

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР**

**ЛЕНИНГРАДСКИЙ ИНСТИТУТ АВИАЦИОННОГО
ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

КОНСТРУИРОВАНИЕ РЭА

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К
ЛАБОРАТОРНОМУ ПРАКТИКУМУ**

Часть II

**ЛЕНИНГРАД
1985**

Составитель: доцент, канд. техн. наук АРТЕМЬЕВА Н. Г.
Рецензенты: —кафедра микроэлектроники и технологии радиоаппаратостроения — ЛИАП;
доцент кафедры № 25 Саломасов В. В.

Разработка предназначена для выполнения лабораторного практикума по курсу «Конструирование РЭА» студентами специальности «Конструирование и технология производства радиоэлектронной аппаратуры» и включает методические указания и описания работ.

Подготовлена к публикации кафедрой Конструирования и управления качеством РЭА ЛИАП по рекомендации методической комиссии радиотехнического факультета.

©Ленинградский институт авиационного приборостроения ЛИАП (1985)

Подписано к печати 17.12.85
Объём 5,0 п. л. УЧ.-изд. л. 5,0
Заказ 870

Формат 60Х90 1/16
Тираж 150 экз.
Бесплатно

РАБОТА №4 изучение конструкторско-технологических ОСОБЕННОСТЕЙ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ.

Цель работы: «изучение конструктивно-технологических особенностей и конструирование (разработка) печатной платы функционального узла согласно заданным исходным данным.

Методические указания.

Назначения и типы печатных плат

Печатные платы (ПП) представляют собой конструктивные узлы, на поверхности которых расположены плоские проводники различной конфигурации.

ПП предназначены для реализации электрических соединений между различными элементами РЭА. На основе ПП можно получить электрические соединения с совершенно различными габаритными размерами и сочетаниями рисунков проводящих слоев в зависимости от вида разрабатываемой РЭА, ее структурной схемы, типа соединяемых элементов и их взаимного расположения. В зависимости от количества проводящих слоев ПП можно разделить на односторонние, двухсторонние (ДПП) и многослойные (МПП).

Для радио и телевизионной РЭА чаще используют односторонние ПП. ДПП применяют для повышения плотности упаковки ЭРЭ и микросхем в функциональных узлах. МПП применяют для существенного повышения плотности упаковки при разработке бортовой РЭА.

Конструктивно-технологические требования на ПП.

Конструктивные и технологические параметры ПП весьма разнообразны. Основные из них – геометрическая форма, габаритные размеры, шаг координатной сетки, минимальная ширина печатных проводников, минимальное расстояние между печатными проводниками, минимальное расстояние переходных и монтажных отверстий, минимальное расстояние между контактными площадками, сопротивление печатных проводников, допустимое рабочее напряжение для проводников, допустимая величина тока для печатных проводников. В зависимости от геометрических размеров различают печатные платы следующих типов:

- особо малогабаритные, размеры которых не превышают 60х60 мм.

- малогабаритные, размеры которых не превышают 120x180 мм.
- среднегабаритные, размеры которых не превышают 200x240 мм.
- крупногабаритные, размеры которых не превышают 240x360 мм.

ПП обычно имеют прямоугольную форму. Размеры одной из сторон рекомендуется выбирать из следующего ряда:

25,30,35,40,45,50,55,60,65,70,80, 90,100,120,140,160,180,200,220,240 мм. При определении второй стороны рекомендуется выбирать следующие соотношения сторон:

1:1, 1:3, 2:3, 2:5. Для плат с размером большей стороны до 180 мм допускается соотношение сторон 1:4, а для плат с размером большей стороны до 360 мм - 1:3. По плотности печатного монтажа платы принято делить на 3 класса:

1-й класс - платы с наименьшей плотностью печатного монтажа;

2-й класс - платы с повышенной плотностью печатного монтажа;

1-й класс - платы с высокой плотностью печатного монтажа;

Минимальное значение основных параметров, определяющих плотность печатного монтажа и точность изготовления ПП приведены в табл 1.

Таблица 1.

Минимальные значения основных параметров печатного монтажа

№ ПП	Наименование э-та	Условн. обознач. э-та.	Размеры э-та, мм, для Классов плотности монтажа.		
			1 класс	2 класс	3 класс
1	Ширина проводника	t_n	0,500	0,250	0,150
2	Расстояние между проводниками, контактными площадками, проводником и контактной площадкой, проводником и металлизированным отверстием.	S	0,500	0,250	0,150
3	Расстояние от края просверленного отверстия до края монтажной площадки	B_m	0,050	0,035	0,025
4	Отношение диаметра металлизированного отверстия к толщине	γ	0,500	0,400	0,300

	платы				
5	Максимальное отклонение радиуса монтажных отверстий	Δ	$\pm 0,200$	$\pm 0,100$	$\pm 0,100$

В зависимости от механических требований к методу изготовления номинальный размер толщины ПП следует выбрать равных 0,8, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0 мм.

Толщина многослойной ПП определяется количеством слоев, прокладок и технологий их склеивания. Центры монтажных отверстий должны располагаться в узлах координатной сетки, шаг которой по ГОСТ 10317-72 равен 1,25 или 2,5 мм. диаметры монтажных и переходных металлизированных отверстий в зависимости от диаметра вывода навесного элемента выбирают равными 0,4 0,6 0,8 1,0 1,3 1,5 1,8 2,0 мм.

Металлизированные отверстия на одно - и двухсторонних ПП, а также на наружных слоях МПП со стороны фольги должны иметь контактные площадки. На внутренних слоях МПП контактные площадки должны быть у отверстий, электрически связанных с проводниками слоя. Контактные площадки рекомендуется выполнять круглой, прямоугольной или близкой к ним формы. Неметаллизированные отверстия нужно выполнять беззенковки. Неметаллизированные отверстия односторонних ПП выполняют сзенковкой со стороны, обратной расположению рисунка печатного монтажа.

Печатные проводники рекомендуется выполнять одинаковой ширины на всем их протяжении. В узких местах, например, между двумя соседними монтажными отверстиями, следует сужать проводники до минимально допустимых значений и прокладывать их перпендикулярно оси, соединяющей центры отверстий. Оси проводников рекомендуется совмещать с линиями координатной сетки. При конструировании МПП, изготавливаемых методом металлизации сквозных отверстий, на их наружных слоях рекомендуется применять печатный монтаж 1-го класса плотности.

Расстояние между краем проводника и краем платы рекомендуется выдерживать равным толщине материала.

Расчёты геометрических параметров ПП выполняют для четырех типов плат, рекомендуемых ГОСТ-ом к промышленному применению (рис. 1) Допустимые значения величины сопротивления, напряжения и тока печатных проводников для различных методов изготовления приведены в табл. 2 - 4.

Методы получения печатных проводников

Наиболее распространенным методом в настоящее время является химический, электрохимический (полуаддитивный), комбинированный.

Химический метод заключается в том, что на фольгированный диэлектрик с одной стороны или с двух сторон наносят защитный слой позитивного рисунка схемы. Последующем травлении в растворе хлорного железа или хлорной меди удаляют медь с незащищенных участков, и на диэлектрике получается требуемая электрическая схема проводников.

По способам нанесения защитного покрытия химический метод подразделяют на фотохимический, светочехимический, офсетно-химический. Метод применяется для изготовления односторонних ПП и внутренних слоев МПП.

Электрохимический (полуаддитивный) метод заключается в предварительном химико-гальваническом меднении отверстий и поверхности не-фольгированного диэлектрика, гальванического наращивания токопроводящих участков и химического травления слоя предварительного меднения с пробельных мест.

В зависимости от способа получения защитного рисунка схемы различает следующие варианты этого метода: фотоэлектрохимический, светочноэлектрохимический. Метод применяется для изготовления двусторонних ПП 3-го класса и наружных слоев МПП.

Комбинационный метод печатного монтажа заключается в получении проводников путём травления фольгированного диэлектрика и металлизации отверстий химикогальваническим способом. В настоящее время широко распространены два варианта этого метода: позитивный и негативный. Метод применяется для изготовления односторонних и двухсторонних ПП 1-го и 2-го классов.

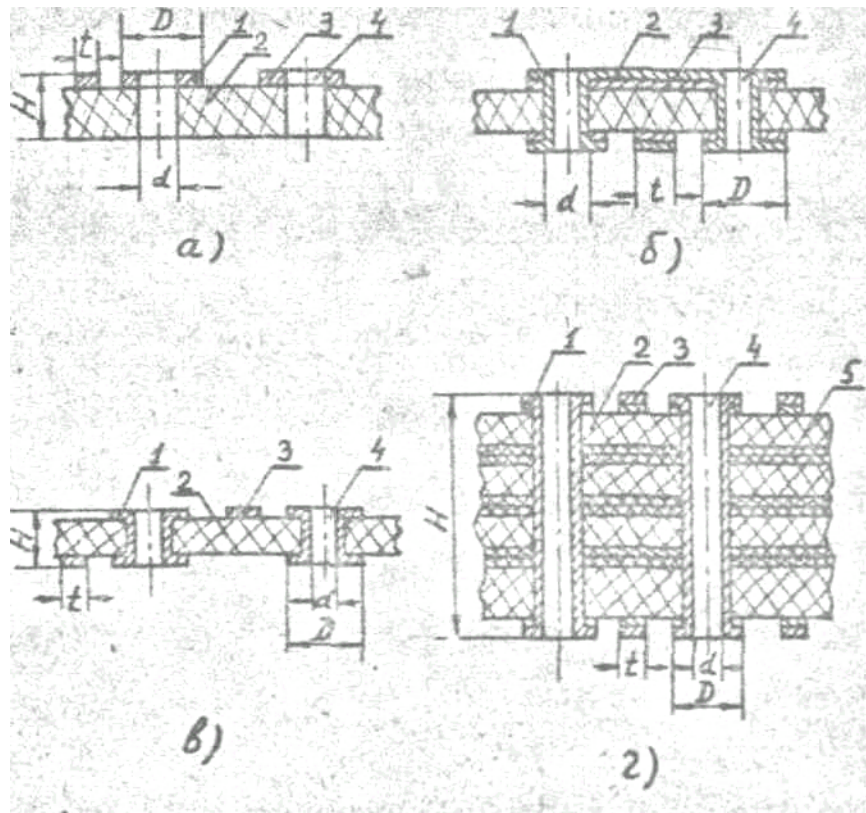


Рис. 1. Конструкции ПП.

Таблица 2
Допустимые значения величин сопротивления
Печатных плат для различных методов изготовления

Номинал толщ. печатного проводника без гальван. покрытия	Метод изготовления	Сопротивление, Ом, не более													
		Ширина проводника, мм													
		0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,5	2,0	3,0	5,0
20	Химический	6,6	6,0	4,0	3,3	2,5	2,0	1,66	1,43	1,25	1,0	0,66	0,5	0,33	0,2
35		3,8	2,85	2,29	1,9	1,42	1,1	0,95	0,81	0,71	0,57	0,38	0,28	0,19	0,11
50		2,66	2,0	1,6	1,33	1,0	0,8	0,66	0,57	0,5	0,4	0,26	0,2	0,13	0,08
20	Комбинированный позитивный	4,1	3,1	2,46	1,9	1,5	1,2	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,18	0,12
35		2,8	2,1	1,63	1,4	1,05	0,8	0,7	0,6	0,55	0,4	0,28	0,27	0,14	0,08
50		2,14	1,6	1,2	1,1	0,8	0,6	0,5	0,5	0,4	0,32	0,2	0,16	0,10	0,06
-	Электронический (полупроводниковый)	10,66	8,00	6,40	5,33	4,0	3,20	2,66	2,28	2,00	1,60	1,06	0,80	0,59	0,32

Допустимые значения величин
напряжений печатных проводников

Таблица 3

Раст. между провод- никами мм.	0,15	0,26	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,20	1,50	2,50
Напря- жен. В не бо- лее	20	30	50	75	100	125	150	175	200	250	300	400	500

Таблица 4

Допустимые значения тока
для печатных проводников

Номин. толщ. печ. проводн. без гальв. покр. мкм	Метод приго- товления	Допустимый ток, не более, А				
		Ширина проводника, мм				
		0,15	0,2	0,25	0,3	0,5
20	Хими-чес- кий	0,045	0,06	0,075	0,09	0,15
35		0,079	0,11	0,13	0,16	0,26
50		0,11	0,15	0,19	0,23	0,36
20	Комбини- рованный позитивный	0,14	0,18	0,23	0,27	0,45
35		0,18	0,24	0,30	0,36	0,60
50		0,23	0,3	0,38	0,45	0,75
-	Электро- химич. (полуад- дитивн.)	0,075	0,10	0,125	0,15	0,25

Перспективным для производства ПП являются аддитивный метод и метод фотоформирования. Аддитивный метод заключается в химическом осаждении меди в зоне токопроводящих участков на нефольгированный диэлектрик с введенным катализатором и адгезионным слоем. Применяется для изготовления одно- и двухсторонних ПП.

Метод фотоформирования заключается в восстановлении на поверхности нефольгированного диэлектрика из водных растворов солей металлов ионов, образующих рисунок толщиной 0,2-0,5 мкм и последующем химическом осаждении слоя меди. Различные модификации метода связаны с различными способами формирования рисунка: фотоосаждение металлов, проявление и восстановление ионов, формирование лучом лазера, фотоформинг. Метод применяется для односторонних и двухсторонних ПП. Из перечисленных методов наиболее трудоёмким является комбинированный позитивный и электрохимический методы.

Нанесение рисунка на заготовку с просверливанием монтажных отверстий требует применения сухого пленочного фоторезиста при фотохимическом способе, или сеточно-графического способа получения рисунка (жидкий фоторезист не приемлем).

Геометрические параметры и точность печатного монтажа непосредственно зависят от метода изготовления.

При химическом и гальваническом способах осаждения меди происходит увеличение размеров токопроводящих участков за счет разрастания.

Если пробельные места защищены краской (толщина 5-7 мм), то разрастания велико и примерно соизмеримо с толщиной осажденного слоя меди. Если пробельные места защищены сухим пленочным фоторезистом (толщина 50-80 мкм), то разрастание осажденной меди минимально.

Методы изготовления МПП

Существуют следующие методы:

- попарного прессования;
- металлизация сквозных отверстий;
- послойного наращивания;
- выступающих выводов ;
- открытых контактных площадок и др.

Классификация методов изготовления МПП по способу получения электрических межслойных соединений показана на рис. 2. технология изготовления МПП базируется в основном на тех же процессах получения рисунка печатных проводников и создания электрических межслойных соединений, которые используются в технике ПРОИЗВОДСТВА обычных ПП,

однако требования к геометрическим допускам и электрическим параметрам МПП часто бывают на порядок выше.

Влияние механической обработки ПП на её конструктивные размеры

В зависимости от серийности заготовки плат из диэлектрика получают либо резкой на циркулярных пилах, либо штамповкой на эксцентриковых прессах.

В зависимости от выбираемого материала ПП определяется и обрабатывающий инструмент и режим резания (скорость, подача). Обработку контура фрезерованием производят в специальных приспособлениях, позволяющих одновременно обрабатывать большое количество плат, что даёт более высокую точность, чем вырубка в штампах. Инструмент и режимы резания тоже зависят от выбираемого материала. Вырубку в штампах проводят как в холодном, так и в подогретом состоянии материала в зависимости от его толщины. Подогревать материал следует при его толщине более 2 мм.

При вырубке плат из слоистых пластиков материал пружинит. В результате этого наружные размеры деталей получаются большими, чем размеры матрицы, а внутренние - меньше, чем размеры пуансона.

Упругая деформация слоистых пластиков оценивается величиной абсолютного естественного пружинения ξ , которая определяется как разность между размерами металлической вырубки и из слоистого пластика. Величина ξ зависит от толщины материала. Допуски на наружные размеры плат обычно больше, поэтому учитывать величину их упругой деформации не обязательно.

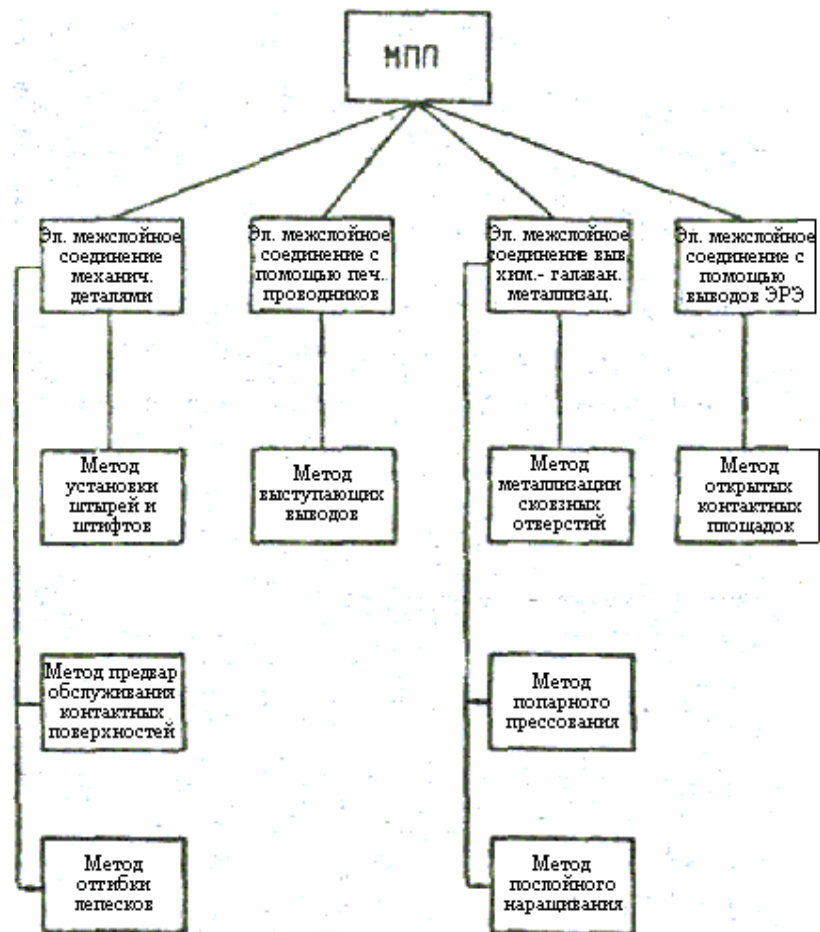


Рис. 2 классификация методов изготовления МПП.

В зависимости от степени точности соответствующего размера платы назначают допуск на изготовление одного из рабочих элементов штампа согласно табл. 5.

Таблица 5

Степень точности вырубаемых плат	Допуск на изготовление одного из элементов штампа .
13-й и 14-й квалитеты	по 10-му квалитету
12-й квалитет	по 8-му квалитету

При сверлении слоистых пластиков применяют спиральные, перовые и комбинированные сверла; причем при использовании комбинированных сверл зенковку отверстия производят одновременно со сверлением. При сверлении отверстий материал нагревается и при последующем охлаждении до комнатной температуры происходит усадка материала. Учитывая усадку материала после охлаждения, диаметр сверла нужно брать на 0,1 - 0,2 мм больше диаметра отверстия, указанного на чертеже.

Исполнительные размеры при пробивке отверстий в ПП на штампах с подогревом материала определяет с учетом усадки.

Материалы для ПП

Из многочисленных типов диэлектриков при конструировании ПП в настоящее время применяются материалы, характеристики которых приведены в табл. 6. При выборе материала следует учитывать метод получения печатных проводников, надежность контактных соединений печатных проводников с элементами, прочность сцепления печатных проводников с основанием, толщину печатных проводников, требования к теплостойкости, химической стойкости, и влагопоглощению, диэлектрической проницаемости (ϵ), к тангенсу угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg} \delta$), тип основания, допустимое количество слоев, допустимое количество припаяек, стоимость материала и др.

Таблица 6
Материалы для печатных плат

Материал	Марка	Толщина		Область применения
		Фольга, мкм	Материал с фольгой, мкм	
Гетинакс фольгированный	ГФ-1-35	35	1,5 2,0 2,5 3,0	Односторонние и двусторонние ПП
	ГФ-2-35			
	ГФ-1-50	50	1,0 1,5 2,0 2,5	
	ГФ-2-50			
Стеклотекстолит фольгированный	СФ-1-35	35	0,8 1,0 1,5 2,0 2,5 3,0	Односторонние и двусторонние ПП
	СФ-2-35			
	СФ-1-50	50	0,5 1,0 1,5 2,0 2,5 3,0	
	СФ-2-50			
Стеклотекстолит фольгированный травлящийся	ФТС-1-20А	20	0,08 0,15 0,18 0,27	МПП на гибких ПП
	ФТС-2-20А		0,50 0,10 0,12 0,19	
	ФТС-1-35А	35	0,14 0,23 0,50	
	ФТС-2-35А			
Стеклотекстолит непостоянный фольгированный	СТФ-1	35	0,13 0,15 0,20 0,25 0,35	Двусторонние, многослойные и гибкие ПП
	СТФ-2		0,5 0,8 1,0 1	
			1,5 2,0 2,5 3,0	
Стеклотекстолит	СТЗФ-1-2ПК	—	1,0 1,5	Двусторонние ПП, протравливаемые полуаддитивным методом
Стеклоэпоксидные прокладочные	СПТ-3	—	0,025 0,060	МПП

Расчет геометрических параметров печатного монтажа с учетом технологических ограничений

Расчет геометрических параметров производится для элементов печатного монтажа односторонних печатных плат (ОПП) и слоев МПП, изготавливаемых химическим методом, двусторонних печатных плат (ДПП), изготавливаемых комбинированным позитивным и электрохимическим методами; МПП, изготавливаемых методом металлизации сквозных отверстий.

Расчет предусматривает базовый способ изготовления ОПП, ДПП, МПП, а также способом А и Б изготовления внутренних слоев МПП при автоматизированном сверлении монтажных и переходных отверстий. При способе А базовые отверстия выполняют как на фотошаблонах, так и на заготовках слоев, а совмещение их производят с помощью фиксирующих элементов. При способе Б базовые отверстия на слоях выполняют после получения печатного монтажа относительно перекрестий (элементов рисунка), а совмещение слоев производят на базовых штырях пресс - формы перед прессованием слоев МПП. Рассчитывают диаметры контактных площадок (D), ширину проводников (t_n), минимальные расстояния между элементами печатного монтажа и расстояния, необходимые для прокладки n -го количества проводников между другими элементами платы.

В расчетах учитывают условия и технологические факторы различных методов изготовления ПП. Предельные значения технологических коэффициентов (табл. 7) получены в результате анализа производственных данных и экспериментальных исследований точности отдельных операций. Максимальные значения коэффициентов соответствуют оборудованию и оснастке низкой точности, средние значения - оборудованию высокой точности, минимальные значения учитывают перспективы повышения точности оборудования оснастки и операций технологического процесса.

Расчет минимального диаметра металлизированного отверстия и толщины МПП, диаметра контактных площадок, ширины проводников, минимальных расстояний между элементами проводящего рисунка, минимального расстояния между элементами проводящего рисунка, необходимого для прокладки определенного количества проводников, электрических параметров ПП (емкость, индуктивность, сопротивление изоляции, мощность потерь)

Таблица 7

Предельные отклонения технологических коэффициентов

Наименование коэффициента	Обозначение	Величина
I	2	3
I. Толщина предварительно осажденной меди, мм	$h_{\text{нм}}$	0,005-0,008
2. Толщина наращенной гальванической меди, мм	h_{Γ}	0,05-0,06
3. Толщина металлического резиста, мм	h_p	0,02
4. Погрешность расположения отверстия относительно координатной сетки, обусловленная точностью сверлильного станка, мм	δ_0	0,02-0,10
5. Погрешность базирования плат на сверлильном станке, мм	δ_{δ}	0,01-0,03
6. Погрешность расположения контактной площадки относительно координатной сетки на фотошаблоне, мм	$\delta_{\text{ш}}$	0,02-0,08
7. Погрешность расположения проводника относительно координатной сетки на фотошаблоне, мм	$\delta_{\text{ш } t}$	0,03-0,06
8. Погрешность расположения печатных элементов при экспонировании на слое, мм	$\delta_{\text{э}}$	0,01-0,03
9. Погрешность положения контактной площадки на слое из-за нестабильности линейных размеров, % от толщины	δ_M	0-0,10
10. Погрешность расположения базовых отверстий на заготовке, мм	δ_z	0,01-0,03
II. Погрешность полевого базового отверстия в фотошаблоне, мм	δ_n	0,01-0,05
12. Погрешность положения контактной площадки на слое, обусловленная точностью пробивки базовых отверстий (при способе Б) , мм	$\delta_{\text{пр}}$	0,03-0,05
13. Погрешность положения контактной площадки, обусловленная точностью изготовления базовых штырей пресс - формы, мм	$\delta_{\text{пф}}$	0,02-0,05

14. Погрешность диаметра отверстия, мм	$\Delta\alpha$	0,01-0,03
15. Погрешность на изготовление окна фотошаблона, мм	$\Delta D_{\text{ш}}$	0,01-0,03
16. Погрешность на изготовление линий на фотошаблоне, мм	$\Delta t_{\text{ш}}$	0,03-0,06
17. Погрешность диаметра контактной площадки фотокопии при экспонировании рисунка, мм	$\Delta\mathcal{E}$	0,01-0,03

можно выполнить по методикам, приведенным в приложении к настоящим методическим указаниям или по ОСТ4ГО.010.209.

Пример расчета: требуется выполнить расчет ОПП усилителя, определить минимально допустимые значения толщины и ширины печатных проводников, исходя из электрического режима работы усилителя.

Исходные данные: напряжение питания $U = 12,6$ В, максимальный проходящий через проводник $I_{\max} = 0,4$ А, размер платы 110×70 мм, материал платы - стеклотекстолит фольгированный марки СФ1-50, метод изготовления платы - фотохимический, фоторезист - сухой пленочный.

Решение: I. Так как метод изготовления ПП фотохимический, то, следовательно, минимально допустимая толщина печатных проводников будет равна толщине фольги, т.е.

$$h_n = h_{\phi} = 0,050 \text{ мм.}$$

2. Минимально допустимую ширину печатного проводника определяем по формуле

$$t_n \geq I_{\max} / (h_n J),$$

где $J = 30 \text{ А/мм}^2$ - допустимое значение плотности тока, тогда

$$t_n = 0,4 / (0,05 \times 30) = 0,26 \text{ мм, т.е.}$$

плотность печатного монтажа платы может быть не выше 2-го класса.

Контроль ПП

Для контроля электрических параметров ПП в условиях серийного производства (а иногда и в условиях лаборатории) используют автоматизированные установки типа "УКПМ".

Контролируемыми электрическими параметрами ПП являются целостность проводников (отсутствие обрывов, замыканий между проводниками сопротивление изоляции и др. ПП различаются по объему контролируемых точек, поэтому программы для автоматизированного контроля тоже различаются. К контролируемым точкам относят все металлизированные отверстия в данном печатном проводнике и во всех проводниках, контактные площадки, металлизированные отверстия для подключения к разъемам или контрольным гнездам.

Однако до осуществления такого контроля ПП сначала проходят проверку на соответствие требованиям чертежа, технических условий. При этом многие их параметры проверяются визуально. Так например, металлизация отверстий должна быть ровной, плотной, иметь толщину медного слоя не менее 25 мкм с мелкозернистыми пластичными осадками. Неровность металлизированного слоя свидетельствует о некачественной подготовке отверстий, создает нежелательные концентраторы напряжений, препятствует всякому удалению из отверстий агрессивных реактивов и затрудняет процесс пайки. Неровность металлизированного слоя, проверяемая на контрольных микро шлифах, не должна превышать 50 мкм.

Недопустимы и неровности из-за подъема фольги, так как это может привести в конечном итоге к обрыву цепи при термоударе, например в процессе сборки узла. Известны и другие дефекты металлизированных отверстий, связанные со сверлением, смещением внутренних слоев МПП и т.д.

Контактные площадки металлизированных отверстий представляют собой области соединения проводников с металлизированным слоем отверстий, обеспечивающие электрические связи, а для наружных слоев также возможность пайки навесных элементов в монтажных отверстиях. Площадь контактных площадок на любом слое должна быть такой, чтобы не было их разрывов при сверлении и оставался гарантированный пояс медной шириной не менее 25 мкм для внутренних слоев МПП и не менее 50 мкм для наружных слоев плат.

Частичное отслаивание отдельных контактных площадок наружных слоев не в зоне проводников считается допустимым для переходных отверстий и может быть устранено с помощью эпоксидного клея.

Адгезия рисунка схемы к диэлектрическому основанию платы должна соответствовать ТУ на фольгированный материал и проверяется отрывом проводника на технологическом поле платы.

Наблюдаемое иногда вздутие или отслоение слоя гальванической меди от фольги из-за некачественной подготовки последней перед металлизацией недопустимо. Качество сцепления слоя гальванической меди с фольгой проверяют выборочно путем перегиба на 180° проводника, отделенного от технологической рамки. Известны и другие методы.

По сравнению с проводниками наружных слоев проводники внутренних слоев МПП находятся в более выгодных эксплуатационных условиях: изолированы от внешних воздействий, в т. ч. от загрязнений, имеют лучший теплоотвод, промежутки между ними после прессования заполняются диэлектрическим материалом, что обеспечивает прочное закрепление на слое.

Собственно диэлектрическое основание ПП должно быть монолитным без вздутий, расслоений, царапин и посторонних включений.

Возможное изменение внешнего вида диэлектрического основания возникает вследствие поверхностных или внутренних дефектов материала, а также нарушений технологии изготовления.

Такие отклонения должны рассматриваться как исключения. К ним можно отнести белёсость, сыпь, обнажение стеклоткани, текстуры, вскрытие волокон, ореолы и сколы, контурное посветление, пятнистость поверхности, расслоение, межслойная раковина, вздутие.

Среди дефектов встречаются также деформации (неплоскостность) ПП; она может выражаться в виде цилиндрического, сферического искривления или скручивания, т.е. спирального искривления платы. Это явление зависит от ряда факторов и обычно допуск на неплоскостность оговаривается в чертежах ПП. Известные методы термориhtовки готовых плат имеют ограниченное применение.

Содержание работы

Работа содержит несколько вариантов исходных данных на конструирование, по которым необходимо в соответствии с заданием произвести требуемые расчеты.

Каждый вариант задания предусматривает предварительное изучение теоретического материала, разработку одного из видов ПП или ее фрагментов, в т.ч. выполнение конструкторских расчетов, представление результатов работы в графическом (эскизы, чертежи), табличном и др. виде.

Порядок выполнения работы:

- изучить методические указания ;
- изучить исходные данные и требования по заданию;
- изучить правила оформления КД на ПП;

- ответить на контрольные вопросы;
- предложить по заданию варианты разработки;
- согласовать выбранный вариант разработки с преподавателем;
- разработать требуемую конструкцию;
- оформить результаты в соответствии с требованиями.

Содержание отчета

В отчете должны быть приведены:

- краткие сведения из теории;
- эскизные чертежи разработанной ПП, выполненные на миллиметровой бумаге в соответствии с ОСТ 4Г0.010.209 в карандаше (в соответствующем масштабе), со всеми размерами и обработкой;
- выполненные расчеты с минимальными пояснениями;
- выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Для чего предназначены и что представляют собой печатные платы?
2. Назовите геометрические параметры ПП.
3. От чего зависят геометрические параметры и точность печатного монтажа?
4. Какие бывают ПП? Каких типоразмеров?
5. Какие материалы используют для изготовления ПП? Какие параметры материалов необходимо учитывать и почему?
6. Какие известны методы изготовления печатных плат? В чем их особенность и влияние на конструкцию ПП?
7. Какие требования и почему предъявляются к инструменту для обработки отверстий?
8. Какие условия и почему надо учитывать при определении минимального диаметра контактной площадки?
9. Назовите основные погрешности, которые надо учитывать при расчете минимального диаметра металлизированного отверстия и толщины МПП?
10. Из каких условий определяется минимальное расстояние между элементами проводящего рисунка?

11. Какие электрические параметры ПП вы знаете?
12. По каким параметрам осуществляется контроль ПП?
Какие методы их контроля вы знаете?

Варианты заданий

Вариант I.

Рассчитать конструктивно-технологические параметры двусторонней печатной платы ФУ, в т.ч.

- выбрать материал и толщину платы,
- определить линейные размеры элементов печатного монтажа (диаметр контактных площадок и ширину проводника),
- определить число проводников, которые можно провести между соседними отверстиями.

Исходные данные: метод изготовления печатной платы - электрохимический (полуаддитивный); способ получения рисунка - фотохимический; минимальное расстояние между отверстиями 1,25 мм, шаг координатной сетки 1,25 мм; диаметр неметаллизированного отверстия (монтажного) - 0,7 мм, форма монтажной площадки - круглая, плотность печатного монтажа - 2-й класс, фоторезист сухой пленочный, металлический резистоплавляемый сплав олово-свинец.

Вариант 2.

а) Определить возможность размещения двух проводников между двумя контактными площадками одинаковых отверстий на односторонней ПП. Исходные данные: метод изготовления платы - фотохимический; расстояние между отверстиями 5 мм, максимальный диаметр контактной площадки 2 мм, максимальная ширина проводника 0,35 мм, минимальное расстояние между проводниками 0,5 мм, плотность печатного монтажа - 1-й класс, шаг координатной сетки 2,5 мм.

б) Определить количество проводников, которые можно разместить на односторонней ПП между двумя контактными площадками одинаковых отверстий.

Исходные данные: метод изготовления платы - фотохимический, расстояние между отверстиями 7,5 мм, максимальный диаметр контактной площадки 1,5 мм, шаг координатной сетки 1,25 мм, плотность печатного монтажа - 2-й класс, материал платы - гетинакс фольгированный марки ГФ-1-35.

Вариант 3.

Рассчитать конструктивно-технологические параметры многослойной ПП ФУ, в т.ч. определить толщину МПП, диаметр металлизированного отверстия, диаметры контактных площадок, ширину проводников, минимальные расстояния между элементами печатного монтажа. Исходные данные: размер платы 170x200 мм, количество слоев - 8, метод изготовления МПП - металлизация сквозных отверстий, способ получения рисунка - фотохимический, способ изготовления слоев - способ А, материал слоя стеклотекстолит фольгированный травящийся марки ФТС-1-20А ($H_c = 0,15$), и ФТС-2-20А ($H_c = 0,18$), стеклоткань прокладочная марки СПТ-3 ($H_{пр} = 0,025$), резистивное покрытие - олово-свинец, шаг координатной сетки 1,25 мм, плотность печатного монтажа - 2-й класс, в качестве межслойной изоляции использовать четыре прокладки.

Вариант 4.

Произвести проверочный расчет двусторонней ПП (рис. 1п) усилителя, определить минимально допустимую ширину печатного проводника падение напряжение, мощность потерь, паразитную поверхностную ёмкость и взаимную индуктивность двух параллельных проводников. Исходные данные: напряжение питания $U = 12,6$ В, максимальный ток, проходящий через проводник $I_{\max} = 0,7$ А, размер платы 45x75 мм, материал платы - стеклотекстолит фольгированный марки СФ-2-35, метод изготовления платы - комбинированный позитивный, способ получения рисунка фотохимический, фоторезист сухой пленочный, резистивное покрытие - олово-свинец.

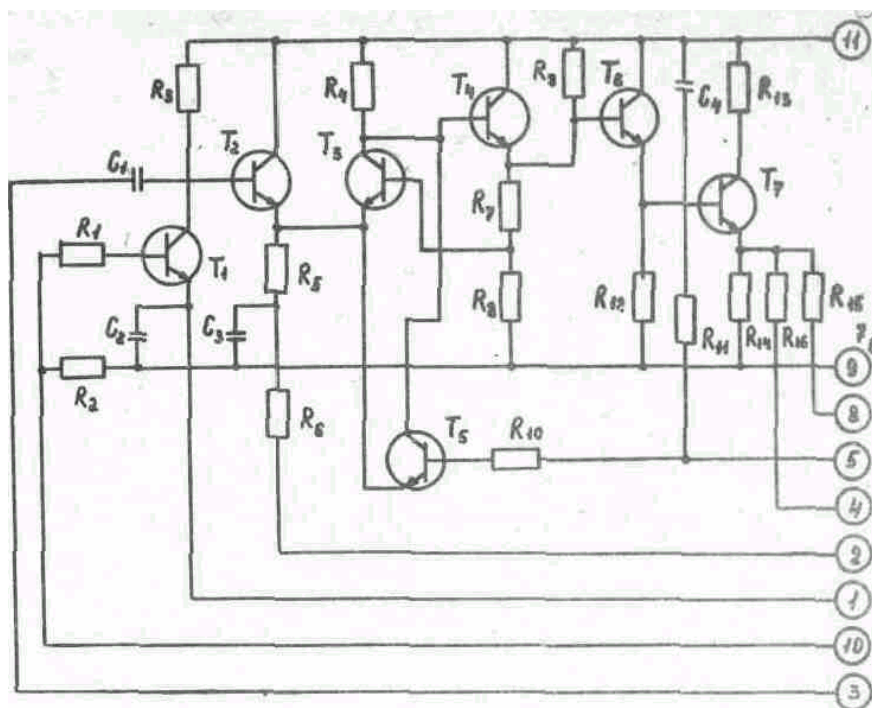
Вариант 3.

Разработать конструкцию и технологию изготовления ПП модуля. Выбрать материал и метод изготовления ПП, определить габариты заготовки платы и коэффициент использования материала. Разработать последовательность технологического процесса изготовления ПП. Исходные данные: электрическая схема модуля (рис. 2п)

R1 - резистор МЛТ-0,25-10 кОм $\pm 10\%$

R2- резистор МЛТ-0,25-2,2 кОм $\pm 10\%$

R4- резистор МЛТ-0,25-10 кОм $\pm 10\%$



11 - +6,3 В

8 - выход видео

4 - корпус

6 - ---

9 - ---

7 - ---

5 - -12,6 В

2 - уровень черного

1 - смещение

10 - выход видео

3 - вход видео

рис. 1п

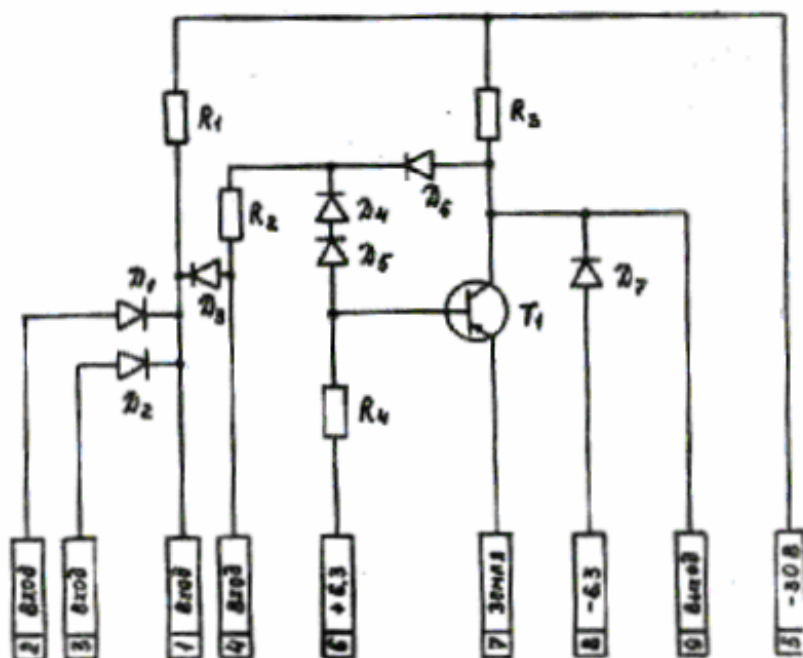


Рис. 2п.

R3- резистор МЛТ-0,25-7,0 кОм $\pm 10\%$,
 Д1-Д3 - диоды кремниевые Д220
 Д4-Д6 - диоды кремниевые Д219А
 Т1 - триод германиевый ИП16А
 шаг координатной сетки платы - 2,5 мм, плотность печатного монтажа - 1 класс. Условия, эксплуатации лабораторные, программа выпуска 20000 плат в год.

Вариант 6.

Разработать конструкцию и выбрать технологию изготовления ПП формирователя импульсов, в т.ч. выбрать материал, метод изготовления, определить допустимые значения длины проводника, емкости проводников, омического сопротивления проводников, волнового сопротивления проводников. Рассчитать габаритные размеры платы. Привести основные этапы технологического процесса изготовления ПП. Исходные данные: Электрическая схема формирователя импульсов: (рис.3п)

R1 - резистор МЛТ-0,25 - 330 Ом $\pm 10\%$
 R2 - резистор МЛТ-0,25 - 56 кОм $\pm 10\%$
 R3 - резистор МЛТ-0,25 - 5,1 кОм $\pm 10\%$
 С1 - конденсатор К50-6-1-6 В - 100 пкф $\pm 10\%$
 Т1 - транзистор КТ315Б
 D - микросхема К1АВ533
 Д1 - диод полупроводниковый Д200.

Напряжение питания 5 В $\pm 5\%$, потребляемый ток 16 мА, плотность печатного монтажа - 2-й класс, шаг координатной сетки 1,25 мм, условия эксплуатации - наземная стационарная РЭА, программа выпуска 15000 шт. в год.

Вариант 7.

Разработать конструкцию ПП импульсного генератора. Выбрать материал и метод изготовления ПП. Определить допустимые значения длины проводника, емкости проводников, омического сопротивления проводника, волнового сопротивления проводников. Рассчитать габаритные размеры платы. Назвать основные этапы ее изготовления.

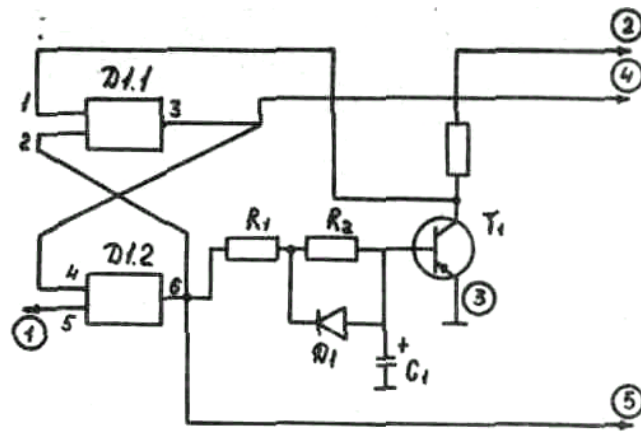


Рис. 3n

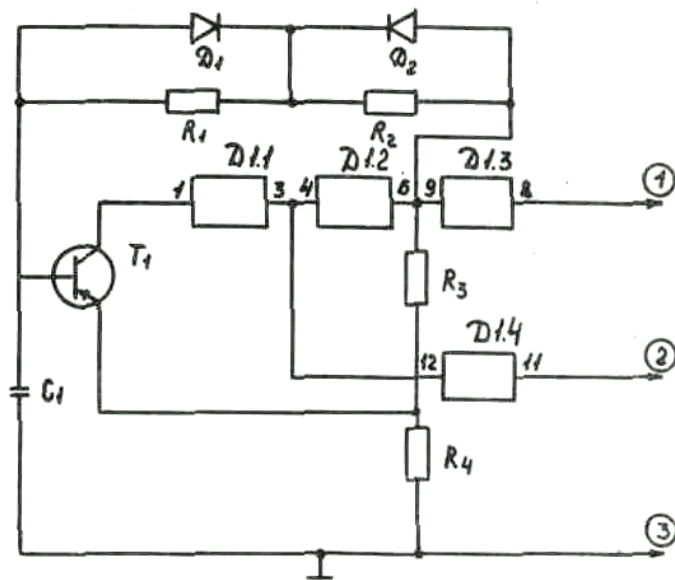


Рис. 4n.

Исходные данные: электрическая схема (рис.4п)

R1,R2-резистор МЛТ-0,25-1 кОм $\pm 10\%$

R3-резистор МЛТ-0,25-47 кОм $\pm 10\%$

R4-резистор МЛТ-0,25-100 Ом $\pm 10\%$

C1 - конденсатор КТП-2Ба-М47-1000 пф $\pm 10\%$

T1-транзистор КТ315А

D-микросхема К155ЛА3

Д1, Д2-диоды полупроводниковые Д220

Напряжение питания 5 В $\pm 5\%$, потребляемый ток 20 мА, граничная частота 100 кГц, плотность печатного монтажа -3-й класс, шаг координатной сетки 1,25 мм, условия эксплуатации - бортовая самолетная РЭА. Программа выпуска 200000 плат в год.

РАБОТА №5: АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ КОНСТРУКЦИЙ РА- ДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Цель работы: изучение сложных конструкций РЭА для определения взаимной связи между деталями и сборочными единицами в ней, последовательности сборки, разработка схем сборки.

Методические указания

Общие сведения о процессе сборки РЭА

Вопросы сборки РЭА являются одними из важнейших при проектировании РЭА. Они существенно различаются от вида проектируемой аппаратуры: бортовая или стационарная РЭА, ЭВА или ее фрагменты, микро-сборки или СВЧ устройства и антенны, приводные узлы или корпуса, блоки РЭА или другие ее уровни и т.д.

Сборка изделий является наиболее ответственным этапом производственного процесса, здесь проявляются недостатки как предшествующих этапов изготовления отдельных составляющих РЭА, так и собственно конструкции. Точность сборочного соединения зависит от суммарного влияния как числа звеньев (сборочных единиц, деталей), входящих в его размерную цепь, так и от диапазона отклонений (допусков) в каждом отдельном звене, а сложность таких размерных цепей исходит от конструктора и выявляется в процессе проектирования всего изделия. Кроме того, в процессе проектирования для конструктора вообще невозможно разрабатывать любую конструкцию РЭА, не представляя как эта конструкция, в какой последовательности будет реализована при производстве. Поэтому при конструировании конструктору необходимо предусматривать четкую разбивку изделия на самостоятельные законченные и взаимозаменяемые сборочные единицы и агрегаты, чтобы трудоемкость сборки этих элементов была одинаковой, а сам процесс сборки основывался на простых производственных приемах. Места сборки и установки деталей и сборочных единиц должны быть открытыми и доступными не только для осуществления самого процесса сборки, но и для регулировки и контроля. Таким образом, схема сборки РЭА связана с одной стороны с технологическим процессом, оснасткой, оборудованием (автоматизированного или ручного действия), с другой - непосредственно с конструкцией (конкретной) изделия.

Конструкция изделия с точки зрения сборки должна быть технологичной и это означает, во-первых, что она должна быть собирательной, т.е. обеспечивающей не только возможность сборки, но и ее простоту, доступность к местам монтажа, возможность применения высокопроизводительных методов сборки. Во-вторых, такая конструкция должна допускать параллельную и независимую сборку, контроль и испытание, с полной взаимозаменяемостью деталей и сборочных единиц. Причем число деталей в сборочном узле должно быть наименьшим, а сокращение числа деталей должно быть за счет выбора наиболее простой и рациональной схемы сборочной единицы и объединения нескольких деталей в одну, отвечающую требованиям технологичности.

По трудоемкости сборочные работы составляют 40 – 75% т общей трудоемкости изготовления РЭА.

Сборочные работы осложняются широкой номенклатурой выпускаемой продукции, преобладанием малых по размеру и массе деталей и сборочных единиц, значительным объемом в общей трудоемкости сборки проверочных и регулировочных работ, многообразием технологических процессов сборки и электрического монтажа.

Основное количество сборочных операций выполняется вручную с использованием простой оснастки. Однако для повышения производительности, снижения трудоемкости и повышения качества РЭА передовые предприятия применяют средства механизации и автоматизации сборочного процесса.

Таким образом, процессом сборки можно назвать совокупность операций, в результате которых детали соединяют в сборочные единицы (узлы), блоки, рамы, стойки, системы и изделия.

Совокупность операций, в результате которых осуществляют электрическое соединение элементов, входящих в состав сборочной единицы (узла), в соответствии с принципиальной, электрической или электромонтажной схемами называют электрическим монтажом.

Простейшими сборочно-монтажными элементами являются детали, не имеющие каких-либо соединений. Сборочная единица является более сложным сборочно - монтажным элементом и, как правило, состоит из двух деталей или более, соединенных разъемами или неразъемными соединениями. Расчленение изделий на сборочные элементы производят в соответствии со схемой сборочного состава, после чего по ней проектируют технологический процесс сборки. Наибольшее распространение получили схемы сборки с базовой деталью и схема сборки изделия "веерного типа" (рис. 1).

Одной из задач при проектировании сборки является выбор базового элемента или ведущего полуфабриката. Правильный выбор базового элемента определяет оптимальную последовательность сборки, ее экономичность, технологичность и др. Базовым является такой сборочный элемент, который при оценке его свойств наберет наибольшее число баллов. Последующие операции сборки производят с теми элементами, у которых максимальное число баллов.

При выборе базового элемента бывает достаточным использование коэффициентов, учитывающих число соединений элементов и характер соединений.

При анализе структуры конструкции РЭА выделяют также замыкающий элемент сборки, который должен обеспечить в сборочном узле неизменное положение других этих элементов и иметь соединение, создающее после предшествующей операции сборки минимальное число степеней свободы, а также обладать минимальной массой и простотой конструкции.

Основными сборочными операциями при производстве РЭА являются: свинчивание (завинчивание), совмещение методом пластического деформирования, сварка, пайка, склеивание, намотка, накрутка.

Процесс сборки может быть разделен на следующие этапы: подача собираемых деталей (элементов) к месту сборки, взаимная ориентация (базирование) деталей перед их соединением, соединение сборочных элементов в сборочную единицу, закрепление сборочных элементов (сборочная операция), контроль.

Наиболее характерным этапом сборки является ориентация собираемых элементов перед их соединением. Особенно это относится к монтажу микросхем и навесных ЭРЭ.

Контроль качества при сборке РЭА

Контроль качества при сборке РЭА определяется видом РЭА и технологическим процессом сборки, предусматривающим последовательность контрольных операций.

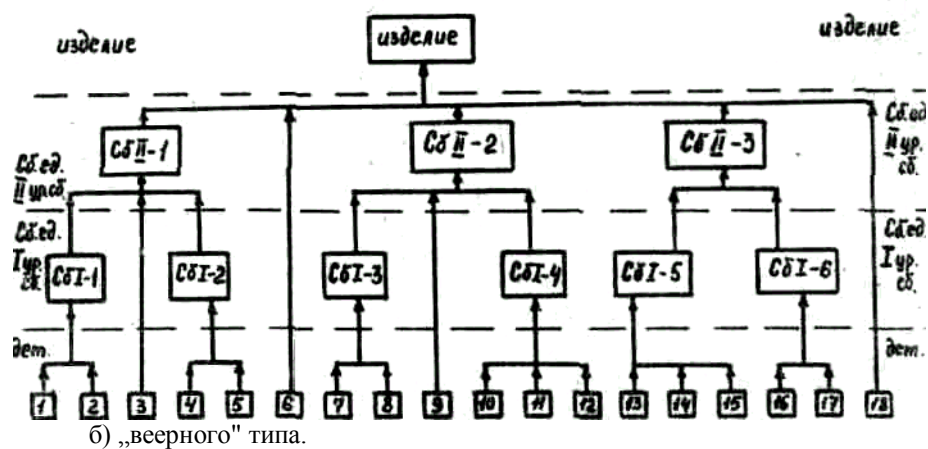
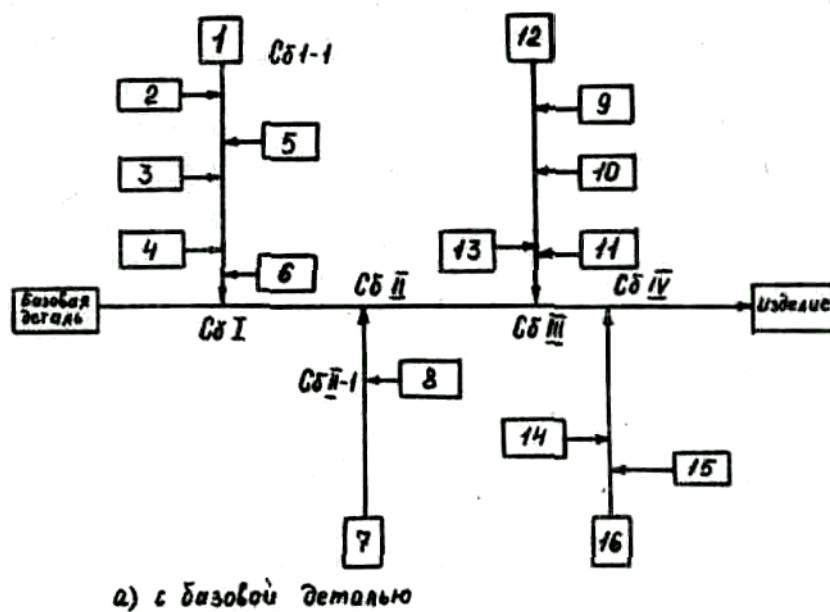


Рис. 1. Схемы сборки изделия.

В зависимости от вида РЭА выбираются методы контроля ее параметров. Контроль, осуществляемый в процессе производства, подразделяется на входной, операционный и приемочный. При входном контроле объем проверок не должен превышать предусмотренного в ТУ. Операционным

называют контроль продукции во время выполнения или после завершения определенной производственной операции.

Приемочный контроль - это контроль готовой продукции, при котором принимается решение о ее годности.

Разработка схем сборочного состава РЭА

Проектирование технологического процесса сборки значительно упрощается, если проанализирована структура конструкции РЭА, ее конструктивно-технологические особенности, варианты организации процесса сборки для заданного объема выпуска. Для этого составляют схемы сборочного состава элементов и технологические схемы сборки. Эти схемы дают возможность определить взаимную связь между деталями и сборочными единицами в РЭА. Построение таких схем практически представляет собой разработку проекта технологического процесса, при этом руководствуются следующими рекомендациями:

- схемы сборочного состава строят независимо от объема выпуска РЭА,
- сборочные единицы схем образуются независимо от условий сборки, контроля, хранения и транспортировки;
- первая ступень сборочного состава не является сборочной, на ней располагают детали, материалы, входящие в состав РЭА - припои, лаки, компаунды и т.д.
- минимальное количество деталей, необходимое для образования сборочной единицы, равно двум;
- при присоединении к сборочной единице данной ступени сборки еще одной детали образуется сборочная единица высшей ступени,'
- каждая последующая ступень не может быть образована без наличия последующей ступени.

Конструкция РЭА характеризуется показателем степени сложности сборочного состава, который равен количеству ступеней сборки, средней полнотой сборочного состава (количество сборочных единиц, на каждой ступени сборки)

$$P = \theta/n = \sum_{i=1}^n m_i/n, \quad \text{где}$$

θ - общее количество сборочных единиц по схеме сборочного состава;

m_i - коэффициент кратности, равный количеству сборочных единиц на i -й ступени сборки по схеме;
степенью расчлененности сборочного процесса, которая характеризуется длительностью сборочной операции и модулем расчлененности

$$M = K/Q, \quad \text{где}$$

K - окончательно запроектированное число сборочных операций.

На базе схемы сборочного состава разрабатывают технологическую схему сборки, в соответствии с которой проектируют технологический процесс сборки. Технологическую схему сборки изображают так, чтобы соответствующие сборочные единицы различной степени сложности и детали были представлены в порядке их введения в собираемую РЭА. Схема начинается с базовой детали или сборочной единицы, соединяемой с условным изображением готовой аппаратуры главной линией сборки. К ней слева направо по ходу сборки подсоединяются отдельные детали (с левой стороны) и сборочные единицы (с правой стороны). Точки присоединения сборочных элементов строго соответствуют последовательности сборки и месту подсоединения элемента. Технологическая схема сборки кроме деталей и сборочных единиц, содержит элементы, поясняющие специфические особенности сборочных операций: соединение элементов (запрессовкой, вальцеванием, пайкой), фиксация (кернением, с помощью лаков, красок и компаундов), механическая обработка в процессе сборки, использование технологических деталей и т.д.

Элементы схемы сборочного состава и технологических схем сборки выполняют в виде прямоугольников, в которые вписываются индекс, наименование и количество элементов. Обозначение деталей принимается в соответствии со сборочными чертежами. Для обозначения сборочных единиц проставляют "Сб" и номер базовой детали. Перед обозначением сборки ставится номер сборочной ступени. Например: 2Сб.3 - сборочная единица второй ступени сборки с базовой деталью № 3.

Пример.

Разработать схему сборочного состава и технологическую схему сборки конденсатора переменной емкости (рис. 2).

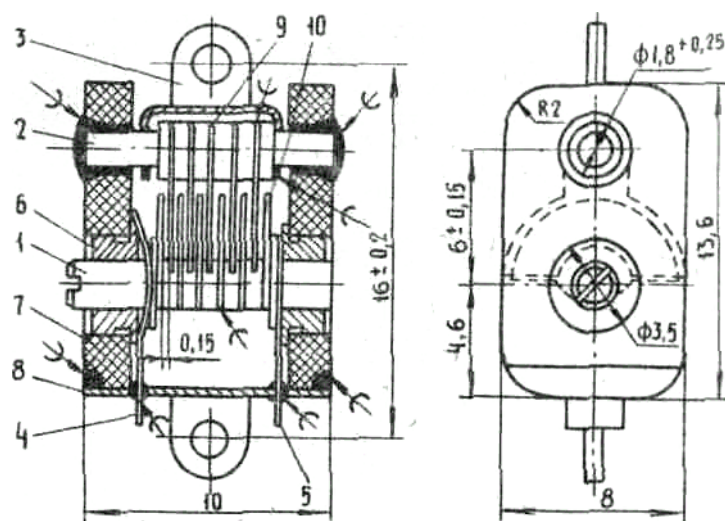
Решение:

Конденсатор переменной емкости с воздушным диэлектриком состоит из ротора I и статора 2, установленных в двух керамических платах 7. Статор запаивают в металлизированные отверстия плат, ротор закрепляют в двух бронзовых втулках 6. Напряжение на обкладки конденсатора подается через контакты 3, 4, 5 и 8.

Статор и ротор собирают независимо друг от друга, окончательную сборку осуществляют в приспособлении, обеспечивающем требуемую величину зазора между пластинами ротора и статора. Схемы сборки приведены ниже.

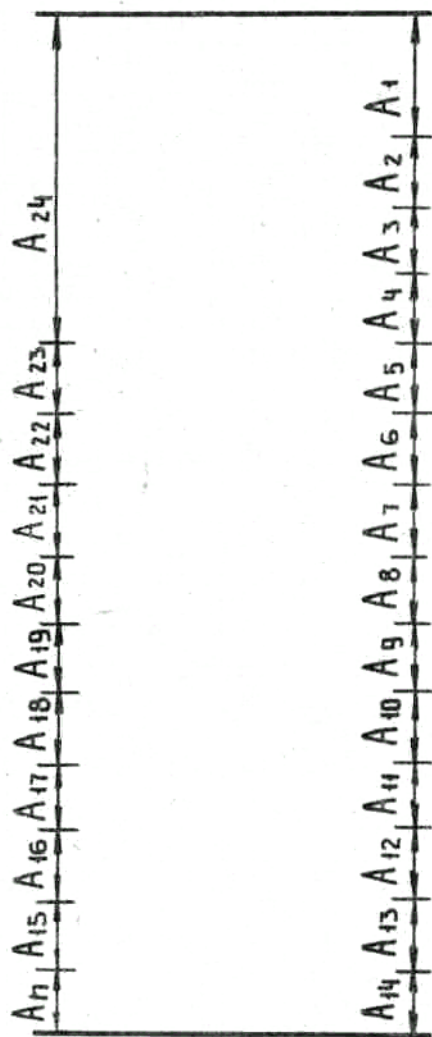
Обеспечение точности сборки конструкций РЭА

В процессе сборки происходит соединение деталей и сборочных единиц, обеспечивающее заданное взаимное расположение их поверхности. При этом погрешности обработки деталей и погрешности сборочных операций влияют на величину и допуск замыкающего размера сборочной размерной цепи. Расчеты точности сборочных работ должны обеспечить заданное взаимное положение деталей и точность их соединения. Расчет заключается в определении ошибок замыкающих звеньев размерных цепей или в определении допусков составляющих звеньев размерной цепи по заданному техническими условиями допуску на замыкающий размер (обратная задача).



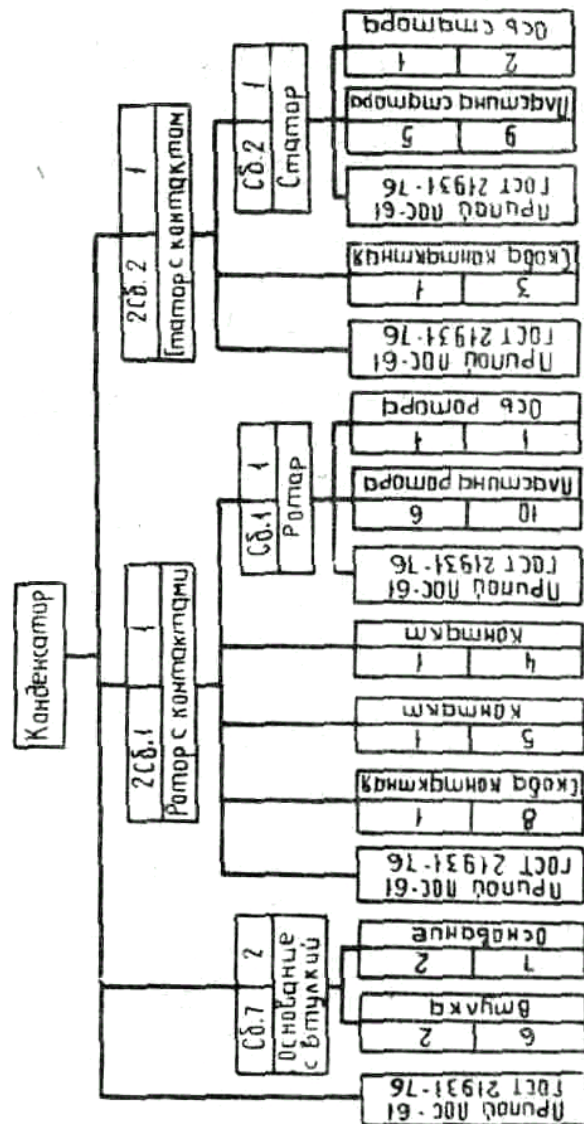
а) Общий вид конденсатора.

Рис. 2

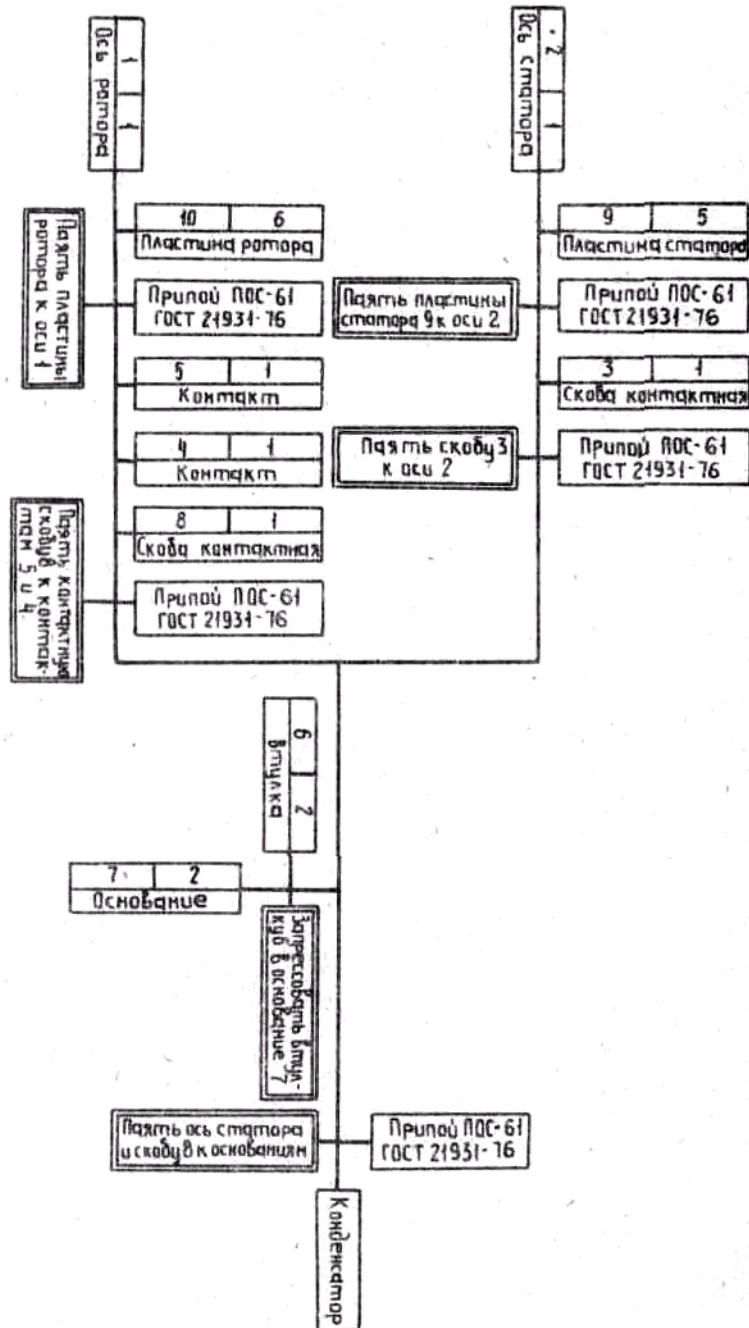


б) [борочная размерная цепь.

Рис. 2



б) Схема сборочного состава КПЕ
Рис. 2



2) Технологическая схема сборки КПЕ

Рис. 2 Конденсатор переменной емкости (КПЕ)

Обычно выполняют расчет линейных размерных цепей, а более сложные размерные цепи могут быть приведены к линейным.

Сборочная линейная цепь должна включать размеры входящих в сборку деталей, их изменения в процессе сборки и замыкающий размер, образующийся в результате выполнения сборочных операций. Производственные погрешности, определяющие величины допусков на размеры, носят случайный характер, поэтому размеры деталей в партии являются в пределах допуска случайными величинами, и расчет размерных цепей ведется вероятностным методом.

$$A_n = \sum_{i=1}^k A_{Li} - \sum_{k+1}^{n-1} A_{Li} ;$$

$$A_{0n} = \left[\sum_{i=1}^k (A_{0Li} + \alpha_i \delta_i) - \sum_{k+1}^{n-1} (A_{0Li} + \alpha_i \delta_i) - \alpha_n \delta_n \right] ;$$

$$\delta_n = \gamma \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} K_i^2 \delta_i^2} ; (*)$$

$$A_{np} = A_{0n} \pm \delta_n ,$$

где A_n - номинальное значение замыкающего размера размерной цепи;

A_i - номинальные значений составляющих звеньев размерной цепи;

n - количество звеньев в размерной цепи;

k - количество увеличивающих размеров;

$n-k-1$ - количество уменьшающих размеров;

A_{np} - предельное значение замыкающего и составляющих размеров соответственно;

δ_n, δ_i - половины полей допусков замыкающего и составляющих размеров соответственно;

α_i - коэффициент относительной асимметрии распределения размера;

K_i - коэффициент относительного рассеивания размеров;

γ - коэффициент гарантированной надежности,

A_i, A_{0i}, δ_i определяют по чертежам;

α_i, k_i, γ выбирают по таблицам в соответствии с технологическими процессами получения соответствующих размеров и в зависимости от метода обеспечения заданной точности РЭА.

Коэффициент γ показывает, что величина рассчитываемого допуска определяется с надежностью P , соответствующей данному коэффициенту

Это означает, что в партии РЭА ЮОР аппаратов будут иметь замыкающий размер размерной цепи в пределах $2\delta_n$. При определении ошибок конструкций РЭА, вызываемых наличием зазоров в сопрягаемых парах, необходимо учитывать величину этого зазора. Наиболее вероятную величину зазора Δ_z , возникающего в сопряжении вал-отверстие, определяют из выражения

$$\Delta_z = (A_0 - A_B) \pm \frac{1}{K_z} \sqrt{K_0^2 \delta_0^2 + K_B^2 \delta_B^2}, \quad \text{где}$$

A_0, A_B - координаты середины полей допусков отверстия и вала соответственно;

δ_0, δ_B - половины полей допусков отверстия и вала;

K_z, K_0, K_B - коэффициенты относительного рассеивания зазора, отверстия и вала соответственно.

В большинстве случаев закон распределения замыкающего размера может быть принят за закон нормального распределения, тогда $\alpha_n = 0$, а $K_n = 1$. Если замыкающий размер не обеспечивает работоспособности конструкций или его точность не соответствует заданной техническими условиями, необходимо установить такие допуски на отдельные звенья размерной цепи, которые обеспечат выполнение заданных условий. Эта задача решается методами полной и неполной взаимозаменяемости, селективной сборки, пригонки и регулировки.

Функциональная точность РЭА

В результате выполнения последовательности сборочных и монтажных операций комплектующие ЭРЭ и микросхемы оформляются в функциональное устройство. Погрешности ЭРЭ и сборки определяют точность

выходных параметров РЭА. Для решения задачи анализа точности выходных параметров РЭА наиболее широко используются расчетно-статистический метод, который предполагает наличия функциональной зависимости выходных параметров от параметров ЭРЭ, сборки и др. Законы распределения погрешностей ЭРЭ считаются известными.

Аналитическая функция, определяющая зависимость выходного параметра от параметров ЭРЭ и др. определяются как

$$y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

исходное выражение для определения допусков на выходные параметры получается из предыдущего выражения методом ее линеаризации

$$\Delta y/y = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial \varphi / \partial x_i}{\varphi} \right] \frac{\Delta x_i}{x_i}, \quad \text{где}$$

Δy - абсолютная погрешность выходного параметра;

$\Delta y/y$ - относительная погрешность выходного параметра;

Δx_i - абсолютные погрешности параметров ЭРЭ, сборки и т.д.

$\Delta x_i/x_i$ - относительные погрешности тех же параметров,

$\frac{\partial \varphi / \partial x_i}{\varphi} = \beta_i$ - коэффициент влияния, вычисленный при номинальном значении x_i .

В последнее выражение входят относительные погрешности различных физических величин, которыми удобно оперировать при вычислениях. Это выражение позволяет определить производственный допуск на выходной параметр функционального узла. На основании одной из предельных центральных теорем математической статистики обычно принимается допущение о том, что погрешность выходного параметра подчиняется нормальному закону распределения. Тогда

$$E(\Delta y/y) = M(\Delta y/y) = \sum_{i=1}^n \beta_i \left[E\left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right) + \sigma_{x_i} \delta\left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right) \right],$$

где $E(\Delta y/y)$, $E(\Delta x_i/x_i)$ - середины полей допусков выходного параметра и параметров ЭРЭ, сборки;

$M(\Delta y/y)$, $M(\Delta x_i/x_i)$ - математические ожидания законов распределений соответствующих параметров.

Если допуски ЭРЭ симметричны относительно номинального значения, второе слагаемое в правой части предыдущего выражения равно нулю, а половина поля допуска на выходной параметр определяется на основании правила сложения дисперсий:

$$\delta = \left(\frac{\Delta y}{y} \right) = \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2 K_i^2 \delta_i^2 \left(\frac{\Delta x_i}{x_i} \right)^2 + 2 \sum_{i,j=1}^n \gamma_{ij} B_i B_j K_i K_j \delta_i \left(\frac{\Delta x_i}{x_i} \right) \delta_j \left(\frac{\Delta x_j}{x_j} \right)},$$

где γ_{ij} - коэффициент корреляции между случайными параметрами.

Если погрешности параметров ЭРЭ взаимно независимы, второе слагаемое под корнем равно нулю.

Предельные значения погрешности выходного параметра

$$\left(\frac{\Delta y}{y} \right)_{\text{пр}} = M \left(\frac{\Delta y}{y} \right) \pm \delta \left(\frac{\Delta y}{y} \right).$$

Предельные значения погрешности выходного параметра

$$y_{\text{пр}} = y_0 + M \left(\frac{\Delta y}{y} \right) \frac{y_0}{100} \pm \delta \left(\frac{\Delta y}{y} \right) \frac{y_0}{100},$$

где y_0 - номинальное значение выходного параметра.

Коэффициенты влияния B_i определяются в результате преобразования исходного выражения, представив это выражение в виде отношения многочленов $y=L/G$:

$$B_i = \frac{\psi L(x_i)}{L} - \frac{g G(x_i)}{G},$$

где ψ - показатель степени параметра x_i в числителе отношения многочленов L/G ;

g - показатель степени параметра x_i в знаменателе отношения многочленов L/G

$L(x_i)$, $G(x_i)$ - части многочленов L и G , содержащие x_i .

Значения коэффициентов α_i и k_i для различных законов рассеивания, коэффициента γ для заданной надежности расчета и добавочные множители при K_i , выбирают из таблиц.

Решение обратной задачи - выбор допусков ЭРЭ, сборки по заданным допускам на выходные параметры РЭА - значительно более сложно, так как ее решение неопределенно и не однозначно. Решается она методами последовательного приближения, равного или обратно пропорционального влияния, методами линейного программирования.

Рассмотрим пример.

Для вилки разъема, чертеж которой приведен в задании № 4, определить отклонение оси контакта от оси корпуса, получаемое при сборке вилки. Эксцентриситет и погрешности формы всех деталей находятся в пределах полей допусков. Рассеивание размеров подчиняется закону нормального распределения.

Решение: Анализ величин диаметра корпуса 1, изоляторов 2, 3 и контакта 4 позволил установить размерную цепь, определяющую положение контакта. Очевидно, что номинальное значение отклонения оси контакта A_n будет равно 0, так как посадки в соединениях-H7/h8. По формуле (*) определяется допуск на величину отклонения оси контакта от оси корпуса при доверительной вероятности расчета $P = 0,997$.

$$j_n = \sqrt{2(0,08^2 + 0,15^2)} = \pm 0,24 \text{ мм}$$

Условия собираемости деталей

Условия собираемости деталей определяются максимально допустимыми смещениями поверхностей соединяемых деталей друг относительно друга, при котором возможно сопряжение, т.е. сборка; они могут быть сведены к двум условиям:

1) $\Delta x > \varepsilon_x$, $\Delta y > \varepsilon_y$, $\Delta z > \varepsilon_z$, где

Δx , Δy , Δz - допустимые смещения собираемых деталей по осям координат;

ε_x , ε_y , ε_z - действительные смещения собираемых деталей по осям координат, определяемые схемой базирования

$$2) \quad \Delta_a > \varepsilon_a, \Delta_b > \varepsilon_b, \Delta_y > \varepsilon_y,$$

где $\Delta_\alpha, \Delta_\beta, \Delta_\gamma$ - допустимый поворот собираемых деталей относительно осей $0x, 0y, 0z$;

$\varepsilon_\alpha, \varepsilon_\beta, \varepsilon_\gamma$ действительный относительный поворот деталей по осям координат, определяемый схемой базирования.

Допустимые смещения и повороты собираемых деталей могут быть разными и зависят от сопрягаемости по различным поверхностям. Это может быть:

- сборка деталей, сопрягаемых по цилиндрическим поверхностям,
- сборка деталей, сопрягаемых по плоским поверхностям,
- сборка деталей, сопрягаемых по двум цилиндрическим поверхностям,
- сборка деталей, сопрягаемых по резьбовым поверхностям, (рис. 3, 4, 5, 6).

Базирование деталей перед сборкой

Наиболее ответственным этапом сборки является обеспечение относительного положения собираемых деталей на базирующих устройствах перед их соединением.

Схемами базирования собираемых деталей являются такие, которые определяют положение в пространстве двух и более сопрягаемых деталей относительно друг друга перед их соединением и удовлетворяют условиям их собираемости. Положение деталей перед сборкой определяется различными схемами базирования. Наиболее характерные схемы базирования и действительные погрешности базирования собираемых деталей следующие:

1. Базирование собираемых деталей на призму.

Действительная погрешность базирования оси вала

оси втулки

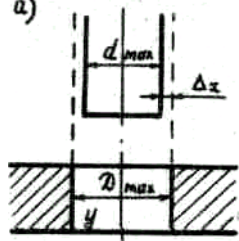
$$\varepsilon_z = \frac{\delta_d}{2 \sin \alpha/2} ,$$

$$\varepsilon_{bm} = \frac{\delta_d}{2 \sin \alpha/2} + l ,$$

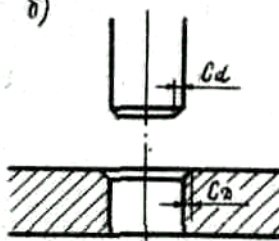
где l - несоосность наружной и внутренней цилиндрических поверхностей;

45

а)



б)



C_d и $C_д$ —
размеры фасок
вала и втулки

Рис. 3. Сборка деталей, сопрягаемых по цилиндрическим поверхностям

- а) детали без фаски,
б) детали с фасками

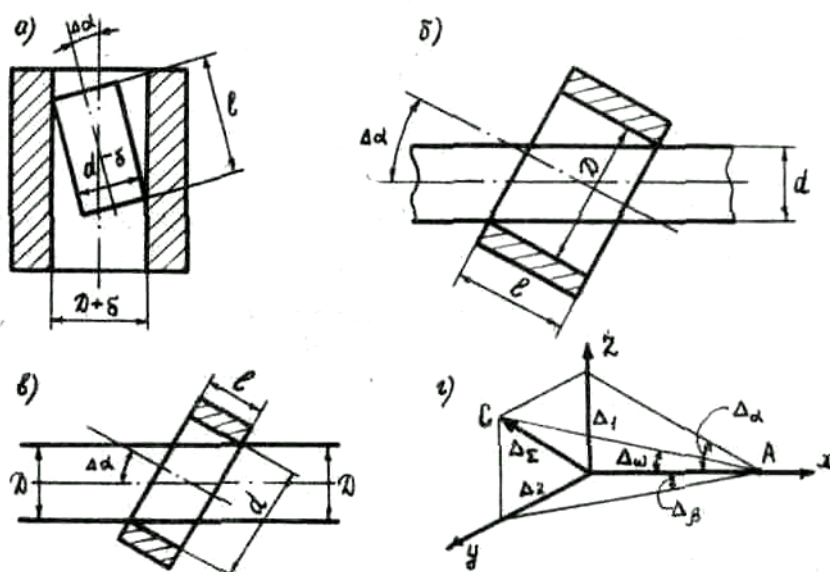


Рис. 4. Схемы к расчету допустимого угла поворота
 а - оси вала относительно оси отверстия,
 б - оси втулки относительно оси вала,
 в - оси шайбы относительно оси вала,
 г - суммарного перекося осей

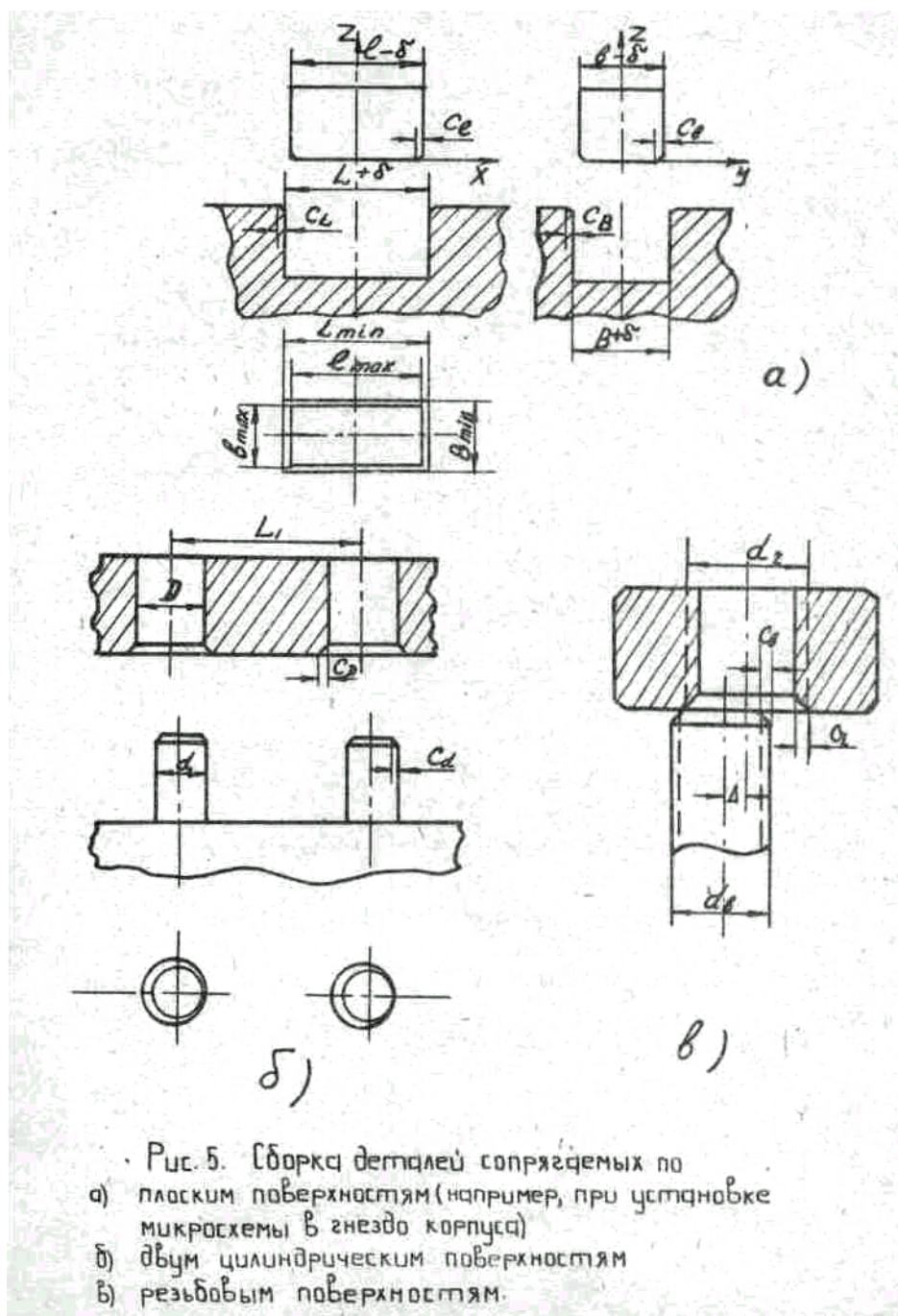


Рис. 5. Сборка деталей сопрягаемых по
 а) плоским поверхностям (например, при установке микросхемы в гнездо корпуса)
 б) двум цилиндрическим поверхностям
 в) резьбовым поверхностям.

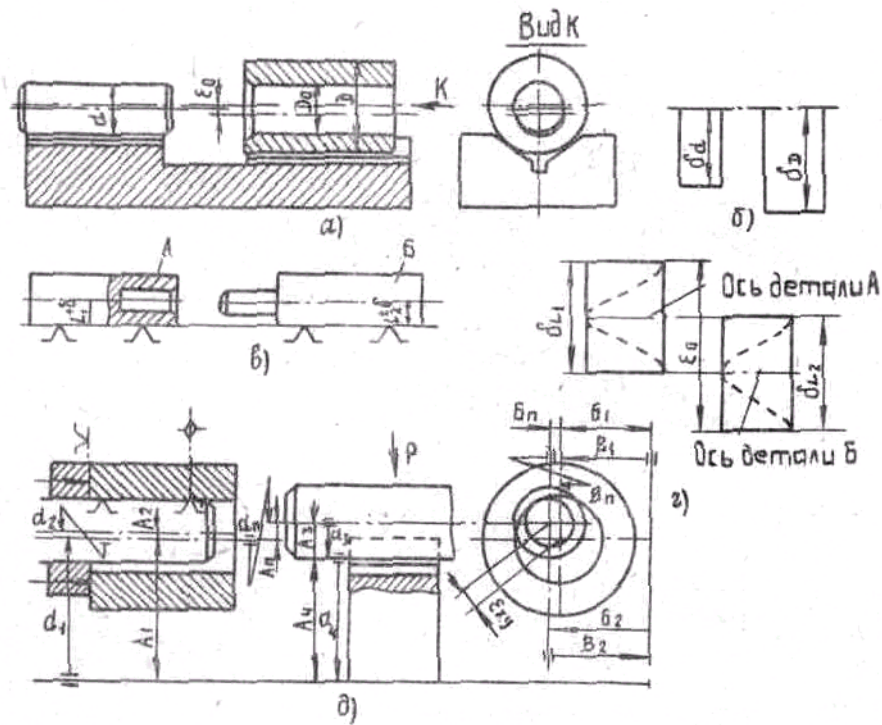


Рис. 6. Базирование собираемых деталей

- а) схема базирования на призмы
- б) поля собираемых допусков
- в) схема базирования на плоскости
- г) поля распределения допусков
- д) схема базирования на цилиндрические и призматические поверхности.

α - угол призмы.

Общей погрешностью базирования ε_0 , т.е. взаимное смещение осей вала и втулки, считают большее из двух полученных значений: $\varepsilon_0 = \varepsilon_B$

2. Базирование собираемых деталей на плоскость.

Погрешность базирования оси деталей А при базировании на плоскость $\varepsilon_A = \delta_L$, детали Б

$$\varepsilon_B = \pm \delta_{L_2} = \frac{1}{2} \delta_{L_2}.$$

Погрешность базирования деталей перед сборкой определяется расстоянием между верхней границей допуска на деталь А и нижней границей поля допуска на деталь Б:

$$\varepsilon_0 = \delta_{A_1} + \frac{1}{2} \delta_{L_2}$$

3 Базирование собираемых деталей на цилиндрическую и призматическую поверхности.

4. Базирование резьбовых деталей перед сборкой.

Схема базирования мало чем отличается от схем базирования соединений по цилиндрическим поверхностям.

5 Определение требуемой точности относительного положения сопрягаемых деталей вдоль их оси.

Примером такой сборки является запрессовка вала в отверстие, (сборка волноводного тракта).

Необходимо, чтобы вал переместился на величину A до соприкосновения торцов корпуса 1 и вала 2, тогда действительная погрешность базирования определится из решения размерной цепи

$$A_n = A_2 - A_1;$$

$$\varepsilon = \delta_{A_n} = \delta_{A_1} + \delta_{A_2},$$

где δ_{A_n} - допуск замыкающего звена.

Полученная величина ε сравнивается с допуском по условиям собираемости.

Содержание работы

Работа содержит несколько вариантов исходных данных на конструирование, по которым необходимо в соответствии с заданием произвести требуемые расчеты. Каждый вариант задания предусматривает предварительное изучение теоретического материала, изучение одного из вариантов конструкции РЭА в соответствии с заданием, разработку схем сборки, выполнение требуемых расчетов, представление результатов работы в графическом виде с пояснительной запиской.

Порядок проведения работы

- Ознакомиться с настоящими методическими указаниями и ответить на контрольные вопросы,
- изучить конструкцию по полученному заданию и правила оформления КД,
- представить в виде эскизов сборочные детали, сборочные единицы,
- разработать схему сборки,
- выполнить необходимые расчеты,
- оформить результаты работы,

Содержание отчета

В отчете должны быть приведены:

- краткие сведения из теории;
- эскизные чертежи, выполненные на миллиметровке в соответствии с требованиями ЕСКД;
- выполненные расчеты с пояснениями,
- выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что называют процессом сборки? Каковы ее особенности?
2. Какие требования к конструкции предъявляются с точки зрения сборки и почему?
3. Что такое схема сборочного состава. Как она выполняется, как связана с конструкцией?

4. Как используется схема сборочного состава?
5. Чем необходимо руководствоваться при разработке схем обонго о состава РЭА?
6. Что такое показатель степени сложности сборочного состава?;
7. Как обеспечивается точность сборки конструкции РЭА?
8. Какие основные условия должны быть выполнены в процессе сборки конструкции. Приведите примеры.
9. Что представляет собой расчет точности РЭА?
10. Какие виды контроля РЭА вы знаете?

Варианты заданий

Вариант I.

Разработать схему сборочного состава и технологическую схему сборки делителя мощности СВЧ, конструкция которого приведена на рис. 1п

Вариант 2.

Разработать схему сборочного состава и технологическую схему сборки дросселя, приведенного на рис. 2п

Вариант 3.

Разработать схему сборочного состава и технологическую схему сборки кнопки однополюсной, приваленной на рис. 3п

Вариант 4.

Разработать схему сборочного состава и технологическую схему сборки разъема, приведенного на рис. 4п

Вариант 5.

Разработать схему сборочного состава и технологическую схему сборки блока РЭА, приведенного на рис. 5п

Вариант б.

Определить допуск на габаритный размер дросселя (рис. 2п) Расчет выполнить с гарантированной надежностью 0,9973.

Размеры для расчета:

- толщина экрана 11-1-0,12 мм;
- толщина стенки крышки 10 - 2,8-0,2 мм,
- толщина колпачка 14 - 4,5 - 0,5 мм;
- высота чашки броневое сердечника - 15,7 - 0,4 мм ;
- толщина корпуса - 4 ± 1 мм .'
- размеры корпуса I приведены на чертеже.

Размеры деталей дросселя подчиняются закону нормального распределения.

Вариант 7.

Определить с надежностью 0,95 возможное отклонение оси контактного лепестка гибкого печатного кабеля (ГПК) относительно оси контактной площадки ПП при установке ГПК с помощью оплавления штырей колодки кабеля в неметаллизированных отверстиях ПП. (рис.6п).

Размеры для расчета: ширина проводников ГПК 1,25- 0,1мм, предельные отклонения размеров между осями двух любых печатных проводников $\pm 0,1$ мм, диаметр штыря колодки ГПК 1,8 -0,12 мм; расстояние между осью отверстия под штырь и осью контактной площадки на ПП 0,25 $\pm 0,1$ мм; предельное отклонение между осями двух любых контактных площадок платы $\pm 0,06$ мм.

Вариант 8.

Для представленной на чертеже сборочной единицы (рис.7п), состоящей из штифта 1 и основания 2, определить условие собираемости деталей, предложить схему базирования деталей, обеспечивающую собираемость деталей в автоматическом режиме.

Вариант 9.

Для представленной на чертеже сборочной единицы определить условие собираемости входящих в нее деталей, предложить схему базирования деталей, обеспечивающую собираемость деталей в сборочную единицу; предложить вариант сборочного приспособления (эскиз).

- а) рис.8ап ,
- б) рис.8бп .
- в) рис.8вп ,
- г) рис. 8гп.

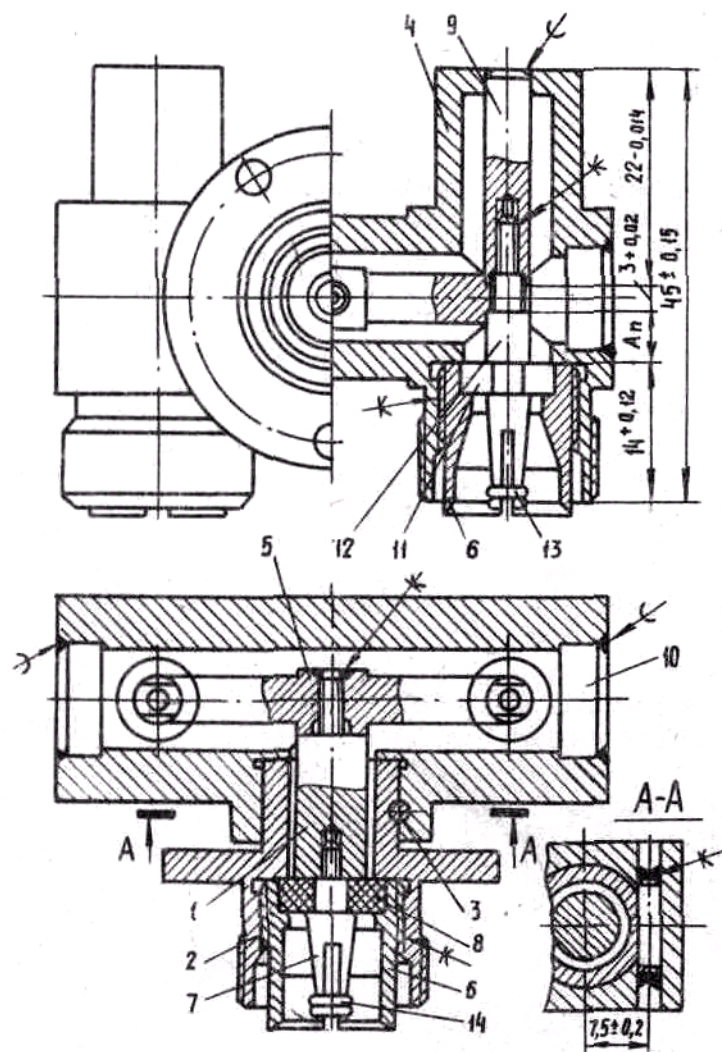


Рис. 1н

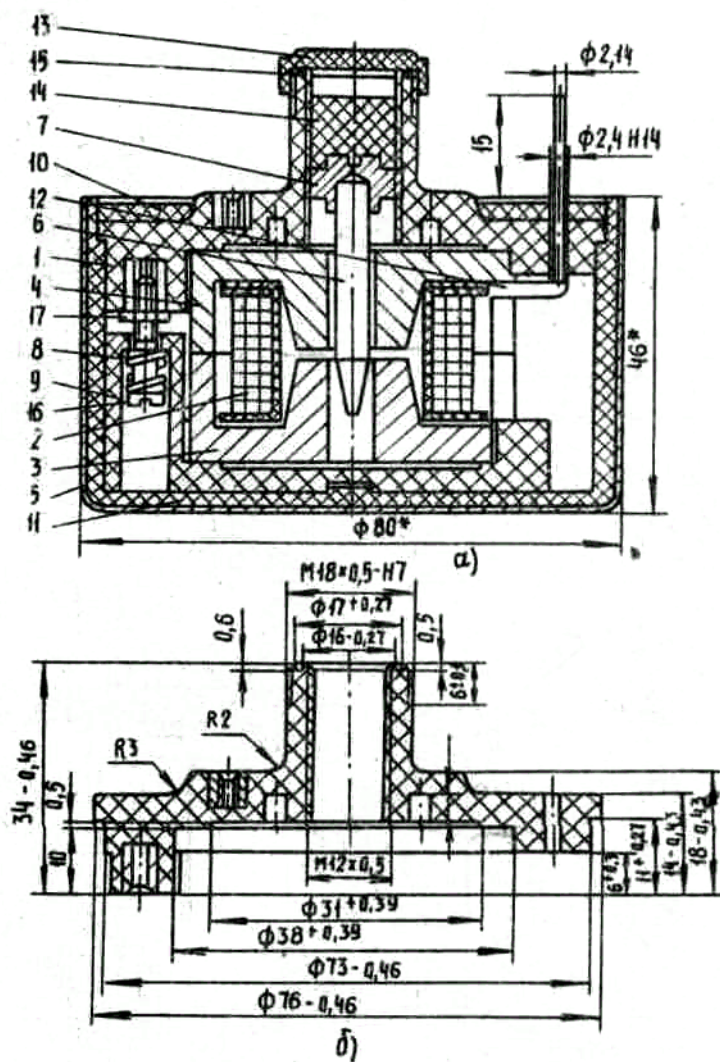


Рис. 2 n

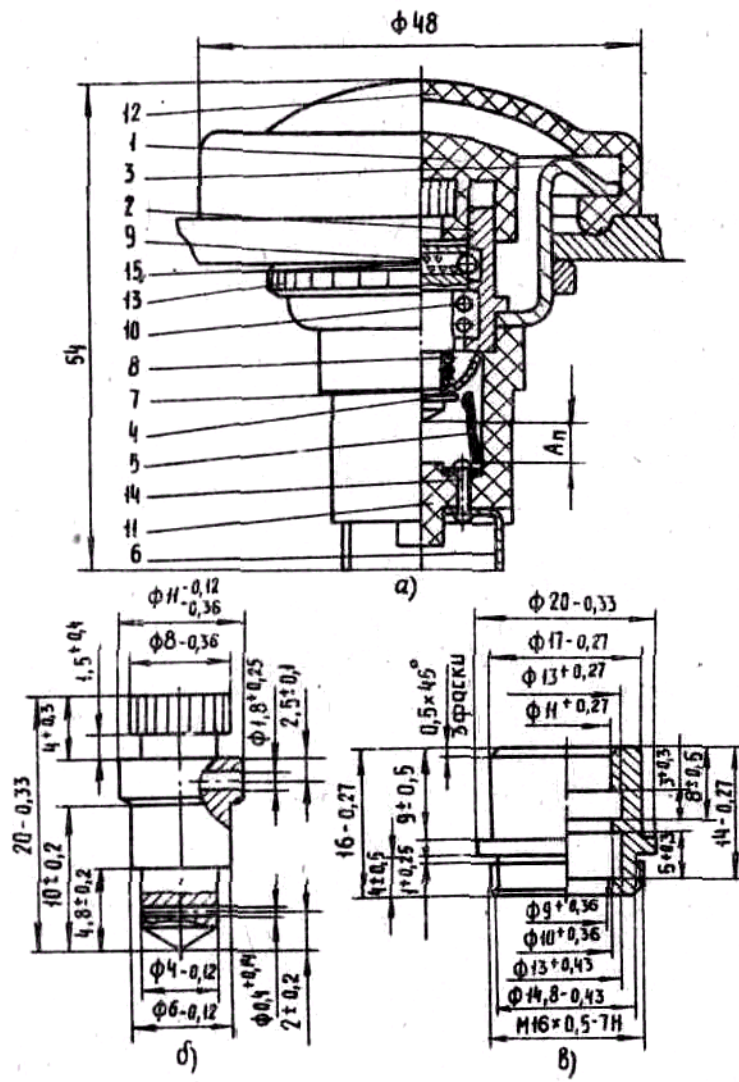
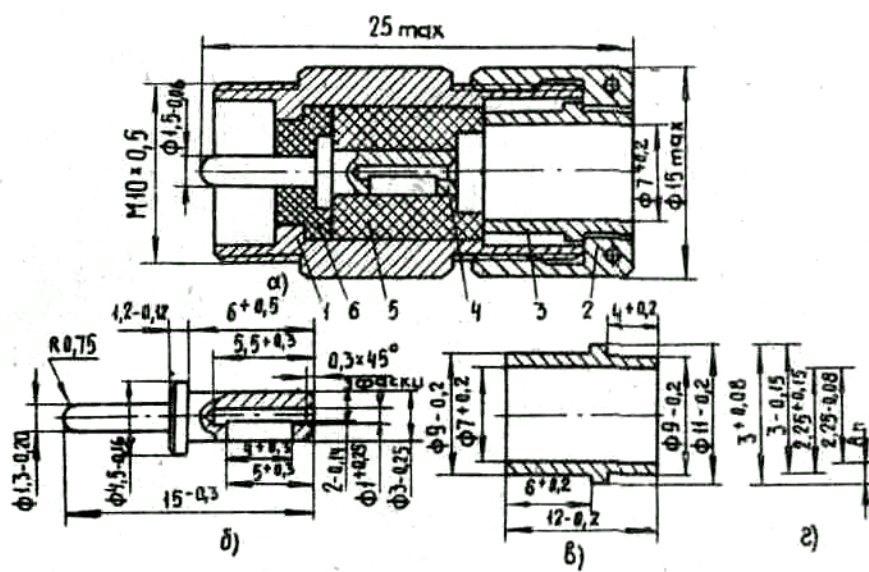


Рис. 3н



$P_{uc, 4n}$

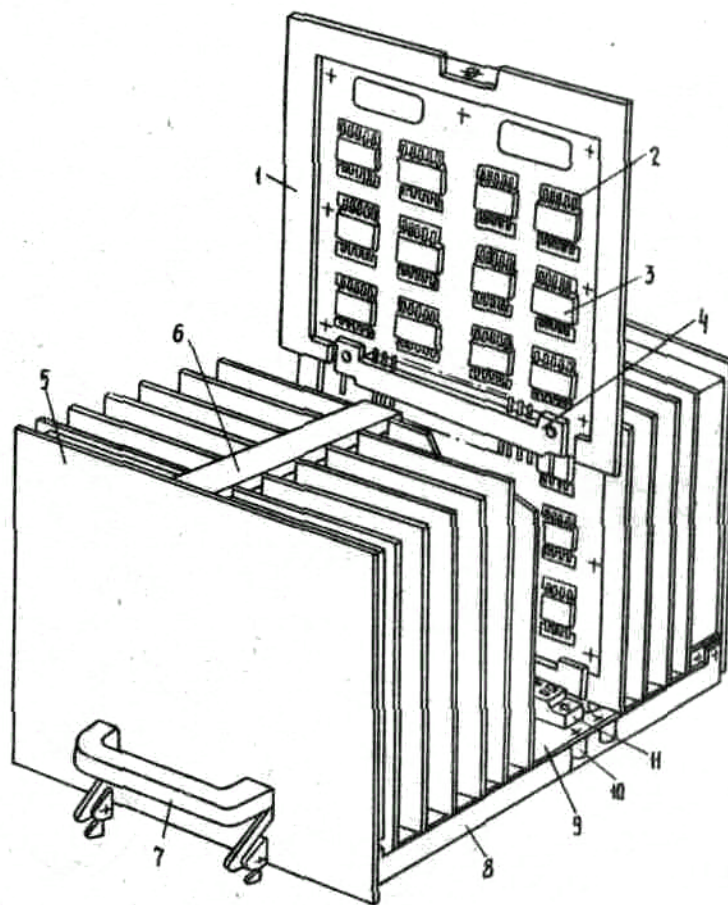
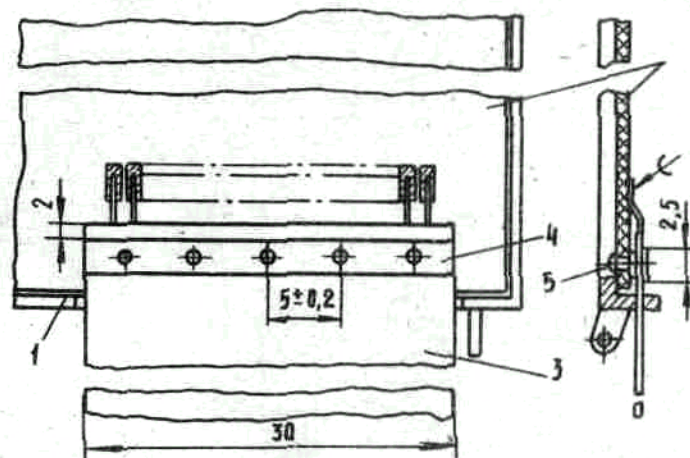
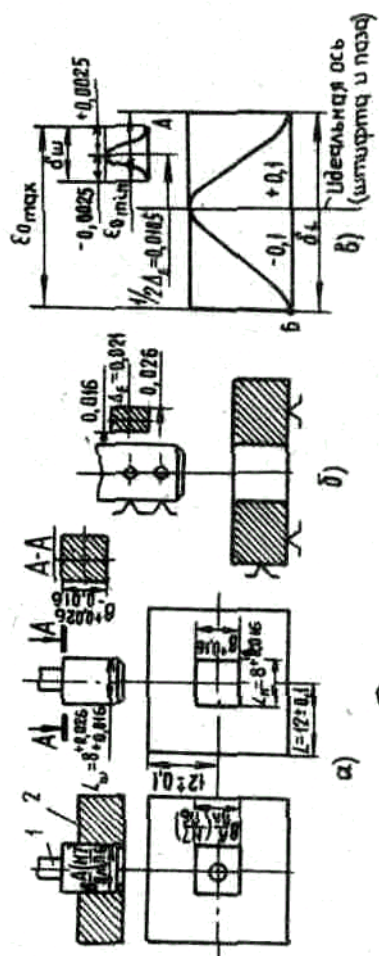


Рис. 5n





$P_{UC.7n}$

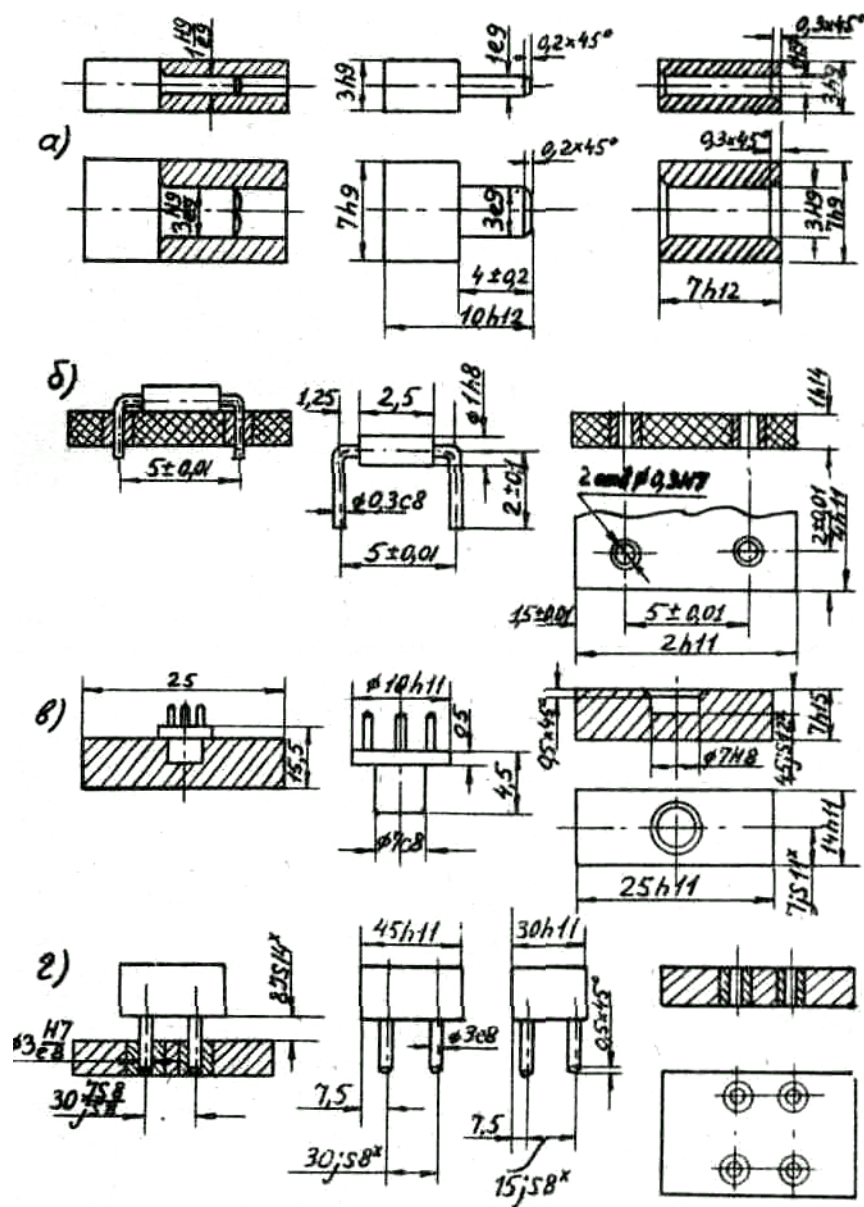


Рис. 8н

РАБОТА № 6: АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ МИНИАТЮРИЗАЦИИ РЭА

Цель работы: обосновать путем оценки эффективности и уровня миниатюризации примеров РЭА необходимость разработки МСБ и произвести оценочный расчет ее конструкций.

Методические указания

Оценка эффективности миниатюризации РЭА

Эффективность изделий является проявлением их качества в определенных ситуациях использования этого изделия по его прямому назначению. Эффективность операции по миниатюризации РЭА можно оценить по приращению ее качества, полученному в результате этой операции.

Комплексная оценка качества играет большую роль при создании новых видов РЭА, определении наиболее целесообразных условий их применения, сравнении между собой различных устройств и систем одного и того же назначения.

Ситуация, в которой возникает необходимость оценки эффективности миниатюризации, может быть, например, следующей: на объекте необходимо разместить аппаратуру, к которой предъявляются жесткие требования по объему или энергопотреблению. Для оценки эффективности миниатюризации устройств РЭА могут быть использованы следующие критерии.

$$W = \varphi^{(A)}(X_j) - \varphi^{(M)}(X_j);$$

$$W = \frac{\varphi^{(A)}(X_j)}{\varphi^{(M)}(X_j)}, \text{ где } \varphi(X_j) - \text{целевая функция.}$$

Допустим, необходимо сравнить Р вариантов исполнения устройств одного и того же функционального назначения, имеющих оценки по m показателям качества X_j .

Алгоритм оценки эффективности миниатюризации устройств РЭА выглядит следующим образом:

1. Производится выбор ограниченного множества показателей качества аппаратуры $\{X_j\}$, $j \in [1, m]$, существенно зависящих от операции миниатюризации.

В качестве таких показателей выбирают, например, стоимость, массу, надежность и т.д..

2. Строится матрица размером

$$X = \begin{vmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{p1} & X_{p2} & \dots & X_{pm} \end{vmatrix}$$

Матрица преобразуется к нормированному виду \bar{X} с помощью нормирующих функций наиболее часто встречающихся

$$\gamma^{(1)}(x_j) : \bar{X}_j = \frac{X_j^{**} - X_j}{X_j^{**} - X_j^*}, \quad j = \overline{1, m}$$

(для показателей, с увеличением которых качество повышается),

$$\gamma^{(2)}(x_j) : \bar{X}_j = \frac{X_j - X_j^*}{X_j - X_j^{**}}, \quad j = \overline{1, m}$$

(для показателей, с уменьшением которых качество повышается);

здесь X_j^* - минимум j -го показателя;

X_j^{**} - максимум j -го показателя.

Нормирующие функции такого вида используются для сравнения по качеству малого числа вариантов. А нормирующие функции вида

$$\gamma(X_j) : \bar{X}_j = \frac{X_j - X_j^*}{X_j^{**} - X_j^*}$$

используются для сравнения по качеству большого числа вариантов устройств.

В общем случае последняя функция определяется выражением

$$\bar{X}_j = \frac{X_j - X_j^*}{X_j^{**} - X_j^*} \ell_j + \left| \frac{X_j - X_j^{**}}{X_j^{**} - X_j^*} \right| (1 - \ell_j),$$

$$\ell_j = \begin{cases} 1, & \text{если показатель } X_j \text{ нормальный;} \\ 0, & \text{если показатель } X_j \text{ инверсный.} \end{cases}$$

Здесь показатель X_j - нормальный, если для объекта g с лучшей j -й характеристикой $X_{jg} > X_{j\omega}$ $g \neq \omega$; показатель X_j - инверсный, если $X_{jg} \leq X_{j\omega}$ $g \neq \omega$

Использование нормирующей функции такого вида говорит о том, что во всем диапазоне заданному приращению ΔX_j соответствует одно и тоже приращение $\gamma(X_j)$, т.е. данное преобразование линейно. Если один из пределов $X_j \rightarrow \infty$, используется нелинейное преобразование.

Иногда показатели качества X изменяются в пределах нескольких десятков, тогда нормирование показателей целесообразно производить по формуле.

$$\bar{X}_j = \frac{\lg X_j - \lg X_j^{**}}{\lg X_j^{**} - \lg X_j^*} \quad \text{при} \quad \frac{X_j^{**}}{X_j^*} > 10.$$

3. Определяются (или задаются) коэффициенты значимости отдельных показателей качества X_j .

4. Производится оценка качества исполнения устройств.

При этом лучшему качеству РЭА пусть соответствует меньшее значение целевой функции $\varphi(X_j)$, которая ставит в соответствие каждому объекту вместо m -мерного вектора оценок $X = \{X_j\}$, $j \in [1, m]$ скалярную оценку, после чего задача выбора и упорядочения решается известным образом.

5. Полученный набор положительных чисел упорядочивается в ряд по их возрастанию, что соответствует порядку убывания предпочтительности вариантов устройств с точки зрения их качества.

При наличии конкретного аналога, выполненного без применения средств микроэлектроники, оценка эффективности миниатюризации может быть получена по описанному алгоритму с использованием критерия "W"

II. Оценка уровня миниатюризации РЭА

При формировании ТЗ на вновь разрабатываемую РЭА в нем оговаривается требуемый уровень миниатюризации.

На стадиях эскизного и технического проектирования (как предварительно) и на стадии разработки рабочей документации опытных образцов (окончательно) производится оценка уровня миниатюризации РЭА.

Если устройства выполнены в микроэлектронном исполнении на основе использования ИМС широкого применения, различают степени интеграции, то их уровень миниатюризации оценивается коэффициентами применяемости ИМС первой μ_1 , второй μ_2 , и т.д. степеней интеграции, которые определяются отношением суммарного числа эквивалентных элементов в ИМС к общему числу элементов в устройстве.

Оценка уровня миниатюризации изделий, состоящих из ряда конструктивных законченных модулей, выполняющих самостоятельные функции, производится отдельно по модулям.

Коэффициент применяемости ИМС, включая МСБ k -ой степени интеграции, в модуле определяется по формуле

$$\mu_k = \frac{\sum_{i=1}^m n_{ki} N_{ki}}{\sum_{k=1}^L \sum_{i=1}^m n_{ki} N_{ki} + M}, \quad k = \overline{1, L}, \quad i = \overline{1, m}$$

где n_{ki} - число эквивалентных элементов в ИМС (МСБ) i -го типа k -й степени интеграции

N_{ki} - число ИМС (МСБ) i -го типа k -й степени интеграции в модуле.

M - число дискретных элементов в модуле.

Общий коэффициент применяемости интегрированных элементов в модуле определяется как

$$\mu_0 = \sum_{k=1}^L \mu_k.$$

Значения μ_0 и μ_k лежат в пределах от 0 до 1;

они показывает долю интегрированных элементов в модуле.

Миниатюризация электронных блоков, состоящих из маломощных каскадов, не может полностью решить проблему миниатюризации РЭА. Значительную часть аппаратуры составляют блоки мощных передатчиков, устройства отображения информации, кинематические механизмы и т.д., которые сегодня еще слабо поддаются миниатюризации.

Уровень миниатюризации устройств целесообразно оценивать коэффициентом

$$\mu_v = \frac{V_a - V_m}{V_a}, \quad 0 \leq \mu \leq 1,$$

где V_m - объем устройства, подвергнутого миниатюризации,

V_a - объем аналога в другом исполнении. В некоторых случаях удобно пользоваться коэффициентом по массе

$$\mu_G = \frac{G_a - G_m}{G_a}; \quad 0 \leq \mu \leq 1.$$

Область допустимых значений уровней миниатюризации различных устройств определяется статистически

$$\mu_{0 \min} \leq \mu_0 \leq 1,$$

где $\mu_{0 \min}$ - минимально допустимый уровень миниатюризации для данного класса устройств (устанавливается директивно на основе анализа); единица - предельно достижимый уровень миниатюризации.

Если уровень миниатюризации РЭА $\mu_0 \geq \mu_{0 \min}$, то она соответствует

современному уровню развития микроэлектроники и методов конструирования, если $\mu_0 < \mu_{0 \min}$ - то нет.

Аналогично устанавливаются области допустимых значений μ для тех частей РЭА, создание которых на данном этапе не может быть реализовано средствами микроэлектроники,

$$\begin{aligned} \mu_{V \min} &\leq \mu_V < 1; \\ \mu_{G \min} &\leq \mu_G < 1. \end{aligned}$$

Показатели уровня миниатюризации μ_0 и μ_V могут быть использованы как критерии, указывающие на целесообразность модернизации конструктивно устаревших РЭ систем. Так, например если образец имеет уровни миниатюризации $\mu_0^{(2)}$ и $\mu_V^{(2)}$ и предварительная проработка показывает, что использование более современной элементной базы, новых технических и конструктивных решений позволит подучить более высокий уровень миниатюризации:

$$\begin{aligned} \mu_0^{(1)} &> \mu_0^{(2)}; \\ \mu_V^{(1)} &> \mu_V^{(2)}, \end{aligned}$$

то модернизация целесообразна при выполнении неравенств

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \frac{\mu_0^{(1)}}{\mu_0^{(2)}} \geq 1 + \varepsilon_1, \\ \xi_2 &= \frac{\mu_V^{(1)}}{\mu_V^{(2)}} \geq 1 + \varepsilon_2, \\ S_{\Sigma} &\leq S_{\Sigma}^* \end{aligned}$$

где ε_1 и ε_2 минимально допустимые относительные приращения уровня миниатюризации (устанавливаются директивно).

S_{Σ} и S_{Σ}^* - потребные и максимально допустимые ресурсы на модернизацию РЭА.

Показатели ξ_1 и ξ_2 определяют эффективность дальнейшего миниатюризации РЭА, т.е. если оценивать необходимость модернизации устройства по принципу "да - нет", можно записать:

$$\xi_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{\mu_0^{(1)}}{\mu_0^{(2)}} \geq 1 + \varepsilon_1, S_{\Sigma} \leq S_{\Sigma}^*; \\ 0, & \text{если } \frac{\mu_0^{(1)}}{\mu_0^{(2)}} < 1 + \varepsilon_1, S_{\Sigma} > S_{\Sigma}^*. \end{cases}$$

$$\xi_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{\mu_V^{(1)}}{\mu_V^{(2)}} \geq 1 + \varepsilon_2, S_{\Sigma} \leq S_{\Sigma}^*; \\ 0, & \text{если } \frac{\mu_V^{(1)}}{\mu_V^{(2)}} < 1 + \varepsilon_2, S_{\Sigma} > S_{\Sigma}^*. \end{cases}$$

Проведение на различных этапах разработки оценки уровня миниатюризации РЭС дает информацию для выбора направлений проектирования и способствует повышению качества проектируемой РЭА.

Таким образом, при разработке РЭА III, IV поколений необходимо использовать максимально возможное количество ИМС широкого применения для достижений более высокого уровня миниатюризации. Однако, учитывая, что при настоящем уровне развития микроэлектроники номенклатура ИМС широкого применения пока еще недостаточна для получения технически достижимого уровня миниатюризации РЭС, разработчикам РЭА приходится создавать либо ИМС специального применения и микросборки, либо микроэлектронный аналог устройства с помощью современной технологии, как, например, в случае микроминиатюризации СВЧ - устройств.

В настоящее время для изготовления микросборок наиболее широко используется гибридно-пленочная технология. Проектирование гибридных микросборок по сравнению со схемами на дискретных элементах имеет ряд особенностей, связанных с необходимостью комплексного решения схемотехнических, конструктивно-технологических (топологических) и технологических процессов.

Перевод в микроэлектронное исполнение дискретных функциональных узлов, выполненных без учета требований гибридно-пленочной технологии, связан с переработкой схем, что равноценно новой разработке их в гибридно-пленочном исполнении. Это приводит к возрастанию затрат на проектирование и изготовление РЭА, что является объективным ограничением дальнейшей микроминиатюризации.

В связи с этим на ранних стадиях проектирования РЭА возникает задача выбора номенклатуры устройств РЭА, миниатюризация которых без использования ИМС широкого применения дает максимальную эффективность. При этом принимают, что при использовании в аппаратуре только ИМС широкого применения никаких ограничений (дополнительных затрат) не возникает, а ограничения в ресурсах появляются при необходимости повышения уровня миниатюризации РЭА за счет разработки микросборок специализированного применения и интегральных микроэлектронных устройств собственного изготовления.

Тогда можно сформулировать задачу.

Пусть необходимо выбрать номенклатуру устройств, миниатюризация которых дает максимальный эффект при заданных ограничениях на ресурсы.

Пусть при решении задачи будет выбрано $m \leq n$ функциональных устройств. Функциональные устройства $1, 2, 3, \dots, i, \dots, n$ это устройства, которые не могут быть миниатюризированы за счет ИМС широкого применения и на миниатюризацию которых следует распределить ресурсы S_{Σ} - здесь разработка каждого i -го устройства в интеграль-

ном исполнении дает приращение уровня миниатюризации РЭА, на μ_r и требует затрат $S_i(\mu_r)$.

Разрабатываемые m устройств обозначим через j , ($j=1,2,\dots,m$). Тогда задача выбора номенклатуры функциональных устройств, миниатюризация которых дает максимальный эффект при ограничениях на ресурсы, формулируется следующим образом:

Найти номера

$$j \in [1, m] : M_z = \sum_{j=1}^m M_{zj} \rightarrow \max$$

$$\text{при } S(M_z) = \sum_{j=1}^m S_j(M_z) \leq S_z^* \quad (**)$$

и формулируется, таким образом, как целочисленная задача линейного программирования. Рассмотрим алгоритм ее решения.

Пусть уже выбрано r ($r < m$) устройств, тогда выбор $(r+1)$ -го устройства подчиняется следующему правилу: выбирается то устройство, при котором уровень миниатюризации для всех $(r+1)$ устройств, приведенный к затратам, будет максимальным. В соответствии с этим правилом первым выбирается то устройство, для которого выполняется условие:

$$\Delta_1 = \max_i \frac{M_{zi}}{S_i} = \frac{M_{zj_1}}{S_{j_1}}$$

Выбор $r+1$ устройства подчиняется правилу

$$\Delta_{r+1} = \max_{i=R} \frac{\sum_{j=R}^R M_{ji} + M_i}{S_{jR} + S_i}$$

где jR - порядковые номера устройств, выбранных до $(r+1)$ -го шага.

Это правило может быть нарушено только на последнем шаге, когда устройство, определяющее максимальный суммарный приведенный уровень миниатюризации, может нарушить условие (**)

В связи с этим на последнем шаге выбирается то устройство, которое не нарушает этого условия и в наибольшей степени удовлетворяет предыдущему.

III. Повышение уровня миниатюризации РЭА за счет создания гибридных микросборок

Теперь, при разбиении функциональной схемы устройства, прибора и т.п. на блоки, функциональные ячейки конструктор одновременно определяет

возможность их реализации при использовании ИС широкого применения.

Однако, в ряде случаев приходится кроме использования ИС широкого применения конструировать специализированные гибридные микросхемы -микросборки, чтобы повысить (обеспечить требуемый) уровень миниатюризации проектируемой РЭА.

Дело в том, что функциональная схема устройства в процессе оптимального проектирования на основе ПФР или других показателей разбивается (расчленяется) на функциональные блоки, узлы, которые могут быть реализованы на ИМС широкого применения; на МСБ и БИС для использования в функциональных ячейках или для самостоятельного применения в виде ФЯ, которые подлежат разработке; и на узлы не подающиеся миниатюризации.

Тогда на ранних стадиях проектирования РЭС выполняют оценочный расчет конструкции такой микросборки (МСБ).

Для этого необходимо, зная требуемый уровень интеграции проектируемой МСБ, конструктивные параметры используемых кристаллов, их количество и разрешающую способность пленочной технологии, выбрать (определить) минимально допустимый размер подложки, выбрать тип корпуса, минуя стадию разводки соединительных проводников. Или, задавая размеры сторон подложки, определить максимальное число кристаллов, расположенных на этой подложке.

Здесь на этом этапе, главной задачей конструктора МСБ является устранение крупногабаритных компонентов, а эта задача может решаться двумя путями: миниатюризацией таких компонентов или заменой их путем изменения электрической схемы устройства и опять же миниатюризацией.

Основные моменты конструирования ГИС широкого применения такие как выбор элементов базы, технологии изготовления, расчет пленочных элементов, размещение элементов и компонентов, корпусирование и др. достаточно хорошо известны разработчикам и конструкторам микросхем широкого применения, т.е. специалистам электронной промышленности.

Однако, поскольку разработчикам и конструкторам РЭА в настоящее время тоже часто приходится заниматься конструированием и производством МСБ, т.е. специализированных ГИС, то радиоинженеру - конструктору необходимо знать некоторые особенности конструирования МСБ и технологии их изготовления / /.

В терминологии по МСБ еще не совсем установились некоторые понятия, поэтому специализированную ГИС называют МСБ или ИМС ограниченного применения, а используемые для их построения бескорпусные активные элементы (диоды, транзисторы и т.п.) называют также бескорпусными микросхемами, кристаллами, элементной базой ИС широкого применения.

Известны для этих целей схемы резистивно-транзисторной логики (РТЛ),

транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ) и др., перспективными можно назвать схемы эмиттерно-совмещенной логики (ЭСТЛ).

Кристалл схемы РТЛ имеет квадратную форму и пять гибких выводов, которые припаиваются, либо привариваются к подложке микросхемы, МСБ.

Схемы ТТЛ используются шире, чем схемы РТЛ. Их особенностью является наличие в одном кристалле большего числа вентилях (эквивалентный вентиль представляет совокупность из 10 элементов без дифференцирования их электрических функций), чем в РТЛ.

Кристалл имеет квадратную форму и 16 шариковых выводов (если вентилях, например, 4).

В общем случае кристалл может быть с гибкими выводами или с жесткими шариковыми выводами.

Исходными данными для расчета конструктивных параметров МСБ является схема принципиальная электрическая, требуемый уровень интеграции, рекомендации по выбору кристалла. МСБ будет представлять собой корпусированную электрическую подложку одного из типоразмеров, все пассивные элементы на которой неразрывно связаны между собой пленочными проводниками и изготовлены в виде однослойных или многослойных структур, а навесные компоненты и кристалл смонтированы пайкой или сваркой в контактные площадки.

Расчет конструктивных параметров МСБ

Определение начнем с анализа посадочного места кристалла.

Площадь посадочного места кристалла ограничивается контуром, проведенным по внешним краям контактных площадок, расположенных на коммутационной пленочной плате вокруг кристалла. Поскольку кристаллы имеют прямоугольную форму, то общее число площадок вокруг них должно быть четным.

По числу контактных площадок и их характеристикам - стороне квадрата контактной площадки "а", минимальному расстоянию между двумя контактными площадками d_1 , минимальному расстоянию от края кристалла до края контактной площадки С можно определить размеры посадочного места кристалла.

Вокруг кристалла обычно можно расположить некоторое число контактных площадок, которое превышает необходимое.

Минимальные размеры b_1 и l_1 , посадочного места кристалла с гибкими выводами определяются по Формулам

$$\begin{aligned} b_1 &= b_{кр} + 2(a + c), & b_{кр} & - \text{ширина кристалла,} \\ l_1 &= l_{кр} + 2(a + c), & l_{кр} & - \text{длина кристалла.} \end{aligned}$$

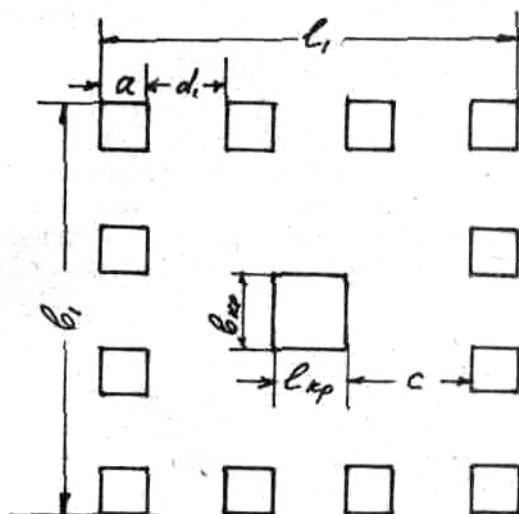


Рис.1 Паячное место кристалла.

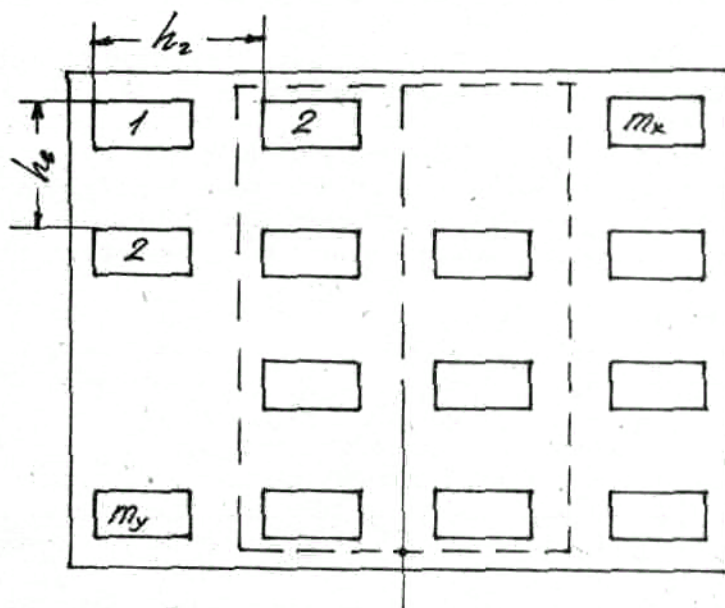


Рис.2 Пример разводки питания.

Если принять разводку питания и корпуса как на рис.2, то минимальные шаги установки кристаллов hb_{\min} и hg_{\min} по вертикали и горизонтали соответственно составляют

$$hb_{\min} = b_1 + a_1 + 2d_1$$

$$hg_{\min} = \ell_1 + a_1 + 2d_1$$

Как правило, форма подложки МСБ отличается от квадратной, соотношение сторон составляет 2:3 или 4:5, что диктуется требованием обеспечения как можно большего числа выводов с двух противоположных сторон корпуса МСБ. В связи с этим число рядов кристаллов целесообразно определять по формуле

$$m_y = E \left\lceil \sqrt{N_{кр} hg_{\min} / hb_{\min}} - 1 \right\rceil ,$$

а столбцов

$$m_x = E \left\lceil N_{кр} / m_y + 0,999 \right\rceil$$

Вокруг кристалла с размерами $b_{кр}$ и $\ell_{кр}$ можно расположить

$$M_{кв} = E \left\lceil \frac{2(b_{кр} + \ell_{кр}) + 2a + 4c}{a + d_1} \right\rceil$$

контактных площадок, из которых обычно некоторое число М- контактных площадок используется для электрических соединений. В этом случае имеем

$$0,5 (M_{кв} - M_{кр}) = x + y ,$$

где X и Y - число неиспользованных контактных площадок соответственно вдоль большей и меньшей сторон кристалла. Тогда расстояние вдоль меньшей и большей сторон кристалла b_1' и ℓ_1' , определяется зависимостями

$$b_1' = [0,5 (M_{кв} - M_{кр}) y (a + d_1)] / (x + y) ;$$

$$\ell_1' = [0,5 (M_{кв} - M_{кр}) x (a + d_1)] / (x + y) .$$

При прокладке соединительных проводников под кристаллами в областях подложки, неиспользуемых для размещения контактных площадок, линии, на которых располагаются соединительные проводники, группируются в пучки.

Если наложить условие, чтобы расстояние между линиями в пучках по горизонтали было близко к расстоянию между линиями в пучках по вертикали, то можно записать:

$$\frac{0,5 (M_{KB} - M_{KP}) X m_x (a + d_1)}{(x + y) M_{\Lambda 1}} = \frac{0,5 (M_{KB} - M_{KP}) y m_y (a + d_1)}{(x + y) M_{\Lambda}^2}$$

Из последних уравнений определяется

$$x = \frac{0,5 (M_{KB} - M_{KP}) M_{\Lambda 1} m_y}{m_x M_{\Lambda 2} + m_y M_{\Lambda 1}} ;$$

$$y = \frac{0,5 (M_{KB} - M_{KP}) M_{\Lambda 2} m_x}{m_x M_{\Lambda 2} + m_y M_{\Lambda 1}} .$$

Размеры суммарных свободных зон под кристаллами вдоль меньшей стороны b_2 и большей стороны l_2 определяется зависимостями

$$b_2 = y m_y (a + d_1)$$

$$l_2 = x m_x (a + d_1)$$

Число слоев соединительных проводников

$$M_{\Sigma \Lambda} = 2 \left[E \left| \frac{(a_1 + d_1) (m_y M_{\Lambda 1} + m_x M_{\Lambda 2})}{0,5 (M_{KB} - M_{KP}) m_x m_y (a + d_1)} \right| + 1 \right] .$$

Разводка соединительных проводников топологии коммутационной пленочной платы МСБ по площади посадочных мест кристаллов требует не более двух слоев при равенстве нулю целочисленной части последнего выражения.

При этом условие двухслойной разводки топологии коммутационной пленочной платы запишется в виде:

$$b_{KP} + l_{KP} > 0,5 M_{KP} (a + d_1) + 0,5 (4 K_1 + 1) (a_1 + d_1) - 2a - 8c$$

Если это условие выполняется, то возможна разводка соединительных проводников по площади посадочных мест в кристалле в два слоя на плате с размерами b и l .

При этом максимально возможное число рядов и столбцов

$$m_y = E \left| (b - 2a - 2d) : (b_{KP} + 2a + 2c + a_1 + 2d_1) \right| ;$$

$$m_x = E \left| \frac{(l - 2d)}{l_{KP} + 2d + 2c + a_1 + d_1} \right| .$$

Здесь d - технологическая зона подложки, т.е. область, в которой запрещается прокладывать пленочные элементы и крепить навесные детали.

В этом случае на подложке может максимально разместиться кристаллов:

$$N_{кр} = m_x m_y =$$

$$= E \left| \frac{b l - 2(b+l)(d+a)}{(b_{кр}+2a+2c)(l_{кр}+2a+2c) + (a+2d)(b_{кр}+l_{кр}+4a+4c)} \right|$$

Таким образом, в случае выполнения рассмотренного условия можно, задавая размеры сторон подложки b и l , определить максимальное число кристаллов, располагающихся на этой подложке или решить обратную задачу: по заданному числу кристаллов выбрать минимально допустимые размеры подложки.

Если рассмотренное выше условие не выполняется, то разводка соединительных проводников по посадочным местам кристаллов в два слоя невозможна. В этом случае необходимо увеличить шаг установки кристаллов для уменьшения елейности коммутационной пленочной платы. Ширина b_3 и длина l_3 площадки, необходимой для расположения линий, на которых группируются соединительные проводники вне посадочных мест кристаллов определяется по формулам:

$$b_3 = \mu_{\lambda 2} (a_1 + d_1) - b_2 ;$$

$$l_3 = \mu_{\lambda 1} (a_1 + d_1) - l_2 ,$$

откуда критерии для выбора ширины b и длины l подложки принимаю вид

$$\left[\mu_{\lambda 2} (a_1 + d_1) + b, m_y - b_2 + 2a + 2d \right] \leq b \leq \left[\mu_{\lambda 2} (a_1 + d_1) + b, m_y - b_2 + 2a + 2d \right] ,$$

$$\left[\mu_{\lambda 1} (a_1 + d_1) + l, m_x - l_2 + 2d \right] \leq l < 2 \left[\mu_{\lambda 1} (a_1 + d_1) + l, m_x - l_2 + 2d \right] .$$

Еще раз уточним, что все выше изложенные выводы справедливы для кристаллов с гибкими выводами: при использовании кристаллов с жесткими (шариковыми) выводами, когда прокладка соединительных проводников по посадочным местам под кристаллами невозможна, размеры площадки, на которой укладываются эти проводники, определяются выражениями:

$$b_3 = \mu_{\lambda 2} (a_1 + d_1) ;$$

$$l_3 = \mu_{\lambda 1} (a_1 + d_1) ,$$

откуда

критерии для выбора подложки определяются в виде

$$[M_{N2}(a_i + d_i) + b_{кр} m_y + 2a + 2d] \leq b < 2 [M_{N2}(a_i + d_i) + b_{кр} m_y + 2a + 2d],$$

$$[M_{N1}(a_i + d_i) + b_{кр} m_x + 2d] \leq l < 2 [M_{N1}(a_i + d_i) + b_{кр} m_x + 2d].$$

При получении расчетных выражений предполагается, что используются кристаллы одного стандартного размера. На практике же возникает необходимость использования кристаллов бескорпусных микросхем различных серий.

В этом случае для расчета размеров подложки в качестве стандартного выбирается кристалл такого размера, который в данном изделии используется больше всего; принимается, что посадочные места кристаллов, размеры которых меньше стандартного, соответствуют посадочному месту стандартного кристалла.

Каждый кристалл больших размеров, у которого размеры посадочного места b_h и l_h превышают размеры посадочного места типового кристалла b_1 и l_1 , учитывается в расчетах как некоторое число N_i типовых кристаллов, где величина N_i определяется выражением

$$N_i = (E \lfloor b_h / b_1 \rfloor + 1) (E \lfloor l_h / l_1 \rfloor + 1).$$

При расчете размеров подложки аналогично могут быть учтены и другие компоненты, размеры посадочных мест которых превышают размеры посадочных мест кристаллов.

Минимальные размеры подложки, на которой могут быть расположены кристаллы гибридной микросхемы и осуществлена разводка соединительных проводников между кристаллами, а также необходимое число выводов микросхемы оказывают основное влияние на выбор корпуса.

При этом выбирается корпус, размеры внутренней полости которого позволяют установить не более одной подложки минимальных размеров.

После выбора корпуса размеры подложки уточняются таким образом, чтобы они соответствовали размерам внутренней полости корпуса.

Уточненные размеры подложки, как правило, превышают минимально допустимые, а увеличение шагов расположения вертикальных и горизонтальных линий открывает возможность использования проводников и расстояний между ними, превышающих минимально допустимые, что позволяет увеличивать коэффициент выхода годных коммутационно-пленочных плат, а, следовательно, и коэффициент выхода годных МСБ. Помимо размеров подложки и корпуса при проектировании МСБ, прогнозируется масса и габариты.

Габаритный размер МСБ с планарными выводами по ширине складывается из ширины корпуса и длины отформованного вывода. Габаритные размеры МСБ со штыревыми выводами по длине и ширине соответствуют габарит-

ным размерам корпуса. Габаритный размер такой МСБ по высоте превышает высоту корпуса на величину зазора между подложкой и корпусом. Масса МСБ складывается из масс корпуса, подложки, клея для крепления подложки к корпусу и кристаллов.

Масса кристаллов и корпуса является справочным параметром, массы подложки и клея могут быть вычислены путем перемножения их геометрических размеров на их соответствующую удельную плотность.

Таким образом, зная уровень интеграции проектируемой МСБ, конструктивные параметры используемых кристаллов и разрешающую способность пленочной технологии, можно определить размеры подложки и выбрать тип корпуса, минуя стадию разводки соединительных проводников.

Уточнение выбора корпуса МСБ производится на последующих стадиях проектирования на основе расчетов тепловых расчетов (режимов) внутри МСБ, оценки помехоустойчивости и герметизации. Схема конструкции МСБ на рис.3.

Содержание работы

Содержание работы заключается в изучении настоящих методических указаний, оценке (расчете) эффективности миниатюризации нескольких вариантов бортовых вычислительных машин, оценке уровня миниатюризации РЭА для конкретных вариантов функциональных узлов (т.е. необходимо найти варианты ФУ, подлежащие миниатюризации) и в выполнении оценочного расчета конструкций МСБ, подтверждающего возможность реализации ее конструкции для обеспечения требуемого уровня миниатюризации РЭА, обоснованного в предыдущих разделах работы. Вся работа состоит из 3-х разделов:

I. Пользуясь данными технико-экономическими показателями (I), сравнить несколько ВМ (бортовых) одинаковой производительности и одного объема памяти в микроэлектронном исполнении с аналогом в транзисторном исполнении и выбрать тип ВМ для заданных видов ЛА.

I							II		
№ пп	Вари- Атн	Масса кг	Объём Дм ³	Нара- ботка ч	Энерго- потреб. Вт	Стои- мость (усл. Ед)	$\varphi(X_j)_1$	$\varphi(X_j)_2$	$\varphi(X_j)_3$
1	А	4,5	9,2	1700	170	15			
2	Б	3,8	8,1	1600	150	20			
3	В	2,2	4,6	1800	120	30			
4	Г	13,6	19,3	1200	145	35			
5	Д	7,2	13,5	1400	180	26			
6	Е	12,1	18,6	1100	210	31			

7	Ж	11,6	15,8	1200	240	24			
8	З	40	75	400	900				
9	И								
10	К								

Показатели качества

$\varphi(X_j)_1$ - для ЛА I типа,

$\varphi(X_j)_2$ - для ЛА Л типа,

$\varphi(X_j)_3$ - для ЛА Ш типа рассчитываются (по заданию преподавателя).

Установить показатель качества аналога для всех трех объектов установки; произвести необходимые расчеты, пользуясь заданными условиями (Т - Э показатели).

Рассчитать показатели эффективности миниатюризации вариантов В.М. Сделать выбор ВМ, лучшей по показателям качества и эффективности миниатюризации. Сделать выводы по расчетам.

П. Решить тестовую задачу по выбору номенклатуры функциональных устройств, подлежащих миниатюризации согласно исходным данным, представленным в таблице.

i	μ_{pi}	S_i , т.р.	i	μ_{pi}	S_i , т.р.
1	0,008	10,1	9	0,023	15,5
2	0,012	11,2	10	0,013	10,5
3	0,021	14,6	11	0,007	6,4
4	0,016	13,2	12	0,006	3,7
5	0,009	7,1	13	0,015	16,2
6	0,011	10,3	14	0,11	9,4
7	0,031	20,1	15	0,016	13,6
8	0,014	8,2			

для $S_{\Sigma 1}^* = 85$ т.р. и $S_{\Sigma 2}^* = 100$ т.р.

Реализовав описанную выше процедуру выбора ФУ на ЭВМ, найти варианты ФУ, подлежащие миниатюризации. Сделать вывод о полученном повышении уровня миниатюризации для $S_{\Sigma 1}^*$ и $S_{\Sigma 2}^*$.

Ш. Для заданного варианта принципиальной схемы узла и уровня интеграции (2,3), определить, минуя стадию разводки, размеры подложки МСБ и тип корпуса.

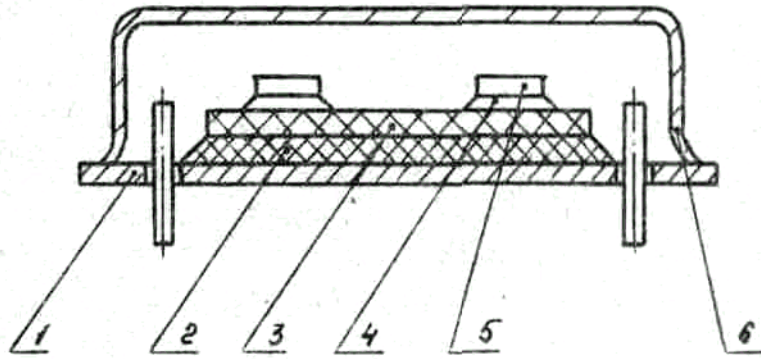


Рис. 3. Схема конструкции МСБ

- 1-металлическое основание;
- 2-клей;
- 3-керамическая подложка
- 4-шариковые выводы (либо клей)
- 5-кристаллы;
- 6-металлическая крышка,
приваренная к основанию корпуса.

Порядок выполнения работы

- получить исходные данные у преподавателя для выполнения работы;
- изучить исходные данные по каждому разделу работы и методы решения поставленных задач •
- предложить варианты решения поставленных задач;
- произвести расчеты;
- составить отчет с выводами и рекомендациями, графическим материалом.

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- исходные данные для выполнения всех разделов работы;
- необходимые определения терминов;
- название, обозначения и расчетные формулы всех коэффициентов, по которым производятся все оценки и расчеты;
- сводные таблицы;
- эскизы ;
- выводы и рекомендации.

Контрольные вопросы

1. Что такое эффективность миниатюризации РЭА и какими показателями пользуются для ее оценки?
2. Как оценивается эффективность миниатюризации РЭА (методика)?
3. Что такое уровень миниатюризации?
4. Когда производится оценка уровня миниатюризации?
5. Как применяется определение коэффициента применяемости ИС?
Общий коэффициент применяемости интегрированных элементов?
6. Область допустимых значений уровней? (В каких пределах он может быть?)
7. Как используются (для чего) показатели уровня миниатюризации?
8. Как формулируется задача миниатюризации РЭА? Ее суть.
9. Какой вы знаете метод решения задачи?
10. Назовите некоторые особенности конструирования МСБ?
11. Какие исходные данные необходимы для оценочного конструктивного расчета МОЕ?
12. Что (какие параметры) определяются в процессе оценочного расчета МСБ?
13. Для чего выполняется оценочный расчет МСБ и на какой стадии проектирования это делается.

Литература

1. Жигадов А.Т. и др. Конструирование и технология печатных плат. М. Высшая школа, 1973г.
2. Федулова А.А., Котов Е.П., Явич Э.Р. Многослойные печатные платы. М., Сов.радио, 1977.
3. ОСТ 4ГО.010 209. Плата печатные. Конструирование.
4. Технология ЭВА, оборудование и автоматизация. М., Высшая школа, 1984.
5. Михайлов А.В., Савин С.К. Точность радиоэлектронных устройств. М., Машиностроение, 1976.
6. Федосеев Д.Н. Качество сборочных операций. Л., Машиностроение, 1971.
7. Пименов А.И. Погрешности деталей механизмов РЭА. М., Сов. радио, 1975.
8. ОСТ 4ГО.101.043. Узлы и блоки РЭА на микросхемах. Микросборки. Конструирование.
9. ОСТ 4ГО.054.240. Микросборки. Платы толсто пленочные. Типовые технологические процессы.
10. Компоновка и конструкции микроэлектронной аппаратуры: справочное пособие. /Под ред. Б.В.Высоцкого, В.Б.Пестрякова, О.А.Пятлина/ М., Радио и связь, 1962, 208с.
11. Гелль П.П., Иванов-Есипович Н.К. Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры. Л., Энергоатомиздат, ЛО, 1984, 535с.