель, основные показатели качества, принцип, последовательность и методы компоновки при разработке радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в условиях гибкого автоматизированного производства (ГАП). Приведены компоновочные схемы и конструкции функциональных ячеек и блоков РЭА третьего и четвертого поколений. Рассмотрены вопросы повышения эффективности компоновки.

Учебное пособие предназначено для студентов специальности 0705. Может быть полезно также инженерам, занимающимся решением задач компоновки РЭА применительно к условиям гибкого автоматизированного производства.

Ил. 25. Библиогр. — 21 назв.

Рецензенты: В. М. Шахматов, Г. В. Зиборова

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время расширение сферы применения радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) связано с ее микроминиатюризацией, совершенствование которой обеспечивается автоматизацией проектирования и изготовления. Одним из основных направлений при изготовлении РЭА является переход к гибким производственным системам, обеспечивающим гибкость автоматического производства (ГАП). Современная РЭА не допускает какой-либо подстройки или регулировки параметров РЭА, т. к. она создается на основе интегрально-групповых методов полупроводниковой и тонкопленочной или толстопленочной технологии. Однако далеко не все технологические процессы РЭА удается реализовать в условиях ГАП, поэтому при конструировании РЭА главное внимание должно уделяться вопросу о том, на какой технологический процесс следует ориентироваться при создании конкретных устройств радиоэлектроники.

Анализ современной научно-технической и учебной литературы в области конструирования и микроминиатюризации РЭА позволяет сделать вывод о недостаточном обобщенном и концентрированном изложении методики компоновки РЭА. Кроме того, в настоящее время актуальны методы компоновки с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР) с индивидуальным, диалоговым доступом широкого круга конструкторов РЭА к этим САПР, т. к. схемы современной РЭА настолько усложнились, что непосредственная конструкторская разра-

ботка рабочих чертежей невозможна без выполнения предварительной части работ — компоновки РЭА по заданным требованиям.

В печати работы по компоновке представлены в различных учебниках и монографиях в виде разобранного материала, что вызывает определенные трудности у студентов. Настоящее пособие восполняет пробел в отсутствии учебной литературы по этому важному разделу курса.

Системный подход при компоновке РЭА — основополагающий принцип предлагаемого учебного пособия.

*Цель пособия* — помочь студентам освоить и углубить знания по методике, получить практические навыки компоновочных работ при решении задач автоматизированного конструирования и обеспечения качества проектирования РЭА.

В пособии более глубоко отражены состояние и перспективы развития техники компоновки РЭА на базе накопленного опыта и передовых направлений конструирования современной РЭА.

В разделе 1 рассмотрены особенности и методы компоновки РЭА в условиях ГАП. В разделе 2 приведены компоновки модулей и блоков. Раздел 3 посвящен повышению эффективности компоновки РЭА.

Компоновка РЭА, излагаемая в учебном пособии, составляет один из разделов курса «Конструирование и микроминиатюризация РЭА», читаемого студентам специальности 0705.

---

## 1. ОСОБЕННОСТИ И МЕТОДЫ КОМПОНОВКИ РЭА

### 1.1. ОСОБЕННОСТИ И ЗАДАЧИ КОМПОНОВКИ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ РЭА

Компоновка РЭА (лат. *componere* — складывать) — размещение в пространстве или на плоскости электрорадиоэлементов (ЭРЭ), имеющих электрические соединения, в соответствии с принципиальной схемой и обеспечение допустимого минимума паразитных взаимодействий, которые не нарушают значения расчетных выходных параметров РЭА.

Компоновка РЭА является одной из важнейших проблем при конструировании, влияющей на качество разработки всего изделия. Непрерывное усложнение РЭА и необходимость сокращения сроков разработки затрудняют получение оптимальных вариантов компоновки традиционными ручными методами. Однако недостаточная формализация задач, решаемых при компоновке, необходимость получения оптимальной компоновки по некоторой совокупности критериев и отсутствие обобщенной математической модели компоновки затрудняют их автоматизацию РЭА.

Проектирование конструкций РЭА и технология ее производства характеризуются в настоящее время тремя важными особенностями:

широким использованием фундаментальных достижений физики твердого тела;

применением вычислительной техники для решения сложных конструкторских задач и автоматизации управления технологическими процессами;

созданием научных основ проектирования как творческого процесса, которому можно и нужно обучить начинающих и малоопытных.

Усложнение задач, решаемых средствами радиоэлектроники, проникновение последних во все новые области человеческой деятельности и связанное с этим усложнение самой РЭА находятся в явном противоречии с повышением требований к массе, габаритам, надежности, стоимости и срокам проектирования

РЭА. Разрешить это противоречие можно следующими путями:  
упрощение схем РЭА;  
стандартизация и унификация;  
ослабление требований по габаритам, надежности;  
применение вычислительной техники;  
дальнейшее развитие и совершенствование конструирования РЭА и процесса ее проектирования в связи с изменениями в технологии, сменой элементной базы и организации производства, т. е. за счет дорогостоящих и длительных исследований и мероприятий.

В то же время возможно наилучшее разрешение указанного противоречия за счет поиска лучшего варианта конструкции (по массе, габаритам и т. д.), не ухудшающего других характеристик РЭА в рамках ограничений на сроки и затраты при ее создании. Это может быть осуществлено за счет применения различного рода компоновочных процедур в процессе проектирования РЭА.

Процесс компоновки РЭА включает в себя этапы анализа и синтеза, которые выполняются преимущественно эвристическими методами, основными недостатками которых являются: неразрешимость противоречия между качеством компоновки и временем;

отсутствие объективной количественной оценки вариантов для сравнения нескольких альтернатив решения;

учет и сравнение вариантов по множеству критериев возможно только узким кругом высококвалифицированных специалистов-конструкторов;

остаётся невыясненной относительная ценность окончательного решения, т. к. не найден оптимальный вариант в условиях данной проектной ситуации.

Наиболее перспективными являются методы синтеза конструктивных решений, ориентированные на сочетание формальных и эвристических процедур [4].

Под *задачей синтеза компоновки РЭА* будем в дальнейшем понимать синтез пространственной структуры конструкции и параметров элементов этой структуры с учетом существующих между ними связей и некоторых дополнительных требований. Современная РЭА — это микроэлектронная аппаратура (МЭА), характерными особенностями которой является:

модульный принцип построения; в качестве модулей используются интегральные схемы (ИС), гибридные ИС (ГИС), функциональные ячейки (ФЯ), субблоки и т. д.;

наличие иерархической связи между модулями; это означает, что некоторая совокупность модулей 1-го уровня (элементы), объединяясь, дают модуль 2-го уровня (узел — ГИС), те дают

модуль 3-го уровня (субблок — типовый элемент конструкции) и т. д.;

возможность применения базовых (унифицированных стандартизированных) элементов конструкций. Например, определенные типоразмеры разрешенных к применению печатных плат, подложек для ГИС позволяют разработать конструктивные варианты модулей 1-го и 2-го уровней в виде базовых конструкций.

В условиях указанных особенностей МЭА на начальном этапе синтеза структуры и параметров конструкции необходимо:

выбрать систему базовых конструктивных элементов и принципов компоновки элементов в конструктивные узлы высшей сложности;

скомпоновать узлы различного уровня сложности в узлы большей сложности.

На практике сформулированные задачи в настоящее время формализованы и решаются автоматизированно с использованием оптимизирующих процедур. Однако при этом работа ведется по одному критерию, что не позволяет эффективно учитывать множество требований к конструкции. Причем, как правило, не обсуждаются альтернативные варианты. Все это не позволяет улучшить качество проектирования, а значит не разрешается противоречие между сроками и качеством.

Причиной, на ваш взгляд, является неудачная модель синтеза, используемая при формализации. Конструктор интуитивно учитывает гораздо больше условий, требований и ограничений, чем в формальной модели. Таким образом, актуальна задача разработки такой гибкой модели синтеза, которая органически сочетала бы возможность творческого и формального подходов.

Анализ особенностей синтеза компоновки блоков МЭА позволяет выбрать в качестве формальной модели задачу многокритериальной оптимизации [13].

Вся совокупность  $D = \{D_1, \dots, D_n\}$  исходных данных разбивается при этом на следующие группы:

1. Совокупность  $\mathcal{Y} = \{y_1, \dots, y_p\}$  условий; к ним относятся данные об электрической схеме и ее элементах, условиях эксплуатации и т. д.

2. Совокупность  $Q_s = \{Q_{s1}, \dots, Q_{sq}\}$  ограничений на структуру и параметры; к ним относятся данные о типоразмерах конструкций модулей всех уровней.

3. Состав вектора  $CK = \langle K_1, \dots, K \rangle$  показателей качества (ПК) конструкции блока МЭА.

4. Совокупность  $O_k = \{O_{k1}, \dots, O_{kl}\}$  ограничений, накладываемых на ПК.

Таким образом,  $D = \{D_1, \dots, D_n\} = \{Y, O_s, CK, O_p\}$ . Для того, чтобы учесть влияние результатов других этапов компоновки на процесс конструирования, было принято оценивать качество конструирования блоков МЭА не частными (внутренними) конструктивными характеристиками, а наиболее общими, характеризующими весь аппарат в целом. К ним отнесены надежность  $P$ , объем  $V$ , масса  $M$ , стоимость проектирования, изготовления и эксплуатации  $C$ , т. е. для данной задачи

$$K = \langle P, V, M, C \rangle.$$

Задача оптимизации компоновки блоков МЭА на основе базовых субблоков по критерию максимальной надежности  $P$  может быть сведена к задаче разбиения схемы на подсхемы с минимальным числом соединяющих их связей при условии соответствующей конструктивной проработки базовых субблоков. Указанная задача компоновки, алгоритм ее решения приведены в работе [15].

Особые возможности приобретает этот метод при использовании его в САПР, например, на основе автоматизированного рабочего места (АРМ). Возможность организации диалога в реальном масштабе времени позволит полнее использовать достоинства метода.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Особенности компоновки МЭА вызывают необходимость в качестве формальной модели использовать многокритериальную задачу оптимизации, причем для критериев выбирать наиболее общие показатели МЭА в целом.

2. Метод компоновки, основанный на применении на первом этапе безусловного критерия предпочтения, а на втором — творческих возможностей человека, позволяет повысить качество конструкции, т. к. дает возможность:

определить совокупность идеальных решений;

дать объективную количественную оценку варианта конструкции;

формализовать процесс векторного синтеза, т. е. сделать доступным его широкому кругу специалистов и, в конечном итоге, автоматизировать его.

3. Автоматизация компоновки дает подход к разрешению основного противоречия при проектировании конструкций РЭА — повышает качество решения при одновременном сокращении сроков проектирования.

*Основная задача компоновки* — выбор форм, основных геометрических размеров, ориентировочное определение веса и расположения в пространстве элементов РЭА.

Определяющими факторами при выборе того или иного компоновочного решения РЭА являются сложные совокупности

факторов, связанных с особенностями функционирования и эксплуатации изделия, электрическими взаимосвязями и тепловыми режимами внутри РЭА, геометрическими размерами и формой отдельных элементов конструкции, т. е. выбор компоновочного решения должен быть проведен на основе системного подхода. Поэтому компоновочными моделями ЭРЭ или РЭА в целом являются не геометрически адекватные им модели, а модели, геометрически обобщающие всю совокупность их свойств. Такая модель называется *обобщенной геометрической моделью* (ОГМ).

Сложность расчета и формы ОГМ является причиной использования в практике компоновочных работ упрощенных компоновочных моделей в виде установочных объемов  $V_{уст}$  или площади  $S_{уст}$  ЭРЭ.  $V_{уст}$  ( $S_{уст}$ ) — прямоугольный параллелепипед (или прямоугольник), описанный вокруг ЭРЭ с учетом максимальных установочных размеров, требований по монтажу и регулировке и дополнительных объемов или пространства, обеспечивающих его нормальную работу при данном тепловыделении, электрических и магнитных взаимодействиях.

Размеры ОГМ ( $V_{уст}$  и  $S_{уст}$ ) — функция геометрии ЭРЭ и его режима работы. При малых коэффициентах по мощности ( $K_{н} = 0,1 \dots 0,3$ ) можно использовать [3] упрощенные соотношения для вычислений  $V_{уст}$  и  $S_{уст}$  по нормализованным установочным размерам (рис. 1.1, а):

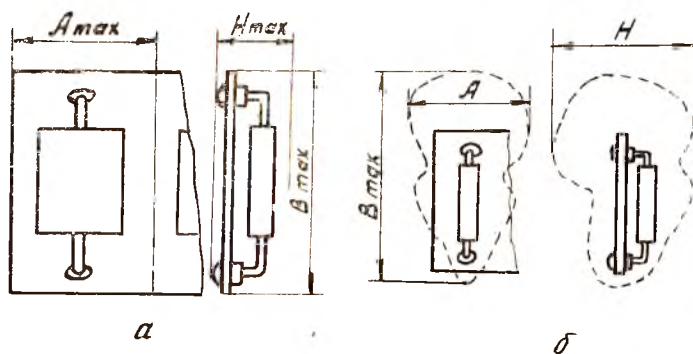


Рис. 1.1. Схема определения: а — установочного объема  $V_{уст}$ ; б — объема обобщенной геометрической модели ОГМ

$$V_{уст} \cong 1,5 A_{max} B_{max} H_{max};$$

$$S_{уст} \cong 1,3 A_{max} B_{max}.$$

При значениях  $K_{н} > 0,3 \dots 0,5$  вычисление  $V_{уст}$   $S_{уст}$  затрудняется, т. к. необходимо вычислить объемную или плоскую ОГМ

со сложными образующими (рис. 1.1, б), что требует знания начальных и граничных условий.

Результатом выполненной компоновки являются компоновочные чертежи, позволяющие до начала основных работ при сравнительно небольших затратах средств и времени рассмотреть имеющиеся варианты, сделать их качественную оценку и принять к разработке лучший. Наличие компоновочных чертежей позволяет предварительно рассчитать прочность, тепловой расчет и виброизоляцию, а также оценить компактность аппаратуры и условия размещения ее на объекте. В процессе компоновки вначале решают главные задачи и только после этого переходят к второстепенным. В компоновочном чертеже не следует увлекаться подробным изображением элементов конструкции. Необходимо максимально упрощать такие чертежи, т. е. подробно всегда можно нанести впоследствии там, где возникает в этом необходимость.

Такая оценка учитывает средние габаритные размеры элементов независимо от степени их микроминиатюризации.

## *1.2. КОНСТРУКТИВНАЯ ИЕРАРХИЯ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ КОНСТРУИРОВАНИЯ РЭА*

К основным проблемам современного конструирования РЭА относятся выбор того или иного варианта конструкции, обеспечение надежности и эффективности производства, нормального теплового режима и вибропрочности конструкции, унификация и стандартизация, комплексная микроминиатюризация. Выбор конструкции зависит от назначения и области применения устройств, заданных электрических параметров и условий эксплуатации, конструктивных показателей, сроков разработки и серийности, стоимости и возможностей существующей элементной базы. Сложность выбора конструкции заключается в том, что он должен быть проведен на самых ранних стадиях проектирования и конструктору необходимо разобраться в степени важности множества взаимосвязанных факторов.

Конструкцию современной РЭА следует рассматривать как некоторое структурное образование, отдельные части которого находятся в иерархической соподчиненности, что подразумевает усложнение конструкции последовательным объединением более простых конструктивно законченных единиц (отдельных дискретных элементов, микросхем, модулей) в более сложные [1]. По сложности уровня компоновки конструкции подразделяют на многоблочные (стойки, шкафы, контейнеры), моноблоки, функциональные ячейки, микросборки и микросхемы. Таким образом, можно говорить о существовании нескольких уровней компо-

новки. Наиболее низкий и неделимый структурный уровень-нулевой называют *элементным базисом РЭА*. Он составляет все конструктивно неделимые ЭРЭ, ИС и большие интегральные схемы (БИС), приобретаемые разработчиком РЭА как покупные изделия.

Уровень сборки характеризуется размерами и сложностью сборочной единицы (рис. 1.2). В РЭА самой малой сборочной

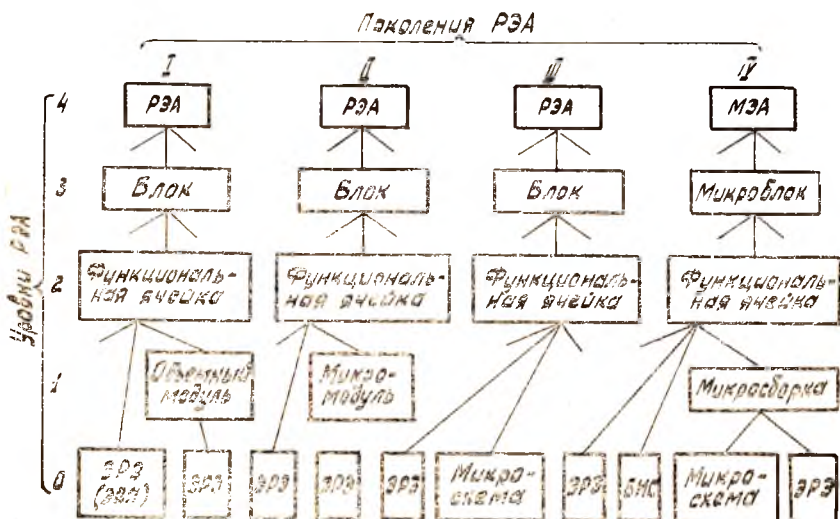


Рис. 1.2. Структурные уровни РЭА

единицей конструкции является элементарный модуль, микро-модули, микросборки или типовой элемент замены (ТЭЗ). Такие сборки называют *1-м структурным уровнем*. Они могут быть заменены названием *функциональная ячейка*. ФЯ, как правило, является функционально и конструктивно законченной сборочной единицей: у нее есть свои выводы, присоединительные и кодовые элементы, контрольные гнезда и т. д.

*2-й структурный уровень* — это блоки, компоновка которых осуществляется путем сборки ФЯ в пакеты и корпусирования пакетов в блоки. Название блок заменяет существующие названия 2 структурного уровня — прибор, контейнер и др. В блоке содержится от одной до десятков ФЯ, он обязательно является конструктивно и функционально законченной сборочной единицей, состоящей из элементов, модулей, ИС, устанавливаемых на печатной плате.

*3-й структурный уровень* — блоки, представляющие собой функционально и конструктивно законченную сб. единицу, состоящую из деталей и функциональных узлов, объединенных

крепежом и электрическим монтажом в общем несущем основании. Таким основанием для бортовой РЭА может служить общая амортизационная рама или стеллаж.

*4-й структурный уровень* представляет собой РЭА, т. е. конструктивно и функционально законченное изделие, которое в отличие от изделий других уровней имеет самостоятельное эксплуатационное назначение. РЭА состоит из блоков, объединенных стойкой, шкафом или стеллажом. Стойки и стеллажи могут объединяться в сложные радиоэлектронные комплексы.

Количество структурных уровней в конструировании РЭА определяется функциональной сложностью и элементным базисом. Появление дополнительных структурных уровней ведет к увеличению связей, переключений и ухудшению надежности и технологичности конструкции. Сокращение структурных уровней конструкции, наоборот, ведет к лучшему заполнению шкафов и уменьшению связей.

Конструкция современной РЭА является прежде всего результатом эволюции элементного базиса, которая повлекла за собой изменение методов компоновки и характера структурных уровней в конструкции. При компоновке преследуется цель максимально использовать высокие качества элементной базы. С увеличением степени интеграции уменьшается число монтажных соединений, увеличивается плотность компоновки, уменьшается масса и объем устройства. Все большее количество соединений переходит внутрь самой микросхемы, и сложность конструкции как бы переходит в сложность элементного базиса. Совершенствование компоновки РЭА нужно рассматривать как историю качественного развития электронной техники и технического уровня производства. За период развития РЭА произошла смена нескольких поколений, основными отличительными признаками которых являются элементная база и метод конструирования: в первом поколении — электронная лампа, крупногабаритные навесные ЭРЭ и блочный метод конструирования; во втором — транзистор, миниатюрные ЭРЭ и модульный метод; в третьем — ИС с небольшой степенью интеграции (до 100—1000 элементов на корпус) и функционально-узловой метод; в четвертом (современная аппаратура) — БИС и сверхбольшие ИС (СБИС) с числом элементов от тысяч до сотен тысяч элементов, функциональные компоненты и функционально-узловой метод конструирования с применением микросборок (МСБ).

Анализ работы [12] показывает, что материальные затраты при переходе от одного поколения к следующему уменьшаются примерно в 10 раз, через каждые 5 лет также примерно в 10 раз происходит увеличение функционально-аппаратурной сложности, поэтому в принципе они могут компенсироваться. Отсюда следует, что для обеспечения эффективного развития РЭА

необходимо, чтобы темпы развития элементной базы и методов конструирования опережали темпы развития схмотехники; совершенствование элементной базы и темпы ее развития должны определяться особенностями и принципами развития самой аппаратуры.

Возникшие новые схмотехнические методы построения МЭА (микросхмотехника) позволили практически для всех функциональных узлов современных радиоустройств создать конструкции, отвечающие основным принципам микроэлектронного конструирования (планарность конструкций, малые масса и габариты, высокая надежность и т. д.) Анализ современного состояния РЭА различного назначения, а также перспектив ее развития показывает, что с конструктивной точки зрения особенно важными являются следующие направления:

*традиционное* — конструирование и компоновка МЭА с использованием корпусированных ИС и МСБ на печатных платах;

*развивающееся* — компоновка МЭА с использованием бескорпусных МСБ на металлических основаниях;

*перспективное* — конструирование МЭА с использованием БИС и СБИС, в том числе матричных, в кристаллодержателях или на лентах-носителях на крупноформатных («гигантских») металлических подложках.

Важнейшими направлениями комплексной микроминиатюризации МЭА являются:

разработка новых принципов компоновки;

совершенствование новых способов коммутации, унификаций конструкций;

конструирование МЭА с учетом технологических возможностей.

Качественный скачок в создании перспективных конструкций МЭА произошел с применением технологии изготовления гибких коммутационных плат на основе полиимидной пленки. Сочетание попарно многослойных конструкций типа МПП-ПМ, представляющих пакет двусторонних полиимидных пленок, электрически соединенных сквозными металлизированными переходами, с коммутационными платами на основе анодированного алюминия с одним слоем коммутации непосредственно на оксиде позволило полностью отказаться от печатных плат, исключив лишние переходные соединения между коммутационными элементами, повысив уровень интеграции более чем в 10 раз при уменьшении массы более чем в 10 раз.

Применение в качестве жесткого основания металлической подложки позволяет решить проблему теплоотвода путем установки непосредственно на алюминиевую плату активных элементов с высоким уровнем выделяемой мощности, а также использования металлической платы в качестве конструктивного

элемента. Дальнейшее повышение степени интеграции ФУ и блоков МЭА может быть достигнуто созданием двусторонних плат с многоуровневой разводкой.

### *1.3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОМПОНОВКИ*

РЭА обладает признаками, которые присущи сложной системе:

конструкция РЭА состоит из большого числа элементов со связными взаимными связями;

элементы конструкции выполняют разнообразные функции;

функции РЭА однозначно определены, и все элементы подчинены выполнению этих функций;

имеются регулируемые и нерегулируемые управляющие воздействия и неопределенные внешние случайные возмущения.

Структурную модель конструкции РЭА можно представить как иерархию блоков разного уровня, в которой каждый блок содержит блоки нижних уровней (см. п. 1.2). Иерархическая структурная модель конструкции РЭА применяется при автоматизированном конструировании.

При конструировании РЭА широко используют функционально-узловой метод (см. п. 1.1), который дает возможность:

а) использовать ограниченный выпуск ФУ для создания широкого класса аппаратуры и решать задачи их унификации;

б) организовать серийный выпуск ФУ на специализированных предприятиях, снизить их стоимость и повысить надежность;

в) ускорить процесс конструирования и изготовления аппаратуры, автоматизировать процессы сборки и монтажа РЭА, снизить ее себестоимость, улучшить ремонтпригодность, сократить сроки разработки.

Функционально-узловой метод конструирования предусматривает деление РЭА на отдельные конструктивно законченные единицы (модули, блоки, ФУ и т. п.) различных уровней: стойки, блоки, суббеджи, ФУ.

Существующие системы автоматизированного проектирования РЭА позволяют решать задачи:

параметрического и статистического анализа и оптимизации схем;

расчета параметров механических, электромеханических и электронных узлов и блоков РЭА;

расчета компоновочных характеристик, тепловых режимов, механической прочности и надежности конструкций.

При конструкторском проектировании РЭА решаются задачи поиска наилучшего варианта конструкции, который удовлетворяет требованиям ТЗ и максимально учитывает возможности технологической базы производства.

Создать единую математическую модель, которая комплексно учитывала бы особенности конструкторско-технологической базы производства, не представляется возможным ввиду ее сложности. Поэтому задачу решают по частям. При конструкторском проектировании решают такие задачи, как распределение конструктивных элементов по коммутационным пространствам различного уровня иерархии, размещение элементов в заданном коммутационном пространстве, трассировка проводных и печатных соединений и др. Для оптимизации конструкторских решений используют различные показатели (см. п. 1.2).

*Граф* — графическое выражение структуры связей между элементами любой системы. Граф легко сопоставить со схемами и конструкциями, которые имеют линии связи между элементами. Описание моделей конструкций РЭА с помощью графов [7, 13] позволяет решать следующие задачи:

анализ электронных схем;

размещение конструктивных элементов и их ориентация в конструктивном пространстве;

проектирование проводного и печатного монтажа.

Практическое использование таких моделей дает возможность: сократить объем вычислений по сравнению с обычными методами; сохранить наглядность описания схемы и конструкции; построить алгоритмы преобразований и оптимизации, компактные и удобные для реализации на ЭВМ.

Компоновка — первый этап, на котором устанавливается однозначное соответствие электрической принципиальной схемы (ЭЗ) и конструкторского деления проектируемого устройства, в процессе которого [17] решают следующие задачи:

*типизация* — расчленение ЭЗ на типовой элемент конструкции (ТЭК) с минимальной номенклатурой (минимумов типов ТЭК);

*покрытие* — определение минимального числа ТЭК для реализации ЭЗ;

*разрезание* — разделение ЭЗ на конструктивные части с минимумом связей между ними;

*размещение ТЭК* — установление места ТЭК  $i$ -го ранга в ТЭК более высокого ( $i + 1$ ) ранга.

**Задача типизации.** ЭЗ проектируемого устройства определяется графом  $G(x, r)$ , каждой вершине  $x$  ставится в соответствие тип интерпретируемого ею элемента, а ребро  $r$  характеризует связи между элементами различных типов. В результате в графе  $G(x, r)$  требуется выделить множество групп изоморфных подграфов, удовлетворяющих следующим условиям:

любые два подграфа  $G_i$  и  $G_j$ , принадлежащие любой произвольной группе разбиения  $\Gamma_\gamma$ , должны быть изоморфны;

число вершин любого подграфа разбиения не должно превышать заданного;

множество вершин любых двух подграфов разбиения не должно пересекаться;

суммарное число внешних выводов каждого подграфа не должно превышать заданной величины.

Критерием типизации является минимальное количество групп изоморфных подграфов, полученных в результате разбиения ЭЗ устройства.

Конструктивные требования к компоновке выполняются соответствующим выбором модели монтажной плоскости (плоскость, на которой проводится компоновка и электрический монтаж ЭРЭ). Так можно представить обобщенную математическую модель компоновки, пригодную для любого вида и типа ЭЗ и любого иерархического уровня РЭА. Детальные математические модели компоновки подразделяются в зависимости от принципов, которые заложены в основу модели. Пример модели компоновки, в которой используется принцип механических аналогий, рассмотрен в работе [3], методы компоновки элементов РЭА — в [14], конструкторских узлов — в [16].

Задача покрытия. Известна ЭЗ устройства  $S = \{L_1, \dots, L_n\}$ , состоящая из конечного числа элементов  $L_i$ , и библиотека ТЭК (модулей)  $M = \{M_1, M_2, \dots, M_i\}$ , содержащая конечное число типов модулей. Задача покрытия ЭЗ этим набором ТЭК может быть сформулирована как разбиение множества  $S$  по условиям:

каждая часть разбиения должна соответствовать по своему составу из ТЭК (например,  $M_i$  библиотек);

любые две части разбиения не имеют общих элементов.

Распространенными критериями задачи покрытия являются минимум суммарной стоимости устройства, минимальное число типов, используемых ТЭК ( $k = n/l$ ,  $i$  — число типов ТЭК, которыми покрыта ЭЗ). Если ЭЗ соответствует граф  $G(x, r)$ , а стандартные ТЭК определены графами  $G_i(x, r)$ , то задача покрытия формулируется так: в графе  $G(x, r)$  выделить максимальное количество изоморфных подграфов  $G_i(x_i, r_i)$ , т. е.  $G_i(x_i, r_i) \subset G(x, r)$ . Для решения этой задачи используются последовательные и итерационные алгоритмы, определяющие локально-оптимальные варианты решения.

Задача разрезания. Известен граф  $G(x, r)$ , интерпретирующий ЭЗ. Необходимо его разрезать на подграфы  $G_i(x_i, r_i)$  с минимальной связностью, выполнив условия: число подграфов, минимальное количество их вершин и внешних связей между ними ограничено. Если число подграфов заранее задано, то при разрезании графа  $G(x, r)$  на подграфы  $G_i(x_i, r_i)$  должны выполняться условия:

$$G_i(x_i, r_i) \neq 0; G_i(x_i, r_i) \cap G_j(x_j, r_j)$$

$$\bigcup_{i=1}^l G_i(x_i, r_i) = G(x, r) \sum_{i=1}^l x_i \leq t, l = \text{ent}(x/t),$$

где  $l$  — максимально допустимое количество вершин подграфа;  
 $x$  — количество вершин графа;  
 $\text{ent}$  — равно целой части плюс единица.

Для решения задачи разрезания используют приближенные последовательные или итерационные алгоритмы.

При решении задачи компоновки конструктор располагает определенным составом и количеством ТЭК, которые необходимо разместить на коммутационной плате (например, ИС в ФЯ, ФЯ в панели, панелей в стойке). При размещении ТЭК происходит установление места ТЭК  $i$ -го ранга в ТЭК более высокого  $(i + 1)$  ранга.

Задача размещения ТЭК. Суть состоит в следующем: известны конечные множества  $P = (P_1, \dots, P_p)$  (интерпретирующие вакантные установочные места) и множество  $K = (K_1, \dots, K_k)$  (набор ТЭК). Требуется расположить  $K$  на  $P$  по некоторым конструктивно-технологическим критериям (минимум суммарной длины соединений, минимум перемещений, максимально близкое расположение ТЭК с наибольшим числом связей). Наиболее общий и распространенный прием, по которому производится размещение и трассировка, — минимум суммарной длины соединительных проводников при ограничении максимальной длины соединений. Если ввести координатную длину  $d_{ij}$  на монтажной плоскости  $d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|$ , то минимальную суммарную длину удобно оценить моделью связного

$$\text{графа } G(x, r) \text{ с матрицей смежности } a_{ij}: L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k a_{ij} d_{ij},$$

где  $\kappa$  — число размещаемых ТЭК.

Ограничения на максимальную длину определяются коэффициентами важности связей  $q_{ij}$ :

$$0 \leq q_{ij} < Q_{ij}^* / \sum_{i=1}^c Q_{ij} < 1,$$

где  $Q_{ij}^*$  — вес связи;

$c$  — число связей;

$Q_{ij}$  — число оставшихся  $c-1$  связей.

В этом случае суммарная величина нормировочных длин связей

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k a_{ij} d_{ij} q_{ij} \Rightarrow \min.$$

Для решения задач размещения ТЭК используют комбинаторные методы целочисленного линейного программирования.

Одной из основных проблем конструкторского проектирования РЭА является выбор показателей качества для оценки оптимальности конструкции модулей. Правильный выбор показателей качества эквивалентен правильной формулировке задачи конструкторского проектирования. В настоящее время используют следующие показатели качества РЭА:

*функционирования*, характеризующие полезный эффект от использования РЭА по назначению и область их применения;  
*надежности*, определяющие свойство РЭА сохранять свою работоспособность во времени;

*технологические*, характеризующие эффективность конструкторско-технических решений для обеспечения высокой производительности труда при изготовлении и ремонте РЭА;

*эргономические*, характеризующие систему «человек-изделие-среда» и учитывающие комплекс гигиенических, антропологических, физиологических, психофизиологических и психических свойств человека, проявляющихся в производственных и бытовых условиях;

*эстетические*, характеризующие внешние свойства РЭА: выразительность, оригинальность, гармоничность, целостность, соответствующие среде и стилю и т. д.;

*стандартизации и унификации*, характеризующие степень использования в РЭА стандартизованных изделий и уровень унификации их составных частей;

*патентно-правовые*, отражающие степень патентной защиты конструкторских решений в РЭА в СССР и за рубежом, а также ее патентную чистоту;

*экономические*, характеризующие затраты на разработку, изготовление и эксплуатацию РЭА, а также экономическую эффективность эксплуатации.

Укрупненно связь конструкции РЭА с показателями качества показана на рис. 1.3. Следует подчеркнуть, что только учет всего многообразия факторов, их тщательный анализ дают основание конструктору выбрать из большого числа возможных вариантов решение, близкое к оптимальному. Показатели качества служат комплексом критериев, используемых для оценки принимаемых решений на различных этапах создания РЭА. Из-за специфики условий эксплуатации и производства критерии могут быть различными, что приводит к многовариантности проектных решений.

Характерной особенностью оптимальной компоновки РЭА является трудность установления единого критерия качества, обладающего определенным физическим смыслом и приводя-

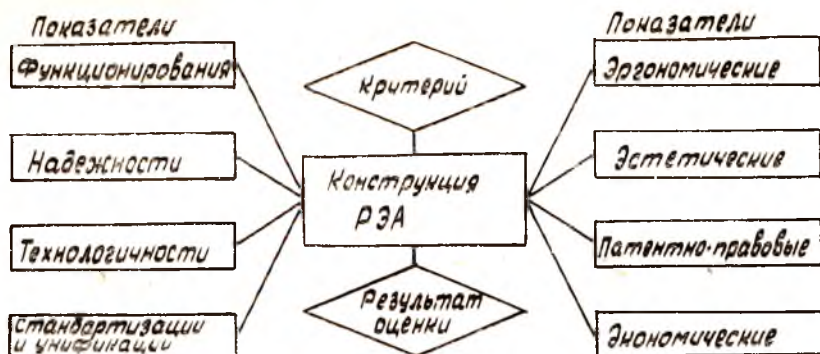


Рис. 1.3. Связь конструкции РЗА с показателями качества

щего к действительной оптимизации модулей. Приемлемым решением этого вопроса является использование нескольких равноценных критериев качества, каждый из которых может стать преобладающим в зависимости от основной целевой функции и условий использования проектируемой РЗА, уровня модуля в иерархической лестнице, этапа конструкторского проектирования и типа решаемой задачи.

Рассмотрим наиболее известные и широко применяемые показатели качества, позволяющие полностью характеризовать вариант конструктивного исполнения модулей различных уровней.

На этапе компоновки используются следующие критерии:

1. Получение минимального числа связей между модулями, конструктивно реализующими заданную схему. Этот критерий иногда заменяется равнозначным критерием максимальной взвешенной связности элементов внутри модуля:

$$\max \Phi = \max \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij},$$

где  $a_{ij} = \sum_{r=1}^k \varphi_r (S_i, S_j) / Q (S_i)$  — коэффициент относительной взвешенной связности модулей  $S_i$  и  $S_j$ ;

$m$  — количество модулей предыдущего  $(n - 1)$ -го уровня, размещенных на модуле  $n$ -го уровня;

$\varphi_r$  — вес связи  $r$ -го вывода  $S_i$  модуля с  $S_j$ ;

$Q (S_i)$  — полное количество связей модуля  $S_i$ ;

$k$  — количество связей между модулями  $S_i$  и  $S_j$ .

2. Получение минимального числа модулей, связанных с каждым модулем.

3. Возможно более полное использование модуля, которое может быть охарактеризовано коэффициентом [11]  $\xi = (Z - \Delta Z)/Z$ , где  $Z$  и  $\Delta Z$  — соответственно общее число и число использованных базовых элементов в модуле.

*Базовый элемент* — это элемент, реализующий функции И, ИЛИ, НЕ, И — НЕ, ИЛИ — НЕ, усиления и т. п. Этот критерий по существу является критерием минимального количества типовых модулей.

4. Максимизация числа «исчезнувших» связей. Под «исчезнувшими» понимаются внутренние связи стандартных модулей, которые не указаны в таблице связей, т. к. они конструктивно не существуют. Этот критерий позволяет увеличить связанность пар модулей (увеличить число связей между ними) и обеспечить последующее более близкое размещение их относительно друг друга.

На *этапе размещения* используются следующие критерии:

1. Минимизация суммарной длины всех соединений  $l_q$

$$\min \sum_{q=1}^Q l_q,$$

где  $Q$  — полное количество соединений.

2. Выполнение условия, чтобы длина каждого соединения, по которому передается данный сигнал  $\omega$ , не превышала заданной величины  $l_q(\omega) \leq l_{q\text{зад}}(\omega)$ . Этот критерий зачастую заменяется следующим близким критерием минимизации числа соединений  $N$ , длины которых больше заданной

$$\min N [l_q(\omega)] \text{ при } l_q(\omega) > l_{q\text{зад}}(\omega).$$

3. Минимизация суммарной длины всех соединений, связывающих каждый источник сигнала с его наиболее удаленной нагрузкой (минимизация наиболее длинных соединений).

4. Минимизация суммарной длины всех соединений  $l_q(\omega)$ , связывающих монтажные точки, относящиеся к одному сигналу:

$$\min \sum_{q=1}^{Q(\omega)} l_q(\omega),$$

где  $Q(\omega)$  — количество связей источника сигнала  $\omega$  с другими модулями.

5. Минимизация числа пересечений проводников.

6. Максимально близкое размещение модулей, имеющих наибольшее количество связей между собой.

На *этапе трассировки* используются следующие критерии:

1. Минимальная длина проводников.

2. Минимальное использование переходов, перемычек, диффузионных каналов.

3. Максимальная удаленность проводников от выводов и других проводников.

4. Минимальное число используемых каналов.

5. Минимальное число паек к одному контакту.

Значимость выбранных показателей различна на каждом уровне иерархической лестницы, и в ряде случаев некоторые показатели качества конструкторского проектирования могут приобрести известную самостоятельность. Их особенностью является то, что при переходе от отдельных модулей к РЭА вышеуказанные показатели качества в основном сохраняются.

Перечисленные показатели качества охватывают почти все параметры, характеризующие модули, и являются общепризнанными. Однако можно назвать некоторые другие показатели качества конструкторского проектирования модулей РЭА, которые не могут быть сведены к указанным. В качестве примера можно назвать показатель, вытекающий из проблемы электромагнитной совместимости и учитывающий электрические особенности принципиальных схем. Суть его заключается в минимизации уровня паразитных помех до заданного значения. Величина заданного значения уровня помех определяется либо расчетным путем [5], либо с помощью экспериментальных зависимостей, определяющих порог срабатывания модулей.

Выбор конструктивных вариантов модулей в значительной мере зависит от технологических процессов, используемых для их реализации. Нереализуемость хотя бы одного технологического процесса приводит к отклонению данного варианта. Например, как указано в работе [7], существенным критерием качества компоновки модулей на основе печатных плат является возможность последующего проложения всех необходимых соединительных проводников, т. е. реализуемость печатного монтажа на основе применяемой технологии.

Основные требования, которым должны отвечать показатели качества конструкторского проектирования РЭА любого иерархического уровня можно сгруппировать по следующим признакам: представительность, критичность, устойчивость к исследуемым параметрам, предельно возможная простота при максимуме содержимой информации, статистическая эффективность [10].

Под *представительностью* понимается свойство показателя характеризовать качество выполнения основного свойства конструкции модуля.

Под *критичностью* понимается резкая зависимость качества выполнения общей задачи конструкторского проектирования к изменениям каждого из показателей, при этом, чем выше критичность, тем лучше. Показатель считается устойчивым, если

его изменение в окрестности оптимальных решений незначительно.

*Простота* критериев подразумевает исключение второстепенных сторон исследуемой задачи, которые усложняют анализ, но существенно не уточняют оценку конструкции. Одновременно из нескольких показателей, которые характеризуют одно и то же свойство конструкции и к которым конструкция одинаково чувствительна, должен быть выбран простейший.

Под *максимумом содержимой информации* понимается следующее: каждый показатель должен учитывать по возможности больше различных сторон рассматриваемой операции, т. е. включать в себя больше частных показателей, и при этом иметь количественный характер. Одновременно общее число показателей не должно быть велико, чтобы не усложнять задачу автоматизации процесса оптимального конструкторского проектирования модулей.

Под *статистической эффективностью* понимается связь каждого показателя с параметрами модулей РЭА, причем каждый из показателей должен иметь достаточно малую дисперсию и, следовательно, определяться с разумной точностью. И, наконец, обязательное требование: все показатели должны обеспечивать возможность включения их в общий алгоритм исследования и выбора оптимальной компоновки моделей всех иерархических уровней РЭА.

### 1.5. ПРИНЦИПЫ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ КОМПОНОВКИ

Принципы компоновки определяют те конструктивные типовые элементы, которые закладываются в основу РЭА. Выбор принципа компоновки зависит от требований, предъявляемых к разрабатываемой РЭА, и ограничений. Процесс компоновки РЭА обычно ведется в определенной последовательности, которую можно представить в виде схемы (рис. 1.4.).

*Общими факторами*, определяющими усложнение компоновки за счет функциональных особенностей, являются повышение требований к стабильности, увеличение числа входов и выходов, уровня дестабилизирующих факторов, разницы между формой и размерами лабораторного макета и проектируемого изделия, увеличение точности работы. Конкретные требования зависят от особенностей работы схемы и условий ее эксплуатации.

*Дополнительными факторами* общего характера будут: количество информации, перерабатываемое в изделии; тип активных ЭРЭ (магнитные, полупроводниковые); требуемая форма и размеры; вид электромонтажных соединений; технология из-

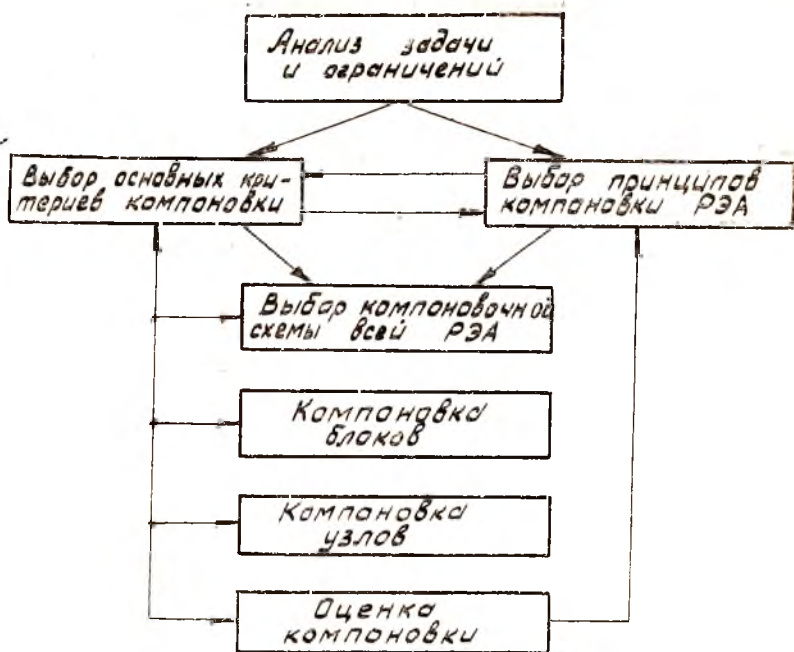


Рис. 1.4. Последовательность компоновки РЭА

готовления, сборки и регулировки; заданная компоновочная схема.

После выяснения степени сложности компоновки с учетом функционального назначения и общих дополнительных факторов необходимо проанализировать техническое задание последовательно:

выяснить назначение ЭРЭ схемы и определить их электрические и тепловые режимы;

проанализировать условия эксплуатации и степень влияния дестабилизирующих факторов на работу ЭРЭ и схемы в целом,

выявить наиболее важные внутренние источники неустойчивости схемы (ее ЭРЭ) и их чувствительность к внешним электрическим, магнитным, тепловым, механическим и другим видам воздействия;

определить пути возможных внутренних паразитных наводок между ЭРЭ схемы за счет гальванической паразитной связи, электрических, магнитных и электромагнитных полей;

оценить величину, характер и особенности входных и выход-

ных сигналов и напряжений питания (особенно в чувствительных и высоковольтных цепях);

предусмотреть наличие дополнительных, не указанных на принципиальной схеме, ЭРЭ в виде контрольных точек, экранов и развязывающих цепей, повышающих качество работы изделия;

вычислить координаты ЦТ (при необходимости), проанализировать варианты координат точек крепления и характерных схемных (вход, выход, контроль, питание) точек;

учесть характер смены ЭРЭ, критичность расположения подборных, построенных, регулировочных и индикаторных устройств и определить на основе проведенного анализа генеральную линию компоновки изделия.

Последовательность компоновки элементов функциональных узлов рекомендуется следующая: анализ работы принципиальной (функциональной) схемы, построение потенциальных и терминальных эпюр элементов схемы, построение обобщенных геометрических моделей и собственно компоновка [21].

Основная задача анализа работы схемы (принципиальной, функциональной и т. п.) заключается в выяснении схемных и конструктивных особенностей, которые могут повлиять на компоновку. К ним относятся:

1. Назначение схемы и определение сложности компоновки и конструкции изделия. Компоновка многокаскадных усилителей тем сложнее, чем больше величина коэффициента усиления, шире полоса частот, выше наименьшая частота широкополостного или резонансного усилителя, меньше величина входного сигнала. Несколько проще по компоновке различные измерительные генераторы, которые требуют и рациональной компоновки элементов и тщательной экранировки. Более простыми в компоновке будут блоки питания (в том числе и со стабилизаторами) и логические устройства.

2. Условия эксплуатации (диапазон изменений дестабилизирующих факторов) и степень их влияния на работу схемы, которыми будут определяться компоновочные характеристики внешних защитных устройств.

3. Наиболее важные внутренние источники нестабильности работы схемы: чувствительность к внешним электрическим, тепловым, механическим и другим воздействиям, работа элементов схемы в критичных по усилению, величинам рассеиваемой мощности, величинам напряжений и токов и т. п. режимах.

4. Пути возможных паразитных наводок за счет гальванической связи между элементами схемы, электрических, магнитных и электромагнитных полей и других видов связи. Выяснение этих особенностей позволяет дать первую предвари-

тельную оценку габаритов и объема функционального узла, сравнить габариты и объемы лабораторного макета с габаритами и объемом функционального узла по требованиям технического задания. Чем больше эта разница, тем больше, как правило, возникает трудностей при компоновке и налаживании функционального узла.

5. Величина, характер и особенности входных и выходных сигналов и напряжений питания. Чем больше разница в величине между входными и выходными сигналами, тем более жесткие требования к компоновке элементов. Высоковольтные цепи также требуют соблюдения особых правил по компоновке и конструкциям элементов высоковольтного монтажа.

6. Наличие дополнительных, не указанных на принципиальной схеме элементов в виде контрольных точек, экранов, развязывающих цепей и т. п. Введение этих элементов заставляет целиком перекомпоновать схему, а о их необходимости часто просто забывают.

7. Координаты центра тяжести, что необходимо при установке узлов и деталей на гиросtabilизированные платформы. Эту задачу компоновки элементов проще всего решать графоаналитическим методом.

8. Координаты точек крепления, что особенно важно при функциональных узлах разной формы и размеров и жестко заданных координатах. Это необходимо для того, чтобы иметь определенный резерв для вариантов размещения элементов, особенно крупногабаритных.

9. Расположение входных, выходных, контрольных точек питания, которыми в очень сильной степени определяется «рисунки» компоновки элементов.

10. Характер замены тех или иных элементов (вручную, с помощью специального оборудования, с обеспечением необходимых подходов к элементам) и его влияние на компоновку.

11. Критичность расположения регулировочных и подстроечных элементов, частота обращения к ним и условия регулировки (при сборке узла, при подстройке параметров блока, прибора или сложной системы), которыми будет определяться их компоновка и компоновка элементов всего функционального узла.

12. Необходимость наличия индивидуальных индикаторных устройств, критичность их расположения, связь с регулировочными элементами и возможность их вынесения на уровень модулей 3-го или 4-го порядка (в кассеты или блоки).

13. Влияние монтажных соединений на компоновку элементов функционального узла и устройства в целом.

Анализ работы схемы, выполненной в такой последовательности, дает возможность определить генеральную линию компоновки элементов, которая предшествует выбору тех или иных конструктивно-компоновочных решений. Рабочая компоновка должна начинаться одновременно с разработкой электрической схемы изделия. На первом этапе анализируется структурная схема с делением ее на функционально и конструктивно законченные составные части, компоновочные параметры которых соответствуют выбранной конструктивной базе изделия. При этом необходимо предусматривать возможность создания параметрических рядов конструкций составных частей, что в будущем повысит уровень унификации изделий. Поскольку в современной РЭА широко применяются печатные платы и плоские кабели, на этапе рабочей компоновки формируется структура внутриблочных электромонтажных соединений, а на следующем — детально прорабатываются композиционные решения внешнего вида и размещения органов управления, контроля, индикации и коммутации.

Компоновка структурных элементов внутри изделия предполагает выбор методов отвода тепла, обеспечения устойчивости к механическим и климатическим воздействиям, экранирования и т. п. При этом рассчитываются радиаторы охлаждения мощных полупроводниковых приборов и интегральных схем, теплоотводы, разрабатываются амортизаторы для отдельных элементов, электромагнитные экраны и т. п.

Последним и главным этапом компоновочных работ является размещение структурных элементов в рабочем объеме конструкции и детальная проработка несущих, вспомогательных и электромонтажных элементов изделия. Взаимное размещение составных частей в изделии определяется с учетом обеспечения минимальных паразитных связей между отдельными узлами и ЭРЭ; характера и количества электрических связей между элементами; тепловых режимов, т. к. составные части, интенсивно выделяющие тепло, недопустимо размещать вблизи элементов с ограниченным диапазоном рабочих температур. Положение элементов должно быть таким, чтобы обеспечивались их эффективные охлаждения конвективными потоками теплоносителя, высокая ремонтпригодность конструкции, доступ к подстроечным и регулировочным элементам.

При компоновке структурные элементы необходимо размещать одновременно со вспомогательными элементами, обеспечивающими необходимые связи в изделии или защиту от нежелательных связей, — крепежными элементами, амортизаторами, теплоотводами, экранами, подсоединяемыми прово-

дами, жгутами и кабелями, элементами контроля, заземления, изоляции, развязывающими цепями и т. п.

Добившись нескольких приемлемых вариантов размещения структурных элементов изделия, тщательно прорабатывают конструкции вспомогательных деталей и сборочных единиц (кронштейнов, шасси, стенок, экранов и т. п.) совместно с технологом определяют методы их изготовления.

Разработка композиции изделия и выбор его цветового решения начинаются с анализа требований ТЗ и изучения существующих аналогов, патентной и научно-технической информации с целью определения тенденции развития аппаратуры данного класса, выявления ее лучших и худших эстетических и эргонометрических сторон.

По результатам этого анализа определяются: требования к габаритам, форме изделия, фактуре и цвету его поверхностей, необходимость во вспомогательных элементах (ручках переноса, подставках, защитных крышках и т. п.), оптимальность размещения органов управления, индикации контроля, коммутации, их размеры, форма, принцип действия, окраска и т. п. Далее определяется основной формообразующий принцип конструкции, прорабатываются главные и второстепенные элементы, определяются материалы и декоративные покрытия, необходимые для реализации несущих и вспомогательных элементов, вырабатывается единый подход к формообразованию деталей, выражающий свойства примененных материалов.

Особое внимание необходимо уделять художественно-конструкторской проработке лицевой панели изделия. Выбор или конструирование элементов индикации, контроля, коммутации и управления, их расположение относительно оператора и взаимное размещение на лицевой панели должны способствовать наиболее легкому и быстрому обнаружению, считыванию и анализу информации, принятию решения об операции управления и самому управляющему действию.

Наиболее важные, ответственные элементы должны быть расположены в оптимальной для считывания и управления зоне панели и четко выделяться среди других.

В хорошо скомпонованной лицевой панели не должно быть лишних, отвлекающих внимание элементов, крепежных деталей, особенно с блестящими или контрастными покрытиями, фирменные знаки небольших размеров нужно помещать вне оптимальной рабочей зоны.

Работа конструктора, разрабатывающего чертежи лицевой панели, проводится в такой последовательности:

определение задач и необходимой очередности их решения в соответствии с тактико-техническими требованиями (ТТТ) на изделие и принципиальной схемой;

определение степени точности и времени на решение задач согласно ТТТ на изделие;

определение методов решения задач и необходимого для этого количества органов управления, индикации, сигнализации и т. д.;

определение соответствующих типов органов управления и индикации, необходимых для выполнения задач с указанной точностью и в определенное по ТТТ время;

определение значимости органов управления и индикации, частоты и последовательности их использования и соответствующее этому их размещение;

определение соответствующих факторов распознавания органов управления и индикации (выбор обозначения, размеры шрифтов, букв, цифр и знаков, яркости, освещенности, цветового тона и т. д.).

Размещение органов управления является одним из основных вопросов при конструировании. Правильное его решение во многом предопределяет нормальную работу оператора как в нормальном, так и в аварийном режимах. Существует четыре разных принципа компоновки органов управления на панелях:

*по функциональным связям органов управления*, когда последние группируются исходя из общности решаемых задач;

*по последовательности*, когда органы управления размещаются в строгом соответствии с последовательностью их использования;

*по частоте использования*, когда наиболее часто используемые органы управления размещаются в центре панели;

*по значимости*, когда наиболее важные органы управления (даже редко используемые) размещают в центре панели.

При выборе того или иного принципа необходимо учитывать следующие требования:

максимальное сокращение количества и траектории рабочих движений;

размещение последовательно используемых органов управления на одной высоте по горизонтали или на одной линии по вертикали;

сведение рабочих движений к движению пальцев рук, кисти и предплечья, но не туловища;

вращаемая ручка должна размещаться под индикатором или справа от вертикального индикатора;

ожидаемое направление перемещения указателя индикатора должно соответствовать направлению движения органа

управления, т. е. должно соблюдаться совмещение направлений движений органа управления и индикатора.

Более подробно рекомендации по компоновке лицевых панелей изложены в методических указаниях [18].

### 1.6. МЕТОДЫ КОМПОНОВКИ

В работе [4] систематизированы известные методы компоновки (рис. 1.5), отличающиеся друг от друга принципами формализации, приемами выполнения и способами пространственного размещения составных элементов. В процессе компоновки широко используются способы, упрощающие и сокращающие объем чертежно-графических работ, такие как аналитический, графический, модельный, натурный.

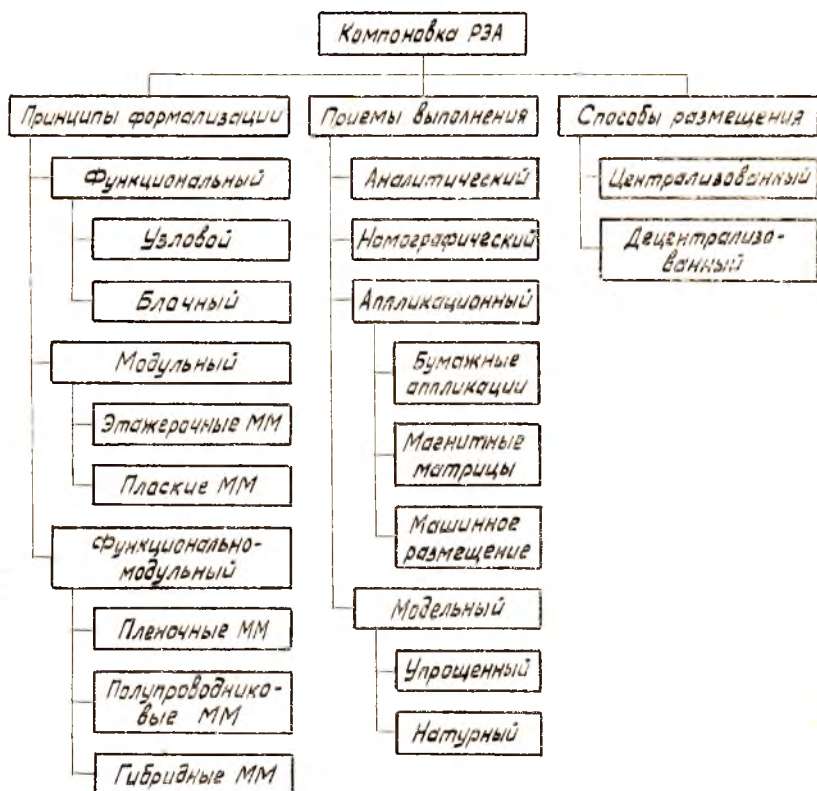


Рис. 1.5. Методы компоновки РЭА

Аналитическая компоновка. При этом методе оперируют численными значениями различных компоновочных характеристик, такими как размеры элементов, весом, площадью, объемом и т. д. Основой аналитической компоновки является выражение

$$КП = k \sum_{i=1}^m N_i, \quad (1.1)$$

где КП — компоновочный параметр (вес, объем и т. д.);

$m$  — число параметров;

$k$  — коэффициент пропорциональности;

$N_i$  — элементарный параметр. Например, подсчитывается элементарный параметр элементов деталей  $V_{уст}$  и потом находят общий параметр [3].

Для расчета объема и веса используют соответственно выражения

$$V_{\Sigma} = \frac{1}{k_v} \left( \sum_{i=1}^n V_{bi} + \sum_{i=1}^n V_{ai} \right), \quad (1.2)$$

$$G_{\Sigma} = k_c \sum_{i=1}^n G_i \text{ или } G_{\Sigma} = G' V_{\Sigma}, \quad (1.3)$$

где  $G'$  — объемная масса (плотность) блока ( $G' = 0,4$  —  $1,6$  кг/дм<sup>3</sup>);

$k_c$  — обобщенный коэффициент объемной массы ( $k = 0,1$  —  $1,0$ );

$k_v$  — обобщенный коэффициент заполнения блока ( $k_v = 0,2$  —  $1$ ).

В результате расчета компоновочных параметров получают ответ об объеме, весовых и габаритных размерах блоков, по которым можно судить о возможности получения заданных характеристик. При малом разнообразии форм ЭРЭ можно использовать единичный геометрический компоновочный параметр в виде квадрата или куба, сводя площади (объемы) ЭРЭ к исходному нормированному значению и вычисляя площадь (объем) в нормированных значениях.

Аналитическими методами пользуются при ограниченном количестве типоразмеров ЭРЭ на предварительных этапах проектирования и разработки РЭА. После расчета компоновочных параметров переходят к использованию других методов компоновки.

Графическая компоновка. Сущность метода заключается в упрощении и ускорении процесса вычерчивания элементов РЭА, различных вариантов компоновки. Используется при выполнении компоновочных эскизов и монтажных

чертежей. В соответствии со стандартными ЕСКД допускается весьма значительное упрощение начертаний элементов РЭА. Для ускорения выполнения графических работ используют деколи (сухие переводные изображения на прозрачной пленке), трафареты, специальные штампы и т. п.

Графическими методами пользуются на стадиях ЭП и ТП при разработке эскизов и монтажной КД.

Графоаналитическая компоновка. В основу положено выражение

$$A_{\Sigma} = N (A_2 - A_1) + n A_1, \quad (1.4)$$

где  $A_{\Sigma}$  — суммарное значение компоновочного параметра;

$N$  — число «больших» ЭРЭ;

$n$  — число «малых» ЭРЭ;

$A_2$  и  $A_1$  — максимальное и минимальное значение компоновочного параметра;

Если гистограмма распределения  $V_{\text{уст}}$  или  $S_{\text{уст}}$  имеет два максимума (рис. 1.6, а), то строим график (рис. 1.6, б). В за-

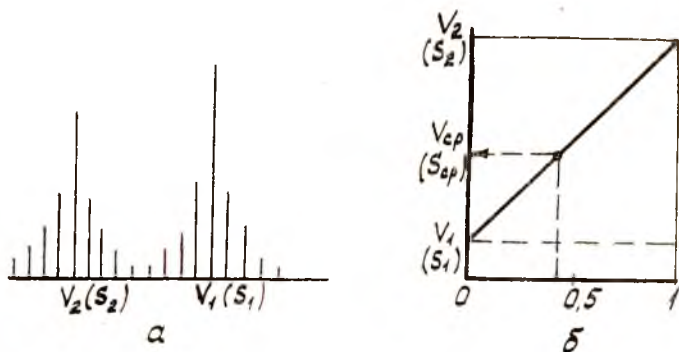


Рис. 1.6. Характер распределения компоновочных параметров (а) и их связь с отношением  $N/n$  (б) для графоаналитической компоновки

висимости от  $V = f(N/n)$  или  $S = f(N/n)$  по отношению  $N/n$  находим среднее значение  $V_{\text{ср}}$  или  $S_{\text{ср}}$ , а затем суммарное

$$V_{\Sigma} = V_{\text{ср}} \cdot n, \quad S_{\Sigma} = S_{\text{ср}} n.$$

Графоаналитический метод целесообразно использовать для быстрой приближенной оценки компоновочных параметров на стадиях технического предложения (ТП) и эскизного проектирования (ЭП) и при достаточной однородности компоновочных параметров и анализируемых изделий.

Модельная компоновка. Метод наиболее распространен из-за своей простоты и наглядности. Используются

плоские (апликации) или объемные модели, выполненные в виде упрощенных чертежей в масштабе 1:1, 2:1, 5:1, 1:2, 1:5 (рис. 1.7).

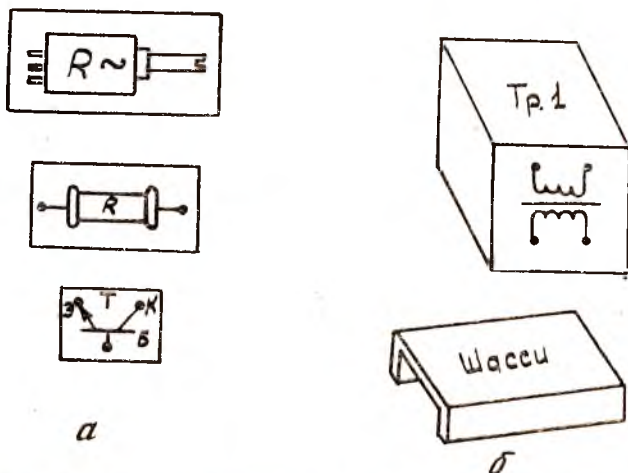


Рис. 1.7. Модели, применяемые при компоновке: а — плоские, б — объемные

Модели элементов изготавливают из плотной бумаги, картона, пенопласта, дерева, металла и других материалов. Объемные модели можно изготавливать как в виде упрощенных копий элементов, так и в виде простых геометрических форм: цилиндров, конусов, кубов, шаров и их комбинаций.

Плоские аппликации целесообразно использовать для печатных узлов и объемного монтажа, когда коэффициент заполнения  $k_v \leq 0,5 \dots 0,7$ . При  $k_v \geq 0,5 \dots 0,7$  лучше использовать объемные модели. Модели можно выполнять с учетом потенциалов сигналов и тепловых полей, определяя их граничные условия из допустимых уровней сигналов или заданных изменений температур  $\Delta t$ , которые будут определять новую форму модели, что вытекает из теории подобия, теории поля и теории теплообмена.

Модельная компоновка значительно сокращает объем чертёжно-графических работ, существенно повышает качество и уровень проектирования, избавляет исполнителей от ошибок, неизбежных при других способах компоновки. Широкое ее применение сдерживается сложностью изготовления при индивидуальном производстве всей необходимой номенклатуры объемных моделей. Способ неэффективен при конструировании изделий, в которых не используются широко типовые унифициро-

ванные и стандартные элементы. Возникают затруднения при оформлении конструкторской документации вследствие несовместимости фотографического метода с чертежно-графическим. Успешное применение этого способа возможно лишь при организации серийного производства моделей и централизованной их поставки проектно-конструкторским организациям одновременно с выпуском новых типов ЭРЭ.

Дальнейшим развитием модельного способа является компоновка моделированием на магнитных матрицах. Сущность состоит в том, что компоновку изделия, его конструктивную проработку ведут на магнитном листе-матрице с помощью плоских стальных шаблонов с нанесенными на них упрощенными графическими изображениями элементов. Магнитная матрица представляет собой составленное из постоянных магнитов плоское основание с размерами рабочего поля, соответствующими листу формата 24. Описание конструкции магнитной матрицы, шаблонов элементов и технологии их изготовления дано в гл. 3 работы [9].

Метод моделирования на магнитных матрицах позволяет оперативно, не прибегая к чертежно-графическим работам, компоновать элементы конструкции РЭА, осуществлять поиск наиболее целесообразного варианта размещения с учетом требований минимизации веса, габаритов, электромагнитных связей и т. д.; получать конструкторскую документацию путем фотографирования модели на электрографических или фото-репродукционных высокопроизводительных аппаратах.

К преимуществам моделирования на магнитных матрицах можно отнести и то, что металлические шаблоны ЭРЭ можно многократно использовать (в течение 2—3 лет), они прочно фиксируются на матрице без дополнительных средств крепления, можно быстро и легко изменять компоновку РЭА на любой стадии процесса проектирования, чертеж модели можно выполнять с высокой графической точностью. Наиболее полно преимущества метода проявляются при компоновке РЭА с большим числом элементов и узлов (плат печатного монтажа, микросхем). Области использования моделирования на магнитных матрицах при компоновке конструкций приборов, лицевых панелей, печатных плат и т. д. подробно изложены в работе [9].

Другим видом модельной компоновки является компоновка плоскостного монтажа с помощью имитационных гибких лент, вырезанных из бумаги или другого материала на компоновочном эскизе, или, в отдельных случаях, на корпусе самого изделия. При этом определяются места и порядок прокладки плос-

них кабелей, места их перегибов, закрепления, длина, положение первой шины и т. д.

**Натурная компоновка.** При ней используются реальные элементы: резисторы, конденсаторы, микросхемы и т. д. Возможны 3 способа применения. *Первый способ:* все элементы плотно укладываются в коробку и, задаваясь коэффициентом заполнения объема, пересчитывают полученное значение объема в предположительно необходимое (нельзя его применять при  $k_v > 0,5$  из-за ошибок, вызванных неучетом вспомогательных и монтажных объемов).

*Второй способ:* все элементы подготавливают к монтажу и komponуют их на миллиметровой (бумаге), отмечают соединения и места установки элементов, а затем вычерчивают эскиз. Такой способ хорошо применять для плоского монтажа блока.

*Третий способ:* изготавливают по электрической схеме работающий макет. Монтаж обычно ведут без изменения длины выводов элементов, что приводит к увеличению объема в 2—3 раза, а при доработке конструктором макета до нужного объема — к увеличению паразитных связей и наводок.

Натурные методы целесообразны на стадии отработки принципиальной схемы и формулировки технического задания на конструкцию РЭА. Перспективным является применение ЭВМ в компоновке РЭА.

**Машинная компоновка.** Сущность метода заключается в использовании принципов перебора возможных вариантов расположения ЭРЭ и возможных мест трассировки соединений с помощью ЭВМ. Развитие ЭВМ позволило в настоящее время различными способами машинного конструирования выполнять: компоновку дискретных ЭРЭ и интегральных схем ИС на печатных платах, топологию ИС, таблицы цепей многослойных печатных плат (МПП) и жгутового монтажа, сборочные чертежи и их детализовку, текстовые документы в виде различных ведомостей и спецификаций, а также комплекты фотошаблонов слоев МПП.

Эффективность машинных способов компоновки РЭА (являющихся частью системы автоматизации проектирования) повышается с увеличением возможностей для формального (в виде уравнений) описания конструкции, с ростом степени стандартизации схемных и конструкторских решений, при четкой иерархической структуре изделия в целом и частых повторях аналогичных разработок. Большая сложность и трудоемкость программного обеспечения, значительные затраты на аппаратуру делают нецелесообразным ее использование для нестандартных решений или в сравнительно простых случаях.

Эффективность методов машинной компоновки тем выше, чем выше жесткость иерархических конструкторских уровней РЭА (стойка, рама, панель, типовая элемент замены (ТЭЗ) с «гнездами» для ИС или дискретных ЭРЭ). Чем ограниченной их номенклатура, тем больше степень унификации схемных и технологических решений. Наиболее целесообразно использование системного подхода и решения не частных задач машинной компоновки, а машинного проектирования РЭА в целом. В противном случае эффективность применения машинной компоновки позволяет повысить производительность конструкторского труда всего на 8...10%. Машинная компоновка особенно эффективна при проектировании унифицированных блоков, построенных на стандартных или типовых составных частях: печатных платах, ячейках, узлах.

## 2. КОМПОНОВКА МОДУЛЕЙ И БЛОКОВ

### 2.1. КОМПОНОВКА И КОНСТРУКЦИИ ФЯ

При разработке РЭА часто говорят о модульном методе компоновки, понимая при этом совершенно различные понятия, поэтому и бытуют такие термины, как «модульный», «функционально-модульный», «модульно-ячеечный» и тому подобные методы компоновки.

В соответствии с определением, данным в работе [12], в широком смысле слова термин «модульный метод» надо понимать как совокупность принципов проектирования и конструирования, в основу которых заложено одно общее требование: так расчленить электрическую схему устройств на модули (ФУ, ФЯ, блоки), чтобы те были как функционально, так и конструктивно законченными и чтобы при этом их конструктивные размеры либо повторяли друг друга, либо были кратны одним базовым размерам, т. е. были унифицированными.

Наименьшую часть функциональной сборочной единицы составляет *модуль* (ячейка). Он состоит из минимального функционально оправданного числа элементов, решающих одну из задач преобразования. Функциональный принцип компоновки МЭА увеличивает возможность использования одних и тех же сборочных единиц в новых системах с неоднократно повторяющимся ФУ. Изменение конструкции одного узла не влечет за собой переделку других функциональных сборочных единиц и не вызывает изменения всего изделия и перестройки производства.

Далее остановимся подробнее на компоновке модулей (точ-

нее ФЯ) и блоков как наиболее трудоемких в процессе проектирования и изготовления МЭА.

В процессе проектирования ФЯ необходимо решить следующие задачи [14]:

выбрать вариант конструкции ячейки (рис. 2.1);

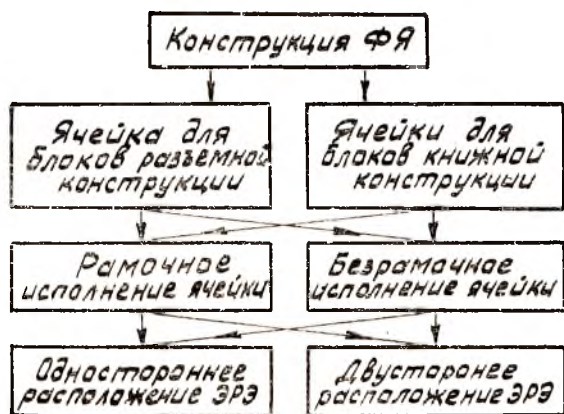


Рис. 2.1. Классификация возможных конструкций ФЯ

осуществить рациональную компоновку конструктивно-технологических зон на печатных платах ячеек;

выбрать типоразмеры печатных плат;

определить тип электрического соединителя;

выбрать элементы крепления, контроля и фиксации;

выбрать метод изготовления печатных плат;

выбрать компоновку микросхем, МСБ и других ЭРЭ на печатной плате;

обеспечить нормальные тепловые режимы;

защитить ячейки от механических перегрузок и т. д.

Рассмотрим первые две задачи. При разработке конструкции ФЯ к ней предъявляются следующие основные требования: максимальное использование унифицированных ИС, сборочных единиц и деталей конструкции;

применение навесных микроминиатюрных ЭРЭ, соизмеримых по габаритам с ИС;

повышенная интеграция применяемых ИС частного назначения;

возможность функционального контроля и контроля элементов без нарушения монтажных соединений;

обеспечение эффективной защиты ИС в ячейках от механических и климатических воздействий;

минимальное число и длина межсоединений ИС в ячейке;

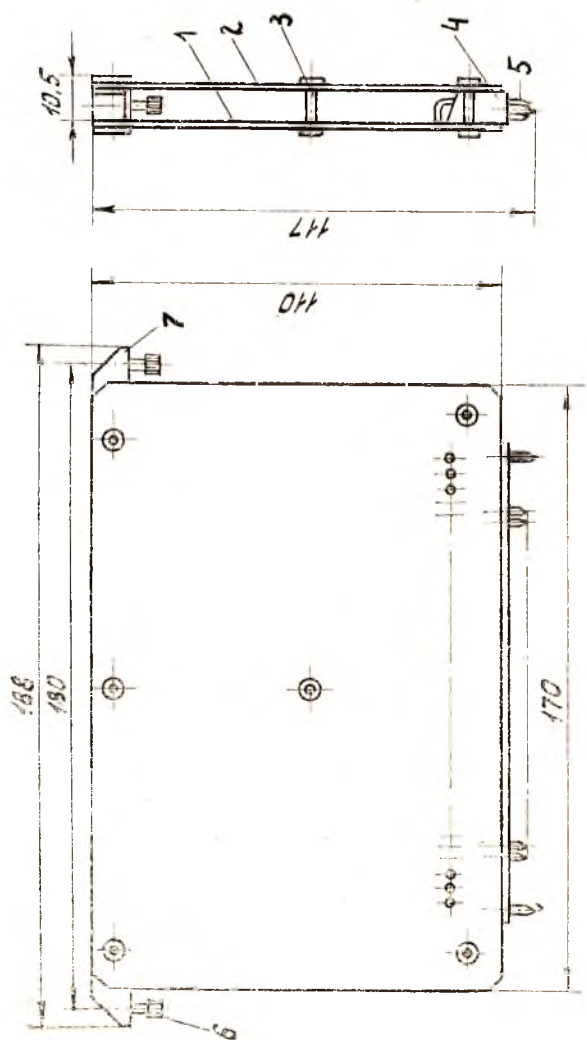


Рис. 2.2. Двухслойная кассета блока разъемной конструкции в безрамочном исполнении: 1 и 2 — печатные платы; 3 — колонка; 4 — вилка соединителя; 5 — штырь-ловитель; 6 — невыводящийся винт; 7 — накладка

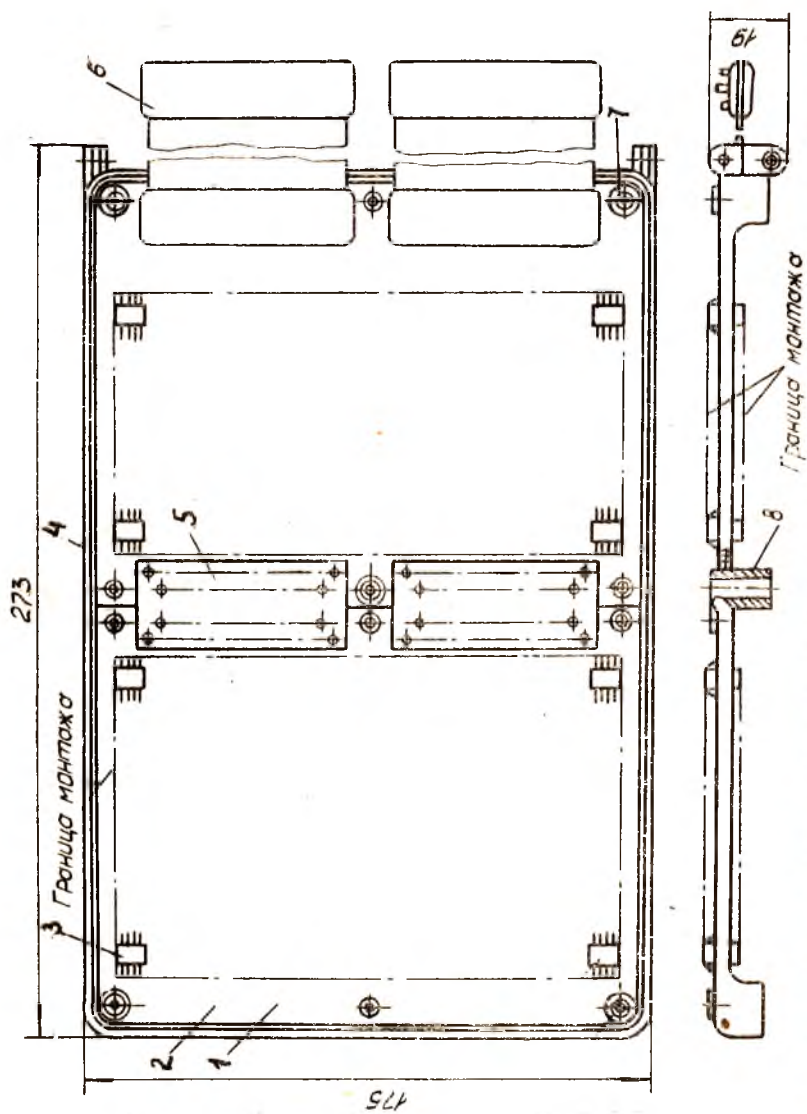


Рис. 2.3 Двухслойная кассета блока книжной конструкции в рамочном исполнении; 1, 2 — печатные платы; 3 — микросхема; 4 — рама; 5 и 6 — гибкий печатный кабель; 7 — пустотелая закладка; 8 — втулка

унификация размеров прямоугольной формы ячеек;  
 взаимозаменяемость одноименных ячеек по электрическим параметрам;

возможность автоматизации и механизации основных процессов изготовления, сборки и контроля.

Конструктивно функциональные ячейки могут быть выполнены в нескольких вариантах — с каркасом и без каркаса (см. рис. 2.1). На рис. 2.1 приведена классификация возможных конструкций, которая включает в себя помимо различных исполнений и различные варианты компоновки ЭРЭ на печатных платах ячеек.

На рис. 2.2 показана двуплатная ячейка в безрамочном исполнении, предназначенная для установки в блоках разъемной конструкции, а на рис. 2.3 двуплатная кассета в рамочном исполнении, предназначенная для применения в блоках книжной конструкции. Выбор того или иного конструктивного исполнения зависит от условий эксплуатации, тактико-технических требований на аппаратуру, обеспечения заданной технологичности, а также от учета технико-экономических показателей.

Для оптимизации компоновки ФЯ необходимо определить взаимосвязь между отдельными конструктивно-технологическими зонами, которые можно выделить на печатной плате ячейки. На рис. 2.4 показаны основные конструктивно-технологические зоны для одноплатной ФЯ в рамочном исполнении с печатными платами больших размеров, введены следующие обозначения:

$S$  ( $S'$  и  $S''$ ) — зона размещения микросхем, МСБ и др. ЭРЭ;

$S_1$  — зона установки электрического соединителя и его коммутации с зоной  $S$ ;

$S_2$  — зона расположения элементов крепления ячейки или элементов контроля;

$S_3$  и  $S_4$  — конструктивно-технологические зоны, предназначенные для установки ячеек в блок;

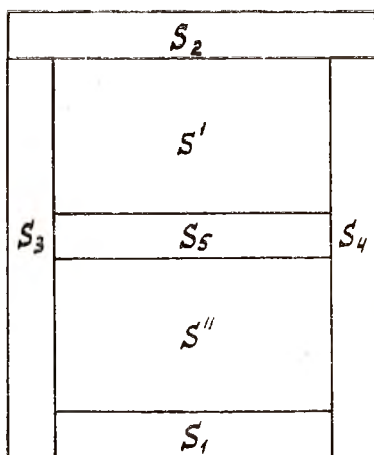


Рис. 2.4. Основные конструктивно-технологические зоны ФЯ

$S_5$  — зона дополнительных элементов крепления ячейки (элементы рамки, планки и т. п.).

Компоновка основных конструктивно-технологических зон в поперечном сечении ячейки представлена на рис. 2.5, где введены следующие обозначения:

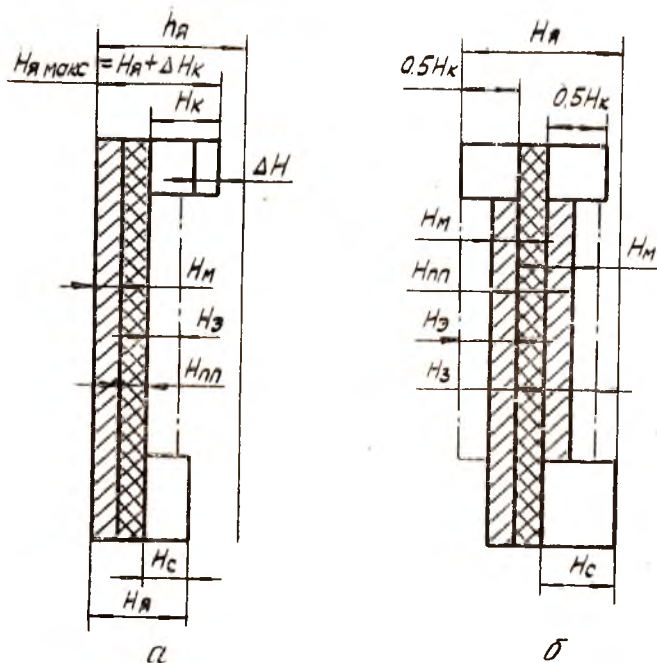


Рис. 2.5. Основные конструктивно-технологические зоны ФЯ при одностороннем (а) и двустороннем (б) расположении элементов

$H_{пп}$  — толщина печатной платы;

$H_с$  — высота электрического соединителя;

$H_э$  — высота элементов (микросхем, МСБ и других ЭРЭ);

$H_м$  — высота пайки элементов или высота механических элементов (рамки, крепеж и т. д.);

$H_к$  — высота элемента крепления или элемента контроля ячейки;

$h_я$  — шаг установки ячейки в блоке;

$H_я$  — высота ячейки при  $H_к < H_с$ ,  $H_я + \Delta H$  — высота ячейки при  $H_к > H_с$ .

Компоновку ФЯ начинают с выбора типа печатных плат (двусторонних или многослойных), что порой является наиболее важ-

ным в процессе проектирования и производства аппаратуры. Соответственно выбранный метод изготовления печатных плат определяет вариант установки элементов — односторонний или двусторонний. Односторонняя или двусторонняя установка элементов также определяется элементной базой, т. е. конструкцией корпуса с планарными или штырьковыми выводами.

Отличительной чертой конструкций МЭА четвертого поколения является применение в них БИС, СБИС, функциональных компонентов и микросборок. Часто используются бескорпусные МСБ при вакуумно-плотной герметизации и заполнении внутреннего объема инертным газом.

Для МЭА этого поколения характерна наибольшая плотность упаковки элементов в объеме, что ухудшает тепловые режимы, а следовательно, резко изменяет параметры и режим работы комплектованных изделий относительно расчетных значений и тем самым может приводить к уменьшению надежности. Для значительного увеличения теплопроводности внутри блока в ФЯ вводятся теплоотводящие шины. Они могут быть выполнены в виде значительных участков фольги на печатных платах, тонких металлических пластин, на которые устанавливаются бескорпусные микросхемы и МСБ, в виде металлических рамок с планками и т. п. Установка бескорпусной МСБ представлена на рис. 2.6.

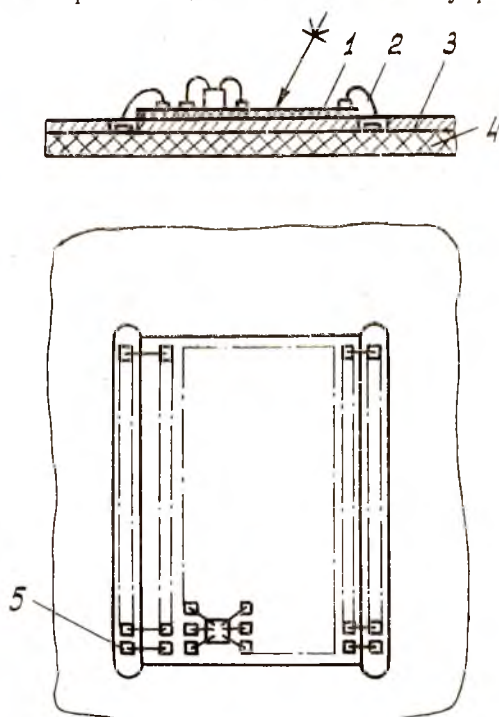


Рис. 2.6. Установка бескорпусной МСБ на металлическое основание: 1 — подложка МСБ с навесным компонентом; 2 — проводник, соединяющий внешнюю контактную площадку МСБ с контактной площадкой печатной платы; 3 — металлическая пластина; 4 — печатная плата; 5 — контактная площадка печатной платы

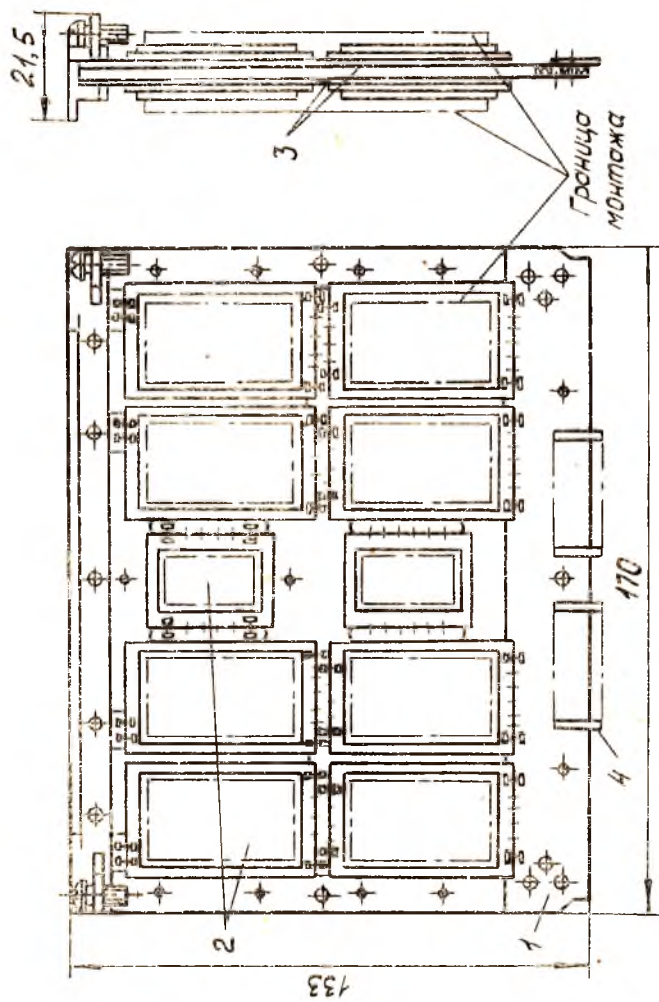


Рис. 2.7. Ячейка герметичного блока МЭА разъемной конструкции: 1 — печатная плата; 2 — бескорпусные МСБ; 3 — металлические шины — основания; 4 — лепестковый контакт соединителя

Типовая конструкция ФЯ герметичных блоков разъемной конструкции приведена на рис. 2.7. Она состоит из печатной платы, прикрепленной заклепками к металлическим шинам, на которых установлены бескорпусные микросборки. Для крепления ФЯ в блоке используется металлическая пружинная планка, которая имеет хороший тепловой контакт с металлическими шинами и корпусом. Электрический контакт с объединительной печатной платой блока осуществляется с помощью лепестковых контактов соединителя.

Для бортовой МЭА в качестве металлического теплоотводящего основания ФЯ используют раму из легких сплавов [14, 16]. Рама по контуру и в пределах контура перпендикулярно длинным сторонам имеет ребра жесткости и теплоотводящие шины толщиной 0,5—0,8 мм, на которых размещаются бескорпусные микросборки. Коммутация между ними осуществляется золотыми проволочками диаметром 30—50 мкм и длиной 3—5 мм, приваренных или припаянных с одной стороны к выводным контактным площадкам МСБ, а с другой — через окна рамки к язычкам металлизированных отверстий печатной платы, прикрепленной к рамке с тыльной стороны.

На рис. 2.8 показана конструкция аналогичной ячейки, выполненная по двусторонней компоновочной схеме. Широкая теплоотводящая шина в ней располагается вдоль рамки, бескорпусные микросборки приклеиваются к этой шине с двух сторон и соединяются по принципу непрерывной микросхемы. Коммутация производится либо непосредственно между внешними кон-

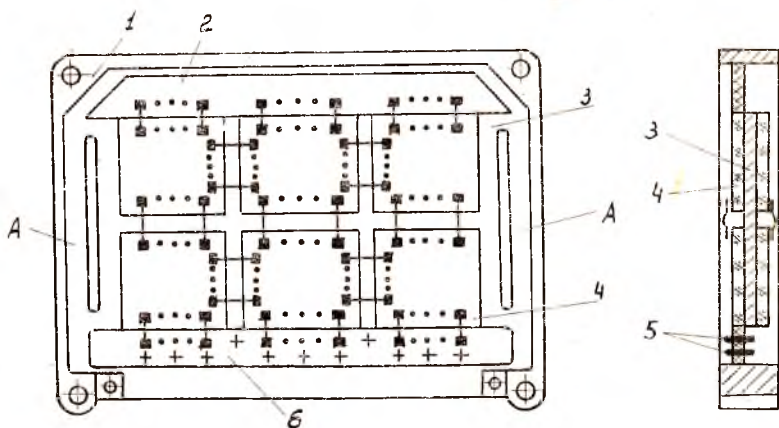


Рис. 2.8. Двусторонняя ячейка герметичного блока МЭА на металлической рамке: 1 — рамка; 2 и 6 — верхняя и нижняя печатные вставки; 3 — планка рамки; 4 — бескорпусная микросборка; 5 — штыри

лоотводящая шина в ней располагается вдоль рамки, бескорпусные микросборки приклеиваются к этой шине с двух сторон и соединяются по принципу непрерывной микросхемы. Коммутация производится либо непосредственно между внешними кон-

тактными площадками микросборок, либо через промежуточные печатные платы (вставки). Из двух односторонних рамок можно собрать сдвоенную ФЯ с использованием многослойных печатных плат. Межъячеечная коммутация в конструкциях типов, показанных на рис. 2.8, осуществляется либо с помощью гибкого шлейфа, либо с помощью гибкой матрицы проволоочно-жгутовым монтажом.

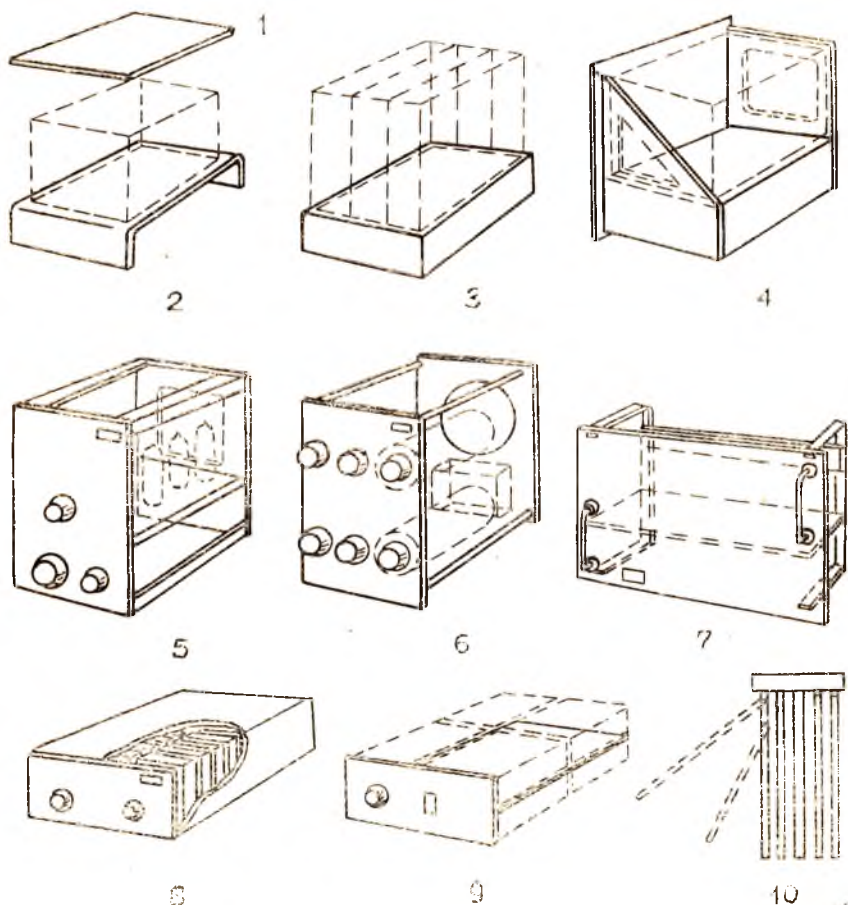


Рис. 2.9. Некоторые характерные компоновочные схемы блоков

Увеличение функциональной сложности ячеек приводит к обострению проблемы коммутации в пределах ФЯ и одновременно к обострению проблемы теплоотвода. Обе эти проблемы

успешно решаются путем применения нового конструктивно-технологического производства ФЯ [16], в котором функции теплоотвода несущей конструкции и подложки в большой гибридной ИМС объединены и выполнены в виде металлической (алюминиевой) платы, покрытой слоем анодного окисла, а функции коммутационной печатной платы — в виде системы гибких полиимидных пленок с нанесенными на них методом тонкопленочной технологии проводящими дорожками.

Коммутационные переходы с одной стороны гибкой платы на другую осуществляются системой металлизированных отверстий. Гибкие коммутационные платы присоединяют к анодированной алюминиевой подложке методом групповой пайки, для чего на подложке сформированы контактные площадки, покрытые припоем. На полиимидных гибких платах в соответствующих контактным площадкам местах имеются переходные металлизированные отверстия. При подогреве системы подложка — гибкие печатные платы в условиях вакуума (вакуумная пайка) припой поднимается по переходным отверстиям и, застывая, образует прочные коммутационные соединения и одновременно механическое крепление. Для изоляции между гибкими коммутационными платами используют прокладки из полиимидной пленки с системой отверстий в местах межслойных переходов.

Рассмотренные варианты конструкций ФЯ на металлическом основании характерны для цифровой МЭА, отличающейся однородностью структуры, конструктивной и схемотехнической совместимостью ее элементной базы. Для ФЯ аналоговой МЭА использование металлических конструкций имеет свою специфику. Так, для приемно-усилительных микроэлектронных устройств необходимыми условиями являются последовательное («в линию») расположение и многократное преобразование уровня входного сигнала, высокая добротность, помехозащищенность и стабильность частотно-избирательных узлов. Распространены [11, 14], пенальные конструкции таких ФЯ, имеющие удлиненный металлический корпус, служащий одновременно и теплоотводом, и экраном. Микросборки в ФЯ располагают по принципу непрерывной микросхемы [16] таким образом, что коммутация между ними осуществлялась по минимально коротким связям.

## *2.2. КОМПОНОВКА И КОНСТРУКЦИИ БЛОКОВ*

Компоновочные схемы блоков определяются количеством и видом составляющих элементов и их расположением. В настоящее время блоки РЭА, как правило, компонуются из субблоков вида печатных плат, на которых могут быть собраны весьма

сложные устройства из различных ФЯ (модулей), микромодулей и микросхем. На рис. 2.9 показаны характерные компоновочные схемы блоков. Схема 1 является простейшей, когда в качестве основы используются металлический или диэлектрический лист. Как правило, это печатные платы с установленными на них ЭРЭ или микросхемами. Схемы 2 и 3 используются в качестве несущих металлических конструкций для макетной, лабораторной и бытовой РЭА. На них могут устанавливаться как дискретные элементы, так и крупные модульные узлы. Соединяя такие конструкции с панелью, получаем компоновочную схему 4. В настоящее время такие компоновочные схемы используют обычно только для блоков питания, когда требуется достаточная жесткость конструкции и возможно расположение тяжелых трансформаторов и транзисторов с радиаторами сверху шасси, а остальных деталей — снизу.

Малый вес современных компонентов и ЭРЭ и требования к высокой доступности явились причиной широкого распространения двухплатных конструкций. Первая плата является передней панелью блока. Она соединена цилиндрическими, прямоугольными или уголковыми деталями с задней панелью, на которой обычно ставится разъем. Если используются компоненты типа длинных переключателей, а остальных деталей мало, то в таком блоке никаких промежуточных шасси или плат не делается, т. к. детали и монтаж укрепляются на выводах переключателей, панелей и т. п. (схемы 5 и 6). При необходимости могут быть установлены одно или несколько промежуточных плат-шасси из металла или изолятора (обычно являются печатные платы). Можно снять заднюю стенку и использовать П-образные скобы для обеспечения высокой доступности монтажа и элементов (схема 7). Модульные ФУ в таких блоках могут быть установлены в один или несколько этажей или рядов параллельно или перпендикулярно печатной плате с промежуточными соединениями (схемы 8 и 9). При вертикальной установке для повышения прочности конструкции используют дополнительные силовые элементы. Часто субблоки собирают в «книжную», (схема 10) или «верную» конструкции. При составлении или выборе компоновочных схем блоков необходимо помнить об обязательных вспомогательных элементах: ручках для вынимания и переноски, направляющих, фиксаторах, разъемах, защитных конструкциях монтажа и элементов и т. д. (см. п. 1.5).

Основная компоновочная форма блоков и узлов часто зависит от заданной формы приборов, стоек и контейнеров. Наиболее простой и технологичной формой принято считать плоскость или параллелепипед. Однако при размещении блоков в контейнерах или приборах, имеющих цилиндрическую или шаровую конфигу-

рацию, сегментная или призматическая форма по своей компактности может оказаться более выгодной. Так, для блоков бортовой и космической аппаратуры геометрическая форма их определяется формой отводимых под РЭА отсеков. На рис. 2.10 показаны компоновочные схемы авиационных приборов. Сложный многоблочный прибор (рис. 2.10,а) имеет амортизаторы, т. к. его центр тяжести находится на большой высоте. Отдельные блоки вдвигаются в специальные полочки и закрепляются легкоъемными замками или защелками. Передатчик (рис. 2.10,б) закрепляется на раме откидными болтами. Приемник (рис. 2.10,в) имеет легкооткрывающиеся замки-защелки. Генератор имеет неправильную форму из-за места в отсеке (рис. 2.10,г). Его волноводный тракт и низкочастотные разъемы расположены в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях.

Выполнение отдельных узлов или блоков в виде модулей позволяет унифицировать рамы сложных аппаратов или легко разбивать сложную систему на блоки с двумя стандартными размерами. Один из возможных примеров компоновки таких блоков показан на рис. 2.10,д. Характерной особенностью таких конструкций блоков является наличие легкого и открытого шасси, в которое вставляются ФУ (ячейки), располагаемые в продольном и поперечном направлениях.

Другим принципом конструктивного построения самолетной РЭА является компоновка с поворотными монтажными платами, выполненными печатным способом (касетный вариант конструкции). Характерной особенностью этого принципа является отсутствие несущего шасси, роль которого выполняют штанги с элементами крепления к ним плат. Такой принцип компоновки обеспечивает наименьшую металлоемкость конструкции, хороший доступ к элементам схемы для осмотра и проведения регламентных работ.

Следующей разновидностью конструктивного построения самолетной РЭА является разъемная конструкция и раскрывающихся блоков — книжная конструкция. Метод раскрытия обеспечивает доступ для осмотра без отключения схемы. Аппаратура в этом случае обладает хорошей ремонтпригодностью. В аппаратуре, состоящей из разнообразных функциональных частей и включающей разнохарактерные элементы, применяют смежный принцип компоновки с использованием различных конструктивных решений, выбор которых определяется частным подходом к оптимальному решению задачи общей компоновки.

При компоновке узлов и блоков МЭА на базе пленочных и полупроводниковых интегральных микросхем совершенно по-новому решается вопрос о нулевом структурном уровне РЭА. Микросхема служит наименьшей конструктивной составляющей и

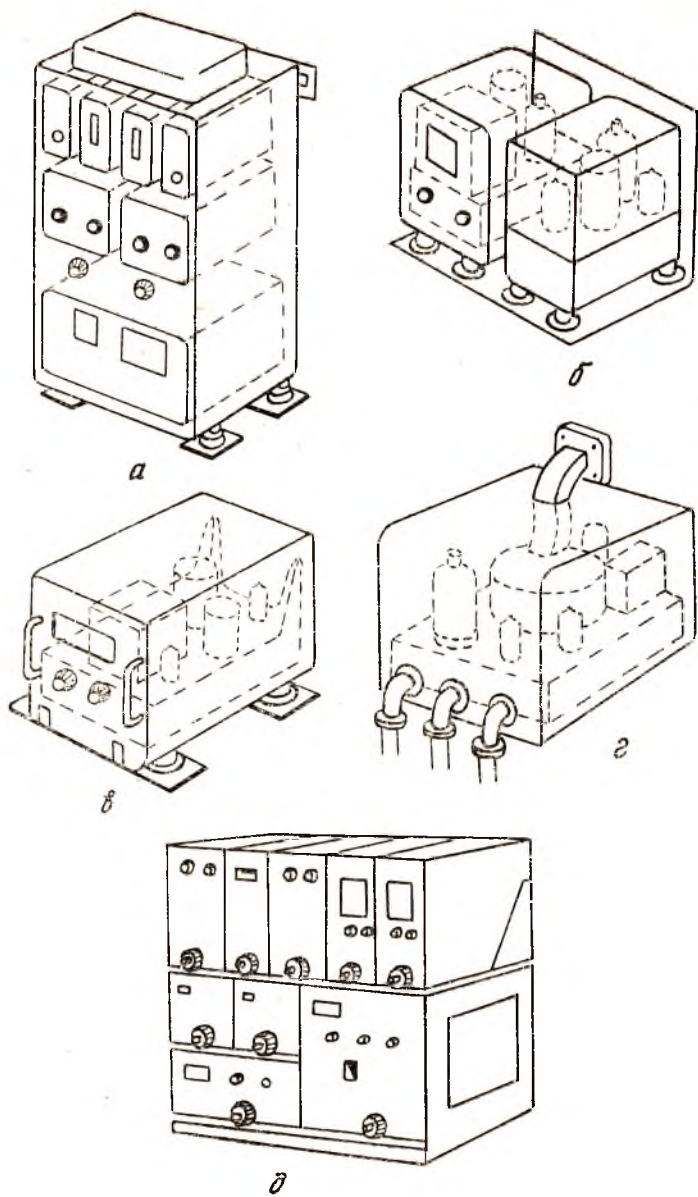


Рис. 2.10. Компонентные схемы авиационных приборов

используется наравне с дискретными элементами. Плотность размещения микросхем зависит от размеров монтажного поля, метода компоновки и степени интеграции. Широко используют следующие способы компоновки:

1. Микросхемы монтируют на печатной плате, установленной в металлическую раму, создавая таким образом первичную ячейку. Ячейки, собранные в галеты или кассеты по функциональным признакам, образуют узлы. Размещая узлы в отдельных защитных корпусах или на шасси, из них создают блоки, которые комплектуются в общую приборную стойку.

2. Ячейку создают, монтируя БИС на печатных платах вместе с навесными пассивными схемными элементами.

3. Компоновку ячеек производят с использованием бескорпусных СБИС, монтируя их на печатной плате с последующей установкой в общий герметичный корпус.

4. СБИС или БИС компонуют на общей подложке, соединяя их между собой перемычками непосредственно без печатной платы.

Выбор конкретной конструкции блока должен осуществляться с учетом следующих особенностей:

1. Достоинством «книжной» компоновки блоков МЭА являются высокая компактность, легкий доступ к микросхемам и МСБ при их ремонте, возможность проверки и отладки блока во включенном состоянии. Недостатком этого варианта в основном является затрудненный демонтаж ФЯ, что значительно увеличивает время ремонта блока при его разборке. «Книжная» конструкция чаще всего применяется для бортовых устройств с высокой надежностью, где требования уменьшения масс и габаритов являются первостепенными.

2. Достоинствами разъемной компоновки блоков РЭА являются легкосъемность ФЯ и, следовательно, высокие ремонтнопригодность и эксплуатационное обслуживание. Основными недостатками разъемной конструкции являются значительные потери массы и объема, обусловленные наличием самих разъемов, и повышенная частота отказов в их контактных парах. Несмотря на это, разъемная конструкция блоков нашла весьма широкое применение в МЭА наземного типа (ЭВМ, бытовая аппаратура, измерительная и др.).

3. Кассетная (веерная) компоновка блока обладает существенным недостатком, заключающимся в том, что при ремонте и проверке работоспособности кассета откидывается на шарнире вверх, что увеличивает длину проволочного монтажа — поэтому кассетная компоновка блока нашла весьма ограниченное применение в конструкциях МЭА.

Главными задачами разработки блока являются: выбор рационального варианта компоновки ячеек в блоке, обеспечение минимальной длины, массы и габаритов электрической коммутации, обеспечение нормальных тепловых режимов, защиты от воздействий внешней среды, снижение материалоемкости, стоимости. Необходимыми условиями выбора компоновочной схемы блока МЭА являются решение проблем унификации, типизации, упрощения конструктивных решений и технологии формообразования деталей блока. Элементы несущих конструкций блоков МЭА обеспечивают размещение, механическое крепление, защиту от дестабилизирующих воздействий ячеек, установку блоков в шкафах, стойках и стеллажах.

Рассмотрим влияние расположения зоны коммутации и ориентации ячеек на полезный объем блока. На рис. 2.11 представлены возможные схемы компоновки блоков. Суммарный объем блока можно представить как объем, занимаемый ячейками,  $V_1$  и объем, занимаемый элементами электрической коммутации и монтажными соединениями,  $V_2$  [4, 12]. Для рассматриваемых вариантов компоновки объемы, занимаемые ячейками и коммутационными элементами, будут следующими:

для вариантов *a* и *b*

$$V_1 = LH (B - B_{\text{к}}); \quad V_2 = LHB_{\text{к}};$$

для вариантов *в* и *г*

$$V_1 = L (H - H_{\text{к}})B; \quad V_2 = LH_{\text{к}}B;$$

для вариантов *д* и *е*

$$V_1 = (L - L_{\text{к}})HB; \quad V_2 = L_{\text{к}}HB.$$

В последних двух вариантах компоновки объем, занимаемый коммутационными элементами, будет наименьшим, а занимаемый ячейками — наибольшим, поэтому варианты *д* и *е* компоновки наиболее рационально использовать в аппаратуре; наименее же рациональны варианты *a* и *б*. Это условие вытекает из кратности сторон блоков РЭА. На практике в большинстве случаев выполняются условия

$$L > H; \quad L > B; \quad H > B,$$

отсюда

$$V_1^{д,е} > V_1^{в,г} > V_1^{a,б}; \quad V_2^{a,б} > V_2^{в,г} > V_2^{д,е}.$$

Для хорошего перемешивания воздуха внутри блока ячейки должны располагаться вертикально, поэтому варианты *б* и *е* компоновки на практике не используются.

Число ячеек в вариантах компоновок *a* и *в* получается больше, чем в вариантах *г* и *д*. Это вытекает из неравенства  $L/h_{\text{я}} > B/h_{\text{я}}$ , где  $h_{\text{я}}$  — шаг установки ячеек.

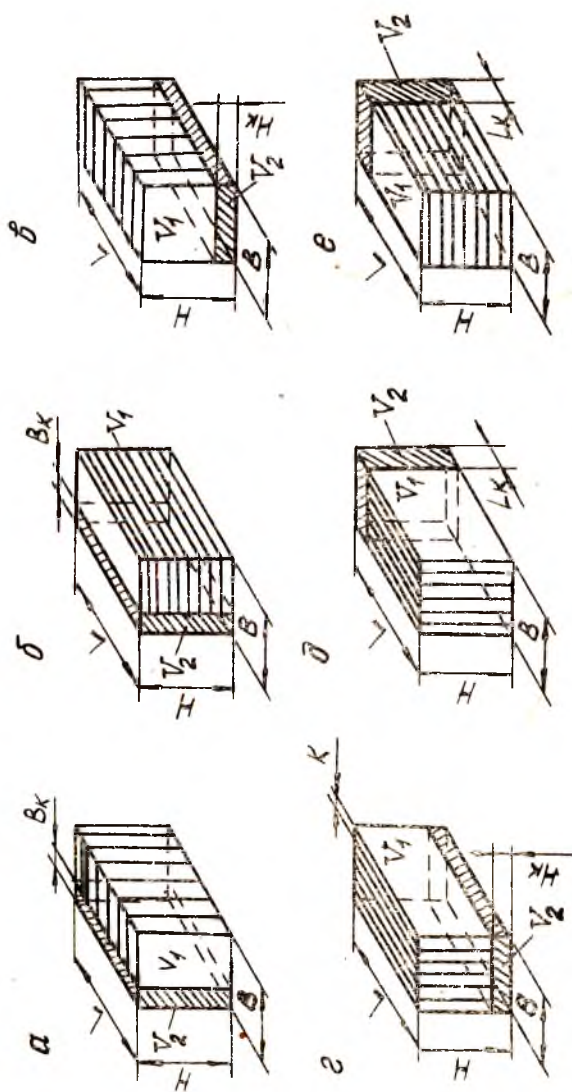


Рис. 2.11. Схемы компоновки блоков:  $L$ ,  $H$ ,  $B$  — длина, высота и ширина блока;  $L_k$ ,  $H_k$ ,  $B_k$  — части блока, занимаемые элементами внутриблочной коммутации

В «книжных» конструкциях блоков число «страниц» (ячеек) обычно бывает небольшим, что обусловлено невозможностью достаточного раскрытия ячеек. Поэтому в книжных конструкциях блоков используют варианты компоновки  $г$  и  $д$ , а в разъемных конструкциях блоков — варианты компоновки  $а$  и  $б$ . При окончательном выборе компоновочной схемы блока приходится идти на компромисс.

Соотношение геометрических размеров блока — длины, ширины и высоты — для каждого из рассмотренных вариантов компоновки определяет соотношение геометрических размеров ФЯ, а последние, в свою очередь, определяют длину электроомонтажных связей в ФЯ, ее помехоустойчивость, шаг установки ИМС. По данным [12] ширина блоков книжной конструкции не должна быть меньше 120 мм. Для блоков разъемной конструкции высота и ширина должны быть: для варианта компоновки  $а$  —  $H \geq 180$  мм,  $B \geq 120$  мм, для варианта  $в$  —  $H \geq 180$  мм,  $B \geq 180$  мм. При этом надо учесть, что электрические соединители в ячейках занимают в блоках зону, равную 25—35 мм, что увеличивает одну из сторон блока (в зависимости от выбранного варианта компоновки); жгутовые соединения, гибкие печатные шлейфы и коммутационные платы увеличивают размеры блока на 15—20 мм в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. Дополнительные конструктивные теплостоки (радиаторы, теплоотводящие шины, ребрение корпусов) также увеличивают габариты блоков на 20—25%. На размеры блоков влияют способ изготовления несущих конструкций и метод герметизации.

В процессе эскизного проектирования необходим системный подход с оценкой количественных абсолютных и относительных показателей качества конструкции блока (объема, массы, надежности, коэффициента дезинтеграции и др.). Методики расчета таких показателей даны в литературе [3, 15, 21]. В качестве примера рассмотрим варианты конструкций блоков самолетной РЭА.

На рис. 2.12 показана конструкция негерметичного разъемного блока самолетной аппаратуры на ИМС и микросборках, в которой ячейки расположены параллельно передней панели. Передняя и задняя панели, нижняя стенка и верхние направляющие образуют жесткий каркас блока. Индивидуальное крепление ячеек осуществляется невыпадающими винтами к верхней направляющей и нижней стенке. В целях обеспечения теплоотвода от ИМС и микросборок верхняя и боковые стенки отсутствуют. На задней панели блока располагается врубной соединитель типа РППМ. Ячейки имеют вилочную часть соедини-

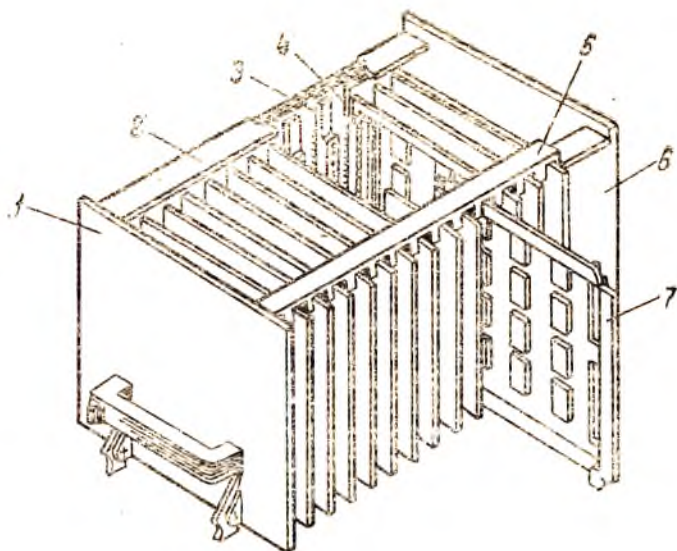


Рис. 2.12. Блок разъемного типа самолетной МЭА: 1—передняя панель; 2 — угольник; 3 — розетка соединителя РППМ26; 4 — объединительная плата; 5 — направляющая; 6 — задняя панель; 7 — ячейка с выключной частью соединителя РППМ26

теля и соединяются с монтажом блока через объединительную плату.

На рис. 2.13 представлен вариант блока самолетной аппаратуры «книжной» конструкции, состоящего из набора ячеек на бескорпусных БИС и микросборках, снабженных воздуховодами и установленных перпендикулярно передней панели блока. Передние и задние панели выполнены литьем под давлением из алюминиевого сплава АЛ9. Кожух блока сварной, выполнен из титанового сплава ВТ1-0 с покрытием Н12 с последующим горячим лужением припоем ПОС61. Боковые стенки кожуха имеют ребра жесткости.

Герметизация блока осуществляется пайкой кожуха с передней и задней панелями блока. На передней панели блока расположены разъем, герметизируемый через уплотнительную прокладку, трубка для откачки воздуха и заполнения блока сухим азотом, а также отверстия для подвода и отвода воздуха в коллектор воздуховода. На задней панели блока расположены штыри-ловители. Внутриблочные электрические соединения выполнены с помощью гибких печатных шлейфов и объединительной печатной платы. Отвод тепла от блока осуществлен с помо-

шью воздуха, подаваемого принудительным способом по герметичным воздуховодам.

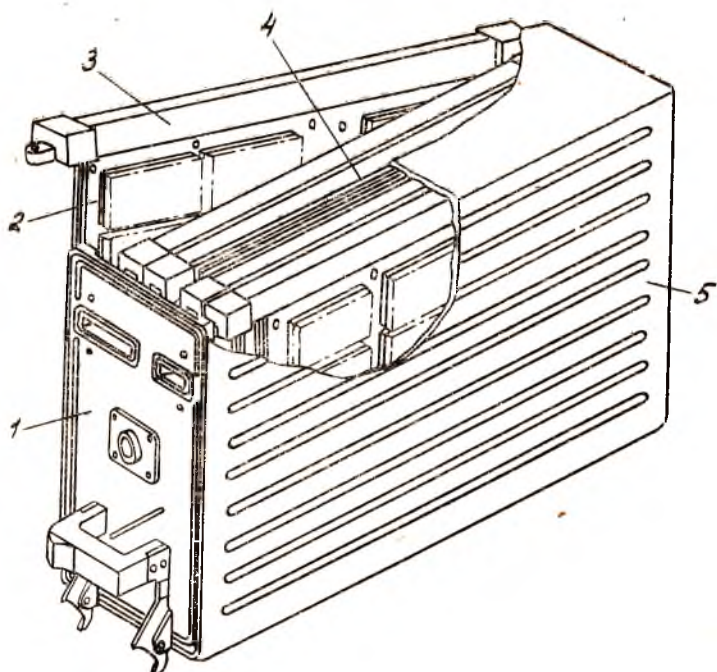


Рис. 2.13. Герметичный блок книжной конструкции самолетной МЭА: 1 — передняя панель; 2 — печатная плата с микросхемами; 3 — воздуховод; 4 — соединительная печатная плата с гибким печатным кабелем; 5 — кожух

Наиболее высокие показатели качества МЭА к настоящему времени достигнуты с применением конструктивно-технологического направления, основанного на использовании:

функциональных ячеек на металлическом основании, покрытом слоем диэлектрика с одним уровнем разводки поверх этого диэлектрика;

многослойных (до 10—12 слоев) коммутационных плат на полиимидной пленке с разводкой, выполненной по тонкопленочной технологии на обеих сторонах пленки с плотностью 6—8 линий/мм;

двусторонних гибких шлейфов с разводкой, выполненной по тонкопленочной технологии;

бескорпусных микросборок и БИС с высокими степенями интеграции, миниатюрных бескорпусных ЭРЭ, конструктивно совместимых с БИС, гибких носителей бескорпусных БИС;

герметичных, заполненных сухим инертным газом металлических блоков МЭА, обеспечивающих изоляцию МЭА от дестабилизирующих воздействий внешней среды на длительный период.

Однако в настоящее время проблемами компоновочных схем блоков МЭА являются:

конструктивно-технологическое исполнение электрических соединений, уменьшение их объема при росте функциональной сложности блоков;

миниатюризация и компоновочная совместимость элементной базы;

способы надежной и прочной герметизации блоков, включая герметизацию соединителей;

сокращение количества соединителей и их габаритов при одновременном увеличении числа каналов связи между блоками МЭА;

снижение материалоемкости конструкций МЭА, автоматизация и механизация особо трудоемких процессов проектирования и изготовления МЭА.

### *3. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПОНОВКИ РЭА*

#### *3.1. КОМПОНОВКА РЭА С УЧЕТОМ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ*

Эффективность разработки РЭА существенно повышается, если компоновка производится с учетом тепловых режимов, прочностных характеристик, электромагнитной совместимости и эксплуатационных факторов [6].

Учет тепловых режимов. Главной задачей после выполнения компоновочных чертежей является выбор способа теплоотвода от РЭА, которая обычно выполняется в виде одноблочного прибора или совокупности блоков прибора, содержащих от 10 до 500 греющихся элементов. В таких конструкциях при приближенных расчетах можно пренебречь теплопроводностью и излучением, т. к. наиболее распространенными являются следующие способы теплоотвода с помощью конвекции:

с естественной конвекцией внутри герметичных или уплотненных кожухов приборов;

с циркуляцией воздуха вентиляторами внутри герметичных или уплотненных кожухов приборов;

с естественной вентиляцией за счет перфорации шасси, дна и крышки;

с принудительной вентиляцией прибора, при которой воздух продувается через отверстия в противоположных стенках (сторонах) кожуха прибора. Методика теплового расчета приведена в работах [4, 8].

В общем виде количество тепла при конвекции вычисляется по формуле Ньютона

$$P = \alpha_k (t - t_c) S,$$

где  $P$  — количество тепла;

$\alpha_k$  — коэффициент теплоотдачи конвекцией;

$t, t_c$  — температура тела и среды;

$S$  — площадь.

Для блоков РЭА с высоким  $k_v$  и относительно малым временем работы необходимо учитывать их тепловую инерцию. При простом охлаждении или нагреве разницу между температурой блока и среды можно определить из выражения [10]

$$t - t_c = (t_0 - t_c) e^{-m\tau} + k \frac{P}{S} (1 - e^{-m\tau}).$$

где  $m$  — темп охлаждения ( $m = dS/C$ );

$\alpha$  — коэффициент теплоотдачи;

$S$  — поверхность охлаждения;

$C$  — полная теплоемкость;

$\tau$  — время;

$P$  — мощность потерь;

$k$  — коэффициент пропорциональности.

Необходимость применения в блоке той или иной системы охлаждения ориентировочно можно определить из следующих данных сравнительной эффективности систем охлаждения (рис. 3.1).

При компоновке блока с учетом тепловых режимов необходимо учитывать, что общая площадь дополнительных отверстий в шасси должна составлять 5—10% полной поверхности нагретой зоны, а площадь отверстий — 20—30% полной его поверхности. Дальнейшее увеличение площади отверстий не имеет смысла.

При помощи такой перфорации можно получить снижение  $t$  кожуха,  $t$  зоны на 20—30%, использование жалюзи несколько ухудшает условия теплообмена, и  $t$  кожуха,  $t$  зоны будут ниже лишь на 15—20% (это справедливо при нормальном давлении воздуха). Элементы с большими тепловыми потерями (мощные лампы, трансформаторы и т. д.) следует располагать

в верхней части конструкции и по внешнему периметру шасси, ближе к кожуху.

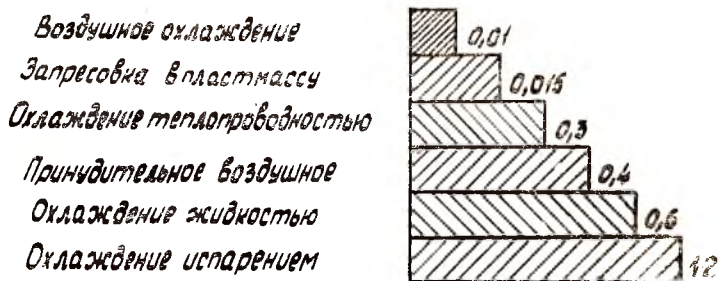


Рис. 3.1. Удельная мощность  $P_{уд}$  (Вт/см<sup>3</sup>), при которой эффективно данное охлаждение

При применении принудительного охлаждения необходимо предусмотреть свободный путь хладагента. Локальное охлаждение можно осуществить с помощью радиаторов, а защиту от тепловых потоков — экранами. Перспективно применение охлаждения при помощи эффекта Пельтье.

Учет электромагнитной совместимости сводится к соответствующему расположению узлов и их экранировки, необходимости применения развязывающих элементов в цепях питания, например, нельзя располагать близко задающий и выходной каскады передатчиков и т. д. Для моноблоков необходимо выполнять все те требования компоновки, что и для узлов.

С учетом прочностных характеристик блока компоновка будет зависеть от необходимой жесткости и прочности конструкции.

Крепление узлов можно рекомендовать в таких точках, где действующая сила будет направлена вдоль осей крепления, а ограничивающие степень свободы плоскости и точки должны быть оптимально размещены.

Как правило, исходными данными для прочностного расчета являются вес блока, платы, шасси; количество и место креплений; механические воздействия по техническим условиям.

Среднее значение силы в момент удара определяется уравнением

$$P_{ср} = \frac{m V_2 + m V_1}{\tau} = \frac{G (V_2 + V_1)}{g \tau},$$

где  $m$  — масса тела;

$V_2$  — скорость тела в конце удара;

$V_1$  — скорость тела в начале удара;

$\tau$  — продолжительность удара;  
 $G$  — вес тела;  
 $g$  — 9,81 м/с.

В случае падения изделия с высоты  $H$   $V_1 = \sqrt{2gH}$ . Скорость  $V_2$  можно определить из соотношения  $\frac{V_2}{V_1} = k$ , где  $k$  — коэффициент восстановления, зависящий от упругих свойств тела и препятствия (например,  $k = 0,65$  для стали).

Длительность удара  $\tau$ , как правило, требует точного экспериментального подтверждения. Сила, действующая на изделие в момент падения, определяется выражением  $F = G' \frac{P_{ср}}{G}$ , где  $G'$  — вес тела, на которое действует сила  $F$ . Сила, действующая на один винт (присоединение винтами)  $F' = F/n$ , где  $n$  — число витков.

Необходимый диаметр винта находят из уравнения

$$\frac{4F'}{\pi d^2} \leq R_{\text{доп}} \quad \text{или} \quad d = \sqrt{\frac{4F'}{\pi R_{\text{доп}}}},$$

где  $d$  — диаметр винта;

$R_{\text{доп}}$  — допустимая нагрузка среды (для стали  $R_{\text{доп}} = 12$  кг/мм).

Сила, возникающая при вибрации, равна:

$$F'' = \frac{G' \pi j^2 A}{q'}$$

где  $j$  — частота вибрации;

$A$  — амплитуда вибрации;

$q'$  — условие при вибрации.

Толщина стенок кожуха, шасси, лицевой панели, платы межсоединений определяется из выражения

$$h = \sqrt[3]{\frac{0,0284 q \cdot a^4}{E \cdot \Delta \cdot [1 + 1,056 (a^5/b^5)]}},$$

где  $q$  — нагрузка, распределенная по площади ( $q = P/S$ );

$a$  и  $b$  — размеры шасси, платы или кожуха;

$\Delta$  — допустимый прогиб;

$E$  — модуль упругости для данного материала (для АМцА  $E = 7200$  кг/мм).

Эксплуатационные факторы. При компоновке РЭА необходимо учитывать как состав внешних эксплуатационных воздействий, так и их количественный уровень. Наиболее распространенными из них являются:

внешние тепловые воздействия, задаваемые диапазоном возможных значений температуры окружающей среды и скоростью изменения температуры во времени;

уровень максимально возможной относительной влажности атмосферы при заданной температуре;

наличие в атмосфере химически агрессивных веществ (например солей морской воды);

наличие в атмосфере взвешенных твердых частиц с различной дисперсностью и скоростью движения (пыль, песок и т. д.);

климатические условия, при которых возможно воздействие биологических факторов (плесени, грибов, насекомых и т. п.);

пониженное атмосферное давление среды вплоть до глубокого вакуума в открытом космосе;

внешние механические воздействия, проявляющиеся в виде вибраций (периодических и случайных), ударов (одиночных и многократных), ускорений (линейных и центробежных).

Помимо перечисленных внешних воздействий на изделие оказывают влияние и внутренние факторы, определяемые особенностями функционирования аппаратуры, используемой элементной базой и принципами построения конструкции. Это внутреннее тепловыделение конструкции, создающее дополнительный перегрев элементов над окружающей средой; внутренние паразитные электрические, магнитные и электромагнитные связи между составными частями конструкции, не предусмотренные принципиальной схемой, а также механические воздействия, возникающие в результате функционирования подвижных частей конструкции (вибраторы, двигатели, динамические громкоговорители большой мощности и т. п.).

### *3.2. ПРОЦЕСС КОМПОНОВАННЯ*

В целях правильной компоновки с учетом знаний принципов и последовательности компоновки (см. п. 1.5.), ее методов (см. п. 1.6.) необходимо вырабатывать наилучшую стратегию. Известно, что среди многих интуитивных стратегий для данного класса задач есть только одна, которая без перехода на другие стратегии обязательно приведет к наилучшему решению, а все другие для данного класса задач являются вариантами этой ключевой (генеральной) стратегии за счет свертывания отдельных ее процессов. Такое сокращение промежуточных процессов и замена их результатами-догадками уменьшает время и трудоемкость поиска и увеличивает вероятность получения совсем не лучшего решения. Чем крепче навыки конструктора в пользовании ключевой стратегией, тем меньше вероятность ошибки в решении при ее «свертывании».

Для студентов и начинающих конструкторов может быть рекомендована стратегия, условно названная «от содержания к форме», используемая тогда, когда предъявляются жесткие

требования к габаритам и массе и в то же время нет каких-либо ограничений на форму [2]. Процесс компонования РЭА по этой стратегии состоит из следующих этапов:

подготовительные работы (определение состава конструктивов, оценка габаритов, определение компоновочных взаимодействий);

поиск наилучших вариантов размещения конструктивов;

поиск наилучшего варианта компоновки изделия.

*Компоновочные взаимодействия* определяются, когда уже известны габаритные размеры всех конструктивов: ЭРЭ, ФЯ, ФУ и их групп, которые выступают как целое — элемент размещения или компоновочный конструктив (К). В любой РЭА среди К есть главный, в котором протекает процесс, непосредственно обеспечивающий выполнение изделием его функции; остальные К прямо или косвенно обеспечивают работу главного К. Главный К всегда является ядром, вокруг которого группируются другие К.

Необходимо, пользуясь ЭЗ, выявить и оценить взаимодействия между всеми К и затем установить наименее трудоемкий порядок процесса поиска варианта размещения при сохранении высокой вероятности получения на основе этого варианта наилучшей конструкции изделия.

Задача размещения К сводится к отысканию [17].

$$\Phi = \min \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \Phi_{ij} (X, Y, Z); (X, Y, Z) \in G,$$

где  $\Phi_{ij}$  — функция затрат (стоимость, масса и т. д. на взаимное размещение двух конструктивов  $i, j$ );

$(X, Y, Z)$  — координаты полюсов размещенных К;

$G$  — область допустимых решений, определенная условиями взаимного их непересечения.

Наиболее часто возникают следующие виды компоновочных затрат:

на организацию функциональных связей между К;

на конструктивную привязку друг к другу несовместимых К. Несовместимость устраняется либо удалением друг от друга несовместимых К, либо установлением экранов, дополнительной изоляцией и т. п.;

на защиту или экранирование К, несовместимых с окружающей средой;

на несущие конструкции (каркас, корпус и др.), обеспечивающие определенное взаимное расположение К;

на элементы прикрытия и защиты всего изделия (кожух, оболочка, футляр и др.);

Приведенный перечень видов компоновочных затрат не претендует на исчерпывающую полноту, а в отдельных случаях может иметь место только часть этих затрат.

*Поиск наилучших вариантов размещения К* делается в несколько шагов, число последних определяется числом К в изделии. При решении этой задачи необходимо установить очередность размещения К возле ядра, которая определяется в несколько шагов. Воспользуемся следующими определениями [2]. *Кортеж* — упорядоченное в пространстве согласно какой-то структуре множество всех конструктивов изделия, являющееся основой разработки компоновочного чертежа. *Компоновочное взаимодействие* (КВ) — взаимодействие между К, зависящее по величине и направлению от их конструкций, физической природы протекающих в них процессов и от их взаимного размещения.

При поиске наилучшего варианта размещения К могут использоваться методы: аналитический, графический, натуральный, машинный (см. п. 1.6.). При размещении К необходимо учитывать области пространства, необходимые для теплообмена, прокладки соединительных цепей (СЦ). перемещения К при их ремонте, установки экранов и пр. Это позволяет оценить габаритные размеры будущего изделия.

В основе всех рассматриваемых алгоритмов лежит принцип «многошаговый синтез-анализ-синтез». Поиск наилучшего полного кортежа состоит из ряда последовательных шагов пригонки к ядру К всех других К [i], упорядоченных по величине КВ (рис. 3.2). На первом шаге ( $i=1$ ) к ядру  $K_0$  пригоняется К [i], тяготеющий к нему более других, и получается несколько неполных кортежей, из которых отбрасываются явно наихудшие по требованиям ТЗ. На втором шаге каждый неполный кортеж первого шага вместе со вторым К [i] ( $i=2$ ) снова дает начальный массив неполных кортежей, из коих опять отбрасываются наихудшие и т. д. Таким образом, на каждом  $i$ -м шаге (процесс 4) получают массив кортежей  $R[i] = \{r[a, i]\}$  как итог пространственных размещений  $i$ -го К [i] с каждым кортежем из массива, полученного на ( $i-1$ )-м шаге. В конце концов, на  $n$ -м шаге получается один или несколько неразличимых между собой полных кортежей  $R_1[n] = \{r[a, n]\}$ . Если на каком-то шаге ни один из кортежей не соответствует ТЗ (процессы 5 и 7), то конструктором предлагается, и после экспертной комиссии принимается, решение об изменении условий конструирования: требований ТЗ, технологии или организации производства предприятия-изготовителя, расширение номенклатуры используемых ЭРЭ, ИС, МСБ и материалов и др. В общем случае на каком-то шаге построения кортежей не всегда удается выделить

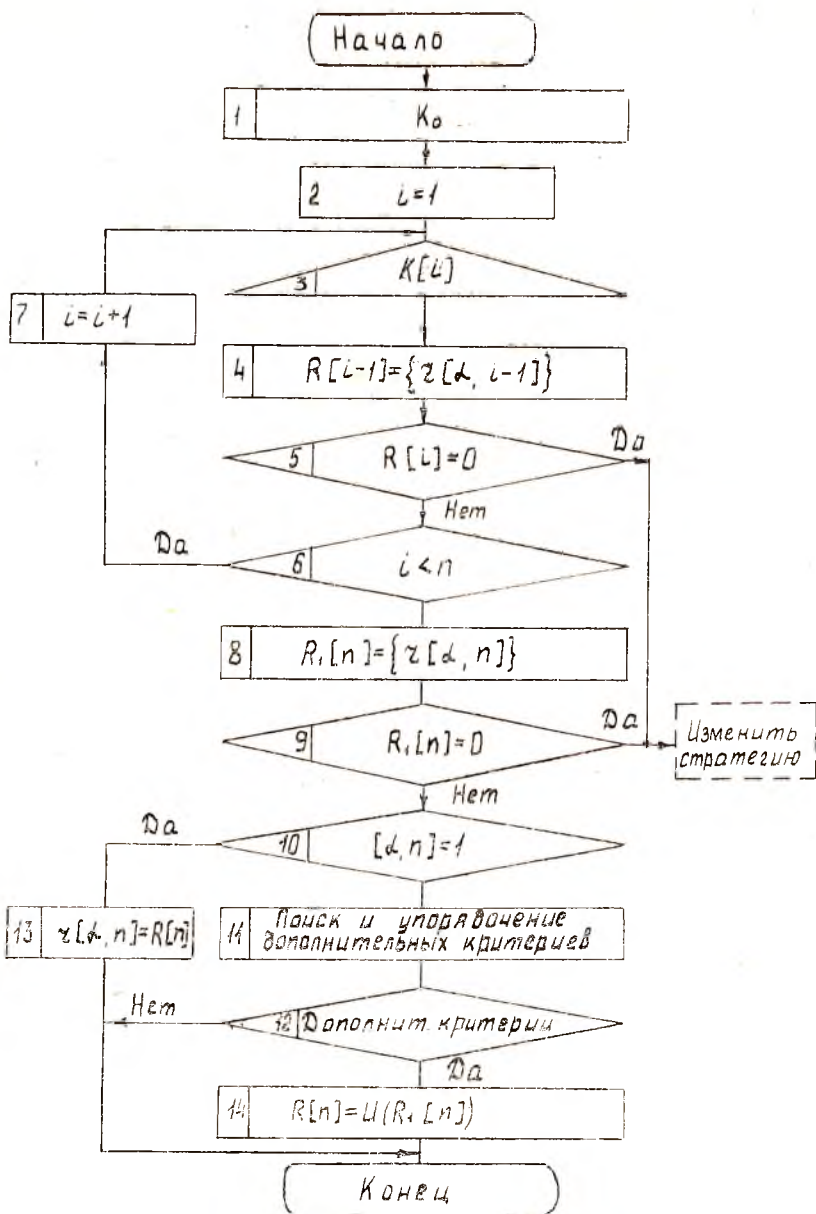


Рис. 3.2. Алгоритм поиска наилучших вариантов размещения конструктивов

определенно единственный кортеж, который обязательно привел бы, при прочих лучших условиях, к наилучшей конструкции изделия; может быть получено несколько полных кортежей, неразличимых по ТЗ (процесс 8). Тогда конструктор изыскивает дополнительные критерии и упорядочивает их по весомости (процессы 11, 12). Если дополнительные критерии найдены, то, сравнивая относительно них полные кортежи, конструктор еще раз отбрасывает наихудшие, оставшиеся  $R[n] = U(R[n])$  становятся основой для дальнейших компоновочных работ.

При компоновке К любого РЭА конструктор, как правило, придерживается ряда инвариантов.

1. Мощность массива кортежей на каждом шаге ограничена:

КВ очередного К с ядром и другими К исходного кортежа (кортежа предыдущего шага);

областями приложения КВ и конструктивными характеристиками К (расположение входа, выхода, потенциальными и тепловыми областями и др.);

фрагментами скелета изделия, число которых по ходу размещения К растет, их образы уточняются и, объединяясь, усложняются (фрагменты-детали преобразуются во фрагменты-сборки);

формой и габаритами К и в первую очередь ядра.

2. Кортежи не должны быть зеркальными отражениями других ранее образованных кортежей.

3. Кортежи не должны повторяться.

4. Необходимо предвидеть возможные последствия КВ конструктивов с теми К, с которыми еще предстоит образовать кортежи.

Поиск наилучшего варианта компоновки. Исходными данными для поиска наилучшего варианта компоновки являются: ТЗ, ЭЗ  $R \in R[n]$ . На основе полного кортежа  $R$  в воображении конструктора возбуждается некий массив прообразов. *Прообраз* — это понятийное и ориентированное в пространстве зрительное представление изделия, содержащее указание на вид формы (куб, цилиндр и др.) и приблизительные отношения габаритных размеров. Он является субъективным откликом сознания конструктора на требования ТЗ и представляет собой динамический мыслительный комплекс, изменяющийся в процессе конструирования в направлении все большей определенности, к образу-идее. Чем богаче опыт творческого конструирования, тем мощнее и разнообразнее массив начальных образов. Обычно ими могут быть:

принципы построения конструкций в виде образа-понятия или образа-идеи;

виды структур конструкций;  
способы перемещений составных частей для ремонта, на-  
стройкой;

конструкции-аналоги: где-то когда-то увиденное, изделия,  
сконструированные ранее самим конструктором или его колле-  
гами.

Алгоритм поиска наилучшего варианта компоновки пред-  
ставлен на рис. 3.3. Из начального массива прообразов исклю-  
чаются очевидно не соответствующие ТЗ, а оставшиеся упорядо-  
чиваются в пределах массива  $A = \{a[\beta]\} = U(A')$ ,  $\beta = \overline{1, l}$ . Из  
массива прообразов (процессы 3, 4, 5) извлекается какой-то  
один, например первый ( $\beta = 1$ ), и на его основе через последо-  
вательные преобразования «синтез-анализ-синтез» конструктор  
находит наилучшее компоновочное решение по  $a(\beta)$ :

$$t'[\beta] = \Theta : (a[\beta]) .$$

Проверяется (процессы 6, 7), все ли прообразы получили  
конструкторскую проработку. Из массива (процессы 8, 9) ко-  
мпонированных изделий по всем прообразам из  $A$

$$T' = \{t'[\beta]\}$$

выбираются и упорядочиваются наилучшие и неразличимые  
между собой по требованиям ТЗ

$$T = \{t[\gamma]\} = U_1^{\ominus}(T'), \gamma = \overline{1, m} .$$

Если наилучшая компоновка (процессы 10, 11) одна ( $\gamma = 1$ ),  
то конструктор приступает к разработке на ее основе сборочно-  
го чертежа. Если наилучших компоновок (процессы 12, 13, 14)  
несколько ( $\gamma \neq 1$ ), то конструктор пытается изыскать дополни-  
тельные критерии и упорядочивает их по весомости, а затем от-  
носительно них выбирает наилучшую компоновку:

$$t = U_2^{\ominus}(T) .$$

Изыскать дополнительные критерии здесь уже легче, чем  
при размещении  $K$ , так как сравниваемые компоновочные ре-  
шения значительно ближе к конечному конструктивному виду  
изделия, и поэтому они достовернее указывают на те прогнози-  
руемые свойства изделия, по которым оценивается его качество.

В основе процесса компонования чаще всего лежат следую-  
щие логико-психологические операции: структурные построения  
по аналогу или по контрасту; структурные построения путем пе-  
рекомбинаций; функциональные преобразования по аналогу  
или по контрасту; смешанные построения и преобразования пу-  
тем перекомбинаций. Названные операции в разных творчес-  
ких процессах могут сочетаться как друг с другом, так и с дру-  
гими тактиками.

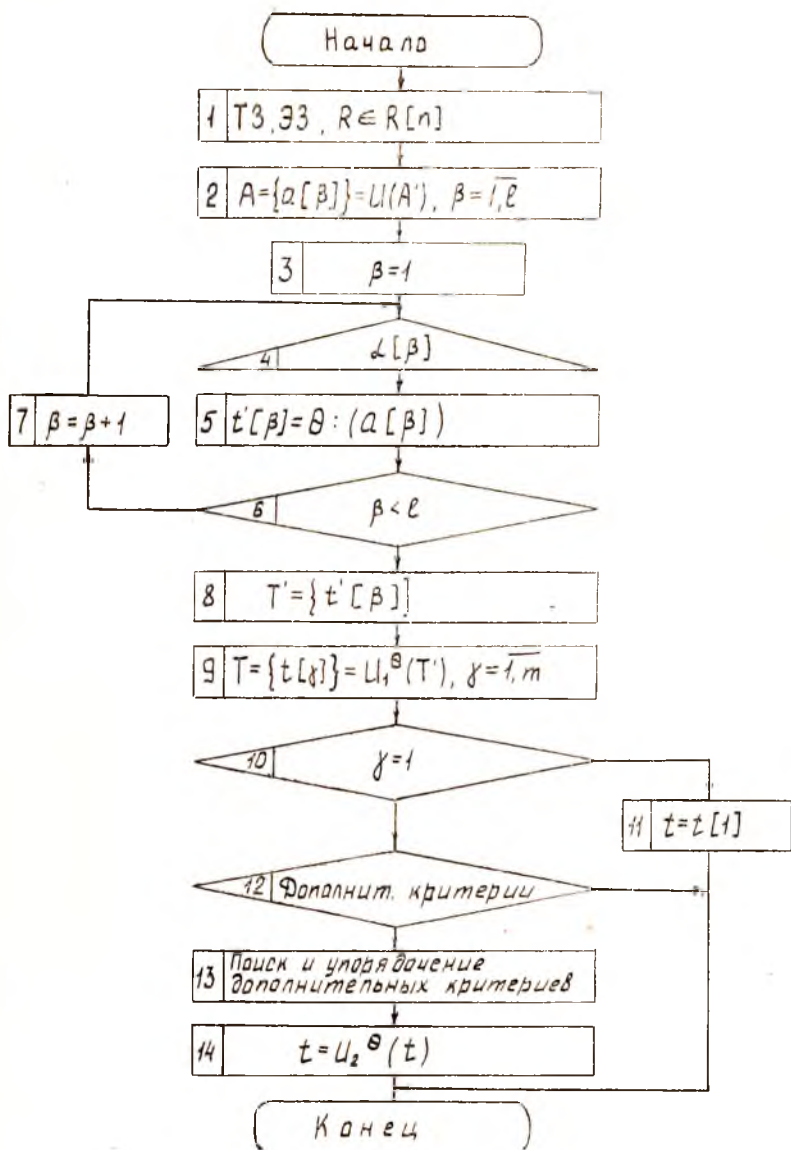


Рис. 3.3. Алгоритм поиска наилучшего варианта компоновки

### 3.3. ПРИМЕНЕНИЕ ГИБКОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

При выполнении оптимальной компоновки модулей различных структурных уровней РЭА конструктор должен знать производство, на котором она будет изготавливаться. Так, при больших размерах партий однотипных деталей, модулей выгодно использовать жесткие автоматические и роторные линии станков. В условиях индивидуального производства единичных изделий целесообразно использование универсального или уникального оборудования, обслуживаемого высококвалифицированным персоналом. Промежуточное положение между этими двумя видами производства занимают ГАП. Их выгодно использовать при размерах партий в несколько сотен штук и разнообразии номенклатуры от единиц до сотен разных деталей, т. е. к этому виду изделий полностью относится РЭА.

ГАП — это качественно более совершенный этап в комплексной автоматизации производства, основанный на широком применении современного программно-управляемого технологического оборудования, микропроцессорных управляюще-вычислительных средств, роботов и промышленных робототехнических систем (РСС), средств автоматизации проектно-конструкторских, технологических и плано-производственных работ и работающих по принципу гибко перестраиваемой технологии. ГАП представляет собой организационно-техническую производственную систему, позволяющую в мелкосерийном номенклатурном производстве заменить (с минимальными затратами и в короткий срок) выпускаемую продукцию на новую, с лучшими показателями качества, путем перестройки технологического процесса за счет замены управляющих программ.

Отличительной особенностью ГАП по сравнению с нынешним мелкосерийным и единичным производством является то, что ГАП может обеспечить выполнение основных известных принципов, характерных для массового поточного производства (непрерывность, ритмичность и пропорциональность), в условиях мелкосерийного многономенклатурного производства. Основой ГАП является широкое использование систем числового программного управления и электронных вычислительных и управляющих машин для управления технологическими процессами и оборудованием, а также для автоматизации всех проектно-конструкторских и расчетных работ, необходимых для функционирования ГАП.

В отечественной электронной и приборостроительной промышленности большое внимание уделяется автоматизации сборочных процессов, которые наименее освоены средствами ГАП

по сравнению с металлообработкой. Изделия микроэлектроники в виде микропроцессоров и больших интегральных схем достигли такого уровня сложности и миниатюрности, что стало невозможно применять ручной труд в их производстве. Поэтому именно в данной области наблюдается большой прогресс в широком использовании роботов и ГАП при автоматизации сборки МЭА, т. е. это характерный пример того, как усложняющиеся требования производства диктуют необходимость развития гибкой автоматизации и роботизации.

Структура и принципы построения гибких производственных систем. В соответствии с ГОСТ 26228-84 термин «гибкая производственная система» (ГПС) применяется как обобщающий для обозначения гибких производственных модулей и комплексов, комплексно-автоматизированных гибких линий, участков, цехов и заводов. Эквивалентные ГПС термины: АТК — автоматизированный технологический комплекс; ГАК — гибкий автоматизированный комплекс; ГАС — гибкая автоматизированная система; ГАПС — гибкая автоматизированная производственная система. За рубежом наибольшее распространение получил термин FMS — *Flexible Manufacturing Systems* (гибкие производственные системы).

ГПС — это совокупность нескольких единиц технологического оборудования и комплекса подсистем, обеспечивающих его функционирование в автоматическом режиме, а также автоматизированную переналадку на производство новых изделий в пределах определенных вариаций их геометрических параметров и других характеристик. В состав ГПС входит основное обрабатывающее программно-управляемое технологическое оборудование, средства автоматизации вспомогательных операций (контрольных, транспортных, складских) и система управления производственным процессом. По полноте охвата производственных функций и ступени их автоматизации ГПС разделяют на несколько структурных уровней (рис. 3.4).

*Первый уровень* — гибкий производственный модуль (ГПМ), состоящий из единицы основного технологического оборудования с ЧПУ. Модуль реализует одну или несколько технологических операций, может функционировать автономно или в составе комплекса, многократно выполняя заданные технологические циклы обработки (сборки) изделий, может встраиваться в ГПС более высокого уровня. В состав средств автоматизации ГПМ входят накопители заготовок и обработанных деталей, устройства загрузки—выгрузки, замены инструмента и технологической оснастки, подачи материалов и удаления отходов, автоматического контроля изделий и диагностики состояния оборудования, его переналадки и настройки.

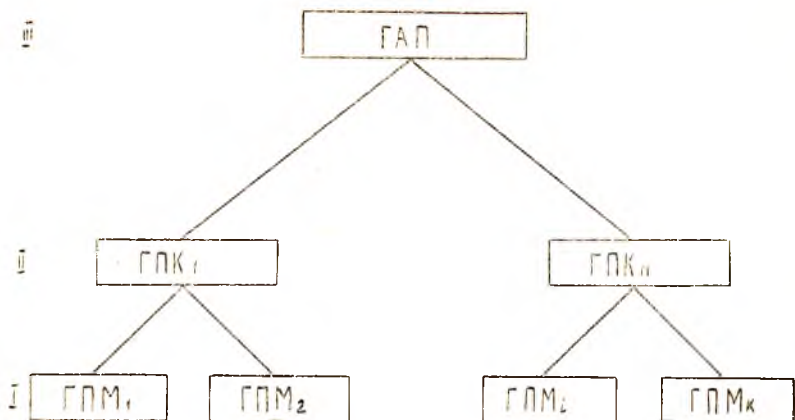


Рис. 3.4. Структурные уровни ГПС

*Второй уровень* — гибкий производственный комплекс (ГПК), состоящий из нескольких ГПМ, реализующих окончание технологического процесса. Модули объединены двумя автоматизированными системами — управления и транспортно-накопительной. ГПК функционирует в автоматическом режиме в течение заданного времени (смена, сутки) может встраиваться в ГПС более высокого уровня.

*Третий уровень* — гибкое автоматизированное производство: производственная система, состоящая из одного или нескольких ГПК, объединенных АСУ производством и автоматизированной транспортно-накопительной системой, автоматизированной системой инструментального обеспечения (АСИО), системами автоматизированного контроля и удаления отходов. С помощью ГАП осуществляется автоматизированный переход на изготовление новых изделий.

По масштабам и организационной структуре производственного процесса различают несколько типов ГПС: гибкий автоматизированный участок (ГАУ), гибкая автоматизированная линия (ГАЛ), гибкий автоматизированный цех (ГАЦ) и гибкий автоматизированный завод (ГАЗ). Высокая гибкость любой производственной системы весьма условна. Она достигается лишь при ограниченной номенклатуре изделий и требует предварительной подготовки производства с проектированием технологических процессов, подготовкой управляющих программ для станков с ЧПУ, проектированием и изготовлением необходимого технологического оснащения.

Области рационального применения ГПС различных уровней автоматизации (гибкости) в значительной мере зависят от технико-экономических показателей производства и характеристик обрабатываемых изделий. Границы целесообразного использования ГПС различных уровней автоматизации показаны пунктиром на рис. 3.5, где по абсциссе в логарифмическом масштабе отложено количество типоразмеров деталей в номенклатуре производства, а по ординате — объем годового выпуска деталей одного типоразмера. Зоны 2, 3, 4 принадлежат к области предпочтительного использования ГПС. Большую часть действующих ГПС можно отнести к 3-й области применения, т. е. к се-

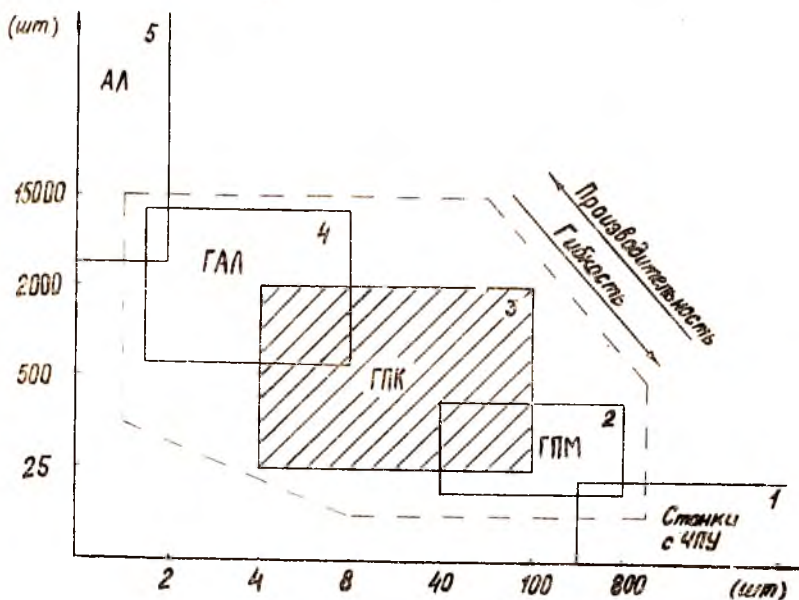


Рис. 3.5. Области рационального перемещения ГПС

рийному производству. Во 2-й области преобладают ГПМ, которые меньше по размерам и более ограничены по технологическим возможностям, чем ГПК, относящиеся к 3-й области. В перспективе области применения ГПС должны непрерывно расширяться, охватывая как массовое, так и единичное производство. В зависимости от типа конкретного производства (частоты изменения выпускаемой продукции, изменения технологического процесса, колебания объема выпуска) рациональные варианты ГПС будут иметь различия.

Особенности компоновки РЭА в условиях ГАП определяются технологическим оборудованием. Совершенствование систем

программного управления технологическим оборудованием и появление промышленных роботов сделали возможными последующие шаги в создании комплексных средств автоматизации. Так возник новый тип элементной гибкой технологии — гибкие производственные системы (ГПС) и робототехнические комплексы (РТК). Основой ГПС стали многооперационные станки с ЧПУ или обрабатывающие центры, а базовыми элементами РТК — промышленные роботы. Быстрое распространение ГПС получили в механообработке, свойственной машиностроительным отраслям промышленности. Преимущества РТК особенно очевидны при использовании их в сборочной технологии.

**Сборочные робототехнические комплексы.** Как правило, сборочный процесс — наиболее трудоемкая часть технологического процесса производства изделий, поэтому автоматизация сборочного процесса является одним из наиболее эффективных путей увеличения производительности промышленных систем.

Создание сборочной системы связано с решением ряда задач: определение допустимых капиталовложений и трудовых затрат на создание сборочной системы;

выбор метода сборки;

определение состава оборудования;

выбор методов планирования и управления материальными потоками;

выбор методов контроля деталей, изделий и оборудования.

Наиболее трудоемкими являются задачи выбора методов сборки и определения состава оборудования.

Операция автоматической сборки состоит из двух основных этапов:

транспортировка и размещение (подача) деталей в устройстве позиционирования;

позиционирование и сопряжение деталей в сборочный узел.

На каждом этапе возможно использование либо роботов, либо специализированных сборочных головок, что определяется характером техпроцесса. Так, существуют операции, требующие сложных манипуляций (дуговая сварка по контуру, трассировка проводки по пространственной траектории). В них целесообразно применение манипуляторов с программным управлением. Некоторые операции по позиционированию и сопряжению деталей нельзя осуществить без дополнительного технологического оборудования. К числу таковых относятся операции с применением больших усилий, например: запрессовка деталей, а также заливание, точечная сварка и т. д.

Сборочное оборудование включает всевозможные вспомогательные устройства подачи, транспортировки, ориентации, а

также технические средства, выполняющие непосредственные технологические сборочные операции. Одним из наиболее удобных способов организации подачи деталей для сборки является применение магазина деталей. Магазины предназначаются для размещения деталей перед манипулятором в заданной ориентации, а также для разделения операций ручной транспортировки деталей и машинного цикла обработки [20]. Магазин осуществляет дополнительные функции межоперационного буфера, что позволяет сбалансировать отклонения временных циклов процесса и темпов заготовительного механообрабатывающего и сборочного производства и устройства фиксации деталей для уменьшения риска их повреждения во время транспортировки.

Работы, применяемые в сборочных операциях, могут быть четырех функциональных категорий [19]:

*вспомогательные роботы для транспортировки деталей*, под-сборки между сборочными постами, загрузки-разгрузки сборочных единиц. Использование роботов для этих операций упрощает конструкцию подающего устройства. Основными операциями при этом являются: палетизация — перенос деталей из одной точки пространства во множество точек, упорядоченных в виде матрицы, и депалетизация — перенос деталей из множества точек пространства в одну точку;

*изолированная сборочная машина*. Обычно применяются простые роботы для несложных сб. операций (позиционирование-посадка детали и т. п.);

*сборочный центр* — для сборки деталей в мелкосерийном производстве без межоперационной транспортировки деталей. Как и в обрабатывающих центрах, здесь достаточно сложные процессы выполняются на одном рабочем месте. Могут быть использованы один, два и большее число роботов, имеющих автоматическую смену захватных устройств и инструмента;

*гибкие сборочные линии с роботами* — для автоматизации сборки в среднесерийном производстве со значительным числом модификаций изделий (для сборки печатных плат, видеомагнитофонов, печатающих устройств и т. д.). Базовые конфигурации сборочных роботов общего назначения приведены.

**Контроль и диагностика изделий.** Высокий уровень автоматизации, внедрение роботизированных рабочих мест для осуществления процесса контроля и диагностики изделий в ГАП позволяют использовать координатные контрольно-измерительные машины (КИМ), управляемые от ЭВМ, для контроля геометрических параметров. По сравнению с другими средствами контроля КИМ наряду с сокращением времени, трудоемкости, ошибок процесса измерения имеют такие преимущества, как возможность комплексного контроля качества, автоматическое

получение результатов замеров, которые могут быть отражены на различных носителях информации и средствах индикации ЭВМ. Конструктивно современная КИМ представляет собой агрегат, в состав которого входят механическая часть; система ощупывания; система измерения; системы приводов и управления перемещением механических частей машины; система обработки результатов обмеров.

В состав ГПС входят автоматические КИМ для контроля изготовления на станках с ЧПУ деталей сложных форм, пространственно сложных поверхностей. КИМ позволяют определить форму детали, неизвестные размеры, проконтролировать соответствие параметров изготовленной детали эталонным. Исполнительным органом (ИО) являются щуповые измерительные головки высокой чувствительности, которые могут быть механическими, оптическими, электронными точечными и электронными непрерывными.

Создание ГПС становится целесообразным, если для действующего производства характерны один или несколько следующих признаков:

среднее количество наименований деталей в номенклатуре производства колеблется в пределах 5...100, а конфигурация деталей сохраняется неизменной при изменении размеров;

выпускаемые изделия или входящие в их состав детали и сборочные единицы часто подвергаются конструктивным изменениям;

объемы партий выпускаемых изделий колеблются, изменяются технологические процессы их изготовления;

значительную часть номенклатуры составляют близкие по размерам и форме детали и сборочные единицы, которые могут быть унифицированы;

время обработки определенной группы деталей настолько длительно, что задерживает окончательную сборку изделий;

требуемая точность обработки детали может быть достигнута лишь при полной обработке с одного станова;

увеличение объема выпуска изделий при малых производственных мощностях и невозможности их увеличения для установки дополнительного оборудования.

Уже сегодня видны основные преимущества внедрения ГПС. повышается качество продукции; сокращается производственный цикл изготовления изделий; уменьшается доля незавершенного производства, что позволяет сократить площади складских помещений; улучшаются условия труда работающих; исключается субъективный фактор в управлении производственным процессом.

Рассматривая процесс конструирования как системный процесс (см. гл. 1), необходимо подчеркнуть следующие его особенности:

многообразие и большой объем конструкторских задач, высокие требования к точности результатов;

значительная трудоемкость, а следовательно, и длительность выполнения как отдельных решений, так и всей совокупности конструкторских работ;

трудности многокритериальных задач оптимизации;

сложность математического описания взаимосвязанных физических процессов, определяющих функциональные свойства конструкции РЭА;

многообразие конструкций РЭА, что дополнительно усложняет модели;

сложная взаимосвязь всего комплекса вопросов конструирования РЭА, приводящая к появлению обратных связей между отдельными этапами конструирования и итерационными процедурами принятия решений.

Перечисленные особенности процесса конструирования (компонования) могут рассматриваться как объективные предпосылки комплексной автоматизации конструирования и изготовления РЭА в условиях ГАП.

Следует дополнительно принять во внимание, что:

РЭА является объектом конструирования, который характеризуется быстрым моральным старением принимаемых решений.

РЭА, как правило, является объектом конструирования устойчивой (по заданиям на проектирование) номенклатуры с достаточной частотой поступления технических заданий (этим, в частности, гарантируется многократность использования САПР-К, необходимая для окупаемости затрат на ее создание и последующее развитие);

синтез конструкции РЭА в САПР-К получает дополнительные, принципиально новые возможности, реализация которых позволит повысить качество конструирования. Например, к таким можно отнести решение конструкторских задач на единой, обобщенной имитационной математической модели (см. п. 1.3).

Существенными препятствиями как для сборки ФЯ, ФУ, так и окончательной сборки изделий в условиях ГАП, являются:

для классической автоматизированной сборки систем слишком небольшое количество изделий и слишком большое число вариантов и типов изделия;

большие расходы на подготовку деталей (правильная установка, заполнения);

задача «сборка» включает в себя не только соединение деталей в чистом виде, но и множество таких сопровождающих функций, как контрольные, подгоночные и ремонтные работы, которые с большим трудом поддаются автоматизации;

при окончательной сборке суммарное накопление допусков на отдельные детали затрудняет автоматическое соединение отдельных частей;

автоматизация сборочных операций всякий раз связана с новыми проблемами; несмотря на широкое применение стандартных деталей доля специальных конструкций в автоматизированных сборочных системах все еще очень велика;

в производственной цепочке сборка занимает последнее место, в связи с чем на нее приходится наибольшее число изменений, поэтому ГАП требует повышенных расходов на планирование и обеспечение приспособляемости;

часто речь идет о сложных изделиях, для сборки которых необходимы перемещения по многим осям и у которых на одно место сочленения необходимо накладывать много деталей, причем в сборочные узлы с жесткими допусками приходится либо вводить детали, не поддающиеся позиционированию, либо осуществлять сборку в условиях ограниченного пространства;

часто отсутствуют точные места захвата или закрепления, например плоскости;

во многих случаях приходится иметь дело с деталями, которые трудно включить в процесс автоматической сборки (гибкие элементы);

применяются соединительные элементы с точными допусками для элементов с грубыми допусками.

Если названные пункты рассмотреть подробнее, то можно объединить их под общим названием «Конструкции, не соответствующие технологии сборки», выражая этим главное препятствие на пути экономически целесообразной высокой степени автоматизации в области сборочных работ.

В качестве основных рекомендаций в направлении создания технологичной в отношении сборки РЭА можно указать следующие:

1. Стандартизация конструктивных узлов, целью которой является ограничение количества вариантов конструктивных узлов.

2. Стандартизация мест сочленения: детали, даже если они имеют различное исполнение для различных типов продукции, должны иметь одинаковые места присоединения и единые элементы соединения с другими деталями. Этим достигается возможность взаимозаменяемости отдельных конструктивных узлов для различных типов изделий и возможность осуществлять сборку с помощью ГПМ.

3. Единообразие сборочных направлений: для снижения требований к универсальности ГПМ необходимо иметь единообразное сборочное движение вертикально сверху вниз.

4. Сборка при использовании простейших движений; это требование в совокупности с п. 3 ведет к существенному снижению технических расходов на ГПМ, ГПК.

5. Замена резьбовых соединений соединениями на фиксаторах: винтовые соединения требуют очень много отдельных процессов (ориентация винтов, подготовка, отделение друг от друга, подача, проверка, установка, ввертывание, затягивание) и высокой точности позиционирования соединяемых деталей. Поэтому автоматизация винтовых соединений связана с большими расходами и требует высокого качества соединяемых деталей. Исходя из сказанного, винтовые соединения, если это возможно, следует заменять простыми самоцентрирующимися штифтовыми соединениями.

6. Исключения гибких и «запутанных» деталей: с гибкими элементами конструкций (рукава, провода и кабели). Поскольку автоматическое манипулирование невозможно, то такие элементы следует заменить жесткими деталями.

7. Уменьшение числа собираемых деталей: всюду, где это возможно, отдельные детали и ФУ должны поступать на сборку в собранном виде.

8. Уменьшение объема окончательной сборки за счет выделения новых основных конструктивных узлов: на стадии окончательной сборки часто затруднительно манипулировать чувствительным к захватам и не имеющим допуска поверхностей изделием из-за сложной его конфигурации. К тому же на стадии окончательной сборки имеется большое количество вариантов. Размеры конструктивных элементов также вызывают многочисленные проблемы. По этим причинам многие сборочные работы из окончательной сборки целесообразно переводить в предварительную сборку отдельных ФУ.

9. Применение деталей с постоянно высоким качеством: обычные 2% деталей или стандартных элементов, не соответствующих заданным размерам или имеющих заусенцы, немедленно выявляются при ручной сборке, однако при автоматической сборке приводят к останову сборочного устройства и снижают эффективность ГАП.

10. Облегчение сборки за счет фасок и направляющих (по возможности следует исключить парные детали с узкими допусками).

11. Обеспечение на соединяемых деталях отчетливо выраженных мест для крепления, захвата и позиционирования.

Таким образом, конструкторы должны отдавать себе отчет в том, какие последствия могут иметь даже незначительные конструкторские мероприятия для стоимости сборочного автомата (робота). Внедрение конструкций, отвечающих требованиям технологии сборки, требует совместной работы разработчика, конструктора, технолога и изготовителя прежде всего на стадии компоновки, в целях своевременного разрешения всех проблем, которые позже, на стадии производства, уже не могут быть решены или для их решения необходимы дополнительные большие затраты.

В основном отсутствие конструкций, соответствующих требованиям технологии сборки, может рассматриваться как основная причина того, что в настоящее время еще многие проекты автоматизации не имеют экономически целесообразной реализации.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Базовый принцип конструирования РЭА. (Е. М. Парфенов, В. Ф. Афанасенко и др. — М.: Радио и связь, 1981. — 120 с.
2. Боданов Г. М. Процесс компонования РЭА. Учебное пособие. — Л.: ЛЭТИ, КПИ, 1985. — 48 с.
3. Варламов Р. Г. Компоновка радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Сов. радио, 1975. — 352 с.
4. Гель Н. П., Иванов-Есипович Н. К. Конструирование и микроинтеграция радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. — Л.: Энергоатомиздат. Ленинград. отделение. 1984. — 536 с.
5. Гроднев И. И. Электромагнитное экранирование в широком диапазоне частот. — М.: Связь, 1972.
6. Гут И. И. и др. Повышение эффективности конструирования радиоэлектронной аппаратуры. — Львов, 1982.
7. Дендобренко Б. Н., Малика А. С. Автоматизация конструирования РЭА: Учебник для вузов. — М.: Высшая школа, 1980. — 384 с.
8. Дульнев Г. Н., Тарновский Н. Н. Тепловые режимы РЭА. — М.: Энергия, 1971.
9. Евтюхин Г. А. и др. Компоновка РЭА на магнитных матрицах. — М.: Сов. радио, 1974. — 88 с.
10. Конструктивно-технологические особенности изготовления гибридных БИС на гибком основании / Г. А. Блинов, А. М. Грушевский, С. К. Дмитриева и др. — Электронная промышленность, 1979, вып. 5, с. 31—39.
11. Конструирование микроселекционной аппаратуры / Под ред. Б. Ф. Высоцкого. — М.: Советское радио, 1975. — 120 с.
12. Компоновка и конструкция микроселекционной аппаратуры. Справочное пособие. / Под ред. Б. Ф. Высоцкого, В. Б. Пестрякова, О. А. Петлина — М.: Радио и связь, 1982. — 208 с.
13. Математический аппарат теории конструирования РЭА: Учебное пособие / В. И. Пономарев. — Харьков: Харьковский авиац. ин-т, 1984. — 61 с.
14. Микроселекционная аппаратура на бескорпусных интегральных микросхемах / Под ред. И. Н. Вожежина — М.: Радио и связь, 1985. — 264 с.

15. Морозов К. К., Одинокое В. Г. Использование ЭЦВМ при конструировании некоторых узлов радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Сов. радио, 1972. — 104 с.

16. Основы проектирования микроэлектронной аппаратуры / Под ред. Б. Ф. Высоцкого. — М.: Сов. радио, 1978. — 351 с.

17. Одинокое В. Г. Математические модели конструкций РЭА. — М.: Московский институт радиотехники, электроники и автоматики. 1978. — 57 с.

18. Пахомов В. В., Чекарев А. И. Компоновка лицевых панелей. — Куйбышев: КуАИ, 1985.

19. Робототехника и гибкие автоматизированные производства. В 9-ти кн. Кн. 1 И. М. Макаров. Системные принципы создания ГАП: Учеб. пособие для вузов. — М. Высшая школа, 1986. — 175 с.

20. Сафраган Р. Э. и др. Технологическая подготовка производства для применения с ЧПУ. — Киев: Техника, 1981.

21. Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования / Под ред. В. Г. Варламова — М.: Сов. радио, 1980. — 480 с.

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

Предисловие . . . . .	3
1. ОСОБЕННОСТИ И МЕТОДЫ КОМПОНОВКИ РЭА . . . . .	5
1.1. Особенности и задачи компоновки при кон- струировании РЭА . . . . .	5
1.2. Конструктивная иерархия и основные направ- ления конструирования РЭА . . . . .	10
1.3. Математическая модель компоновки . . . . .	14
1.4. Основные показатели качества компоновки . . . . .	18
1.5. Принципы и последовательность компоновки . . . . .	22
1.6. Методы компоновки . . . . .	29
2. КОМПОНОВКА МОДУЛЕЙ И БЛОКОВ . . . . .	35
2.1. Компоновка и конструкции ФЯ . . . . .	35
2.2. Компоновка и конструкции блоков . . . . .	45
3. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПОНОВ- КИ РЭА . . . . .	55
3.1. Компоновка РЭА с учетом дестабилизирую- щих и эксплуатационных факторов . . . . .	55
3.2. Процесс компонования . . . . .	59
3.3. Применение гибкого автоматизированного производства . . . . .	66
3.4. Конструкция РЭА как объект автоматизации в условиях ГАП . . . . .	73
Библиографический список . . . . .	76

Св. план 1987, поз. 953

*Петр Ефимович Молотов,  
Анатолий Николаевич Чекмарев*

КОМПОНОВКА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ  
АППАРАТУРЫ В УСЛОВИЯХ ГИБКОГО  
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Редактор Е. Д. Антипова  
Техн. редактор Н. М. Каленюк  
Корректор Н. С. Куприянова

Сдано в набор 31.09.87 г. ЕО 00379.  
Подписано в печать 24.11.87 г.  
Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная.  
Литературная гарнитура. Высокая печать.  
Мсл. п. л. 4,65. Уч.-изд. л. 4,6. Заказ 1032. Т. 500 экз.  
Цена 15 к.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт им. академика С. П. Королева,  
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

---

Тип. ЭОЗ КуАИ, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18